

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

AVALIAÇÃO E MELHORIA DO PROCESSO DE MONTAGEM DO PINHÃO EM EIXOS  
DIFERENCIAIS AUTOMOTIVOS

por

André Ferrari Cogorni

Dissertação para a obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, julho de 2009.

AValiação e Melhoria do Processo de Montagem do Pinhão em Eixos  
Diferenciais Automotivos

Por

André Ferrari Cogorni

Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao corpo Docente do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Alberto Tamagna

Comissão de avaliação:

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Prof. Dr. José Antônio E. Mazzaferro

Prof. Dr. Flávio Sanson Fogliatto

Prof. Dr. Paulo Schneider

Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 23 julho de 2009

## RESUMO

O eixo diferencial é amplamente utilizado em veículos automotores para transmitir a potência do motor para as rodas, sendo esta transmissão realizada por um par de engrenagens conhecidas como pinhão e coroa. O eixo é dito diferencial porque permite que uma roda do veículo gire com rotação diferente da outra, característica necessária nas curvas, por exemplo.

Um dos principais objetivos na montagem de um eixo diferencial é proporcionar a coroa e ao pinhão o mesmo posicionamento relativo no qual o par foi usinado, quanto mais próximo da cota nominal melhor será o desempenho do eixo, diminuindo ruído, vibração e aumentando a sua vida útil.

A tarefa de montar o pinhão com um posicionamento preciso em linhas de produção é uma tarefa difícil devido a quantidades de peças intermediárias, deslocamento do produto montado (pré-carga), e a tolerância da cota de posicionamento ( $\pm 0,030\text{mm}$ ).

Para melhorar este processo e torná-lo viável para produção em linhas de montagem em grande escala a empresa Muri Linhas de Montagem desenvolveu em conjunto com a Dana Traction Technologies um sistema de montagem em quatro passos: a) medição dos componentes individuais com e sem pré-carga; b) seleção do anel espaçador para compensar as diferenças dimensionais dos componentes; c) montagem das peças; d) verificação final do conjunto montado.

Este sistema já foi desenvolvido e implementado de forma parcialmente satisfatória, pois o processo de seleção do anel espaçador apresenta falhas e desvios de montagem não conhecidos, o que leva a introdução de uma variável de ajuste no processo. O problema é que esta variável de ajuste não é constante necessitando ajuste manual e contínuo durante a produção.

No decorrer deste trabalho será explicado o funcionamento do eixo diferencial com os seus requisitos de montagem, após será demonstrada a linha de montagem desenvolvida com os processos de medição e cálculo do anel espaçador. Por terceiro será realizada uma avaliação teórica e experimental para buscar as variáveis de processo desconhecidas e por quarto e último será proposto um novo método de medição e montagem mais preciso do que a método atual.

## ABSTRACT

“Evaluation and improvement in the pinion assembly process in automotives differential axles”

The differential axle is used in the automotive industry to transmit the engine power to the vehicle wheels, this transmission is done by 2 gears called pinion and ring gear. The axle is called differential because permit that the wheels turn with different speed, this is necessary in the curves for example.

One of the main objectives to assembly a differential axle is assembly the pinion gear in the same relative position that the pair was machined, as close as possible to active the best performance, reduce noise, vibration and increase the product life.

Assembly the axle with precision in assembly lines is difficult because there are internal components positioned between the pinion and ring gear, there is a product displacement (pre-load) and also a position tolerance ( $\pm 0,030\text{mm}$ ).

To improve this process and became viable to produce in assembly lines on large flow volumes the company Muri Linhas de Montagem developed in partnership with Dana Traction Technologies one assembly system that works in four steps: a) measure all intermediary components with and without pre-load; b) select the correct spacer to compensate the product dimensional differences; c) assembly the parts; d) check the final assembly.

This system is already developed and work partially satisfactory because there is a failure in the process to select the spacer with some unknown deviations, to compensate those deviations is used a variable in the calculations. The problem is this variable is not constant and demand a manual adjust during the assembly process.

During this paper work will be explain how works the differential axle with the assembly requirements, after will be show the assembly line developed with the measurement process and spacer calculation procedure. In the next part will be performed an evaluation to find the unknown process variation, in the last part will be proposed a new methodology to measure and assembly the axle with more accuracy comparing with the old methodology.

## INDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	Motivação do trabalho .....	19
1.2	Objetivo geral .....	19
1.3	Objetivos específicos .....	19
1.4	Estrutura do trabalho .....	19
<b>2</b>	<b>O EIXO DEFERENCIAL .....</b>	<b>21</b>
2.1	Eixos diferenciais utilizados no presente trabalho .....	25
2.2	O eixo frontal.....	26
<b>3</b>	<b>A LINHA DE MONTAGEM DESENVOLVIDA .....</b>	<b>29</b>
3.1	Posto 05 .....	32
3.2	Posto 10 .....	33
3.3	Posto 15 .....	34
3.4	Posto 20 .....	36
3.5	Posto 25 .....	38
3.6	Posto 30 .....	40
3.7	Posto 40 .....	40
3.8	Posto 50 .....	47
3.9	Posto 60 .....	48
3.10	Posto 70.....	49
3.11	Posto 75.....	51
3.12	Posto 80.....	53
<b>4</b>	<b>SISTEMA DE CÁLCULO DO SHIM DO PINHÃO.....</b>	<b>55</b>
4.1	Metodologia utilizada para avaliar o sistema de cálculo e de medição.....	56
<b>5</b>	<b>MÉTODOLOGIA UTILIZADA PARA A ANÁLISE DOS ITENS DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO .....</b>	<b>58</b>
5.1	Método estatístico.....	58
5.2	Elementos finitos .....	59

5.3	Variação dimensional devido a carga térmica.....	59
5.4	Compressão elástica de componentes.....	60
5.5	Ajuste forçado (prensagem) de anéis cilíndricos.....	61
5.6	Outros métodos.....	62
5.7	Resumo da metodologia .....	62
<b>6</b>	<b>AVALIAÇÃO DOS ERROS INDIVIDUAIS LISTADOS NA TABELA 5.1.....</b>	<b>65</b>
6.1	Item 1 - Erro de medição da HCBSBS .....	65
6.2	Item 2 - Variação da HCBSBS devido ao erro de perpendicularidade da carcaça.....	66
6.3	Item 3 - Variação dimensional da HCBSBS com a pré-carga dos rolamentos do pinhão . .....	68
6.4	Item 4 - Variação $\emptyset$ de prensagem dos rolamentos do pinhão devido a pré-carga do diff- case .....	71
6.5	Item 5 - Variação da carcaça com a temperatura de medição da HCBSBS na usinagem e na montagem. ....	72
6.6	Item 6 - Erro dimensional do PHBFRGCP no fornecedor .....	75
6.7	Item 7 - Erro dimensional do PHH no fornecedor.....	77
6.8	Item 8 - Variação do gear set com a temperatura de medição e de montagem .....	78
6.9	Item 9 - Erro de medição da altura do pinhão .....	80
6.10	Item 10 - Erro de medição do diâmetro do rolamento .....	81
6.11	Item 11 - Erro da aplicação da pré-carga .....	82
6.12	Item 12 - Erro devido a rigidez da máquina na medição da altura do pinhão .....	83
6.13	Item 13 - Erro no cálculo de compensação devido a interferência entre capa e carcaça .....	84
6.14	Item 14 - Variação no cálculo do shim devido ao erro de medição do TTR .....	85
6.15	Item 15 - Erro devido ao run-out da altura do pinhão.....	87
6.16	Item 16 - Diferença entre shim montado e selecionado devido a seleção por classes	88
6.17	Item 17 - Erro de medição do shim.....	89
6.18	Item 18 - Compressão plástica do shim, capa e carcaça devido a força de prensagem das capas .....	90
6.19	Item 19 - Erro dimensional do shim devido a variação de pré-carga dos rolamentos	91
6.20	Item 20 - Erro dimensional devido a diferença do TTR posto 40 e 70.....	92
6.21	Item 21 - Erro de medição na zeiss .....	93

<b>7</b>	<b>RESULTADOS DOS ITENS AVALIADOS.....</b>	<b>95</b>
7.1	Outros fatores de erro no processo de medição .....	96
7.2	Informações provenientes do banco de dados .....	97
7.3	Conclusão sobre o processo de montagem atual .....	99
<b>8</b>	<b>MÉTODOS PROPOSTOS PARA DIMINUIR O ERRO DE MONTAGEM.....</b>	<b>101</b>
8.1	Melhoria do processo através da pré-montagem dos componentes .....	101
8.1.1	Análise de erro do processo proposto .....	103
8.1.2	Correção da dispersão calculada .....	105
8.1.3	Conclusão para o processo 8.1 .....	106
8.2	Melhoria do processo através do reposicionamento do shim .....	106
8.2.1	Análise de erro do processo proposto .....	109
8.2.2	Correção da dispersão calculada .....	110
8.2.3	Conclusão para o processo 8.2.....	111
8.2.4	Erro final esperado para o processo 8.2 .....	112
<b>9</b>	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>113</b>
9.1	Recomendação para análise futura .....	114
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>116</b>
10.1	Bibliografia utilizada como fonte para as figuras do eixo diferencial .....	117
<b>ANEXO A.....</b>		<b>118</b>
<b>ANEXO B.....</b>		<b>120</b>
B.1	Posto 90 .....	120
B.2	Posto 100 .....	120
B.3	Posto 110 .....	121
B.4	Posto 120 .....	122
B.5	Posto 130 .....	123
B.6	Posto 140 .....	124
B.7	Posto 150 .....	124
B.8	Posto 160 .....	125
B.9	Posto 165 e 170.....	126

B.10	Posto 180.....	127
B.11	Posto 190 e 195.....	127
B.12	Posto 200 e 210.....	128
<b>ANEXO C.....</b>		<b>129</b>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_t$	Area total [m <sup>2</sup> ]
$a$	Raio interno do cilindro interno [mm]
$b$	Média do raio externo do cilindro interno e do raio interno do cilindro externo [mm]
$c$	Raio externo do cilindro externo [mm]
CDIFFUBD	Cover Diff Upper Bearing Diameter, diâmetro de prensagem do rolamento superior do diff-case na tampa [mm]
CM	Distância da face do rolamento até o centro da carcaça [mm]
CMSSBS	Cover Mating Surface to Shim Bearing Surface, distância da face de montagem da tampa até a face de montagem do shim [mm]
CPRELOAD	Cover PRELOAD, altura da tampa com a correção elástica para a carga nominal de pré-carga [mm]
CP1	Espessura da capa do produto [mm]
CP2	Espessura da capa de processo [mm]
CS	Cover Shim, espessura do shim do lado da tampa [mm]
C1	Constante de ajuste [mm]
$d$	Diâmetro da coroa [mm]
$D_e$	Diâmetro externo do shim [mm]
$D_i$	Diâmetro interno do shim [mm]
DIFFCH2	DIFF-Case Height 2, cota de altura do diff-case com a pré-carga aplicada [mm]
DIFFLBC	DIFF-case Lower Bearing Compensation, compensação de prensagem do diâmetro do rolamento inferior na carcaça [mm].
DIFFUBC	DIFF-case Upper Bearing Compensation, compensação de prensagem do diâmetro do rolamento superior na tampa [mm]
Dispersão	Erro associado ao processo para o intervalo de confiança de 99,73% [mm]
$E$	Módulo de elasticidade [N/m <sup>2</sup> ]
$E_F$	Erro de aplicação da carga [N]
$E_i$	Erro de cada item [mm]
$E_t$	Erro total [mm]
$E_x$	Erro dimensional devido ao erro de carga [mm]
$E_1$	Erro devido ao item 1 [mm]
$E_2$	Erro devido ao item 2 [mm]

$E_3$	Erro devido ao item 3 [mm]
$E_4$	Erro devido ao item 4 [mm]
$E_5$	Erro devido ao item 5 [mm]
$E_6$	Erro devido ao item 6 [mm]
$E_7$	Erro devido ao item 7 [mm]
$E_8$	Erro devido ao item 8 [mm]
$E_9$	Erro devido ao item 9 [mm]
$E_{10}$	Erro devido ao item 10 [mm]
$E_{11}$	Erro devido ao item 11 [mm]
$E_{12}$	Erro devido ao item 12 [mm]
$E_{13}$	Erro devido ao item 13 [mm]
$E_{14}$	Erro devido ao item 14 [mm]
$E_{15}$	Erro devido ao item 15 [mm]
$E_{16}$	Erro devido ao item 16 [mm]
$E_{17}$	Erro devido ao item 17 [mm]
$E_{18}$	Erro devido ao item 18 [mm]
$E_{19}$	Erro devido ao item 19 [mm]
$E_{20}$	Erro devido ao item 20 [mm]
$E_{21}$	Erro devido ao item 21 [mm]
$f$	Coefficiente de ajuste [adimensional]
$F$	Carga de prensagem aplicada perpendicularmente a área [N]
$F_{medio}$	Força média aplicada no produto [N]
$F_{\Delta}$	Variação da carga aplicada devido ao erro de medição do TTR [N]
$g$	Cota HCBSBS medida [mm]
$GTHC$	Gasket Housing Compensation, compensação realizada devido a aplicação de adesivo de vedação entre a tampa e carcaça [mm]
$h$	Cota HCBSBS real [mm]
$HCBSBS$	Housing Center Bore to Shim Bearing Surface, distância do centro da carcaça até a face de montagem do shim do pinhão [mm]
$HDIFFLBD$	Housing Diff Lower Bearing Diameter, diâmetro da carcaça onde é montado o rolamento inferior do diff-case [mm]
$HMSPCL$	Housing Mating Surface to Pinion Center Line, cota da face da carcaça até a linha de centro do pinhão [mm]

<i>HMSSBS</i>	Housing Mating Surface to Shim Bearing Surface, cota da face da carcaça até a face de montagem do shim do lado da carcaça do diff-case [mm]
<i>HPHBD</i>	Housing Pinion Head Bearing Diameter, diâmetro da carcaça onde é montado o rolamento da cabeça do pinhão [mm]
<i>HPRELOAD</i>	Housing PRELOAD, cota de altura da carcaça com a correção elástica para a carga nominal de pré-carga [mm]
<i>HS</i>	Housing Shim, espessura do shim do lado da carcaça [mm].
<i>j</i>	Erro de perpendicularidade permitido pelo desenho da carcaça [mm]
<i>K</i>	Stiffness médio dos conjuntos [N/mm]
<i>l</i>	Diâmetro da carcaça onde é prensado a capa do rolamento [mm]
<i>L<sub>0</sub></i>	Comprimento inicial [mm]
<i>L<sub>Fmax</sub></i>	Deslocamento causado pela carga máxima de montagem [mm]
<i>L<sub>Fmin</sub></i>	Deslocamento causado pela carga mínima de montagem [mm]
<i>L<sub>Tmax</sub></i>	Deslocamento causado pela carga térmica máxima [mm]
<i>L<sub>Tmin</sub></i>	Deslocamento causado pela carga térmica mínima [mm]
<i>ΔL</i>	Variação do comprimento com a carga aplicada [mm]
<i>ΔL<sub>pinhão</sub></i>	Variação dimensional do pinhão [mm]
<i>MOFFSET</i>	Measurement OFF-SET, off-set de montagem [mm]
<i>N</i>	Número amostras [adimensional]
<i>OL2</i>	Constante de ajuste [mm]
<i>OL3</i>	Constante de ajuste [mm]
<i>OL5</i>	Constante de ajuste [mm]
<i>p</i>	Pressão de contato [N/mm <sup>2</sup> ]
<i>PHBCIDC</i>	Pinion Head Bearing Cap Internal Diameter Compensation, compensação realizada no cálculo devido a interferência de prensagem da capa do rolamento na carcaça [mm]
<i>PHBFRGCP</i>	Pinion Head Bottom Face to Ring Gear Center Point, distância da parte traseira da cabeça do pinhão até o centro da carcaça [mm]
<i>PHBD1</i>	Pinion Head Bearing Diameter 1, diâmetro do rolamento da cabeça do pinhão sem pré-carga [mm]
<i>PHBD2</i>	Pinion Head Bearing Diameter 1, diâmetro do rolamento da cabeça do pinhão com pré-carga [mm]

<i>PHBH1</i>	Pinion Head Bearing Height 1, distância da cabeça do pinhão até a face do rolamento sem pré-carga [mm]
<i>PHBH2</i>	Pinion Head Bearing Height 2, distância da cabeça do pinhão até a face do rolamento com pré-carga [mm]
<i>PHH</i>	Pinion Head Height, altura da cabeça do pinhão [mm]
<i>RGFSPCP</i>	Ring Gear Flat Surface to Pinion Center Point, distância da face da coroa até a linha de centro do pinhão [mm]
$\Delta r$	Variação do raio [mm]
$r_0$	Raio inicial [mm]
$r_f$	Raio final [mm]
<i>SHIM</i>	Espessura do shim do pinhão [mm]
$\Delta S$	Variação da área [mm <sup>2</sup> ]
$S$	Área da coroa [mm <sup>2</sup> ]
$S_f$	Área final da coroa [mm <sup>2</sup> ]
$S_0$	Área inicial da coroa [mm <sup>2</sup> ]
<i>TTR</i>	Torque To Rotate, torque de giro do conjunto com a pré-carga aplicada [Nm]
<i>TTR<sub>medio</sub></i>	TTR médio [Nm]
<i>TTR<sub>Δ</sub></i>	Variação ou erro do TTR [Nm]
$T$	Temperatura [°C]
$\Delta T$	Variação de temperatura [°C]
<i>Tolerância</i>	Tolerância de montagem para o posicionamento do pinhão [mm]
$\bar{x}$	Média aritmética [mm]
$\bar{x}_{BD}$	Valor da média do erro de montagem obtido no Banco de Dados da linha de montagem [mm]
$x_i$	Valor de cada amostra [mm]
$\bar{x}_1$	Média dos valores de deslocamento do item 1 [mm]
$\bar{x}_6$	Média dos valores de deslocamento do item 6 [mm]
$\bar{x}_7$	Média dos valores de deslocamento do item 7 [mm]
$\bar{x}_9$	Média dos valores de deslocamento do item 9 [mm]
$\bar{x}_{10}$	Média dos valores de deslocamento do item 10 [mm]
$\bar{x}_{14}$	Média dos valores de torque do item 14 [Nm]
$\bar{x}_{17}$	Média dos valores de deslocamento do item 17 [mm]
$\bar{x}_{20}$	Média dos valores de pré-carga do item 20 [N]

$\bar{x}_{21}$	Média dos valores de deslocamento do item 21 [mm]
$\alpha$	Coefficiente de dilatação térmica linear [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$\beta$	Coefficiente de dilatação térmica da área [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]
$\epsilon$	Deslocamento relativo [ $\text{Nm}^2/\text{Nm}^2$ ]
$\delta$	Deslocamento total [mm]
$\delta_0$	Acréscimo no raio do cilindro externo [mm]
$\delta_i$	Decréscimo no raio do cilindro interno [mm]
$\Psi$	Ângulo entre a cota HCBSBS medida e cota HCBSBS real [ $^{\circ}$ ]
$\emptyset$	Ângulo do rolamento [ $^{\circ}$ ]
$\mu$	Coefficiente de Poisson [adimensional]
$\sigma$	Desvio padrão da amostra [mm]
$\sigma_{BD}$	Desvio padrão do erro de montagem obtido no Banco de Dados da linha de montagem [mm]
$\sigma_e$	Tensão admissível elástica [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
$\sigma_r$	Tensão resultante no produto devido a carga aplicada [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]
$\bar{\sigma}_1$	Desvio padrão de deslocamento do item 1 [mm]
$\bar{\sigma}_6$	Desvio padrão dos valores de deslocamento do item 6 [mm]
$\bar{\sigma}_7$	Desvio padrão dos valores de deslocamento do item 7 [mm]
$\bar{\sigma}_9$	Desvio padrão dos valores de deslocamento do item 9 [mm]
$\bar{\sigma}_{10}$	Desvio padrão dos valores de deslocamento do item 10 [mm]
$\bar{\sigma}_{14}$	Desvio padrão dos valores de torque do item 14 [Nm]
$\bar{\sigma}_{17}$	Desvio padrão dos valores de deslocamento do item 17 [mm]
$\bar{\sigma}_{20}$	Desvio padrão dos valores de pré-carga do item 20 [N]
$\bar{\sigma}_{21}$	Desvio padrão dos valores de deslocamento do item 21 [mm]

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.	Título	Página
2.1	Tração dianteira	4
2.2	Tração traseira	4
2.3	Tração nas 4 rodas	4
2.4	Trajectoria nas curvas	4
2.5	Exemplo de eixo diferencial	5
2.6	Representação do sistema de engrenagens satélite, que permite o giro das rodas com velocidades distintas	6
2.7	Acoplamento viscoso existente no diferencial viscoso	7
2.8	Diferencial tipo deslizamento limitado	7
2.9	Diferencial tipo Torsen	7
2.10	Desenho do eixo frontal com indicação dos coxins e pontos de entrada e saída de torque	9
2.11	Desenho em corte do eixo, com indicação dos componentes internos	10
3.1	Lay-out da linha de montagem	16
3.2	Foto frontal da linha	17
3.3	Foto frontal do posto 210	17
3.4	Foto dos postos 195, 190 e 180	17
3.5	Foto dos postos 140, 150 e 160	17
3.6	Posto 05, local de setup do pallet	18
3.7	Desenho do pallet	18
3.8	Foto do posto 10	20
3.9	Dados dimensionais da carcaça carregados no sistema via etiqueta de código de barras	21
3.10	Dados dimensionais da tampa carregados no sistema via etiqueta de código de barras	21
3.11	Gráfico para a carcaça	23
3.12	Gráfico para a tampa	23
3.13	Foto do posto 20	24
3.14	Foto dos cabeçotes de medição	24
3.15	Desenho do gear set com as cotas de montagem	25
3.16	Desenho do pinhão com cota de altura	25

3.17	Foto da prensa do rolamento posto 30	26
3.18	Posição do pinhão e rolamentos no dispositivo de medição do posto 40	27
3.19	Curva relacionando o torque de giro do pinhão com a carga aplicada	28
3.20	Vista do posto 40	29
3.21	Foto do dispositivo de medição do posto 40	29
3.22	Ilustração das dimensões utilizadas pela equação 1 para o cálculo do shim	29
3.23	Indicação dos itens levados em consideração para a compensação	31
3.24	Representação da compensação de prensagem na capa do rolamento	31
3.25	Resultados de medição do posto 40	32
3.26	Posto 50 com a prensa, o magazine e o dispositivo verificador	33
3.27	Posto 60	34
3.28	Gráfico típico de aperto realizado no posto 70	35
3.29	Critério de estabilização utilizado para aprovação do TTR	36
3.30	Foto do posto 70 com os sistemas de giro e aperto da porca	36
3.31	Foto do posto 70 com indicação da célula de carga e do sistema de pontos	37
3.32	Vista do desenho onde é possível visualizar os pontos de medição do batimento do flange	38
3.33	Foto do posto 75 onde é possível visualizar os soquetes de giro	38
3.34	Desenho indicativo das medições realizadas no posto 80	39
3.35	Foto da máquina com o produto	40
3.36	Foto da máquina com a ponteira	40
6.1	Vista do desenho da carcaça com as cotas em análise	60
6.2	Diagrama da carcaça com as cotas em análise	60
6.3	Desenho da carcaça com a cota medida HCBSBS e as faces onde é aplicada a pré-carga de montagem	62
6.4	Resultado da análise indicando os deslocamentos em metros na carcaça para a carga aplicada	63
6.5	Vista externa da carcaça com os resultados de deslocamento	63
6.6	Variação da cota HCBSBS com a temperatura	66
6.7	Variação dimensional da carcaça com a temperatura vista isométrica	67
6.8	Variação dimensional da carcaça com a temperatura vista superior	67
6.9	Desenho do shim com indicação das classes dimensionais	81
7.1	Valores de erro de montagem para 4244 peças	90
8.1	Desenho do procedimento de montagem sugerido	94

8.2	Shim reposicionado entre o pinhão e cone do rolamento	99
8.3	Processo de medição com as capas já prensadas	100



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela	Título	Página
4.1	Itens listados que podem influenciar o posicionamento do pinhão	49
5.1	Lista dos itens com os métodos utilizados para a análise	55
6.1	Valores para 30 medições realizadas na mesma peça	58
6.2	Valores de deslocamento obtidos na análise para $\Delta F = 1780N$	64
6.3	Valores de deslocamento obtidos na análise para $\Delta T = 5^{\circ}C$	68
6.4	Valores de deslocamento para $\Delta T = 15^{\circ}C$	68
6.5	Medições do gear set realizadas no cliente	69
6.6	Medições realizadas no cliente (valores ordenados de forma crescente)	70
6.7	Valores medidos para a altura do pinhão no posto 40 da linha de montagem (valores ordenados de forma crescente)	73
6.8	Valores medidos o diâmetro do rolamento no posto 40 da linha de montagem (valores ordenados de forma crescente)	74
6.9	Valores medidos para o stiffness de 30 peças diferentes	76
6.10	Valores máximos e mínimos para a carcaça e capa	77
6.11	Comparação do deslocamento do cilindro interno entre os sistemas de cálculo	78
6.12	Valores medidos o TTR no posto 40 (valores ordenados de forma crescente)	79
6.13	Valores medidos a espessura do shim no posto 50 (valores ordenados de forma crescente)	82
6.14	Valores para 30 medições realizadas na mesma peça	85
6.15	Valores medidos no posto 80 (valores ordenados de forma crescente)	86
7.1	Resultado dos itens avaliados	87
8.1	Resultado dos itens avaliados para o processo 8.1	96
8.2	Resultado dos itens avaliados para o processo 8.2	101

## 1 INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos a indústria automotiva confirma o seu papel como um propulsor da economia mundial, gerando tecnologia e desenvolvimento para todas as áreas. Esta constante melhoria é motivada pela busca de veículos automotores cada vez melhores, com mais tecnologia, conforto, economia, menor peso e custo. O objetivo é atender cada vez melhor o consumidor final, este por sua vez esta se tornando cada vez mais exigente, devido principalmente a grande variedade e opção de compra existente no mercado. As montadoras por sua vez precisam desenvolver e fabricar veículos cada vez melhores para atender a estas exigências, caso não o façam estarão condenadas ao fracasso.

Para obter uma melhor performance do veículo todos os componentes internos e externos também devem ser melhorados individualmente, com menos peso, gerando menos calor, ruído, vibração e perdas. Portanto os fornecedores de autopeças acompanham esta evolução buscando melhorias nos seus produtos, seja por imposição, sobrevivência, busca de clientes novos ou simplesmente para aumentar a sua participação no mercado.

Esta cadeia produtiva impulsiona os fabricantes de máquinas que precisam desenvolver equipamentos cada vez melhores, com mais precisão, rápidos, com alta produtividade e baixo nível de manutenção para conseguir montar em regime de produção os produtos desenvolvidos.

Os produtos inovadores e de alta performance, por estarem próximos ao limiar da tecnologia conhecida, exigem uma sinergia entre montadora, fornecedor de autopeças e fabricante de máquinas. Deve-se ter muito cuidado para não desenvolver produtos com tolerâncias ou características impossíveis de serem garantidas em processos seriados, ou até possíveis, mas com custos de produção muito altos, o que torna o produto comercialmente inviável.

Dentro deste panorama foi desenvolvido um eixo diferencial de alta performance com características muito precisas que são obtidas com um sistema de montagem inovador, este processo foi desenvolvido pelas montadoras BMW e Land Rover com o auxílio do fornecedor de autopeças Dana Traction Technologies e também com a parceria do fabricante de máquinas Muri Linhas de Montagem.

## **1.1 Motivação do trabalho**

Conforme descrito no resumo a montagem do pinhão no eixo diferencial é falha, apresentando diferença de posicionamento entre condição desejada e condição montada. Justamente deste problema surge a motivação para este trabalho que é melhorar o processo de montagem do pinhão de modo a diminuir as reprovações na linha de montagem e utilizar o conhecimento desenvolvido sobre o produto e processo nos novos equipamentos de montagem que serão desenvolvidos futuramente.

## **1.2 Objetivo geral**

O objetivo geral deste trabalho é melhorar o posicionamento do pinhão de modo que o par coroa-pinhão, após montado, fique posicionado o mais próximo possível da cota de usinagem proporcionando assim um produto com melhor desempenho e durabilidade.

## **1.3 Objetivos específicos**

Existem também outros objetivos:

- Encontrar/buscar quais características de produto ou processo são responsáveis pelo elevado índice de reprovação na montagem;
- Verificar se o método atual utilizado para a montagem realmente pode ser utilizado para este tipo de processo devido à tolerância de montagem;
- Propor um novo método para a montagem, caso seja comprovado a ineficácia do método atual;
- Melhorar o conhecimento do produto e processo para utilização nos próximos projetos.

## **1.4 Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado em 10 capítulos, sendo que no primeiro estão descritos os aspectos gerais, como introdução, objetivos e motivação. No segundo será apresentado o eixo

diferencial, com as suas características de produto e tolerâncias para montagem, já no terceiro será apresentada a linha de montagem desenvolvida para atender as exigências de produto.

No quarto capítulo será explicado o método utilizado para avaliação dos erros de montagem e medição, no quinto será revisada a bibliografia e equações que serão utilizadas durante a análise do capítulo 6.

No capítulo 7 serão avaliados os resultados calculados anteriormente, comparando com os as informações existentes no banco de dados do produto, no oitavo serão propostas 2 alternativas para melhorar o processo de montagem, sendo que uma delas incluir o reposicionamento do anel espaçador no produto. O capítulo 9 será destinado a conclusão do trabalho e o último capítulo será relacionada a bibliografia consultada.

## 2 O EIXO DEFERENCIAL

Em geral, o eixo diferencial é empregado nos veículos terrestres tracionados por motores de qualquer natureza. O torque é produzido pelo motor e transmitido diretamente ao diferencial, este por sua vez re-transmite para os 2 semi-eixos que estão ligados diretamente nas rodas de tração do veículo.

Existem veículos com sistema diferencial nas rodas dianteiras, traseiras ou nas 4 rodas simultaneamente. Seguem nas figuras 2.1, 2.2 e 2.3 uma representação dos referidos sistemas em um veículo automotor.

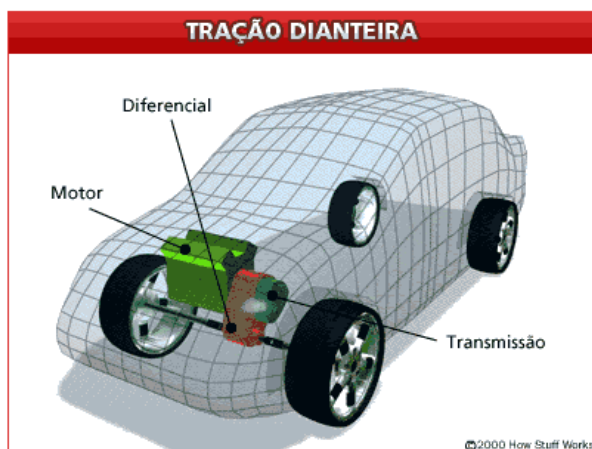


Figura 2.1 – Tração dianteira.  
(Fonte: How Stuff Works)



Figura 2.2 – Tração traseira.  
(Fonte: How Stuff Works)



Figura 2.3 – Tração nas 4 rodas.  
(Fonte: How Stuff Works)

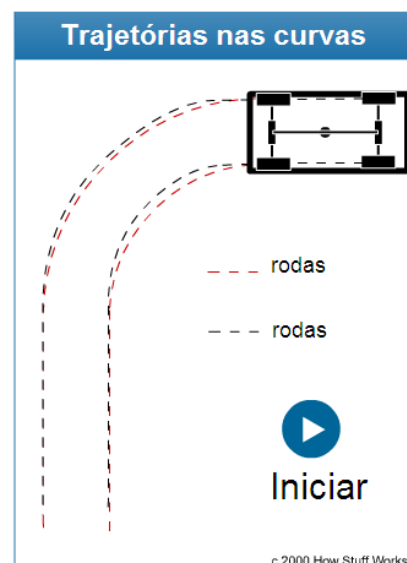


Figura 2.4 – Trajetória nas curvas.  
(Fonte: How Stuff Works)

Uma das principais funções do diferencial é executada no momento da curva, onde uma roda precisa girar mais do que a outra mantendo o torque igual entre elas (figura 2.4). Nesta figura é mostrada a trajetória das rodas do veículo na curva, sendo que as linhas tracejadas em preto representam a trajetória das rodas dianteiras e as linhas em vermelho representam a trajetória das rodas traseiras.

A transmissão do movimento entre eixo motor e eixos motrizes é realizado através de um pinhão e uma coroa, de acordo com o representado nas figura 2.5. No centro do eixo existe um sistema composto por 4 engrenagens satélite, sendo 1 ligada diretamente no semi-eixo direito e outra no semi-eixo esquerdo, as outras 2 transmitem movimento entre estas. Este sistema de engrenagens satélite é o responsável pelo movimento diferencial do eixo, como pode ser observado na figura 2.6.

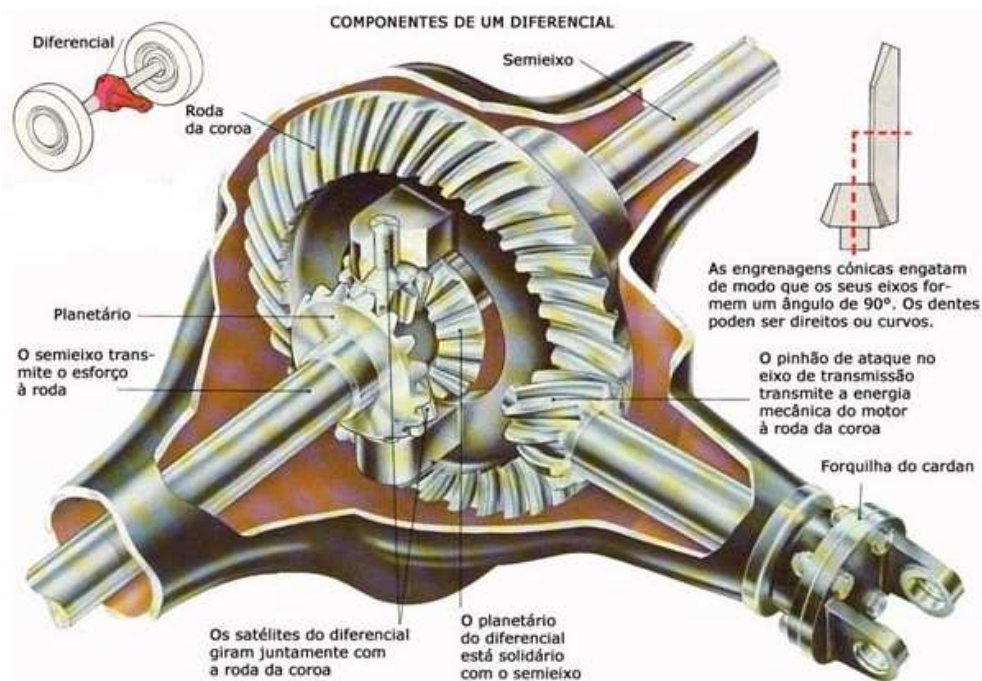


Figura 2.5 – Exemplo de eixo diferencial.

(Fonte: Envenenado, como tudo funciona)

Outra função do diferencial é de mudar a orientação da rotação proveniente do eixo cardin, esta rotação é mudada de orientação 90 graus para o eixo das rodas devido a utilização da coroa e pinhão. Além dos itens citados com a utilização do par coroa e pinhão é realizado o último estágio de redução da velocidade angular do veículo antes das rodas, usualmente a redução de velocidade do pinhão para a coroa é na ordem de 3 a 5 vezes.

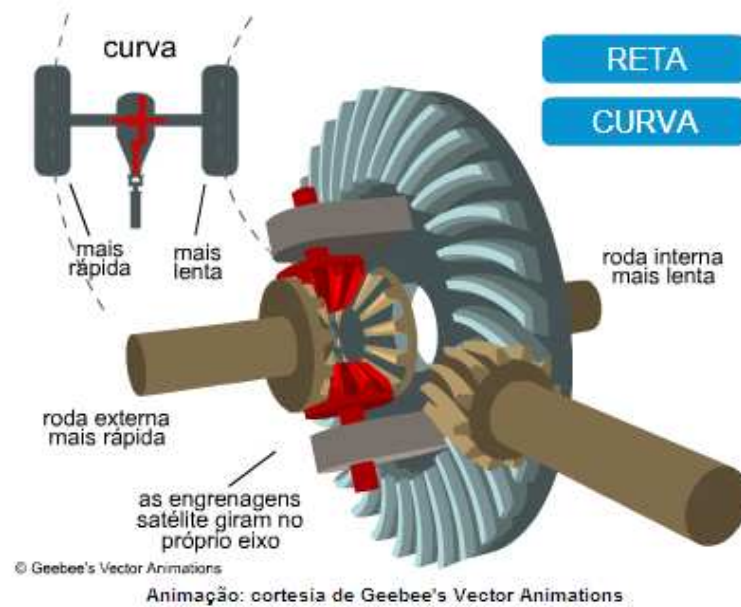


Figura 2.6 – Representação do sistema de engrenagens satélite, que permite o giro das rodas com velocidades distintas. (Fonte: How Stuff Works)

O efeito diferencial representado na figura 2.6 é indesejado quando uma das rodas motoras perde aderência, como por exemplo em um piso escorregadio ou muito irregular. Nessas circunstâncias, o diferencial faz com que a roda com menor aderência gire rapidamente, pois ela absorve todo o torque disponível proveniente do sistema (a outra se mantém parada).

Para solucionar este problema é possível utilizar um sistema composto por 3 diferenciais com bloqueio manual e elétrico, conforme representado na figura 2.3. Este sistema permite que as 4 rodas girem simultaneamente eliminando o efeito diferencial propriamente dito.

Existem ainda outros sistemas diferenciais mais simples e baratos porém não tão eficientes quando o descrito da figura 2.3, como por exemplo: o diferencial de acionamento viscoso, deslizamento limitado, e Torsen.

O diferencial de acoplamento viscoso é basicamente constituído de um conjunto de discos intercalados na ponta de cada semi-eixo e envoltos em um fluído de elevada viscosidade. Na situação em que uma roda gire em falso, por exemplo, e a outra fique parada, o arraste produzido pelo conjunto de discos da roda que gira em falso, faz com que os discos da roda imóvel adquiram movimento por arrasto do meio viscoso. O princípio de funcionamento deste sistema esta representado na figura 2.7.

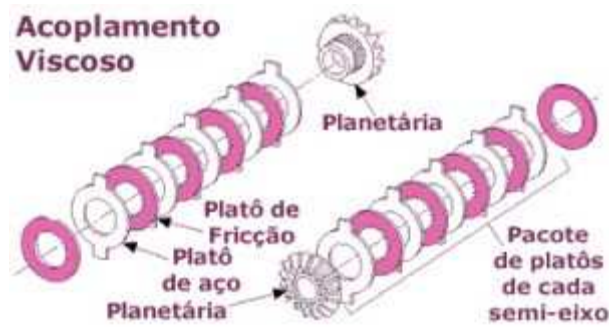


Figura 2.7 – Acoplamento viscoso existente no diferencial viscoso.

(Fonte: Envenenado, como tudo funciona)

O princípio utilizado no sistema de deslizamento limitado é combinar ao mecanismo do diferencial um conjunto de molas e uma espécie de "embreagem" entre as planetárias e os semi-eixos, de modo que, quando uma roda gire em falso parte do torque seja transferido à outra roda. A rigidez das molas e da embreagem é que determinam o percentual de torque transferido à roda de contato ao solo.

O diferencial Torsen (**Torque Sensing**) em situações normais funciona como um diferencial convencional, porém quando uma das rodas perde aderência, a perda de torque faz com que o mecanismo das planetárias, que tem uma geometria e desenhos bem diferentes, atuem como se fossem "coladas" por atrito. A geometria do sistema irá determinar a taxa de transferência de torque para a roda com aderência, de forma que um Torsen desenhado para uma taxa de 5:1, é capaz de aplicar 5 vezes mais torque à roda com aderência em relação a menos aderente. Seguem nas figuras 2.8 e 2.9 uma representação dos diferenciais de deslizamento limitado e tipo Torsen respectivamente.



Figura 2.8 – Diferencial tipo deslizamento limitado.

(Fonte: Envenenado, como tudo funciona)



Figura 2.9 – Diferencial tipo Torsen.

(Fonte: Envenenado, como tudo funciona)



Ainda existem os eixos blocantes. Nestes é possível habilitar ou desabilitar a função diferencial com um comando do motorista, ou seja, normalmente o eixo trabalha como diferencial, mas no momento que o veículo perde aderência em uma das rodas o motorista aciona o sistema temporariamente até que o veículo saia da posição indesejada. Após o retorno para a condição normal da estrada, o sistema bloqueante é desligado.

## **2.1 Eixos diferenciais utilizados no presente trabalho**

Neste trabalho serão avaliados os eixos diferenciais da família T5 utilizados em uma caminhonete da Land Rover. Neste veículo são utilizados eixos dianteiro e traseiros conforme representado na figura 2.3, sendo que o eixo traseiro pode ser fornecido com sistema bloqueante ou normal.

Os eixos da família T5 são os seguintes:

- Eixo frontal, chamado de Front;
- Eixo traseiro normal modelo 319, chamado Rear L319N;
- Eixo traseiro bloqueante modelo 319, chamado Rear L319 ETM;
- Eixo traseiro normal modelo 322, chamado Rear L322N;
- Eixo traseiro bloqueante modelo 322, chamado Rear L322 ETM.

Todos os veículos possuem o eixo frontal e traseiro, porém os modelos L319 e L322 variam de acordo com o modelo do veículo. O eixo é dito normal quando funciona apenas como diferencial e é dito bloqueante ou ETM quando é possível habilitar ou desabilitar a função diferencial mediante comando do motorista.

Os cinco produtos citados são parecidos do ponto de vista de funcionamento e montagem salvo alguns componentes diferentes que proporcionam transmissão e adaptação geométrica com o veículo. Para simplificar a análise em questão o presente trabalho será realizado somente para o modelo front, pois esta peça é a mais utilizada, representando 50% da produção (todos os veículos possuem o eixo frontal). Devido à semelhança entre os eixos as conclusões gerais podem ser estendidas aos demais modelos, bastando ajustar alguns pequenos detalhes.

## 2.2 O eixo frontal

Antes de analisar o processo de montagem cabe uma introdução ao produto em análise assim como uma explicação do seu funcionamento e características principais de produto. Segue na figura 2.10 um desenho do eixo frontal em análise com identificação dos seus principais componentes.

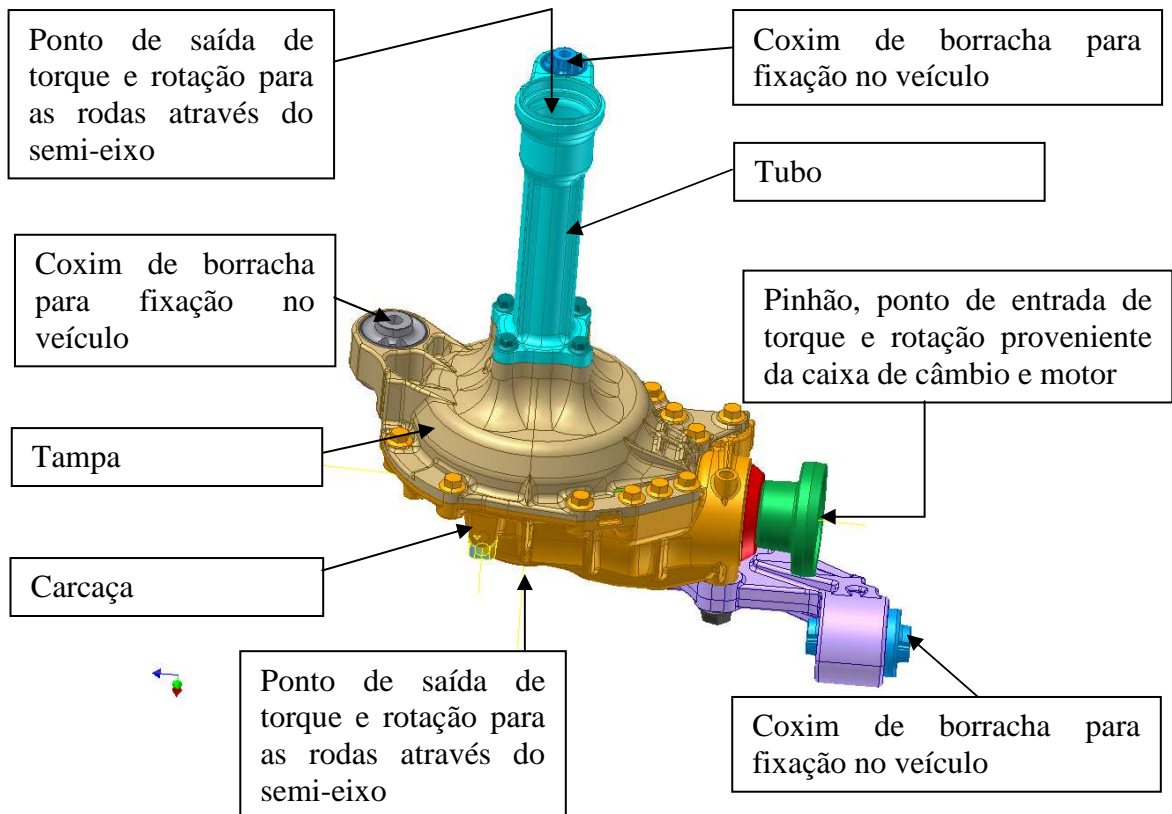


Figura 2.10 – Desenho do eixo frontal com indicação dos coxins e pontos de entrada e saída de torque.

Analisando o eixo frontal externamente pode-se verificar que o mesmo é constituído de uma carcaça inferior e uma tampa superior, estas 2 peças são unidas por 14 parafusos e entre elas estão posicionados os componentes intermediários. Além dos componentes citados existem 3 coxins elásticos que servem para a fixação do produto no veículo. Também é possível visualizar o pinhão/flange que é o ponto de entrada de torque e rotação proveniente da caixa de câmbio e motor e os dois pontos de saída de torque e rotação. Nestes pontos são montados os semi-eixos que transmitem o movimento diretamente para as rodas do veículo.

Na figura 2.11 estão representados os componentes internos do diferencial, como o sistema planetário de engrenagens que proporciona o efeito diferencial; o pinhão e coroa (par de

engrenagens que serão estudados durante este trabalho); os rolamentos cônicos que proporcionam pré-carga axial e as engrenagens onde são acoplados os semi-eixos.

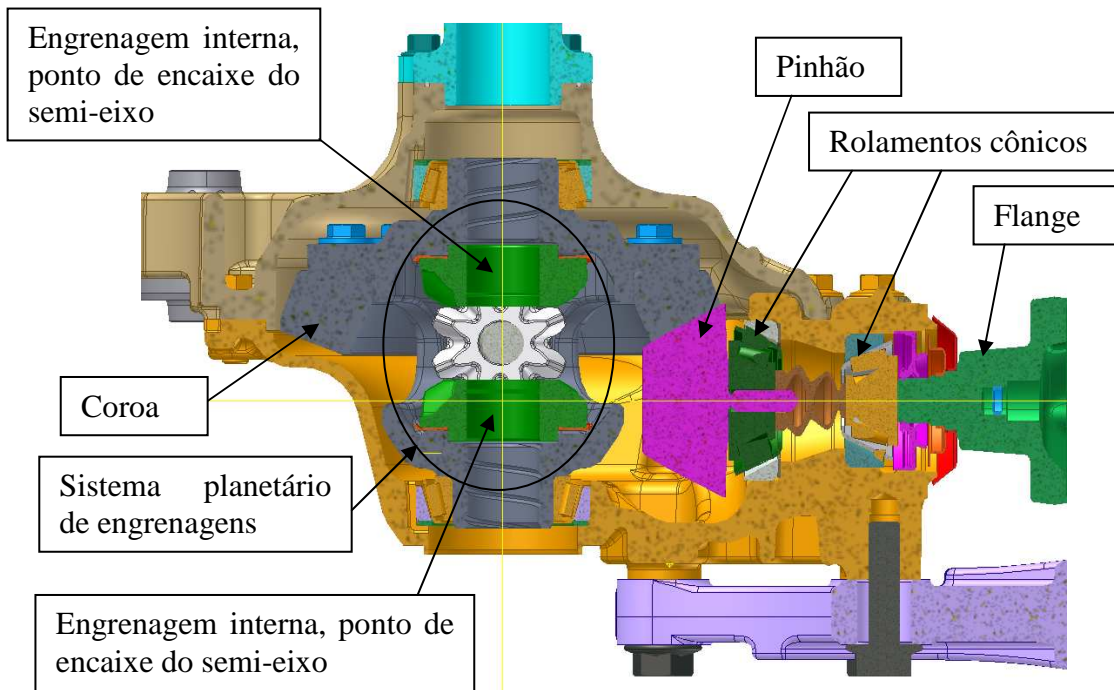


Figura 2.11 – Desenho em corte do eixo, com indicação dos componentes internos.

Seguem no Anexo I os desenhos detalhados do eixo frontal com a respectiva lista de componentes.

O eixo diferencial em análise possui algumas características especiais de montagem que são as seguintes:

- Pré-carga axial de  $4448 \pm 890$  N nos rolamentos do pinhão;
- Distância de montagem da face traseira da cabeça do pinhão até o centro da coroa de  $101 \pm 0,03$  mm;
- Pré carga axial de  $4042 \pm 1818$  N nos rolamentos do sistema diferencial planetário;
- Folga do engrenamento coroa e pinhão de  $0,11 \pm 0,04$  mm, chamado de backlash;
- Aperto dos parafusos com controle do gradiente de torque e ângulo até que haja deformação plástica dos mesmos, através da técnica “torque to yield point”.

A pré-carga axial controlada nos rolamentos, tanto do pinhão como do sistema diferencial é a característica que permite ao conjunto uma montagem sem folgas e também sem carga

excessiva. Esta pré-carga é obtida no processo de montagem para cada par específico de rolamentos através da medição do torque de giro deste par com a carga nominal aplicada ao conjunto. Este procedimento será melhor explicado para os rolamentos do pinhão no capítulo 3.

O posicionamento da cabeça do pinhão em relação ao centro da coroa garante que o conjunto seja montado na mesma posição que foi usinado, com o objetivo de diminuir vibração, ruído e aumentar a vida útil do produto. Para garantir esta montagem os componentes individuais são medidos com e sem pré-carga para simular a condição final pré-carregado dentro do produto, após, é selecionado um calço de ajuste para compensar as diferenças dimensionais das peças medidas para posicionar o conjunto o mais próximo possível da cota nominal de 101mm.

A folga do engrenamento chamada de backlash proporciona o funcionamento adequado ao produto em campo, favor observar que neste caso não é buscada a folga zero, pois isto significa que o conjunto estará travado mecanicamente (sem giro).

O aperto dos parafusos “to yield point” garante que o parafuso estará apertado com o maior torque possível e sem perda de posição. Este sistema de aperto monitora o aumento de torque para cada acréscimo de ângulo girado durante o aperto, quando não existe mais acréscimo significativo de torque para o ângulo girado considera-se que o parafuso está em deformação plástica. Este gradiente segue uma curva padrão para um determinado tipo de parafuso e junta, no qual o sistema é calibrado, quando um parafuso ou junta parafusada apresenta um padrão diferente da curva calibrada o mesmo é reprovado. Esta reprovação normalmente é devido à sujeira na junta, junta com defeito, rugosidade superficial ou parafusos com problema de resistência entre outros.

Para montar todas as peças do produto e atender as características de montagem citadas a empresa Muri Linhas de Montagem em parceria com a Dana Traction Technologies desenvolveu uma linha de montagem inovadora que será detalhada no capítulo 3.

### 3 A LINHA DE MONTAGEM DESENVOLVIDA

A linha de montagem foi desenvolvida para os 5 modelos de produto citados anteriormente, possui sistema transportador por correntes em formato de “M” com dimensões aproximadas de 25 x 26 m. São utilizados 70 pallets de dimensões 600 x 600 mm para transferência do produto entre as estações de trabalho. No interior da linha principal estão posicionadas as 3 máquinas de montagem do sistema planetário denominado “diff-case”, estas máquinas estão representadas pelos números 1684-10, 1684-20 e 1684-30 no lay-out da figura 3.1.

No total existem 30 máquinas, sendo 13 automáticas, 16 semi-automáticas e 1 estação manual para retrabalho, na capacidade plena são utilizados 12 operadores para a produção de 1 eixo por minuto. Segue na figura 3.1 o lay-out da linha de montagem.

Existe uma ponte aérea de aproximadamente 4 metros de altura com 2 elevadores, sendo um para subida e outro para a descida dos pallets, deste modo é permitida a entrada de operadores, caixas com peças, empilhadeiras pequenas ou outros objetos diretamente pela parte frontal da linha.

Também existe um sistema supervisorio composto por um PC industrial, banco de dados e sistema de comunicação com todas as máquinas, este sistema gerencia o trabalho nas máquinas solicitando troca de modelo, armazenando os dados de processo de cada operação, como medições, prensagens, torques e etc.

O processo de montagem começa com uma pré-montagem realizada no posto 10, após esta pré-montagem o produto é inserido na linha no posto 15 (P-015), este posto é chamado de entrada da linha e esta representado na figura 3.1. Na entrada da linha o número do pallet é relacionado com o código de barras do produto colocado sobre o mesmo, com esta ligação o sistema sabe qual é o modelo de peça e quais são as operações que devem ser realizadas.

Em cada posto de trabalho é lido o número do pallet e consultado o supervisorio, este por sua vez responde com o modelo do produto, peça OK ou NOK, e informa quais são os dados necessários ao ciclo da estação. Quando o ciclo é finalizado o posto de trabalho informa se a peça esta OK ou NOK e informa os dados de processo que devem ser gravados no banco de dados.

Caso o corra alguma reprovação a peça é retirada da linha automaticamente através de uma das 3 saídas de retrabalho, a primeira esta posicionada entre o posto 80 e 90 (identificada por S1 na figura 3.1), a segunda esta entre o posto 160 e 165 (S2) e a terceira entre o posto 197 e 210 (S3). Estas saídas estão posicionadas estrategicamente logo após as máquinas que possuem

maior índice de reprovação. Repare que sempre existe um trecho de 1 ou 2 metros nas saídas de retrabalho, a intenção é proporcionar espaço para 3 ou mais reprovações em cada trecho de modo que as peças defeituosas sejam retiradas do fluxo permitindo a passagem das peças em processo.

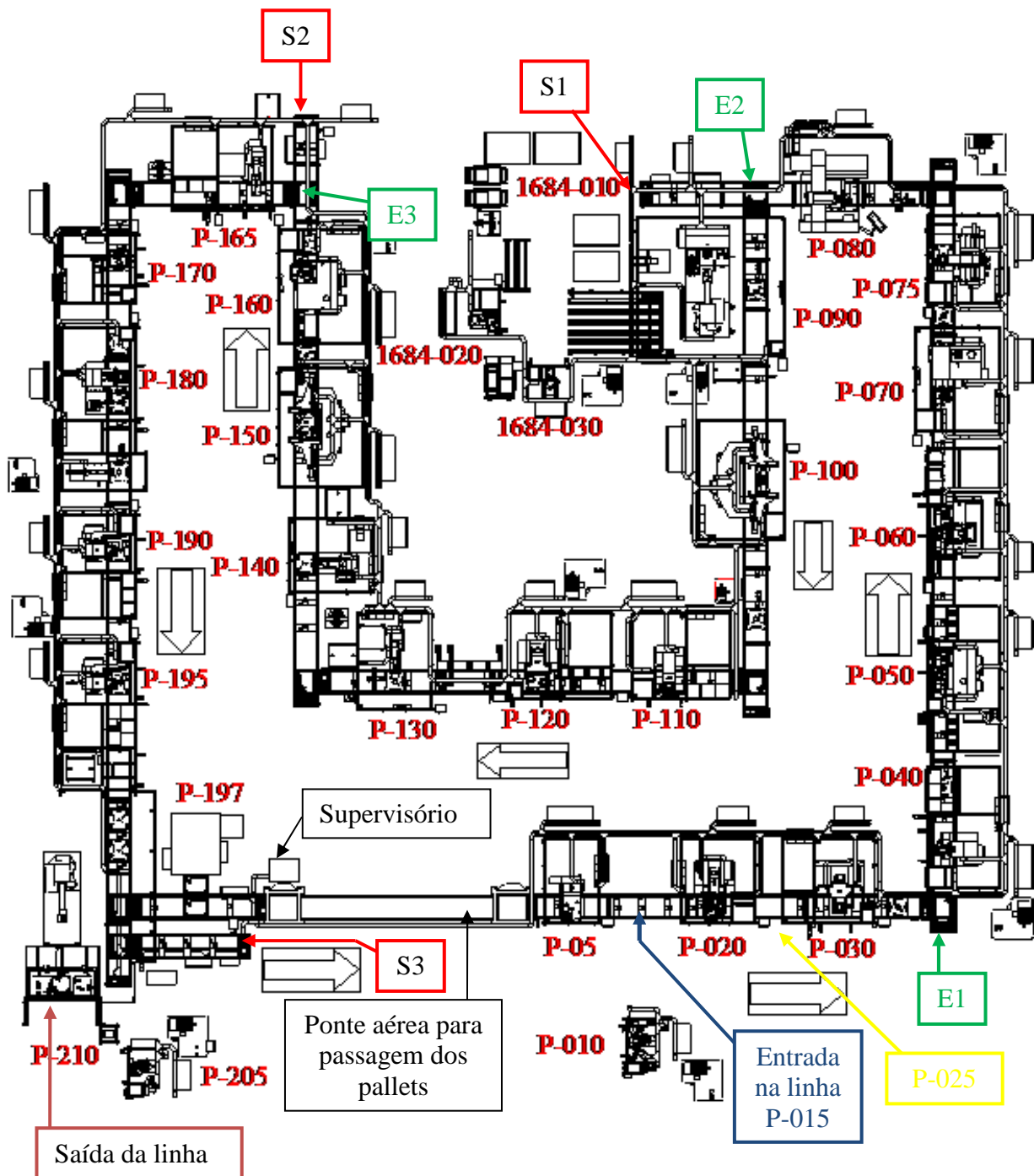


Figura 3.1- lay-out da linha de montagem.

As peças reprovadas são retiradas da linha de montagem e desmontadas total ou parcialmente na bancada de retrabalho de acordo com o motivo da falha (esta bancada não fica próxima a linha, portanto não esta representada no lay-out da figura 3.1). Após esta

desmontagem o produto é inserido novamente em uma das 3 entradas de retrabalho de acordo com o nível de desmontagem realizado. As entradas de retrabalho estão representadas por E1, E2 e E3 no lay-out da figura 3.1.

Seguem nas figuras 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 fotos da linha de montagem instalada na planta do cliente na cidade de Birmingham Inglaterra. A figura 3.2 é uma vista da parte frontal da linha onde ao fundo pode ser observada a ponte dos pallets, já a figura 3.3 é uma foto frontal do posto 210, onde é possível observar o robô que realiza a descarga das peças. A figura 3.4 mostra do lado esquerdo para o direito os postos 195, 190 e 180, na figura 3.5 é possível observar da direita para a esquerda os postos 140, 150 e 160.



Figura 3.2 – Foto frontal da linha.



Figura 3.3 – Foto frontal do posto 210.



Figura 3.4 – Foto dos postos 195, 190 e 180.



Figura 3.5 – Foto dos postos 140, 150 e 160.

Segue agora uma descrição detalhada de cada posto de montagem com a indicação das operações realizadas e componentes montados.

### 3.1 Posto 05

Quando a carcaça e a tampa entram na linha elas são posicionadas sobre o pallet, sendo que este pallet foi projetado para atender a todos os modelos de produto através de uma troca rápida de ferramental.

O posto 05, representado por P-05 no lay-out da figura 3.1 é o local onde é realizado, e também conferido o setup dos pallets, processo este, que começa quando o operador altera o modelo de produto no supervisório. A partir deste momento este posto confere o modelo de cada pallet que chega (neste local todos os pallets estão vazios) emitindo um alarme visual caso o ferramental não esteja de acordo com o modelo selecionado. Com o alarme gerado o operador realiza o setup manualmente, após a realização deste setup o posto confere novamente o pallet e libera o mesmo para a posição de carga do produto.

Segue na figura 3.6 uma foto do posto 05 onde é possível visualizar um pallet dentro da estação onde é verificado o setup. Na parte central direita da foto é possível observar que a carcaça e tampa do modelo front estão posicionadas no pallet sendo que esta posição representa o posto de carga do produto no sistema de transferência (P-015).

Na figura 3.7 segue o desenho do pallet com os seus diversos pontos de apoio de modo a atender a todos os 5 modelos montados na linha com um setup rápido de algumas peças.



Figura 3.6 – Posto 05, local de setup do pallet.

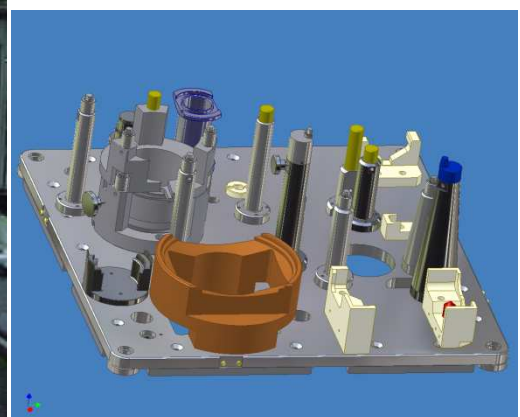


Figura 3.7 – Desenho do pallet.



### 3.2 Posto 10

A linha foi projetada para a montagem de 5 produtos diferentes, devido a algumas diferenças entre estes produtos o ciclo de montagem em algumas estações é diferente para cada modelo de peça. A descrição dos ciclos será detalhada somente para o modelo front, pois este será o modelo de produto analisado neste trabalho, para os modelos Rear L319 e L322 será realizada somente uma breve descrição da montagem.

No posto 10 para o modelo front é realizada a prensagem do coxim de borracha na tampa, sendo que a tampa corresponde à peça de número 2 representada no desenho da figura 2.12 e na tabela da figura 2.13 e o coxim corresponde à peça de número 3. Também neste posto é parafusado o bujão de dreno de óleo na tampa e o bujão de enchimento de óleo na carcaça, sendo que os bujões são representados pelos números 42 e 43 e a carcaça pelo número 1 na figura 2.12 e 2.13.

A prensagem é realizada por cilindro hidráulico com parada por posição controlada com transdutor linear e monitorada por célula de carga. Além de controlar a parada, o equipamento traça o gráfico de carga x curso de prensagem, onde são utilizadas janelas para a aprovação. As janelas de aprovação são obtidas com peças boas dentro da condição de projeto, deste modo quando uma peça de processo é prensada as janelas são medidas e comparadas com as janelas ideais, caso os valores estejam dentro a peça é aprovada, mas caso estejam fora deste intervalo é reprovada. Este sistema de janelas é utilizado para a prensagem de todos os componentes da linha de montagem em todos os postos (a parada por posição não é utilizada em todos os postos).

Os parafusamentos dos bujões são realizados por parafusadeiras eletrônicas com controle de torque e ângulo de parafusamento.

Para o modelo Real L319 também é prensada a bucha e parafusados os bujões, para o modelo Real L322 são parafusados somente os bujões (não existe bucha).

Segue na figura 3.8 uma foto do posto 10 onde é possível visualizar ao centro a prensa hidráulica, uma das parafusadeiras está posicionada no lado direito da prensa e outra esta no lado esquerdo.



Figura 3.8 – Foto do posto 10.

### 3.3 Posto 15

Neste posto o operador coloca a carcaça e tampa provenientes do posto 10 sobre o pallet, neste local também é lida a etiqueta com o código da barras da carcaça e tampa. Neste código estão contidas algumas informações dimensionais necessárias para a montagem do produto, que deste momento em diante ficam armazenadas no banco de dados do supervisor, juntamente com o número do pallet.

Estas cotas são provenientes da uma máquina tridimensional existente na linha de usinagem e são utilizadas para os cálculos dos anéis espaçadores do pinhão e também do sistema diferencial, cálculo este, que será melhor detalhado no decorrer deste trabalho.

Seguem nas figuras 3.9 e 3.10 a representação das dimensões citadas acima para a carcaça e tampa respectivamente.

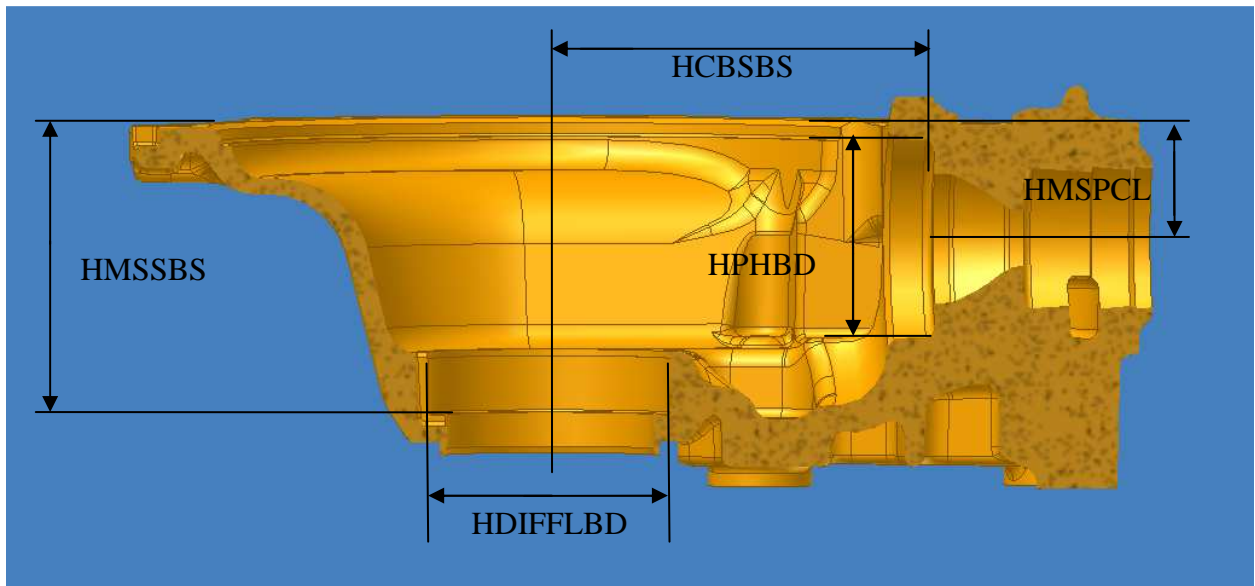


Figura 3.9 – Dados dimensionais da carcaça carregados no sistema via etiqueta de código de barras.

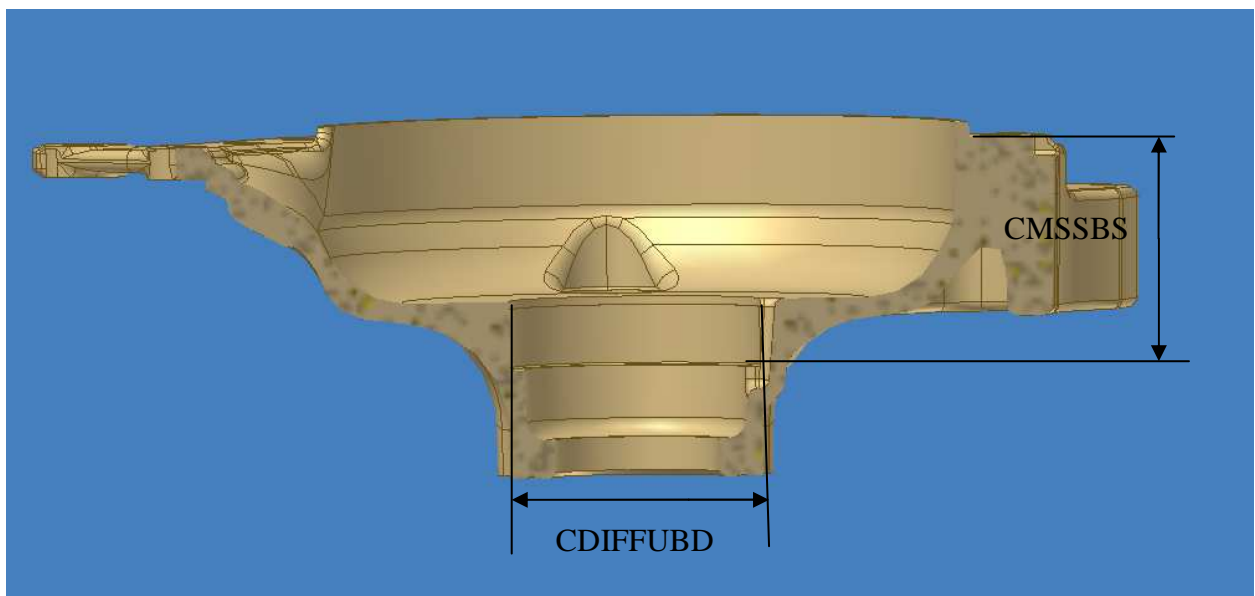


Figura 3.10 – Dados dimensionais da tampa carregados no sistema via etiqueta de código de barras.

Onde:

- *HCBSBS*, Housing Center Bore to Shim Bearing Surface, representa a distância do centro da carcaça até a face de montagem do anel espaçador (também chamado de shim) do pinhão [mm]. Esta cota é utilizada para o cálculo do anel espaçador do pinhão.

- *HMSSBS*, Housing Mating Surface to Shim Bearing Surface, representa a distância da face de montagem da carcaça até a face de montagem do anel espaçador do diff-case [mm]. Esta cota é

utilizada para o cálculo do anel espaçador da carcaça na montagem dos rolamentos do sistema diferencial.

- *HMSPCL*, Housing Mating Surface to Pinion Center Line, representa a distância da face de montagem da carcaça até a linha de centro do pinhão [mm]. Esta cota é utilizada para o cálculo do anel espaçador da carcaça na montagem do diff-case.

- *HPHBD*, Housing Pinion Head Bearing Diameter, representa o diâmetro da carcaça onde é prensado o rolamento da cabeça do pinhão [mm]. Este diâmetro é utilizado para o cálculo do anel espaçador do pinhão.

- *HDIFFLBD*, Housing Diff Lower Bearing Diameter, representa o diâmetro da carcaça onde é prensado o rolamento inferior do diff-case [mm]. Este diâmetro é utilizado para o cálculo do anel espaçador da carcaça na montagem do diff-case.

- *CMSSBS*, Cover Mating Surface to Shim Bearing Surface, representa a distância da face de montagem da tampa até a face de montagem do anel espaçador da tampa [mm]. Esta dimensão é utilizada para o cálculo do anel espaçador da tampa na montagem do diff-case.

- *CDIFFUBD*, Cover Diff Upper Bearing Diameter, representa o diâmetro da tampa onde é prensado o rolamento inferior do diff-case [mm]. Este diâmetro é utilizado para o cálculo do anel espaçador da tampa na montagem do diff-case.

No decorrer deste trabalho será explicada a utilização das variáveis acima para ao cálculo e montagem do shim do pinhão.

### **3.4 Posto 20**

Esta é uma máquina automática, ou seja, o pallet entra, realiza a operação e sai de forma automática buscando e gravando os dados de processo no banco de dados sem necessidade de intervenção do operador em nenhuma fase do ciclo.

Neste posto é medido o deslocamento da tampa e da carcaça mediante um delta de carga aplicado. Este valor é chamado de “stiffness” e é armazenado na unidade de N/mm. Para a medição do stiffness é aplicada uma carga no produto de 2500N, com esta carga é medido o deslocamento da carcaça e tampa, após a carga é elevada para 5500N e o deslocamento medido novamente. O delta da carga dividido pelo delta de deslocamento é o stiffness.

A carga e a medição são realizadas de forma completamente independente para a carcaça e para tampa, o que ocasiona também resultados diferentes. Os valores típicos para o stiffness para a carcaça ficam em torno de 250.000N/mm , o que representa um delta de deslocamento de 0,012mm, já para a tampa fica em torno de 200.000N/mm, o que representa um delta de deslocamento de 0,014mm.

Estes valores de carga foram escolhidos de modo que o deslocamento no produto fique próximo a região de montagem e dentro da região elástica, fato que foi provado pelo retorno a posição inicial após a retirada da carga e também pela linearidade da curva traçada.

Seguem nas figuras 3.11 e 3.12 os gráficos de carga x curso para a carcaça e tampa respectivamente.

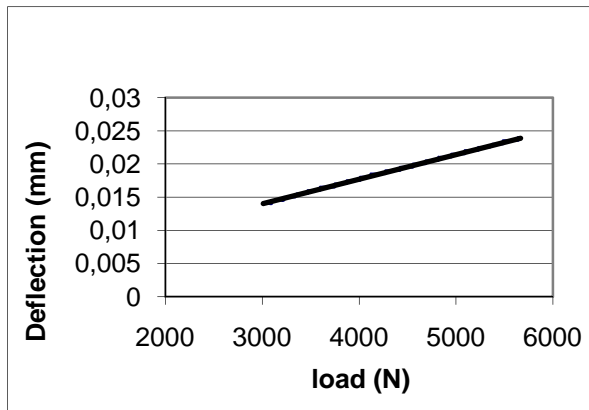


Figura 3.11 – Gráfico para a carcaça.

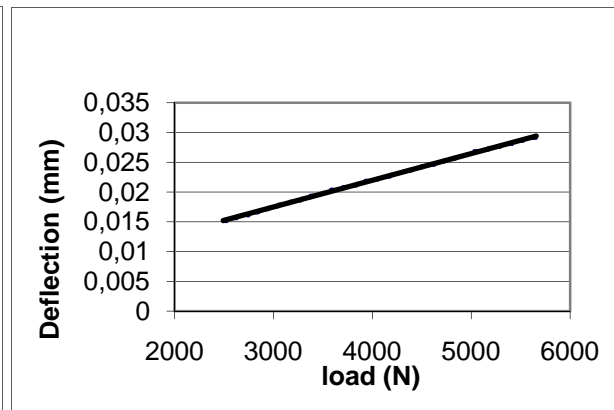


Figura 3.12 – Gráfico para a tampa.

Este stiffness é muito importante para a montagem do conjunto com a pré-carga correta no sistema diferencial, pois é necessário compensar o deslocamento da carcaça e da tampa após o produto montado (o produto deve ser montado com pré-carga de  $4042 \pm 1818\text{N}$ ). Com o stiffness conhecido é possível determinar o deslocamento da carcaça e tampa para a pré-carga nominal de 4042N, deslocamento este que será compensado pelos anéis espaçadores do sistema diferencial.

A carga aplicada no produto por esta máquina é garantida através de um sistema de malha fechada utilizando uma válvula hidráulica proporcional ligada diretamente na célula de carga, com este sistema fechado é possível atingir a carga parametrizada com boa precisão. Para a medição da altura são utilizadas canetas óticas com elevada precisão.

São raras as reprovações neste posto, as que ocorrem normalmente são devidas a falhas de fundição dos produtos, quando estas falhas ocorrem normalmente os valores de stiffness

encontrados são de uma ordem de grandeza de 8 a 10 vezes inferiores ao normal, já entrando em deformação plástica durante o processo de medição.

Segue na figura 3.13 uma foto desta máquina onde é possível visualizar na parte frontal direita o computador que realiza aquisição dos valores de carga e curso e traça o gráfico. Na figura 3.14 segue uma foto dos cabeçotes de medição onde é possível visualizar as células de carga e os transdutores lineares que medem o deslocamento.



Figura 3.13 – Foto do posto 20.



Figura 3.14 – Foto dos cabeçotes de medição.

### 3.5 Posto 25

Na posição representada como P-025 no lay-out da figura 3.1 ocorre a entrada do par coroa e pinhão, também chamado de “gear set”. No momento que o gear set é inserido na linha o operador manualmente digita os desvios em relação a cota nominal obtidos na usinagem. Estes desvios são somados ou subtraídos da cota nominal, o valor resultante representa o set point, ou ponto ótimo de funcionamento do produto.

O objetivo da montagem do gear set é posicionar o pinhão e coroa o mais próximo possível deste set point. O set point varia de produto para produto de acordo com os desvios de

usinagem de cada gear set, sendo que o sistema grava estas informações no banco de dados através do número do pallet em processo. Seguem nas figuras 3.15 e 3.16 as cotas nominais para o gear set (coroa e pinhão).

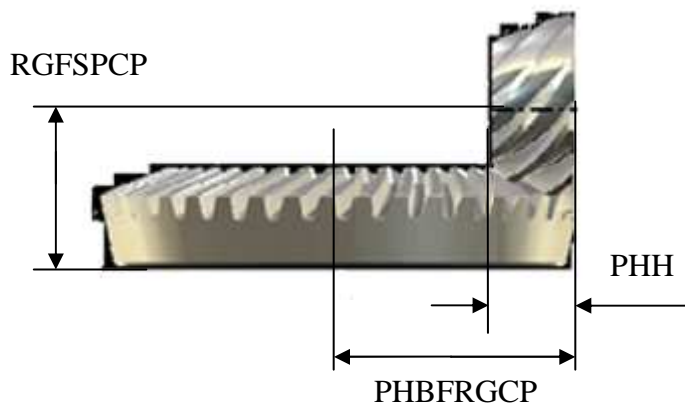


Figura 3.15 – Desenho do gear set com as cotas de montagem.

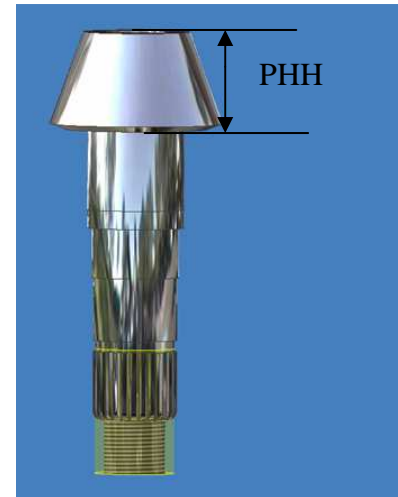


Figura 3.16 – Desenho do pinhão com a cota de altura.

Onde:

- *PHBFRGCP*, Pinion Head Bottom Face to Ring Gear Center Point, a distância da face de trás da cabeça do pinhão até a centro da coroa [mm]. Esta distância é utilizada para o cálculo do shim do pinhão. Para o produto front a cota nominal é de 101mm.
- *PHH*, Pinion Head Height, altura da cabeça do pinhão [mm]. Esta altura é utilizada para o cálculo do shim do pinhão. Para o produto front a cota nominal é 39,1mm.
- *RGFSPCP*, Ring Gear Flat Surface to Pinion Center Point, distance da face da coroa até a linha de centro do pinhão [mm]. Esta cota é utilizada para o cálculo do shim da carcaça do sistema diferencial. Para o front a cota nominal é de 64mm.

Além da cota nominal de cada produto é digitado pelo operador o desvio de montagem para cada par específico, este desvio somado a cota nominal representa o valor real de cada par de engrenagens. Quando, por exemplo, o operador digita + 2 para o PHH o sistema soma 0,002mm com a cota nominal de 39,1mm, resultando em um set point de 39,102mm. Este procedimento também ocorre para as outras variáveis.

### 3.6 Posto 30

Neste posto ocorre a prensagem do cone do rolamento (item 16 do desenho 2.12) no pinhão, com controle da carga e curso. Os valores desta prensagem também são armazenados no banco de dados. Segue na figura 3.17 uma foto do posto 30 onde é possível visualizar a prensa ao centro.

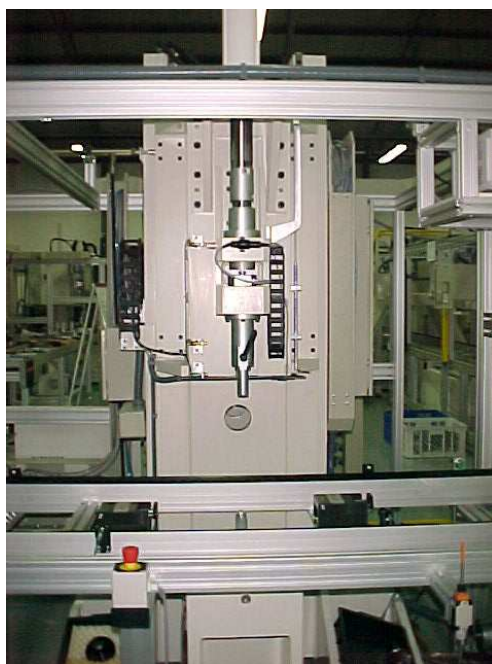


Figura 3.17 – Foto da prensa do rolamento posto 30.

### 3.7 Posto 40

No posto 40 ocorrem medições importantes relacionadas ao posicionamento do pinhão e também a pré-carga dos rolamentos.

Neste processo o operador posiciona o pinhão com o cone do rolamento da cabeça já prensado (proveniente do posto 30) no dispositivo da máquina, após posiciona o cone na parte traseira (item 19 do desenho 2.12) e as 2 capas (itens 17 e 18). Este dispositivo aplica carga nos 2 cones forçando uma capa contra a outra deixando desta maneira o pinhão sobre os 2 pares de rolamentos carregados axialmente, simulando a condição de montagem no produto.

Após este posicionamento um sistema hidráulico proporcional aplica no conjunto uma carga axial de 4448N, que corresponde ao valor nominal de pré-carga na qual o conjunto deve



ser montado no eixo diferencial. Com esta carga aplicada é medida a altura da cabeça do pinhão até a face do rolamento (figura 3.18), o diâmetro externo da capa do rolamento da cabeça do pinhão (item 17 do desenho 2.12) e o torque necessário para giro do conjunto.

Para este par de rolamentos é sabido que a pré-carga nominal é atingida com o valor de torque medido, portanto este valor será o objetivo da montagem realizada no posto 70. É importante lembrar que para o mesmo valor de pré-carga existem valores de torque diferentes para cada produto (de acordo com cada par de rolamentos). Com isso é necessário utilizar um set-point individual de torque para cada produto de modo que seja atingida a mesma pré-carga axial para todos os conjuntos.

As medições realizadas neste posto estão representadas na figura 3.18.

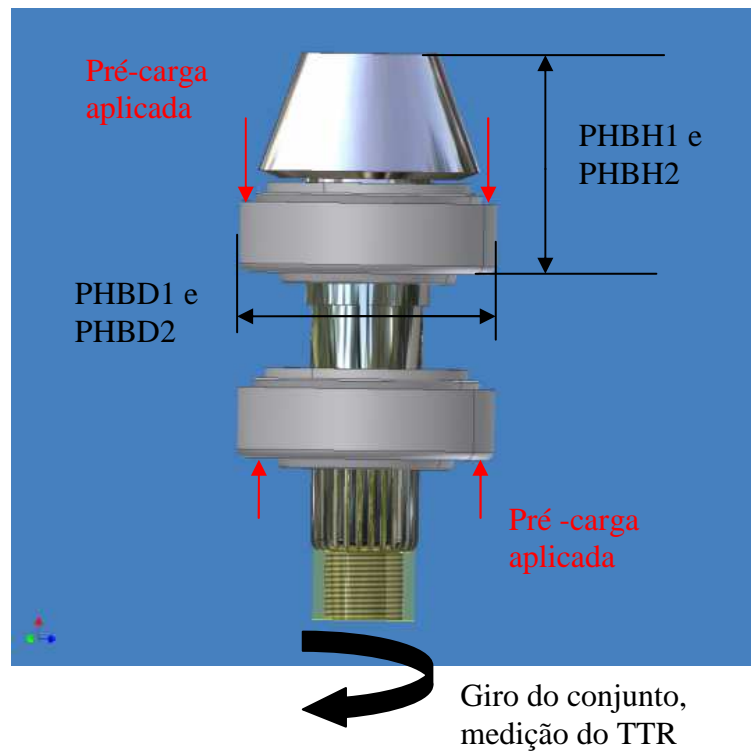


Figura 3.18 – Posição do pinhão e rolamentos no dispositivo de medição do posto 40.

Onde:

- *PHBH1*, Pinion Head Bearing Height 1, cota medida da cabeça do pinhão até a face do rolamento sem pré-carga aplicada [mm].
- *PHBH2*, Pinion Head Bearing Height 2, cota medida da cabeça do pinhão até a face do rolamento com pré-carga aplicada [mm].
- *PHBD1*, Pinion Head Bearing Diameter 1, diâmetro do rolamento da cabeça do pinhão sem pré-carga aplicada [mm].

- *PHBD2*, Pinion Head Bearing Diameter 2, diâmetro do rolamento da cabeça do pinhão com pré-carga aplicada [mm].
- *TTR*, Torque To Rotate, torque necessário para girar o conjunto pinhão + rolamentos com a pré-carga axial aplicada [Nm].

O TTR pode ser relacionado com a pré-carga de forma linear, conforme demonstrado na figura 3.19. Esta linearidade será utilizada mais adiante no posto 70 para ajustar a pré-carga axial em função da leitura do TTR.

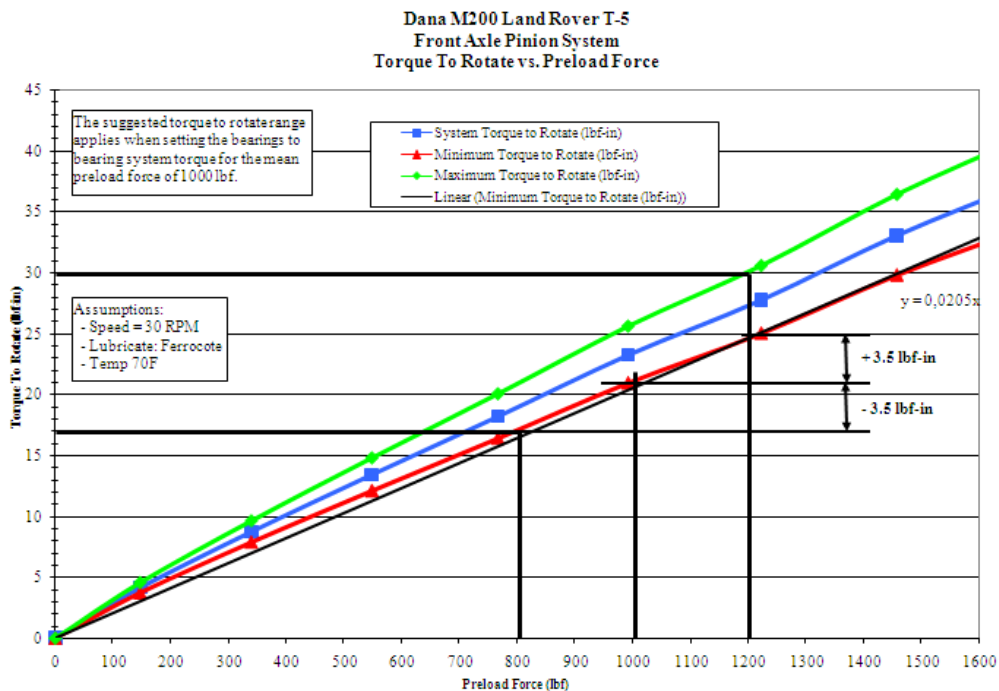


Figura 3.19 – Relação do torque de giro do pinhão com a carga aplicada.

No eixo “X” da figura 3.19 esta representada a carga aplicada no rolamento, no eixo “Y” esta representado o torque de giro do rolamento devido a esta carga aplicada (Torque To Rotate). A linha vermelha representa o limite inferior da tolerância, a linha verde representa o limite superior e a linha azul o valor médio esperado.

Seguem nas figuras 3.20 e 3.21 uma vista geral da máquina e uma foto do dispositivo de medição respectivamente. Na figura 3.22 segue a representação das cotas da carcaça, gear-set e medições realizadas no posto 40, com estas variáveis é possível determinar uma equação para calcular a espessura do shim.

O shim é o item 14 no desenho de produto da figura 2.12

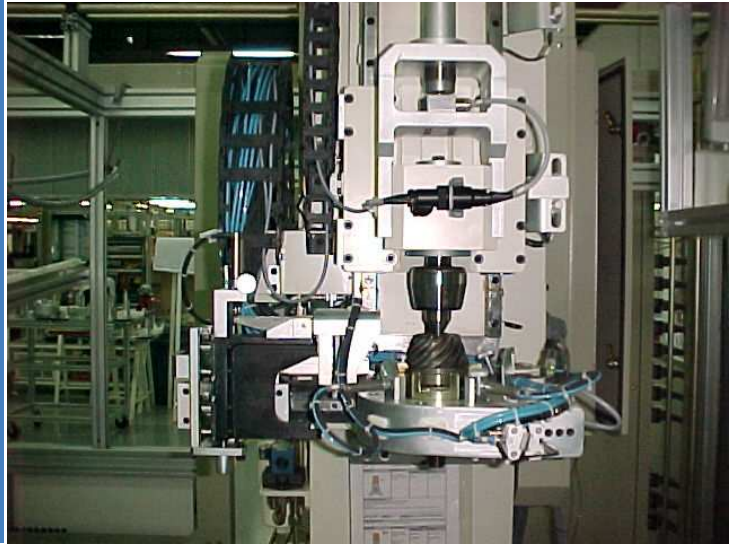
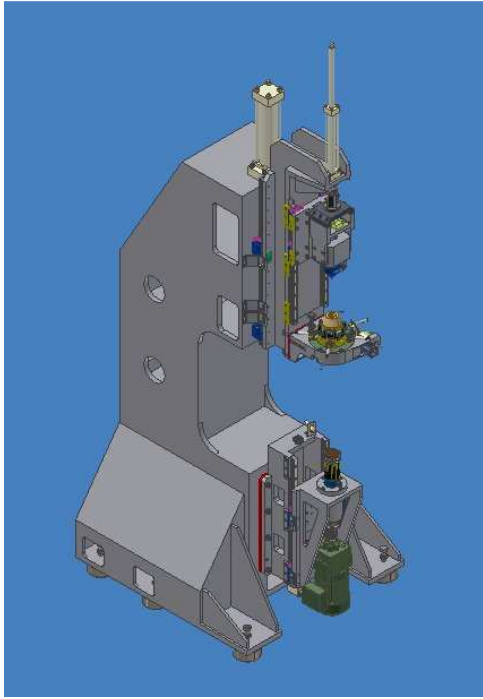


Figura 3.20 – Vista do posto 40. Figura 3.21 – Foto do dispositivo de medição do posto 40.

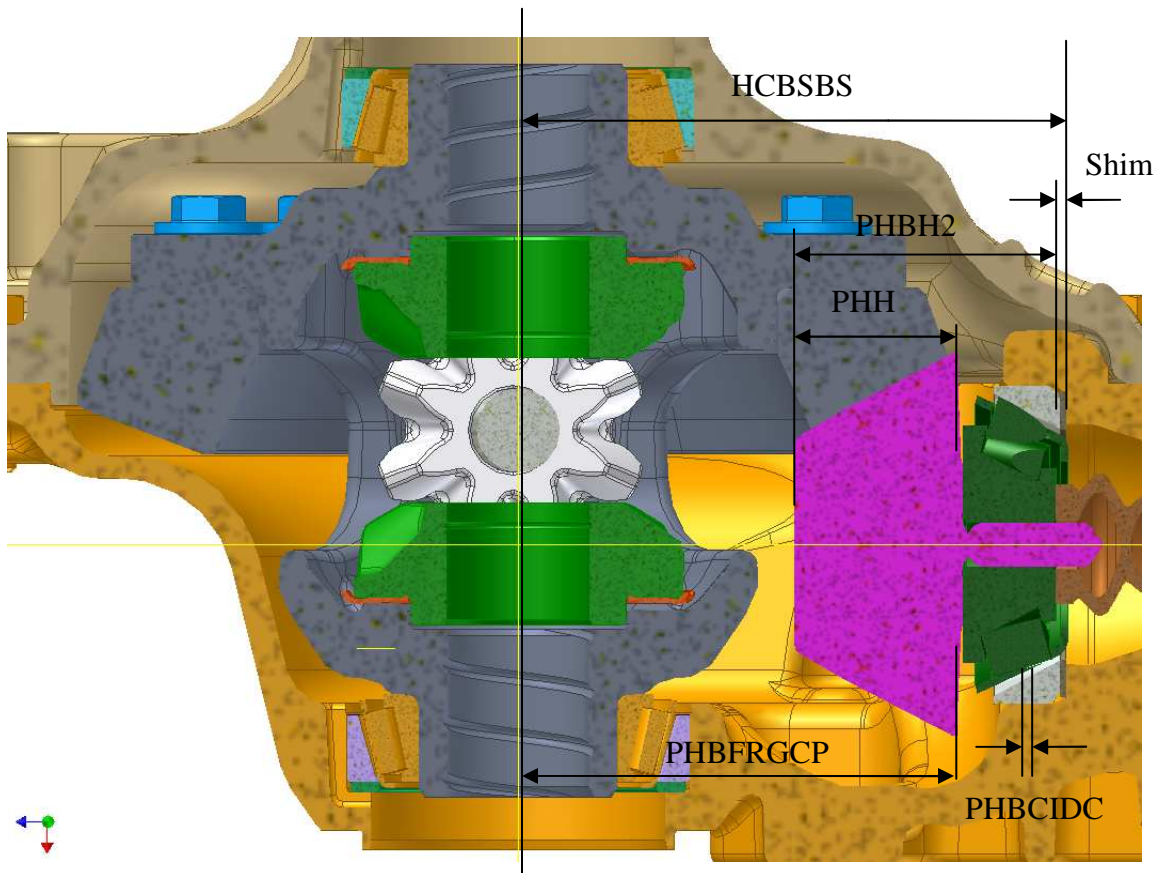


Figura 3.22 – Ilustração das dimensões utilizadas pela equação 1 para o cálculo do shim.

Segue na equação (1) o cálculo da espessura do anel espaçador, utilizando como base as dimensões indicadas na figura 3.22.

$$SHIM = HCBSBS - PHBFRGCP - PHBH2 + PHH - PHBCIDC \quad (1)$$

Onde:

- *SHIM*, espessura do anel espaçador do pinhão, também chamado de shim [mm].
- *HCBSBS*, Housing Center Bore to Shim Bearing Surface, distância do centro da carcaça até a face de montagem do shim do pinhão[mm]. Dado proveniente da medição da carcaça na usinagem que entra na linha de montagem através do posto 15.
- *PHBFRGCP* Pinion Head Bottom Face to Ring Gear Center Point, distância da face traseira da cabeça do pinhão até o centro da coroa [mm]. Dado proveniente do gear set e do desvio de montagem do posto 25.
- *PHBH2* – Pinion Head Height 2, cota medida da cabeça do pinhão até a face do rolamento com pré-carga [mm]. Cota medida no posto 40.
- *PHH*, Pinion Head Height, altura da cabeça do pinhão [mm]. Dado proveniente do gear set e desvio de montagem do posto 25.
- *PHBCIDC* Pinion Head Bearing Cap Internal Diameter Compensation, compensação realizada no cálculo devido a interferência de prensagem da capa do rolamento na carcaça [mm]. O cálculo desta variável será detalhado a seguir.

É importante citar que este sistema de cálculo não foi contribuição deste trabalho, ou seja, o sistema já é utilizado na linha de montagem atualmente.

A compensação *PHBCIDC* é utilizada devido a necessidade de corrigir o desvio de posição gerado pela prensagem da capa do rolamento na carcaça, como a capa é fina com pouca massa ela cede, fechando o seu diâmetro original e como o cone é apoiado nesta capa ele sofre um deslocamento no sentido axial que é proporcional a interferência de prensagem, como pode ser visualizado na figura 3.23 e 3.24. Como este deslocamento aproxima o pinhão do centro da carcaça é necessário realizar uma compensação, sendo esta proporcional a interferência de prensagem.

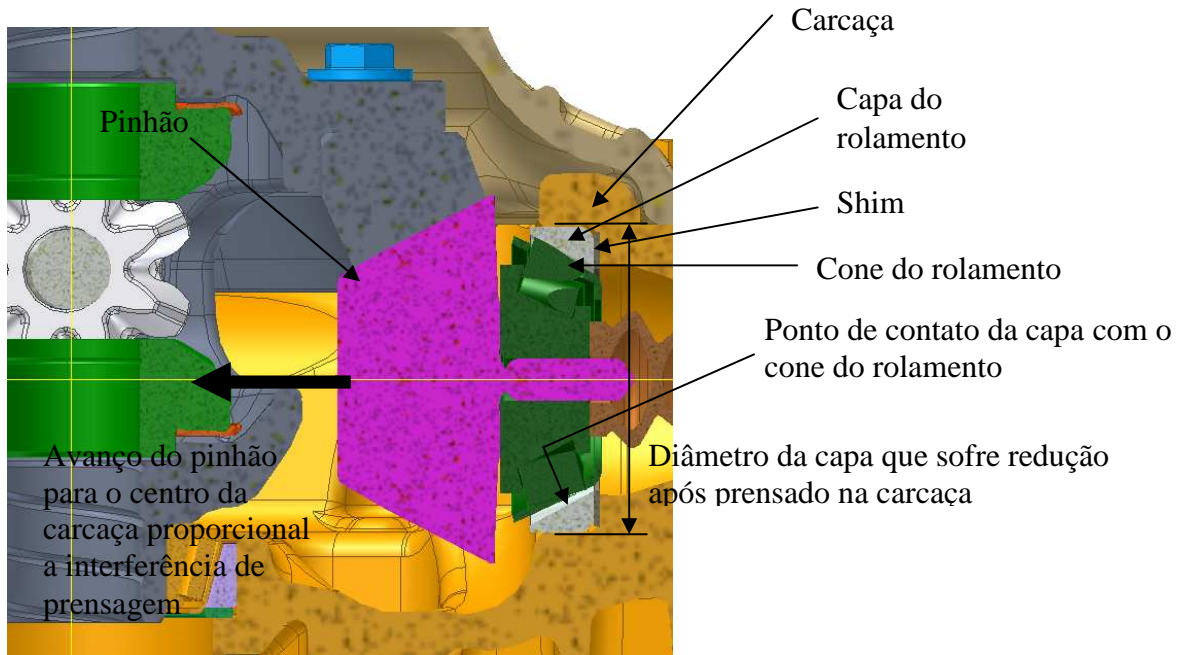


Figura 3.23 – Indicação dos itens levados em consideração para a compensação.

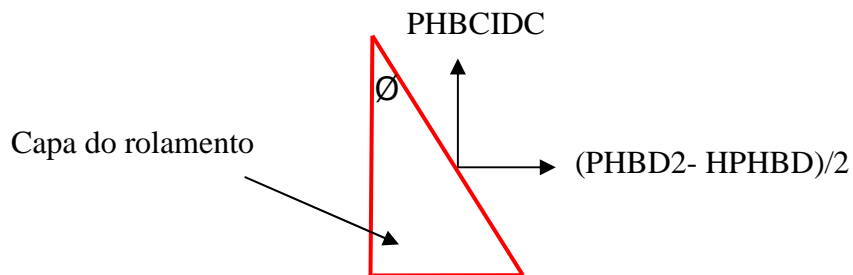


Figura 3.24 – Representação da compensação de prensagem na capa do rolamento.

Segue na equação (2) o cálculo da compensação, utilizando como base as dimensões indicadas na figura 3.24.

$$PHBCIDC = f. \left[ \left( \frac{PHBD2 - HPHBD}{2 \cdot \tan \varnothing} \right) \right] \quad (2)$$

Onde:

- *PHBD2*, Pinion Head Bearing Diameter 2, diâmetro do rolamento da cabeça do pinhão com pré-carga aplicada [mm].
- *HPHBD*, Housing Pinion Head Bearing Diameter, representa o diâmetro da carcaça onde é prensado o rolamento da cabeça do pinhão [mm].
- $\varnothing$ , ângulo do rolamento [°]. Para o produto front  $\varnothing = 24$  graus.

- O valor 2 é devido ao fato da utilização do raio para o cálculo, dividindo assim o diâmetro por 2.
- $f$ , coeficiente de ajuste determinado através de testes experimentais, sendo que para o produto front  $f = 0,7$ .

O Valor do coeficiente de ajuste  $f = 0,7$  foi determinado medindo o diâmetro da capa do rolamento antes e depois da prensagem na carcaça. Este valor permite compensar a equação (2) de acordo com o comportamento real do produto.

É importante citar que esta compensação não foi contribuição deste trabalho, ou seja, o sistema já é utilizado na linha de montagem atualmente.

A equação (2) considera que toda a deformação da prensagem ocorre na capa, sem deformação da carcaça, este item será melhor investigado no próximo capítulo.

Segue na figura 3.25 uma tela de medição obtida para um produto no posto 40. Observar que além dos itens citados e calculados são traçados os gráficos da medição de altura, diâmetro do rolamento e TTR, através dos gráficos fica fácil entender o processo e identificar algum erro ou problema encontrado como sujeira, imperfeições superficiais, rolamentos falhados e etc.

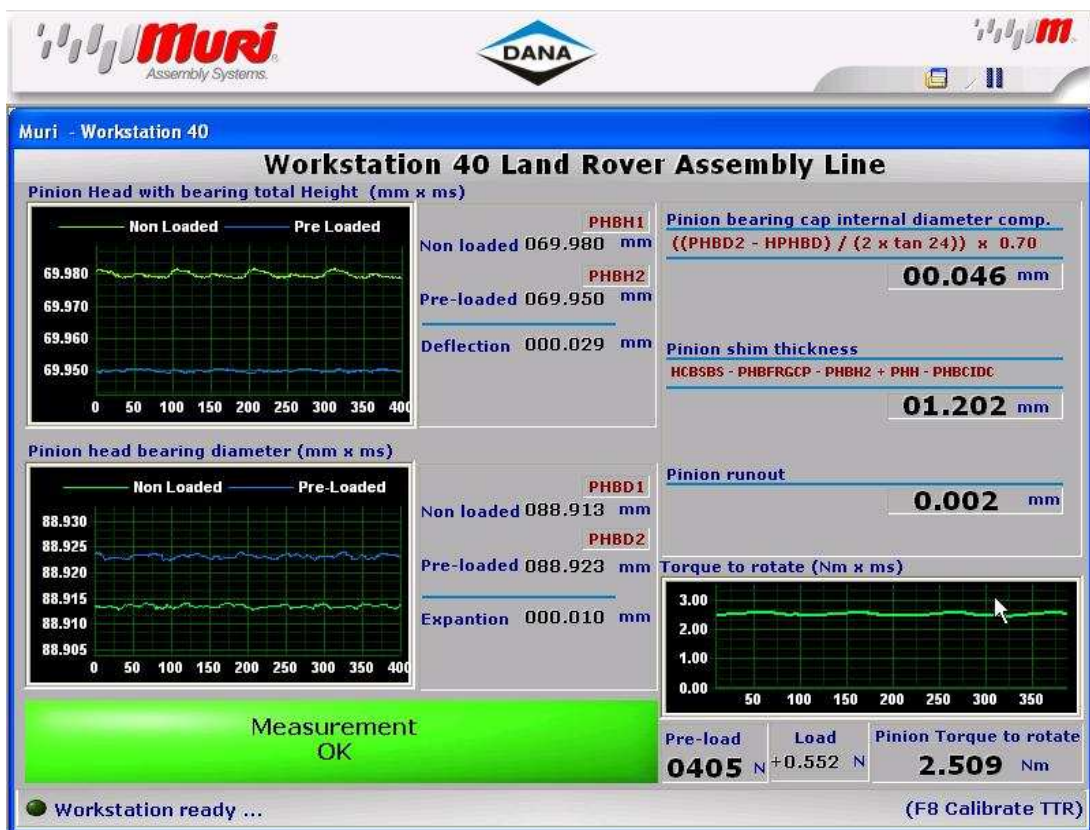


Figura 3.25 – Resultados de medição do posto 40.

### 3.8 Posto 50

No posto 50 é selecionado o shim do pinhão (item 14 da figura 2.12) e prensadas as capas dos rolamentos na carcaça (itens 17 e 18).

Quando a peça chega na estação o posto comunica com o sistema supervisório informando o número do pallet, o supervisório por sua vez informa o valor do shim que deverá ser montado na peça (é o valor calculado no posto 40). O operador retira um shim do magazine, confere se a espessura esta correta e monta no produto.

O shim é montado por classes com intervalo de 0,01mm, ou seja, o operador busca montar um shim da mesma classe do que for calculado. Para que não ocorra equívoco na montagem, esta máquina está equipada com um sistema de verificação do shim, neste dispositivo ele é medido e comparado com o valor calculado, caso esteja na mesma classe a máquina libera a montagem, caso contrário o operador necessita selecionar outro shim e repetir o procedimento.

A prensagem ocorre para as 2 capas ao mesmo tempo, com controle de carga e curso em conjunto. Segue na figura 3.26 o posto 50 com o magazine de shims, o dispositivo verificador e a prensa das capas dos rolamentos.



Figura 3.26- Posto 50 com a prensa, o magazine e o dispositivo verificador.

### 3.9 Posto 60

No posto 60 ocorre a montagem do pinhão e componentes internos no alojamento na carcaça. Além do pinhão são montados também o anel colapsível (item 15), o cone do rolamento da parte traseira do pinhão (item 19), o anel de vedação (item 20), o flange (item 21) e a porca do pinhão (item 24).

O ciclo de montagem é o seguinte: o pallet chega na estação, o operador posiciona o pinhão com o rolamento dentro da carcaça, posiciona um anel colapsível, o cone do rolamento traseiro e o anel de vedação. Aciona start prensando parcialmente o rolamento e o anel de vedação. Após posiciona o flange a aciona start para prensá-lo, por último posiciona a porca no pinhão.

Ao final desta montagem todas as peças estão posicionadas, porém o pinhão e rolamento não estão completamente prensados, pois a prensagem não chega até o final mantendo os rolamentos com folga e sem pré-carga. O objetivo é posicionar todas as peças e preparar o conjunto para o aperto final com o controle de pré-carga que será realizado no posto 70.

O anel colapsível funciona como um tipo de mola, porém de deformação permanente, o objetivo deste componente é causar um aumento gradativo da força axial e do torque durante o aperto da porca e prensagem do rolamento. Com esta suavização fica mais fácil atingir o set-point de TTR durante o aperto da porca.

Segue na figura 3.27 uma foto deste posto onde é possível visualizar na parte frontal a prensa utilizada para a montagem dos componentes



Figura 3.27 – Posto 60.



### 3.10 Posto 70

Neste posto ocorre de forma completamente automática o aperto da porca do pinhão que resulta na prensagem final dos rolamentos cônicos aumentando a pré-carga axial nos rolamentos.

O set-point de TTR varia de peça para peça, de acordo com a medição realizada no posto 40, ou seja, é buscado o mesmo valor de pré-carga axial aplicado no posto 40 mesmo que resulte em produtos com valores de TTR diferentes. O processo de medição do TTR na máquina é indireto, neste caso é utilizada uma célula de carga em contato com a carcaça. Como o pinhão é colocado entre pontos e a carcaça fica livre, existe um arraste devido ao giro dos rolamentos, este arraste da carcaça é medido em [N] com uma célula de carga e transformado em torque multiplicando pela distância ao centro do produto.

Para o aperto são utilizados 2 servo-motores, sendo que um motor gira o flange a 30RPM e outro gira a porca. Como o servo-motor da porca gira com velocidade superior ao do flange ocorre o aperto da mesma. O torque de arraste (TTR) é monitorado durante o processo com o objetivo de atingir o mesmo valor de torque lido no posto 40, sendo que o sistema funciona em malha fechada realimentado com os valores durante o processo. No início do ciclo o sistema gira rápido para aproximar o conjunto, já no final do ciclo o sistema gira mais devagar para não ultrapassar o set-point de montagem. Existe ainda outro critério de aprovação do produto que é o torque de aperto final da porca, caso este torque fique abaixo do especificado o produto é reprovado independentemente do TTR.

Segue na figura 3.28 um gráfico típico do processo de aperto, onde o Tightening torque é o torque de aperto da porca e o TTR é o torque to rotate dos rolamentos. Na figura 3.29 esta representado o critério de estabilização para aprovação do produto no TTR.

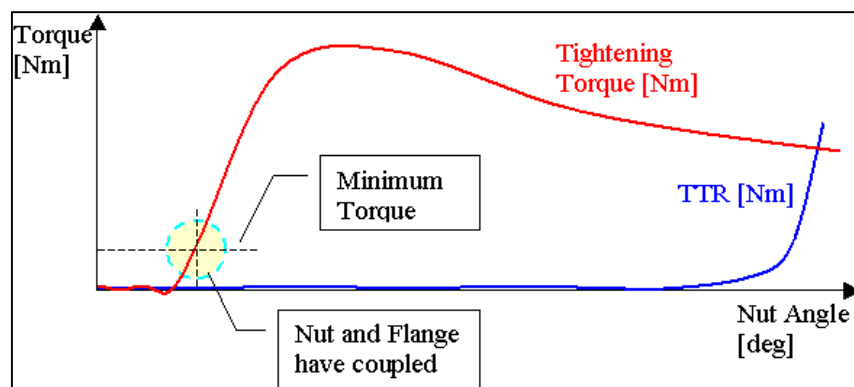


Figura 3.28 – Gráfico típico de aperto realizado no posto 70.

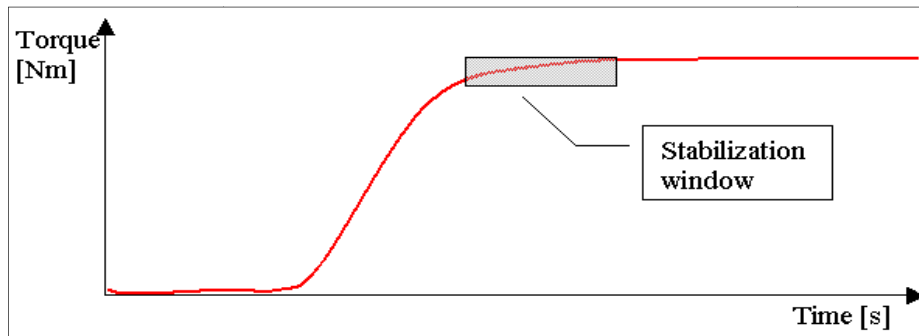


Figura 3.29 – Critério de estabilização utilizado para aprovação do TTR.

Seguem nas figuras 3.30 e 3.31 fotos da máquina onde é possível visualizar os dispositivos de aperto, a célula de torque utilizada para leitura do torque de aperto da porca, o sistema entre pontos utilizado para fixar o pinhão de modo que a carcaça fique livre durante o ciclo de aperto e a célula de carga utilizada para a medição indireta do TTR.

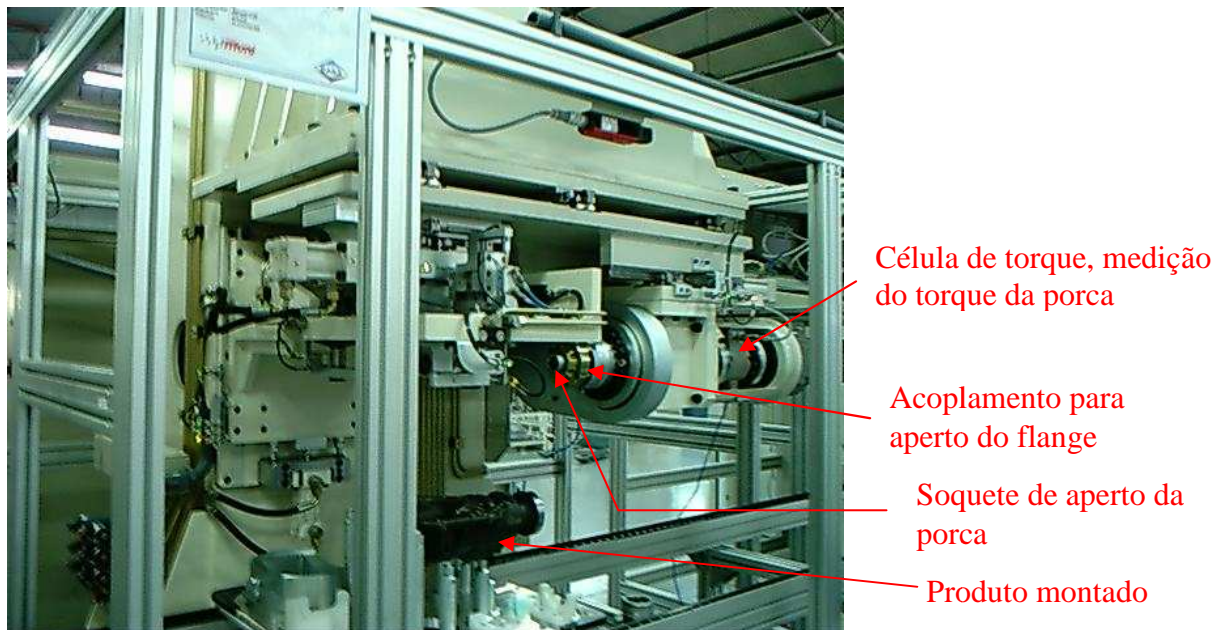


Figura 3.30 – Foto do posto 70 com os sistemas de giro e aperto da porca.

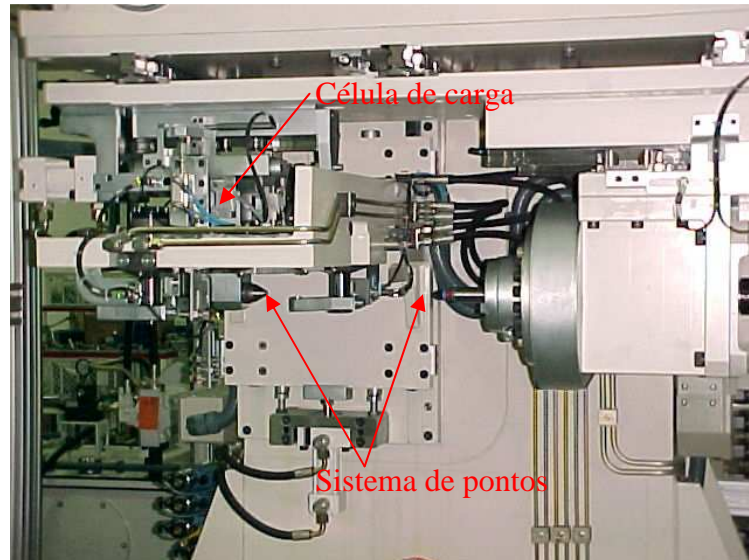


Figura 3.31 – Foto do posto 70 com indicação da célula de carga e do sistema de pontos.

### 3.11 Posto 75

Neste posto ocorre de forma automática a medição do batimento ou run-out do flange, este batimento é medido na face e na lateral do flange, o objetivo é que este valor esteja dentro de um limite máximo estabelecido para o produto.

A máquina possui um motorreductor que acopla no pinhão e gira o mesmo, também existem 2 transdutores de medição que são posicionados na face do produto e na lateral, com o giro do produto e com os valores dos transdutores é medido este batimento.

Segue na figura 3.32 uma vista do desenho de produto com os locais e valores de batimento necessários para a flange após a montagem, também segue indicação do local onde os transdutores lineares estão posicionados. Segue na figura 3.33 uma foto da máquina onde é possível visualizar os soquetes de giro (existem 3 soquetes na máquina, sendo que um é destinado ao modelo front, outro ao Real L319 e outro ao Real L322).

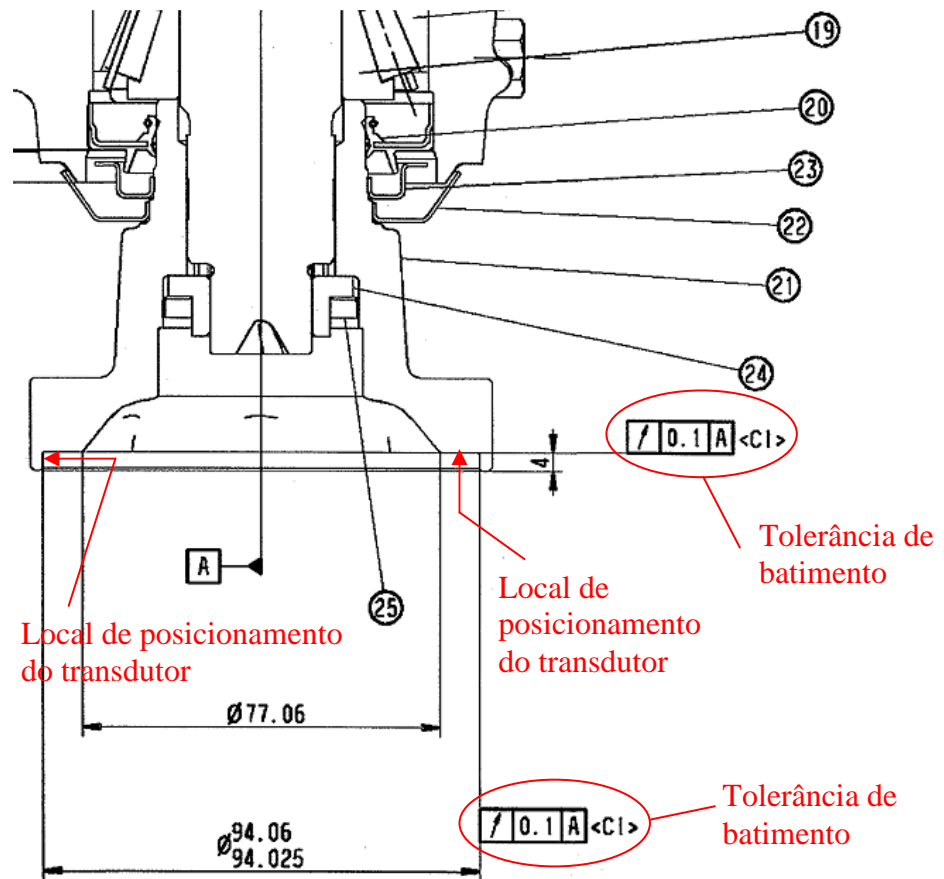


Figura 3.32 – Vista do desenho onde é possível visualizar os pontos de medição do batimento do flange.



Figura 3.33 – Foto do posto 75 onde é possível visualizar os soquetes de giro.

### 3.12 Posto 80

O posto 80 é uma máquina de medição de coordenadas tridimensional do fabricante Zeiss, esta máquina foi introduzida na linha de montagem com a única finalidade de medir o posicionamento do pinhão em relação ao centro da carcaça. O objetivo é verificar se o processo de montagem do pinhão foi eficiente.

Para medir a distância da cabeça do pinhão ao centro da carcaça a máquina primeiramente mede o plano da face da cabeça do pinhão, achando o seu ponto central. Após mede o diâmetro superior da carcaça e diâmetro inferior aonde é alojado o rolamento do diff-case, com estes diâmetros medidos é calculado o ponto central de cada um deles e traçado uma linha imaginária entre os mesmos (linha de centro da carcaça). A distância da cabeça do pinhão até o centro da carcaça é a menor distância do centro do plano da cabeça do pinhão até esta linha imaginária que passa pelo centro do produto.

Segue na figura 3.34 a indicação de como é medida esta distância na máquina Zeiss.

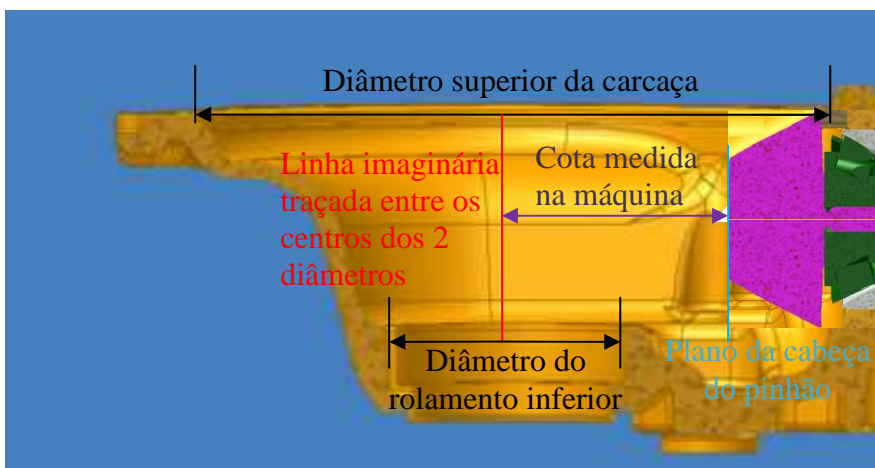


Figura 3.34 – Desenho indicativo das medições realizadas no posto 80

É importante lembrar que para cada produto este uma cota de montagem diferente, pois cada gear set possui um posicionamento próprio de acordo com a usinagem do par. Esta cota final é a cota nominal somada ao desvio digitado no posto 25.

Segue na figura 3.35 uma foto da máquina onde é possível visualizar o produto em processo de medição, já na figura 3.36 segue um foto onde é possível visualizar a ponteira de medição da máquina tridimensional.



Figura 3.35 – Foto da máquina com o produto. Figura 3.36 – Foto da máquina com a ponteira.

Quando a cota fica fora da tolerância de projeto  $\pm 0,03\text{mm}$  a peça é reprovada, com a medida obtida é recalculado o novo valor do shim para a montagem correta. Esta informação segue com o produto para o retrabalho. Na bancada de retrabalho a peça é desmontada e reintroduzida na linha indo direto para o posto 50, onde é montado o shim recalculado anteriormente. O acerto da montagem na segunda tentativa é praticamente 100%.

Todas estas informações e seqüenciamento para esta operação são controlados pelo tag existente no pallet e pelo sistema supervisor. Caso a peça seja retirada do pallet a rastreabilidade é perdida ocasionando falhas de informações no banco de dados assim como erro na entrada de peças para retrabalho.

Conforme já mencionado anteriormente o objetivo deste trabalho é a melhoria do posicionamento do pinhão, como a montagem do pinhão termina no posto 80 esta será a última máquina analisada com detalhes neste trabalho. Porém para facilitar o entendimento do funcionamento do eixo diferencial os demais postos serão brevemente descritos no anexo II.

#### 4 SISTEMA DE CÁLCULO DO SHIM DO PINHÃO

A montagem do pinhão começa no posto 15 e vai até o posto 80, portanto o escopo e análise realizados neste trabalho estão limitados a esta parte da linha. O cálculo e seleção dos shims da carcaça e tampa são bem mais complexos, desta maneira ficam como sugestão para um próximo trabalho.

De acordo com o explicado no posto 40 a equação (1) é utilizada para o cálculo do shim, teoricamente esta equação deveria funcionar pois estão sendo somados e diminuídos todos os itens relevantes conhecidos para a montagem, porém na prática este cálculo apresenta problemas, não funcionando com a confiabilidade requerida.

Medindo produtos montados no posto 80 foi observado que existia uma diferença entre a posição teórica do pinhão e a posição real medida na máquina tridimensional Zeiss. Esta diferença foi compensada por uma constante de ajuste somada á equação (1), deste modo a nova equação utilizada para o cálculo é a equação (3)

$$SHIM = HCBSBS - PHBFRGCP - PHBH2 + PHH - PHBCIDC + C1 \quad (3)$$

Onde:

C1 é a constante de ajuste utilizada para ajustar o processo determinada como sendo o valor médio das diferenças entre a cota teórica e a cota medida na tridimensional do posto 80.

Com a utilização da constante é possível ajustar a média das medidas em relação a média dos valores teóricos calculados, com isso o processo é centrado. Embora o processo esteja centrado ocorre um comportamento tendencioso que pode ser observado através da média das cotas medidas avançando para o limite máximo ou para o limite mínimo da tolerância do produto. Para compensar esta tendência e evitar que a média das medidas fique fora da tolerância de produto é necessário ajustar C1 para o valor nominal da cota do produto. Após o ajuste o processo é centrado novamente e a produção continua sem problemas, mas o comportamento tendencioso volta a ocorrer (podendo ser tanto para o limite superior ou para o limite inferior da tolerância) de modo que é necessário novo ajuste de C1. Este processo de ajuste manual é realizado pelo supervisor da produção sempre com o intuito de centrar manualmente o processo e evitar a produção de peças fora da tolerância.

Como o processo possui um certo grau de dispersão é necessário que o ajuste seja feito utilizando a média das medidas, o que torna o processo mais difícil de ser ajustado, pois caso

seja utilizada uma única peça (que não represente o valor médio) para ajustar C1 o processo não fica centrado ocasionando algumas reprovações. Este complicado procedimento de ajuste é realizado variando C1 para mais ou para menos algumas vezes durante um turno de produção. A necessidade de ajuste é intensificada no momento de troca de modelo de peça ou lote de componentes.

Com a constante variação de C1 é possível concluir que existem variáveis de processo ou de produto relevantes que não estão sendo levadas em consideração no cálculo do shim realizado pela equação (3).

#### 4.1 Metodologia utilizada para avaliar o sistema de cálculo e de medição

A grande dificuldade para solucionar este problema é identificar qual ou quais são os itens causadores do mesmo, pois uma vez descobertos, a solução seria implementada com maior facilidade.

Como não são conhecidos os itens causadores do problema foram listadas várias características de produto, medição e processo que “poderiam” contribuir para este erro de cálculo. Esta lista foi elaborada por uma equipe de 7 engenheiros de diversas áreas que trabalharam no projeto.

A idéia básica é verificar e comprovar através de números a influência de cada uma delas no cálculo, por menor que seja, e utilizando este resultado e conhecimentos adquiridos propor uma maneira de montar o produto com mais confiabilidade diminuindo a taxa de reprovação.

Segue na tabela 4.1 a lista dos itens relacionados.

Tabela 4.1 – Itens listados que podem influenciar o posicionamento do pinhão

Item	Descrição
1	Erro de medição da HCBSBS
2	Variação da HCBSBS devido ao erro de perpendicularidade da carcaça
3	Variação dimensional da HCBSBS com a pré-carga dos rolamentos do pinhão
4	Variação Ø de prensagem dos rolamentos do pinhão devido a pré-carga do diff-case
5	Variação da carcaça com a temperatura de medição da HCBSBS na usinagem e na montagem.
6	Erro dimensional do PHBFRGCP no fornecedor
7	Erro dimensional do PHH no fornecedor



Tabela 4.1 – Itens listados que podem influenciar o posicionamento do pinhão

Item	Descrição
8	Variação do gear set com a temperatura de medição e de montagem
9	Erro de medição da altura do pinhão
10	Erro de medição do diâmetro do rolamento
11	Erro da aplicação da pré-carga
12	Erro devido a rigidez da máquina na medição da altura do pinhão
13	Erro no cálculo de compensação devido a interferência entre capa e carcaça
14	Variação no cálculo do shim devido ao erro de medição do TTR
15	Erro devido ao run-out da altura do pinhão.
16	Diferença entre shim montado e selecionado devido a seleção por classes.
17	Erro de medição do shim
18	Compressão plástica do shim, capa e carcaça devido a força de prensagem das capas
19	Erro dimensional do shim devido a variação de pré-carga dos rolamentos
20	Erro dimensional devido a diferença do TTR posto 40 e 70
21	Erro de medição na zeiss

Para cada item listado na tabela 4.1 existe um procedimento de avaliação que será utilizado para descobrir a sua influência no processo (erro associado). Para alguns itens o erro será avaliado através da estatística, para outros será utilizado um cálculo simples de deslocamento, deformação ou até dilatação térmica. Também será utilizado o método dos elementos finitos para avaliar os deslocamentos da carcaça do produto.

A idéia básica é buscar a variabilidade ou dispersão do processo (erro aleatório) e não a diferença entre a média das medidas e a média da tolerância (erro sistemático), pois este erro sistemático seria facilmente corrigido ajustando a variável C1 na equação (4).

Como o objetivo é buscar toda e qualquer fonte de erro todos os itens serão avaliados integralmente sem priorização ou seleção, mesmo porque não é sabido ao certo qual a influencia de cada um deles no processo. Qualquer priorização poderia causar a avaliação excessiva de um item cujo resultado é insignificante em detrimento a outro cujo resultado é relevante.

No capítulo 5 serão descritos todos os métodos de avaliação utilizados neste trabalho.

## 5 MÉTODOLOGIA UTILIZADA PARA A ANÁLISE DOS ITENS DE INFLUÊNCIA NO PROCESSO

Neste capítulo será realizada uma breve revisão bibliográfica sobre os métodos utilizados para avaliação de cada um dos erros associados a montagem ou medição do produto listados na tabela 4.1. Esta revisão será breve e resumida especificamente aos pontos de interesse no trabalho relacionando a teoria existente e indicando as equações que serão utilizadas para a análise. Em caso de dúvida é recomendado que seja realizado um estudo detalhado nas referências bibliográficas listadas no capítulo 8.

### 5.1 Método estatístico

Os erros de medição de algumas máquinas ou processos foram determinados realizando 30 medições com a mesma peça, o objetivo foi obter a dispersão de medição para o processo em questão.

Considerando uma população normal a dispersão ou variabilidade natural de um processo pode ser calculada como sendo igual a 6 desvios padrões para um intervalo de confiança de 99,73% de acordo com a equação (4).

$$\text{Dispersão} = 6\sigma \quad (4)$$

Onde:

*Dispersão* é a variação ou erro associado ao processo para o intervalo de confiança de 99,73%

$\sigma$  é o desvio padrão da amostra

O desvio padrão e a média podem ser calculados pelas equações (6) e (5)

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{N} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (6)$$

Onde:

$\bar{x}$  é a média aritmética

$x_i$  é o valor de cada amostra

$N$  é o número total de amostras

Este procedimento para cálculo do erro será utilizado para os itens 1, 7, 9 10, 14, 17 e 22.

## 5.2 Elementos finitos

Será utilizado o software Ansys Workbench para análise de deslocamentos via elementos finitos na carcaça do eixo diferencial. A utilização deste software deve-se a geometria da carcaça, que não permite um cálculo analítico direto via teoria da elasticidade. Esta análise será utilizada nos itens 3, 5 e 13.

## 5.3 Variação dimensional devido a carga térmica

A dilatação dimensional linear de um componente devido a variação de temperatura pode ser calculada através da equação (7).

$$\Delta L = L_0 \cdot \alpha \cdot (\Delta T) \quad (7)$$

Onde:

$\Delta L$  é a variação dimensional [mm]

$L_0$  é o comprimento inicial [mm]

$\alpha$  é o coeficiente de dilatação térmica linear [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$\Delta T$  é a variação de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]

A variação da área de um componente devido a variação de temperatura pode ser calculada através da equação (8).

$$\Delta S = S_0 \cdot \beta \cdot (\Delta T) \quad (8)$$

Onde:

$\Delta S$  é a variação dimensional da área [ $\text{mm}^2$ ]

$S_0$  é a área inicial [ $\text{mm}^2$ ]

$\beta$  é o coeficiente de dilatação térmica da área [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ]

$\Delta T$  é a variação de temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ]

#### 5.4 Compressão elástica de componentes

O anel espaçador é montado no conjunto com carga de compressão unidimensional. O comportamento será elástico caso a tensão resultante aplicada da peça seja menor ou igual a tensão admissível elástica, de acordo com a equação (9)

$$(\sigma_r \leq \sigma_e) \quad (9)$$

Caso seja satisfeita a equação (9) o deslocamento é elástico e pode ser calculado pela elasticidade unidimensional através das equações (10), (11) e (12).

$$\sigma_r = \frac{F}{A_t} = E \cdot \epsilon \quad (10)$$

$$\epsilon = \Delta L / L_0 \quad (11)$$

$$A_t = \frac{\pi}{4} \cdot (D_e - D_i) \quad (12)$$

Onde:

$\sigma_e$  é a tensão admissível elástica [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]

$\sigma_r$  é a tensão resultante no produto devido a carga aplicada [N/m<sup>2</sup>]

$F$  é a carga de prensagem aplicada perpendicularmente a área [N]

$A_t$  é a área total [m<sup>2</sup>]

$E$  é o módulo de elasticidade [N/m<sup>2</sup>]

$\epsilon$  é o deslocamento relativo [adimensional]

$\Delta L$  é a variação do comprimento com a carga aplicada [m]

$L_0$  é o comprimento inicial [m]

$D_e$  é o diâmetro externo do shim [m<sup>2</sup>]

$D_i$  é o diâmetro interno do shim [m<sup>2</sup>]

## 5.5 Ajuste forçado (prensagem) de anéis cilíndricos

A montagem da capa na carcaça acontece sob carga. Segundo Shigley, 1984, as tensões e deslocamentos devido a prensagem de anéis cilindros de mesmo comprimento podem ser calculados através das equações (13), (14), (15) e (16).

O método ou desenvolvimento utilizado para obter estas equação

$$p = \frac{E \cdot \delta}{b} \cdot \left[ \frac{(c^2 - b^2) \cdot (b^2 - a^2)}{2 \cdot b^2 \cdot (c^2 - a^2)} \right] \quad (13)$$

$$\delta = \delta_0 + \delta_i \quad (14)$$

$$\delta_0 = \frac{b \cdot p}{E} \cdot \left( \frac{c^2 + b^2}{c^2 - b^2} + \mu \right) \quad (15)$$

$$\delta_i = \frac{b \cdot p}{E} \cdot \left( \frac{b^2 + a^2}{b^2 - a^2} - \mu \right) \quad (16)$$

Onde:

$p$  é a pressão de contato [N/mm<sup>2</sup>]

$\delta$  é o deslocamento total [mm]

$\delta_0$  é o acréscimo no raio do cilindro externo [mm]

$\delta_i$  é o decréscimo no raio do cilindro interno [mm]

$a$  é o raio interno do cilindro interno [mm]

$b$  é a média do raio externo do cilindro interno e do raio interno do cilindro externo [mm]

$c$  é o raio externo do cilindro externo [mm]

$\mu$  é o coeficiente de Poisson [adimensional]

Caso haja interesse no método utilizado por Shigley para obter as equações de prensagem de anéis cilíndricos concêntricos é recomendado uma consulta detalhada a bibliografia citada.

## 5.6 Outros métodos

Além dos métodos citados nos itens anteriores existem ainda outras equações e procedimentos mais simples que serão utilizados para cálculo. Estes por serem particulares a cada tipo de análise e também pela sua facilidade de utilização serão demonstrados juntamente com a análise de cada item no capítulo 6.

## 5.7 Resumo da metodologia

No capítulo 6 os procedimentos descritos nos itens acima serão realizados em cada característica de produto, medição e montagem, conforme representado na tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Lista dos itens com os métodos utilizados para a análise.

Item	Descrição	Método	Erro (mm)
1	Erro de medição da HCBSBS	Estatístico	
2	Variação da HCBSBS devido ao erro de perpendicularidade da carcaça	Outro	
3	Variação dimensional da HCBSBS com a pré-carga dos rolamentos do pinhão	Elementos finitos	
4	Variação $\varnothing$ de prensagem dos rolamentos do pinhão devido a pré-carga do diff-case	Elementos finitos	
5	Variação da carcaça com a temperatura de medição da HCBSBS na usinagem e na montagem.	Elementos finitos	
6	Erro dimensional do PHBFRGCP no fornecedor	Estatístico	
7	Erro dimensional do PHH no fornecedor	Estatístico	

Tabela 5.1 - Lista dos itens com os métodos utilizados para a análise.

Item	Descrição	Método	Erro (mm)
8	Variação do gear set com a temperatura de medição e de montagem	Carga térmica	
9	Erro de medição da altura do pinhão	Estatístico	
10	Erro de medição do diâmetro do rolamento	Estatístico	
11	Erro da aplicação da pré-carga	Estatístico	
12	Erro devido a rigidez da máquina na medição da altura do pinhão	Outro	
13	Erro no cálculo de compensação devido a interferência entre capa e carcaça	Ajuste de anéis	
14	Variação no cálculo do shim devido ao erro de medição do TTR	Estatístico	
15	Erro devido ao run-out da altura do pinhão.	Estatístico	
16	Diferença entre shim montado e selecionado devido a seleção por classes.	Outro	
17	Erro de medição do shim	Estatístico	
18	Compressão plástica do shim, capa e carcaça devido a força de prensagem das capas	Compressão plástica	
19	Erro dimensional do shim devido a variação de pré-carga dos rolamentos	Compressão elástica	
20	Erro dimensional devido a diferença do TTR posto 40 e 70	Estatístico	
21	Erro de medição na zeiss	Estatístico	

Após a análise a última coluna da direita da tabela 5.1 será preenchida com cada erro calculado. Com estes erros individuais será calculado o erro total do processo completo.

Para obter o erro total, os erros individuais serão somados, esta soma deve-se ao fato de que cada medição é totalmente independente das demais, ou seja, não existe transmissão de variância entre os processos. Caso existisse, seria recomendado a utilização do procedimento citado por Lawless, 1998 e 1999 ou mesmo Mackay, 1999, citados na bibliografia.

Esta soma pode ser facilmente explicada da seguinte forma: Sejam M e N duas cotas, seja  $\pm \Delta M$  a tolerância da cota M e  $\pm \Delta N$  a tolerância da cota N, o somatório as cotas pode ser representado pela cota Q com tolerância de  $\pm \Delta Q$  de acordo com a equação (17)

$$Q \pm \Delta Q = (M \pm \Delta M) + (N \pm \Delta N) \quad (17)$$

Separando os termos tem-se:

$$Q = (M + N) \quad \Delta Q = (\pm \Delta M \pm \Delta N)$$

Este procedimento pode ser facilmente comprovado avaliando um exemplo prático: Sejam M e N duas cotas representadas pelos seguintes valores:  $M = 10 \pm 0,1mm$  e  $N = 20 \pm 0,2mm$ . O somatório das cotas para a tolerância inferior é  $Q_i = 9,9 + 18,8 = 28,7mm$  e para a tolerância superior é  $Q_s = 10,1 + 20,2 = 30,3mm$ , portanto  $Q = 30 \pm 0,3mm$ .

Como neste trabalho está sendo avaliada somente a dispersão ou delta do erro, este procedimento poderá ser utilizado. Segue na equação (18) o somatório para os 21 itens que serão avaliados.

$$E_t = \sum_{i=1}^{21} E_i \quad (18)$$

Onde:

$E_i$  é o erro de cada item [mm]

$E_t$  é o erro total [mm]



## 6 AVALIAÇÃO DOS ERROS INDIVIDUAIS LISTADOS NA TABELA 5.1

### 6.1 Item 1 - Erro de medição da HCBSBS

A cota chamada de HCBSBS (Housing Center Bore to Shim Bearing Surface), representada na figura 3.9 é medida em uma máquina tridimensional pertencente a célula de usinagem da carcaça.

Após a medição é colada uma etiqueta na carcaça com os dados dimensionais, quando o código de barras da etiqueta é lido no posto 15 os dados são carregados diretamente para o banco de dados da linha de montagem.

Conforme pode ser observado na equação (3) esta cota entra diretamente no cálculo do espaçador, ou seja, se houver um erro associado a esta medição haverá o mesmo erro associado ao cálculo do shim. Partindo do princípio que o objetivo é encontrar uma variação de processo e não um desvio da sua média (um desvio da média seria corrigido facilmente por C1) foram realizados testes estatísticos na máquina de medição da usinagem para determinar o seu erro de medição.

Para avaliar a variação de medição existente nesta máquina da usinagem foram realizadas 30 medições com a mesma peça, sendo estas medições representadas na tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores para 30 medições realizadas na mesma peça (valores ordenados de forma crescente).

Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
1	124,309	11	124,311	21	124,312
2	124,310	12	124,311	22	124,312
3	124,310	13	124,311	23	124,312
4	124,310	14	124,311	24	124,312
5	124,310	15	124,311	25	124,312
6	124,310	16	124,311	26	124,313
7	124,310	17	124,312	27	124,313
8	124,310	18	124,312	28	124,314
9	124,310	19	124,312	29	124,314
10	124,311	20	124,312	30	124,315

A média, desvio padrão e dispersão deste processo podem ser calculados pelas equações (4), (5) e (6)

$$\bar{x}_1 = 124,3114mm \quad \sigma_1 = 0,0014mm \quad 6\sigma_1 = 0,0083 mm$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$E_1 = 6\sigma_1 = 0,0083 mm = 8,30 \cdot 10^{-3} mm$$

## **6.2 Item 2 - Variação da HCBSBS devido ao erro de perpendicularidade da carcaça**

Conforme explicado no item 6.1, esta cota é medida na máquina tridimensional da usinagem considerando que a face do shim (Shim Bearing Surface) é perpendicular ao centro da carcaça, ou seja, a medida é a menor distância entre a o plano gerado pela face do shim e a linha de centro da carcaça.

De acordo com o desenho da carcaça é tolerável um desvio de perpendicularidade de até 0,03mm, caso o pinhão seja montado neste plano ele irá copiá-lo, ou seja, estará montado perpendicularmente com o Shim Bearing Surface causando um erro de posição em relação a cota medida.

Segue na figura 6.1 uma vista do desenho da carcaça onde é possível visualizar o diâmetro da sede do rolamento, a tolerância de perpendicularidade e a distância da linha de centro a face do shim.

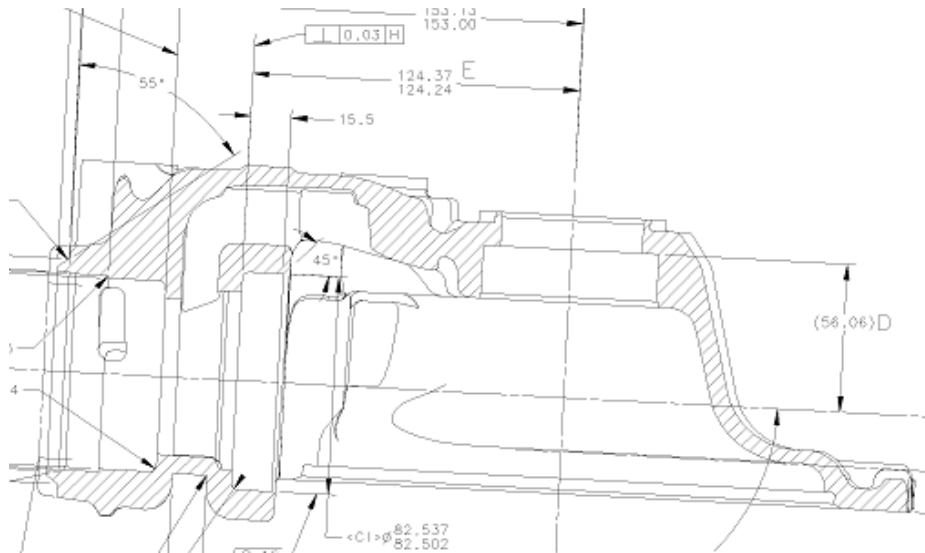


Figura 6.1- Vista do desenho da carcaça com as cotas em análise.

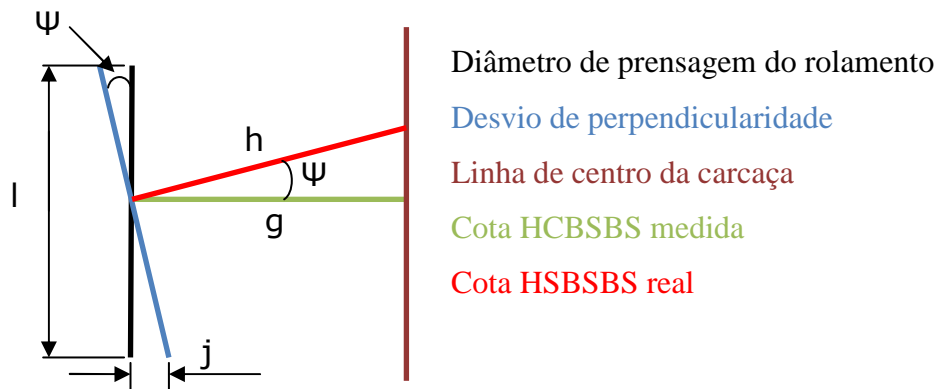


Figura 6.2 – Diagrama da carcaça com as cotas em análise.

Onde:

$g$  é a cota HCBSBS medida [mm]

$h$  é a cota HCBSBS real (trajetória percorrida pelo pinhão) [mm]

$l$  é o diâmetro da carcaça onde é prensado a capa do rolamento [mm]

$j$  é o erro de perpendicularidade permitido pelo desenho da carcaça [mm]

$\Psi$  é o ângulo entre a cota HCBSBS medida e cota HCBSBS real [°]

De acordo com o diagrama da figura 6.2 cota  $b$  pode ser calculada pelas equações 18 e 19:

$$h = \frac{g}{\cos \Psi} \quad (18)$$

$$\tan \Psi = \frac{j}{(l/2)} \quad (19)$$

O erro corresponde a diferença entre a cota “g” e “h”, conforme representado na equação (20)

$$E_2 = h - g \quad (20)$$

Utilizando as equações (18), (19) e (20), e considerando o erro máximo de perpendicularidade de 0,03mm, diâmetro da carcaça onde é prensado o rolamento de 82,502mm e distância máxima de 124,37mm é possível obter o valor do erro.

$$E_2 = 3,29 \cdot 10^{-5} mm$$

Este valor “h” pode ser considerado igual à variação permissível dentro da tolerância de produto da carcaça, que por sua vez é um processo capaz dentro de  $6\sigma$  com 99,73% de confiança.

### **6.3 Item 3 - Variação dimensional da HCBSBS com a pré-carga dos rolamentos do pinhão**

A medição da carcaça ocorre sem a pré-carga dos rolamentos do pinhão, porém na condição de produto montado esta pré-carga existe. O objetivo deste item é verificar se existe variação da cota da face de montagem do shim até o centro da carcaça HCBSBS (Housing Center Bore To Shim Bearing Surface) com a pré-carga aplicada. Caso exista alguma variação este erro entra diretamente na fórmula do shim ocasionando um desvio no cálculo e conseqüentemente erro de montagem.

Segue na figura 6.3 um desenho da carcaça mostrando a cota HCBSBS e as faces onde é aplicada a pré-carga.

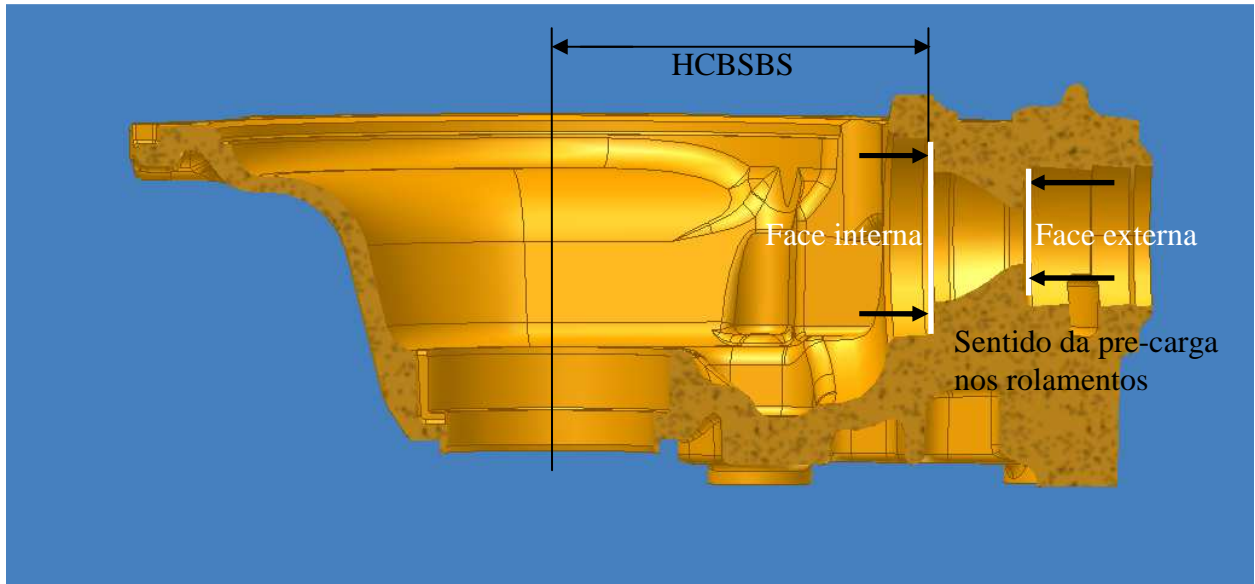


Figura 6.3 – Desenho da carcaça com a cota medida HCBSBS e as faces onde é aplicada a pré-carga de montagem.

A especificação de pré-carga para os rolamentos do pinhão é de  $4448 \pm 890$  N, como está sendo avaliada somente a dispersão da medida será utilizada um delta de carga de 1780N que corresponde a tolerância de montagem permitida pelo desenho do produto.

Nesta análise foi considerada que a face interna esta engastada e a carga de 1780N foi aplicada na face externa (ver figura 6.3 para identificar a face interna e externa).

É sabido que a carcaça é feita de aço médio carbono, porém não é conhecido exatamente a liga metálica na qual o produto é feito, como o objetivo é medir somente deslocamentos foi considerado no cálculo o módulo de elasticidade de um aço médio carbono SAE 1045 ( $E = 205\text{GPa}$ ), como o módulo de elasticidade quase não varia com a liga metálica esta consideração poderá ser utilizada sem ocasionar um erro significativo na análise.

Para esta análise foi considerada elasticidade tridimensional, material homogêneo e isotrópico com as propriedades constantes nos 3 eixos.

Como o objetivo é analisar a variação do HCBSBS (indicado na figura 6.3) foram escolhidos 4 pontos dispostos a 90 graus um do outro próximos a fronteira do furo da carcaça. O objetivo é medir o deslocamento nestes pontos e considerar que o deslocamento no ponto médio (centro do furo) é a média aritmética destes 4 valores. Seguem nas figuras 6.4 e 6.5 desenhos da carcaça deformada com as faixas de deslocamento indicados em escalas de cores e também com os pontos de deslocamento medidos.

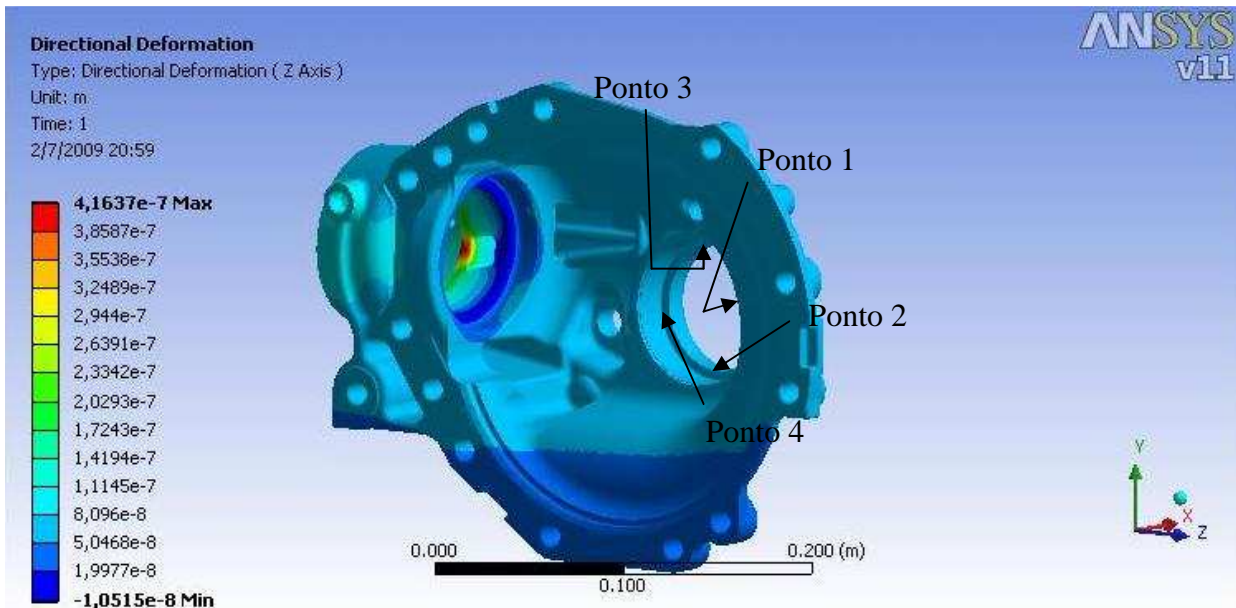


Figura 6.4 – Resultado da análise indicando os deslocamentos em metros na carcaça para a carga aplicada.

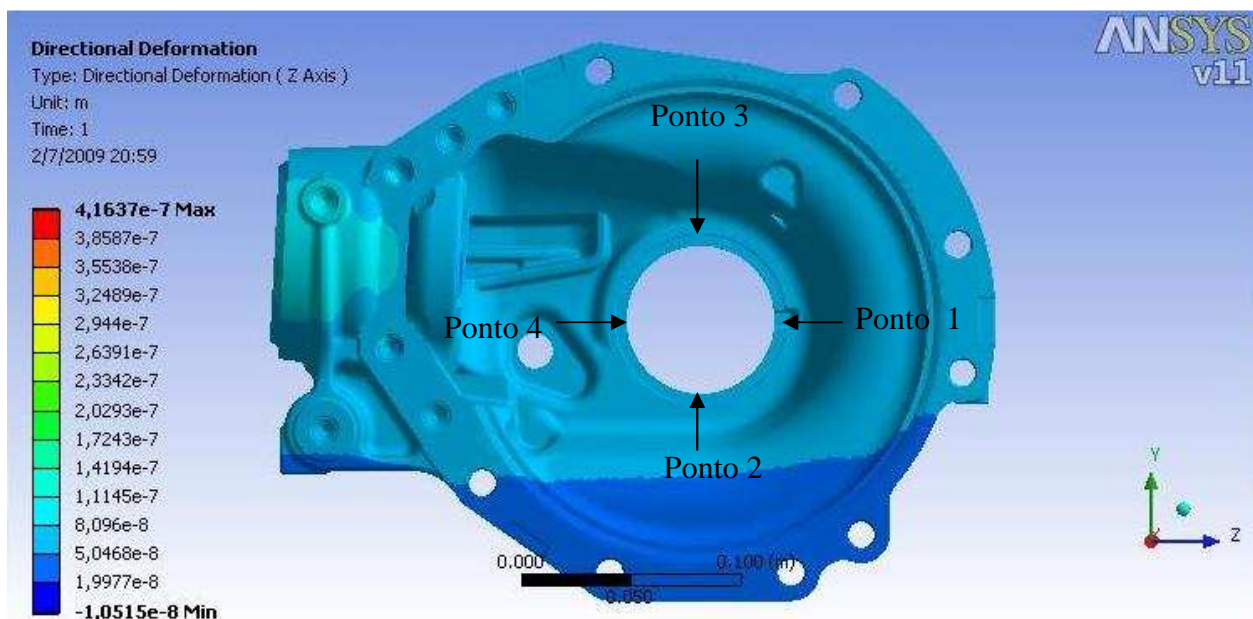


Figura 6.5 – Vista externa da carcaça com os resultados de deslocamento.

Seguem na tabela 6.2 os valores de deslocamento para os pontos indicados na figura 6.4 e 6.5 com indicação no número de nós e elementos. Nesta mesma tabela aparece a média, que é calculada como sendo a média aritmética dos 4 pontos em análise. Na última coluna da tabela tem-se os valores percentuais de variação do deslocamento com o aumento do número de nós da malha, como na última linha a variação é praticamente zero a malha pode ser considerada suficientemente refinada e os resultados podem ser obtidos.

Tabela 6.2 – Valores de deslocamento obtidos na análise para  $\Delta F = 1780N$ .

Nós	Elementos	Deslocamento em Z (m)					Variação percentual
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média	
306209	180325	7,05E-08	6,62E-08	6,54E-08	6,06E-08	6,57E-08	
481503	289966	7,11E-08	6,71E-08	6,63E-08	6,18E-08	6,66E-08	1,37%
755875	462794	7,23E-08	6,84E-08	6,75E-08	6,29E-08	6,78E-08	1,79%
1083866	670459	7,31E-08	6,91E-08	6,82E-08	6,34E-08	6,84E-08	0,97%
1314191	817891	7,32E-08	6,93E-08	6,84E-08	6,39E-08	6,87E-08	0,37%
1514879	947394	7,32E-08	6,93E-08	6,84E-08	6,38E-08	6,87E-08	0,00%

Com estes resultados é possível concluir que o erro devido a medição da HCBSBS sem a pré-carga é de:

$$E_3 = 6,87 \cdot 10^{-8}m = 6,87 \cdot 10^{-5}mm \text{ (valor da média da última linha)}$$

Utilizando elementos finitos ainda existe o erro devido ao método em si, porém este não será considerado pois o seu valor não seria representativo neste caso.

#### **6.4 Item 4 - Variação $\emptyset$ de prensagem dos rolamentos do pinhão devido a pré-carga do diff-case**

Foi levantada a hipótese que no produto completamente montado a pré-carga nos rolamentos do diff-case poderia causar um deslocamento no diâmetro do rolamento do pinhão e conseqüentemente movê-lo no sentido do centro da carcaça, necessitando desta maneira uma compensação negativa do shim.

Pelo método de montagem proposto este problema não seria identificado devido ao fato da montagem do diff-case ocorrer após a montagem e medição do pinhão.

Como neste trabalho esta sendo comparada a montagem do pinhão calculada com a medida, este problema não afeta o processo proposto pois não pode ser medido ou identificado, portanto a influência deste item é zero.

$$E_4 = 0 \text{ mm}$$

Fica esta análise como sugestão para um próximo trabalho onde seja avaliado o cálculo e montagem dos shims do sistema diferencial.

### **6.5 Item 5 - Variação da carcaça com a temperatura de medição da HCBSBS na usinagem e na montagem.**

A cota HCBSBS é medida na usinagem e utilizada para o cálculo do shim do pinhão. Na célula de usinagem não existe controle de temperatura no momento da medição, mas na linha de montagem o ambiente é controlado com a temperatura constante de 25°C.

A temperatura da fábrica normalmente oscila entre 35°C no verão e 5°C no inverno, o que gera um delta de 30°C. Para um dia frio, a peça é medida com uma cota menor que a cota montada, o que torna necessário uma compensação positiva na espessura do shim, já para um dia quente, a peça é medida com uma cota maior que a montada, o que gera a necessidade de uma correção negativa na espessura do shim.

Estes valores de temperatura são para épocas do ano diferentes, ou seja, não ocorrem num período de alguns dias (tempo que as peças percorrem o trajeto da usinagem para a montagem). Considerando o tempo de movimentação e o estoque de peças entre a usinagem e montagem, é possível considerar que as peças levam de 1 a 2 dias entre medição e montagem. Com base nas observações locais para este período de tempo será considerada uma variação de temperatura ambiente de 15°C a 30°C.

Na figura 6.6 esta representada a variação da HCBSBS com a temperatura de medição da carcaça, o  $\Delta L$  negativo é obtido quando a peça é medida com a temperatura abaixo da temperatura de montagem e o  $\Delta L$  positivo é obtido quando a peça é medida com a temperatura acima do ponto de montagem.



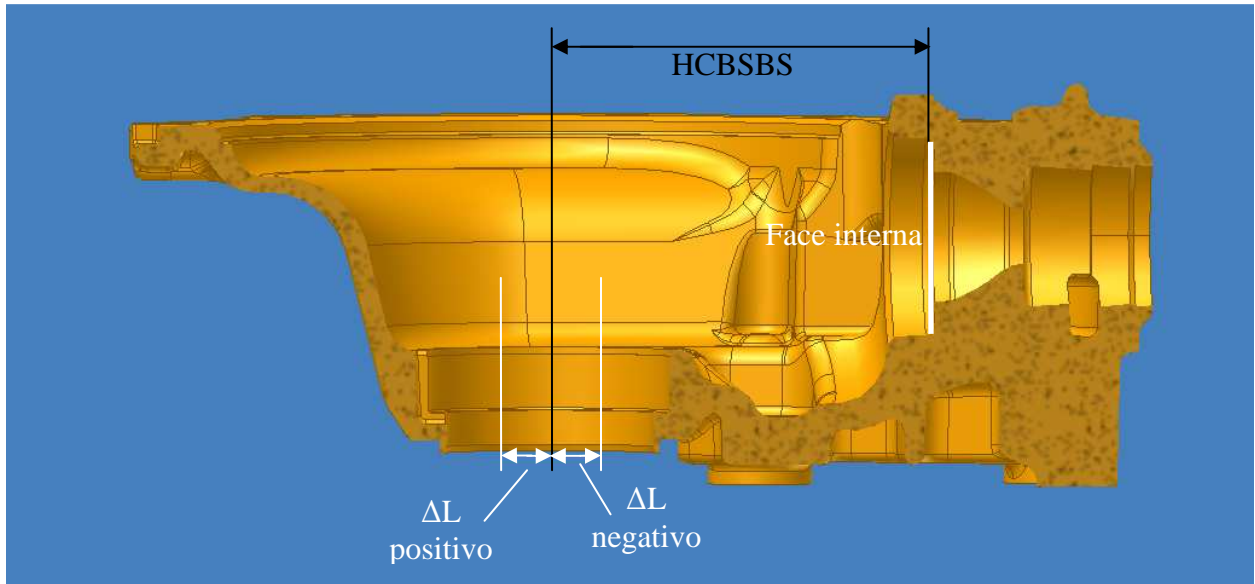


Figura 6.6 – Variação da cota HCBSBS com a temperatura.

Para obter a variação da cota com a temperatura foi utilizado o método dos elementos finitos, de maneira similar ao realizado no item 3, considerando  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$  ( $30-25^{\circ}\text{C}$ ) e coeficiente de dilatação térmica do aço de  $\alpha = 1,15 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ . Nesta análise o sólido foi engastado na face interna indicada na figura 6.6 (mesma face engastada que foi utilizada no item 3).

Tratando-se de dilatação térmica o ideal seria não engastar o sólido em toda a face, mas sim em alguns pontos, porém esta diferença não seria significativa neste caso.

O deslocamento  $\Delta L$  poderia ser calculado analiticamente utilizando o comprimento da cota, o  $\Delta T$  e o  $\alpha$ , porém como a malha já estava gerada (utilizada no item 3) optou-se por calcular o  $\Delta L$  diretamente com o software.

Seguem na figuras 6.7, 6.8 e tabela 6.3 os resultados do deslocamento da carcaça para  $\Delta T=5^{\circ}\text{C}$  indicando os 4 pontos de medição utilizados no cálculo do deslocamento do ponto médio (diâmetro da carcaça).

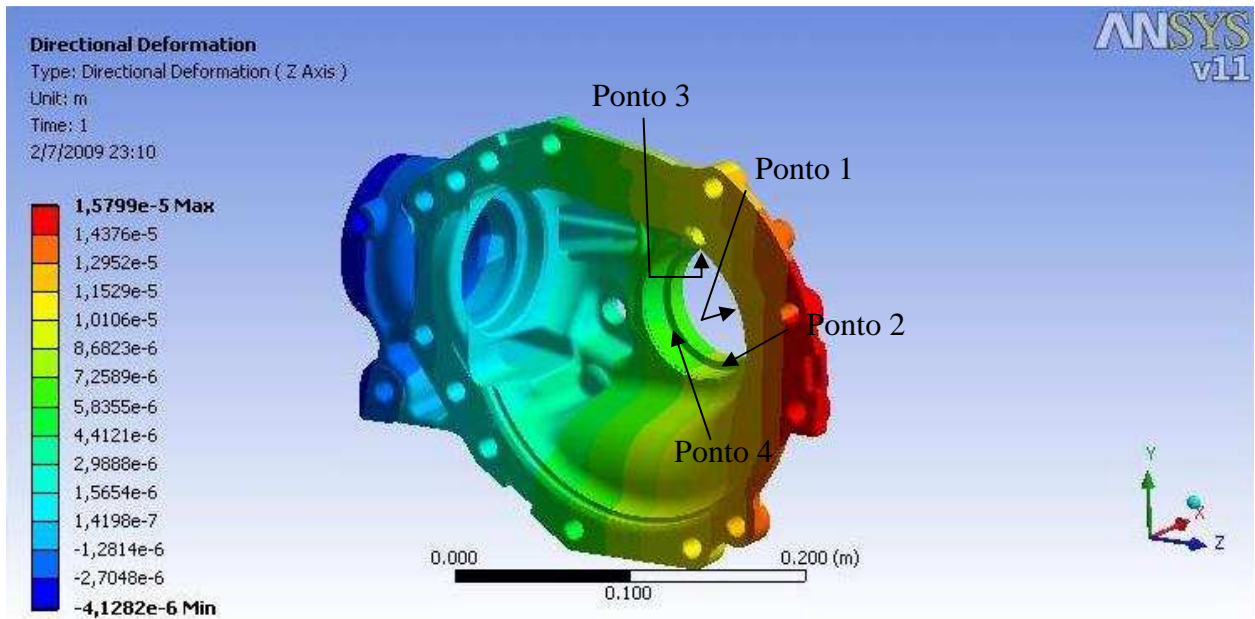


Figura 6.7 – Variação dimensional da carcaça com a temperatura vista isométrica.

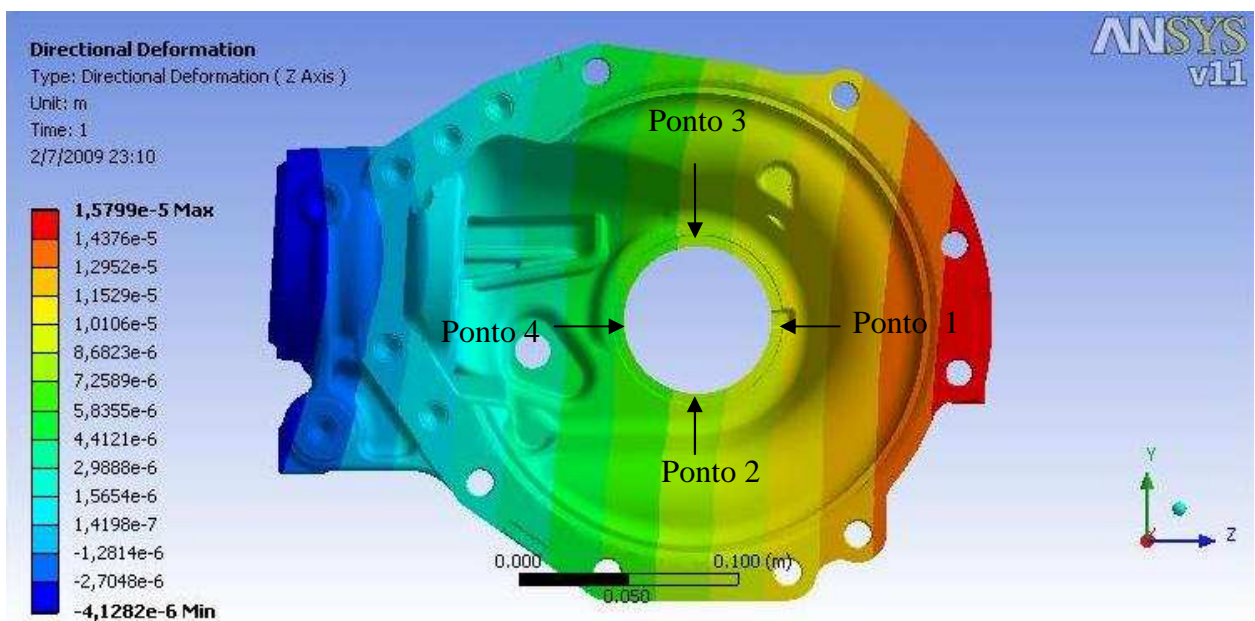


Figura 6.8 – Variação dimensional da carcaça com a temperatura vista superior.

Tabela 6.3 – Valores de deslocamento obtidos na análise para  $\Delta T = 5^{\circ}\text{C}$ .

Nós	Elementos	Deslocamento em Z (m)				
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média
306209	180325	9,71E-06	7,25E-06	8,46E-06	5,92E-06	7,83E-06
481503	289966	9,69E-06	7,23E-06	8,45E-06	5,91E-06	7,82E-06
755875	462794	9,70E-06	7,24E-06	8,45E-06	5,91E-06	7,83E-06
1083866	670459	9,70E-06	7,24E-06	8,46E-06	5,92E-06	7,83E-06
1314191	817891	9,71E-06	7,24E-06	8,46E-06	5,92E-06	7,83E-06
1514879	947394	9,70E-06	7,24E-06	8,45E-06	5,91E-06	7,83E-06

Nesta análise esta sendo avaliada a dispersão para  $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$  (30-15 $^{\circ}\text{C}$ ), portanto os valores da tabela 6.3 devem ser multiplicados por 3. Esta multiplicação pode ser realizada diretamente sem problemas pois neste caso a variação dimensional é diretamente proporcional a temperatura. Seguem na tabela os valores de deslocamento corrigidos para  $\Delta T=15^{\circ}\text{C}$ .

Tabela 6.4 – Valores de deslocamento para  $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$ .

Nós	Elementos	Deslocamento em Z (m)				
		Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Média
306209	180325	2,91E-05	2,17E-05	2,54E-05	1,78E-05	2,35E-05
481503	289966	2,91E-05	2,17E-05	2,53E-05	1,77E-05	2,35E-05
755875	462794	2,91E-05	2,17E-05	2,54E-05	1,77E-05	2,35E-05
1083866	670459	2,91E-05	2,17E-05	2,54E-05	1,77E-05	2,35E-05
1314191	817891	2,91E-05	2,17E-05	2,54E-05	1,78E-05	2,35E-05
1514879	947394	2,91E-05	2,17E-05	2,54E-05	1,77E-05	2,35E-05

Utilizando o valor da média de deslocamento da tabela 6.4 tem-se:

$$E_5 = 2,35 \cdot 10^{-5} m = 2,35 \cdot 10^{-2} mm$$

## 6.6 Item 6 - Erro dimensional do PHBFRGCP no fornecedor

O Pinion Head Bearing Face to Ring Gear Center Point (PHBFRGCP) é o set-point de montagem medido para cada gear set diretamente na unidade do cliente localizada no México, que fornece o gear set utilizado neste produto.

Esta dimensão é o set point de montagem, então a princípio não caberia avaliar o erro do set point, pois esta é a referencia propriamente dita, porém é possível que o valor medido para o gear set não seja o valor real do conjunto, ou seja, poderia haver um erro de medição no fornecedor.

Para avaliar este erro foi utilizado o procedimento estatístico com trinta medições realizadas na mesma peça no fornecedor do gear set. Estes valores estão representados de forma crescente na tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Medições do gear set realizadas no cliente (valores ordenados de forma crescente).

Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
1	100,995	11	101,000	21	101,002
2	100,995	12	101,000	22	101,002
3	100,996	13	101,000	23	101,002
4	100,997	14	101,000	24	101,003
5	100,998	15	101,000	25	101,003
6	100,998	16	101,001	26	101,005
7	100,998	17	101,001	27	101,005
8	100,999	18	101,001	28	101,006
9	101,000	19	101,001	29	101,007
10	101,000	20	101,002	30	101,007

A média, desvio padrão e dispersão deste processo podem ser calculados pelas equações (4), (5) e (6)

$$\bar{x}_6 = 101,0008mm$$

$$\sigma_6 = 0,0031mm$$

$$6\sigma_6 = 0,0187 mm$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$E_6 = 6\sigma_6 = 0,0187 mm = 1,87 \cdot 10^{-2} mm$$

## 6.7 Item 7 - Erro dimensional do PHH no fornecedor

O Pinion Head Height (PHH) também é medido no fornecedor do gear set, portanto também esta sujeito a erro de medição. Para obter este erro foi executado o mesmo processo descrito no item 6.6. Segue na tabela 6.6 os valores das 30 medições realizadas na mesma peça.

Tabela 6.6 – Medições realizadas no cliente (valores ordenados de forma crescente).

Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
1	39,098	11	39,099	21	39,101
2	39,098	12	39,099	22	39,101
3	39,098	13	39,100	23	39,101
4	39,098	14	39,100	24	39,101
5	39,098	15	39,100	25	39,101
6	39,099	16	39,101	26	39,102
7	39,099	17	39,101	27	39,102
8	39,099	18	39,101	28	39,102
9	39,099	19	39,101	29	39,103
10	39,099	20	39,101	30	39,103

A média, desvio padrão e dispersão deste processo pode ser calculados pelas equações (4), (5) e (6)

$$\bar{x}_7 = 39,1002mm$$

$$\sigma_7 = 0,0015mm$$

$$6\sigma_7 = 0,0089 mm$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$E_7 = 6\sigma_7 = 0,0089 mm = 8,91 \cdot 10^{-3} mm$$

## 6.8 Item 8 - Variação do gear set com a temperatura de medição e de montagem

O gear set proveniente do México é usinado na temperatura de 15 °C a 45 °C e montado na temperatura controlada de 25 °C.

Como esta sendo avaliada a dispersão dimensional e não o desvio em relação a média (o desvio em relação a média pode ser corrigido através da constante de ajuste) será avaliado o erro de medição devido ao delta de 30 °C relativo a condição de usinagem do gear set.

Como pode ser observado na figura 3.15 e 3.16, a dilatação térmica provocará um aumento da cabeça do pinhão aproximando o mesmo do centro da carcaça e também um aumento do diâmetro da coroa, contrário ao deslocamento do pinhão. Desta maneira o erro dimensional deve ser somado pois ocorre em sentidos opostos, afastando o par da condição real de montagem.

A variação do comprimento do pinhão pode ser calculado pela equação (7), considerando  $L_0 = 39,1mm$ ,  $\alpha = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$  tem-se

$$\Delta L_{pinhão} = 0,0129mm = 1,29 \cdot 10^{-2}mm$$

Onde:

$\Delta L_{pinhão}$  é a variação dimensional do pinhão [mm]

No caso da coroa é necessário verificar o seu aumento da área, para depois verificar o aumento do raio, sendo este delta do raio o deslocamento da coroa em direção ao pinhão. Para este procedimento serão utilizadas as equações (8), (22), (23), (24) e (25).

$$S = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (22)$$

$$S_f = \Delta S + S_0 \quad (23)$$

$$r = \frac{d}{2} \quad (24)$$

$$\Delta r = r_f - r_0 \quad (25)$$

Onde:

$S$  é a área da coroa [ $\text{mm}^2$ ]

$d$  é o diâmetro da coroa [mm]

$S_f$  é a área final da coroa [ $\text{mm}^2$ ]

$S_0$  é a área inicial da coroa [ $\text{mm}^2$ ]

$\Delta S$  é a variação da área [ $\text{mm}^2$ ]

$\Delta r$  é a variação do raio [mm]

$r_0$  é o raio inicial [mm]

$r_f$  é o raio final [mm]

Considerando  $d_0 = 146,5\text{mm}$ ,  $\beta = 2,4 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  e  $\Delta T = 30^\circ\text{C}$  tem-se:

$$S = 16856,4\text{mm}^2, \quad \Delta S = 12,14\text{mm}^2, \quad S_f = 16868,54\text{mm}^2$$

$$d_f = 145,55\text{mm}, \quad r_f = 73,28\text{mm}, \quad \Delta r = 0,0264 = 2,64 \cdot 10^{-2}\text{mm}$$

O erro de posicionamento total é a soma do erro do pinhão com o raio da coroa. Este erro deve ser somado pois com a temperatura o pinhão dilata movendo-se para o centro da carcaça, a coroa por sua vez permanece centrada variando o seu diâmetro e conseqüentemente o seu raio para fora da carcaça. Estes movimentos ocorrem em sentidos opostos aproximando os componentes.

Este erro pode ser calculado pela equação (26)

$$E_8 = \Delta L_{\text{pinhão}} + \Delta r \quad (26)$$

Considerando  $\Delta L_{\text{pinhão}} = 1,29 \cdot 10^{-2}\text{mm}$  e  $\Delta r = 2,64 \cdot 10^{-2}\text{mm}$  tem-se:

$$E_8 = 3,93 \cdot 10^{-2}\text{mm}$$

### 6.9 Item 9 - Erro de medição da altura do pinhão

A altura da cabeça do pinhão + rolamento é medida no posto 40, conforme descrito no capítulo 3. Para analisar este item foi seguido o mesmo procedimento estatístico utilizado no item 1. Segue na tabela 6.7 o resultados das medições realizadas.

Tabela 6.7 – Valores medidos para a altura do pinhão no posto 40 da linha de montagem (valores ordenados de forma crescente)

Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
1	61,116	11	61,117	21	61,118
2	61,116	12	61,117	22	61,119
3	61,117	13	61,118	23	61,119
4	61,117	14	61,118	24	61,119
5	61,117	15	61,118	25	61,119
6	61,117	16	61,118	26	61,120
7	61,117	17	61,118	27	61,120
8	61,117	18	61,118	28	61,120
9	61,117	19	61,118	29	61,121
10	61,117	20	61,118	30	61,121

A média, desvio padrão e a dispersão deste processo podem ser calculados pelas equações (4), (5) e (6)

$$\bar{x}_9 = 61,1181mm$$

$$\sigma_9 = 0,0013mm$$

$$6\sigma_9 = 0,0079 mm$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$E_9 = 6\sigma_9 = 0,0079 mm = 7,90 \cdot 10^{-3} mm$$



### 6.10 Item 10 - Erro de medição do diâmetro do rolamento

O diâmetro do rolamento é medido no posto 40 e posteriormente utilizado no cálculo da compensação de prensagem, conforme descrito no capítulo 3. Para analisar este item foi seguido o mesmo procedimento estatístico utilizado no item 1. Seguem na tabela 6.8 os resultados das medições realizadas.

Tabela 6.8 – Valores medidos o diâmetro do rolamento no posto 40 da linha de montagem (valores ordenados de forma crescente).

Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
1	82,572	11	82,574	21	82,575
2	82,573	12	82,574	22	82,575
3	82,573	13	82,574	23	82,575
4	82,573	14	82,575	24	82,575
5	82,574	15	82,575	25	82,576
6	82,574	16	82,575	26	82,576
7	82,574	17	82,575	27	82,576
8	82,574	18	82,575	28	82,576
9	82,574	19	82,575	29	82,576
10	82,574	20	82,575	30	82,576

A média, desvio padrão e a dispersão deste processo podem ser calculados pelas equações (4), (5) e (6)

$$\bar{x}_{10} = 82,5777 \text{ mm}$$

$$\sigma_{10} = 0,0010 \text{ mm}$$

$$6\sigma_{10} = 0,0061 \text{ mm}$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$6\sigma_{10} = 0,0061 \text{ mm} = 6,12 \cdot 10^{-3} \text{ mm}$$

Este valor de erro não entra diretamente no cálculo do shim, mas entra no cálculo da compensação de prensagem representada pela equação 2. Para avaliar a sua influência, foi realizada uma manipulação algébrica na equação 2, conforme demonstrado na equação 27:

$$PHBCIDC = \frac{f}{2 \cdot \tan \phi} \cdot PHBD2 - \frac{f}{2 \cdot \tan \phi} \cdot HPHBD \quad (27)$$

Considerando os valores já citados para o front de  $f = 0,7$  e  $\phi = 24^\circ$  tem-se:

$$PHBCIDC = 0,7861 \cdot PHBD2 - 0,7861 \cdot HPHBD$$

Considerando que está sendo avaliado somente a variação de PHBD2, mantendo os demais itens constantes a equação fica reduzida a seguinte forma:

$$E_{10} = \Delta PHBCIDC = 0,7861 \cdot \Delta PHBD2 \quad (28)$$

Portanto o erro de posicionamento deste item é:

$$E_{10} = \Delta PHBCIDC = 0,7861 \cdot 6\sigma_{10} = 0,7861 \times 0,0061 = 0,0048mm = 4,81 \cdot 10^{-3}mm$$

### 6.11 Item 11 - Erro da aplicação da pré-carga

A altura do pinhão + rolamento (PHH2) é medida mediante uma carga de processo de 4450N, como existe uma pequena variação no sistema de aplicação de carga esta variação é transmitida diretamente para a medida do mesmo.

Para o cálculo deste erro pode ser utilizada a constante elástica do conjunto chamada stiffness (já comentada no capítulo 3) e a equação (29).

$$E_x = E_F / K \quad (29)$$

Onde:

$E_F$  é o erro de aplicação da carga [N]

$K$  é o stiffness médio dos conjuntos [N/mm]

$E_x$  é o erro dimensional devido ao erro de carga [mm]

Para determinar o stiffness médio do conjunto foram realizadas 30 medições em conjuntos diferentes. Estes valores estão representados na tabela 6.9.

Tabela 6.9 – Valores medidos para o stiffness de 30 peças diferentes.

Medição	Stiffness (N/mm)	Medição	Stiffness (N/mm)	Medição	Stiffness (N/mm)
1	122483,22	11	124149,66	21	116613,42
2	119281,05	12	111963,19	22	115873,016
3	117363,34	13	114779,88	23	120065,79
4	122895,66	14	107988,16	24	116242,04
5	120065,79	15	118122,98	25	110606,06
6	116242,04	16	117363,34	26	119281,05
7	125862,07	17	118122,98	27	103693,18
8	116242,04	18	122073,58	28	108955,23
9	117363,34	19	103107,34	29	117741,94
10	120065,79	20	116613,42	30	118892,51

O stiffness médio pode ser calculado pela equação (5)

$$K = 116670,44mm$$

Sabendo-se que a variação máxima de pré-carga permitida para o processo é de 100N, pode-se calcular o erro dimensional pela equação (29)

$$E_x = E_{11} = 0,00086mm = 8,6 \cdot 10^{-4}mm$$

## 6.12 Item 12 - Erro devido a rigidez da máquina na medição da altura do pinhão

A princípio foi levantada a hipótese de que uma falta de rigidez da máquina pudesse afetar a medição da altura do pinhão, porém mesmo que afete o erro seria sistemático, o que seria facilmente corrigido pela constante de ajuste. Mesmo existindo erro aleatório este estaria contido dentro do processo de medição da altura do pinhão (já avaliado item 9).

Com estas constatações foi concluído que este o erro deste item é zero, portanto:

$$E_{12} = 0$$

### 6.13 Item 13 - Erro no cálculo de compensação devido a interferência entre capa e carcaça

Conforme demonstrado no capítulo 3 é realizada uma compensação dimensional na prensagem da capa na carcaça, esta compensação representa o deslocamento do pinhão para o centro da carcaça, que aumenta com o aumento da interferência de prensagem.

No capítulo 5 foi realizada uma revisão bibliográfica sobre este processo de prensagem, a idéia proposta neste item é comparar o processo atual com o recomendado pela bibliografia encontrando a diferença entre eles.

A comparação será realizada avaliando a interferência máxima e mínima de prensagem, comparando o resultado dos 2 métodos de cálculo. Seguem na tabela 6.10 os valores de diâmetros máximos e mínimos para a carcaça e capa do rolamento.

Tabela 6.10 – Valores máximos e mínimos para a carcaça e capa.

Diâmetro	Máximo (mm)	Mínimo (mm)
Carcaça	82,537	82,502
Capa	82,605	82,544

Utilizando os valores da tabela 6.10,  $E = 207MPa$ ,  $\mu = 0,3$  e as equações (13), (14), (15) e (16) para o processo recomendado pela bibliografia, para interferência máxima, tem-se:

$$\delta = 5,15 \cdot 10^{-2} mm \text{ (no raio)} \quad c = 52,04 mm \quad b = 41,26 mm \quad a = 35,86 mm$$

$$\delta_0 = 2,09 \cdot 10^{-2} mm \text{ (raio)} \quad \delta_i = 3,06 \cdot 10^{-2} mm \text{ (raio)}$$

Para a interferência mínima tem-se:

$$\delta = 3,50 \cdot 10^{-3} mm \text{ (no raio)} \quad c = 52,04 mm \quad b = 41,26 mm \quad a = 35,86 mm$$

$$\delta_0 = 1,42 \cdot 10^{-3} mm \text{ (raio)} \quad \delta_i = 2,08 \cdot 10^{-3} mm \text{ (raio)}$$

Utilizando o procedimento atual (equação 2) para a interferência máxima tem-se:

$$\delta_i = 3,61. 10^{-2}mm \text{ (raio)}$$

E para a mínima tem-se:

$$\delta_i = 2,45. 10^{-3}mm \text{ (raio)}$$

Repare que ainda é necessário dividir todos estes valores pela tangente do ângulo de 24 graus do rolamento (conforme explicado no capítulo 3, posto 40). Seguem na tabela 6.11 os valores calculados já corrigidos (divididos pela tangente do ângulo).

Tabela 6.11- Comparação do deslocamento do cilindro interno entre os sistemas de cálculo.

	Cálculo Atual	Cálculo recomendado por Shigley	Diferença
Deslocamento para Interferência máxima (mm)	$8,10. 10^{-2}$	$6,87. 10^{-2}$	$1,22. 10^{-2}$
Deslocamento para Interferência mínima (mm)	$5,50. 10^{-3}$	$4,67. 10^{-3}$	$8,31. 10^{-4}$
Variação da diferença (mm)			$1,14. 10^{-2}$

Para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$E_{13} = 1,14. 10^{-2} mm$$

#### 6.14 Item 14 - Variação no cálculo do shim devido ao erro de medição do TTR

O TTR é medido no posto 40, e depois é ajustado no posto 70. Caso haja um erro de medição do posto 40 o posto 70 realizará um aperto maior ou menor no conjunto, causando assim por consequência uma alteração no posicionamento no pinhão devido a rigidez do conjunto.

Conhecendo a rigidez média do conjunto (calculada no item 11) e também a variação de carga devido a variação na medição do TTR é possível calcular a variação dimensional existente.

Para avaliar o erro de medição do TTR foi seguido o mesmo procedimento estatístico realizado no item 1. Os resultados seguem na tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Valores medidos o TTR no posto 40 (valores ordenados de forma crescente).

Medição	Valor (Nm)	Medição	Valor (Nm)	Medição	Valor (Nm)
1	2,53	11	2,662	21	2,734
2	2,546	12	2,663	22	2,734
3	2,619	13	2,683	23	2,736
4	2,632	14	2,692	24	2,739
5	2,636	15	2,693	25	2,745
6	2,64	16	2,694	26	2,747
7	2,643	17	2,697	27	2,761
8	2,649	18	2,698	28	2,775
9	2,659	19	2,709	29	2,787
10	2,661	20	2,728	30	2,795

A média, desvio padrão e dispersão deste processo pode ser calculados pelas equações (4), (5) e (6)

$$\bar{x}_{14} = 2,6896 \text{ Nm}$$

$$\sigma_{14} = 0,0624 \text{ Nm}$$

$$6\sigma_{14} = 0,3742 \text{ Nm}$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$6\sigma_{14} = 0,3742 \text{ Nm} = 3,74 \cdot 10^{-1} \text{ Nm}$$

Utilizando o gráfico de funcionamento do produto (figura 3.19) é possível constatar que a relação entre TTR e carga é linear. Para o TTR médio tem-se a carga nominal de montagem de 4450N, ou seja:

$$\frac{TTR_{medio}}{F_{medio}} = \frac{TTR_{\Delta}}{F_{\Delta}} \quad (30)$$

Onde:

$TTR_{medio}$  é o TTR médio das medidas ( $\bar{x}_{14}$ ) [Nm]

$F_{medio}$  é a força média aplicada no produto para medir o TTR [N]

$TTR_{\Delta}$  é a variação ou erro do TTR [Nm]

$F_{\Delta}$  é o erro da carga aplicada devido ao erro de medição do TTR [Nm]

Considerando  $TTR_{medio} = 2,6896Nm$ ,  $F_{medio} = 4450N$  e  $TTR_{\Delta} = 0,3742Nm$  é possível calcular o  $F_{\Delta}$  pela equação 30

$$F_{\Delta} = 619,2N$$

É possível encontrar o erro dimensional causado por esta variação de carga utilizando a equação (29) e o stiffness médio de calculado no item 11.

$$E_{14} = 0,00533mm = 5,33 \cdot 10^{-3}mm$$

### 6.15 Item 15 - Erro devido ao run-out da altura do pinhão.

No posto 40 é medido também o run-out do pinhão, ou seja, a variação de altura da face superior do mesmo durante o giro. A suspeita inicial seria que um run-out excessivo poderia causar um erro de medição na altura no pinhão, o que influenciaria diretamente o posicionamento do mesmo.

Porém após uma análise mais criteriosa foi possível identificar que este erro já está compreendido no erro de medição da altura do pinhão (item 9), portanto a sua contribuição para o erro total é nula.

$$E_{15} = 0$$

### 6.16 Item 16 - Diferença entre shim montado e selecionado devido a seleção por classes

O Shim é calculado através do procedimento citado no capítulo 3, porém é selecionado pelo operador por classes, ou seja deve ser montado no produto um shim da mesma classe daquele calculado no posto 40.

Esta seleção por classes gera erros, pois algumas vezes o shim calculado encontra-se no limite inferior da classe e o shim montado encontra-se no limite superior da classe (ou vice-versa). Segue na figura 6.11 o desenho do shim onde consta a tabela com as classes, nesta tabela é possível observar que cada classe possui um intervalo de 0,01mm, deste modo é possível montar um produto com erro de até 0,009mm.

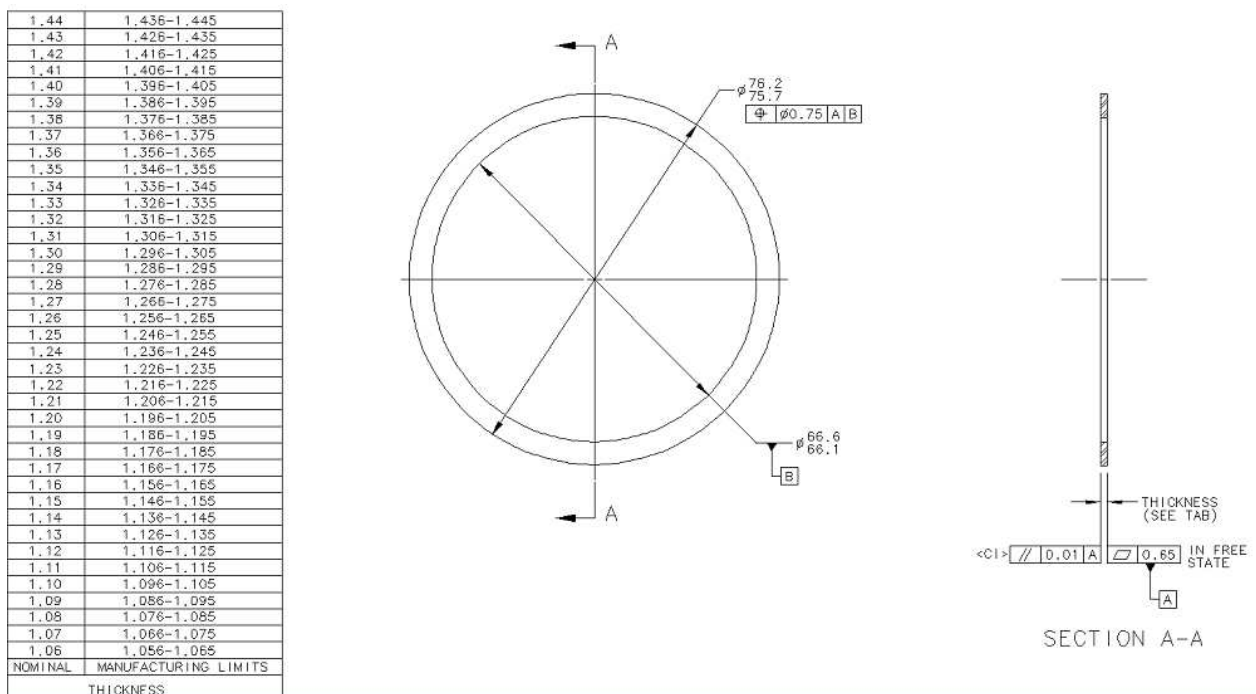


Figura 6.9 – Desenho do shim com indicação das classes dimensionais

Com a tabela das classes é possível visualizar a dispersão máxima do processo e consequentemente o erro associado ao mesmo.

$$E_{16} = 0,009mm = 9,00 \cdot 10^{-3}mm$$



### 6.17 Item 17 - Erro de medição do shim

Depois que o shim é selecionado no magazine ele é medido para verificar se o dimensional esta de acordo com a classe disposta no magazine (algumas vezes pode haver mistura no momento da carga no magazine).

Inicialmente foi levantada a hipótese de que um erro de medição do shim poderia afetar a seleção do mesmo e por conseqüência o posicionamento do pinhão. Após uma análise mais detalhada, verificou-se que um erro de medição deste componente não teria influência no cálculo, pois a montagem é feita por classes, conforme citado no item anterior.

Outra hipótese seria de que um erro de medição em um shim que esteja no limite inferior de uma classe faça com que o mesmo seja posicionado na classe inferior ocasionando um problema de montagem, porém este item não seria problema porque a máquina reprovava o shim indicando que ele não pertence a classe calculada.

A única forma deste erro influenciar a montagem seria se o erro fosse maior ou da mesma ordem de grandeza do erro de seleção por classes. Para avaliar o erro foi seguido o mesmo procedimento estatístico realizado no item 1. Os resultados seguem na tabela 6.13.

Tabela 6.13 – Valores medidos a espessura do shim no posto 50 (valores ordenados de forma crescente).

Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
1	1,310	11	1,311	21	1,311
2	1,310	12	1,311	22	1,311
3	1,310	13	1,311	23	1,311
4	1,310	14	1,311	24	1,312
5	1,310	15	1,311	25	1,312
6	1,310	16	1,311	26	1,312
7	1,310	17	1,311	27	1,312
8	1,310	18	1,311	28	1,312
9	1,311	19	1,311	29	1,312
10	1,311	20	1,311	30	1,312

A média, desvio padrão e dispersão deste processo podem ser calculados pelas equações (4), (5) e (6)

$$\bar{x}_{17} = 1,3110mm$$

$$\sigma_{17} = \sigma = 0,0007mm$$

$$6\sigma_{17} = 0,0042mm$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$6\sigma_{17} = 0,0042mm = 4,24 \cdot 10^{-3} mm$$

Como o erro de medição é inferior ao erro devido a seleção por classes será utilizado na análise somente o de seleção por classe, sendo o erro de medição considerado como parte integrante deste.

$$E_{17} = 0$$

### **6.18 Item 18 - Compressão plástica do shim, capa e carcaça devido a força de prensagem das capas**

Foi levantada a hipótese que poderia haver deformação plástica do shim, capa do rolamento ou carcaça durante o processo de prensagem das capas dos rolamentos no posto 50. Caso ocorra esta deformação o posicionamento do pinhão será diretamente afetado, pois esta deformação não é levada em consideração durante o cálculo do shim.

Como a força de prensagem é a mesma para todo o conjunto, será avaliado primeiramente o shim pois este é o componente de menor área, portanto nele ocorrerá a maior tensão devido a prensagem. Caso ocorra deformação no shim os demais componentes também serão avaliados.

Caso a tensão resultante no shim seja menor ou igual que a tensão admissível do limite elástico não haverá deformação elástica, para esta avaliação serão utilizadas as equações (9), (10), (11) e (12), já explicadas no capítulo anterior.

Considerando o pior caso,  $D_e = 75,2mm$ ,  $D_i = 66,6mm$ ,  $L = 1,445mm$ ,  $F = 50000N$ , tem-se:

$$A_t = 1,02 \cdot 10^{-3} m^2$$

$$\sigma_r = 49,16 MPa$$

A tensão admissível do material onde ocorre a transição do regime elástico para o plástico é de  $\sigma_e = 300 \text{ MPa}$ , como a tensão aplicada é menor que a resistente pode-se concluir que não existe deformação plástica.

Embora não ocorra deformação plástica, ocorre deslocamento elástico, este deslocamento ocorre durante a prensagem, mas retorna a posição inicial após o término da mesma devido a natureza elástica.

Deste modo é possível concluir que este item não influencia o posicionamento do pinhão, esta conclusão pode ser generalizada para as capas dos rolamentos e carcaça pois estes possuem área de contato maior portanto estão sujeitos a tensões resultantes menores.

$$E_{18} = 0$$

### 6.19 Item 19 - Erro dimensional do shim devido a variação de pré-carga dos rolamentos

O shim é medido sem carga, porém após montado no produto estará sofrendo carga de compressão elástica igual a pré-carga dos rolamentos. O erro sistemático não é o problema, pois o mesmo poderia ser compensado pela constante C1, o problema é o erro aleatório, ou seja, a diferença de espessura dos shim para a pré-carga máxima e mínima.

É importante observar que todos os demais itens são medidos com a carga aplicada, e o erro dimensional referente a variação desta carga foi calculado no item 11.

Considerando um shim com dimensões  $D_e = 75,2\text{mm}$ ,  $D_i = 66,6\text{mm}$ ,  $L = 1,445\text{mm}$ , (mesmo dimensional utilizado no item 18), e a pré-carga máxima e mínima permitidas pela desenho de produto (5338N e 3558N) e utilizando as equações (10), (11) e (12) é possível calcular os deslocamentos para os 2 valores de carga.

$$A_t = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \quad \sigma_{r \max} = 5,25\text{MPa} \quad \sigma_{r \min} = 3,48\text{MPa}$$

$$\varepsilon_{\max} = 2,53 \cdot 10^{-5} \quad \varepsilon_{\min} = 1,60 \cdot 10^{-5}$$

$$\Delta L_{\max} = 3,66 \cdot 10^{-5}\text{mm} \quad \Delta L_{\min} = 2,30 \cdot 10^{-5}\text{mm}$$

A dispersão total pode ser calculada como a variação entre a máxima e mínima:

$$E_{19} = 3,66.10^{-5} - 2,30.10^{-5} = 1,36.10^{-5}mm$$

## 6.20 Item 20 - Erro dimensional devido a diferença do TTR posto 40 e 70

No posto 40 é medido o TTR do conjunto com a pré-carga aplicada, no posto 70 é apertada a porca do pinhão buscando o mesmo TTR medido no posto 40 (set point). Quando o TTR final fica diferente do set point significa que os rolamentos estão com uma pré-carga diferente da nominal. Como o conjunto composto pelo pinhão+rolamento possui um stiffness conhecido é possível através do erro da pré-carga calcular o erro dimensional no produto de modo similar ao realizado no item

O set point de carga é sempre a carga nominal, no caso 4450N, onde o erro de já foi calculado no item 4.

Para avaliar a variação de medição existente nesta máquina foram realizadas 30 medições com peças diferentes, de acordo com a tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Valores para 30 medições realizadas na mesma peça.

Medição	Valor (N)	Medição	Valor (N)	Medição	Valor (N)
1	4350,37	11	4315,69	21	4343,14
2	4326,64	12	4394,38	22	4435,97
3	4201,37	13	4378,71	23	4409,20
4	4343,72	14	4383,61	24	5382,16
5	4396,73	15	4209,93	25	4381,47
6	5110,57	16	4371,02	26	4453,18
7	4368,29	17	4317,08	27	4338,27
8	4380,27	18	4003,85	28	4299,86
9	4255,04	19	4457,19	29	4388,83
10	4211,15	20	4208,76	30	4694,66

A média, desvio padrão e dispersão deste processo podem ser calculados pelas equações (4), (5) e (6).

$$\bar{x}_{20} = 4403,7N$$

$$\sigma_{20} = 253,95N$$

$$6\sigma_{20} = 1523,71N$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$\Delta F = 6\sigma_{20} = 1523,71 N$$

Utilizando o  $\Delta F$ , a equação (29) e o stiffness médio calculado no item 11 é possível obter o erro dimensional:

$$E_{20} = \Delta x = 1,31 \cdot 10^{-2} mm$$

### 6.21 Item 21 - Erro de medição na zeiss

A dimensão final do pinhão é medida na máquina tridimensional Zeiss (posto 80), conforme explicado no capítulo 3, portanto o erro de medição desta máquina também deve ser considerado no processo.

Para avaliar a variação de medição existente nesta máquina foram realizadas 30 medições com peças diferentes, de acordo com a tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Valores medidos no posto 80 (valores ordenados de forma crescente).

Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)	Medição	Valor (mm)
1	61,899	11	61,900	21	61,901
2	61,899	12	61,900	22	61,901
3	61,899	13	61,900	23	61,901
4	61,899	14	61,900	24	61,901
5	61,899	15	61,901	25	61,901
6	61,899	16	61,901	26	61,901
7	61,900	17	61,901	27	61,901
8	61,900	18	61,901	28	61,901
9	61,900	19	61,901	29	61,901
10	61,900	20	61,901	30	61,901

A média, desvio padrão e dispersão deste processo podem ser calculados pelas equações (4), (5) e (6).

$$\bar{x}_{21} = 61,9003mm \quad \sigma_{21} = 0,0008mm \quad 6\sigma_{21} = 0,0047mm$$

Portanto é possível concluir que para um intervalo de confiança de 99,73% a dispersão do processo ou erro aleatório é de:

$$E_{21} = 6\sigma_{21} = 0,0047 = 4,73 \cdot 10^{-3}mm$$

## 7 RESULTADOS DOS ITENS AVALIADOS

A avaliação sobre o sistema foi realizada nos 21 itens descritos no capítulo 4, conforme representado na tabela 7.1.

Tabela 7.1 – Resultado dos itens avaliados

Item	Descrição	Método	Erro (mm)
1	Erro de medição da HCBSBS	Estatístico	$8,30. 10^{-3}$
2	Variação da HCBSBS devido ao erro de perpendicularidade da carcaça	Outro	$3,29. 10^{-5}$
3	Variação dimensional da HCBSBS com a pré-carga dos rolamentos do pinhão	Elementos finitos	$6,87. 10^{-5}$
4	Variação $\emptyset$ de prensagem dos rolamentos do pinhão devido a pré-carga do diff-case	Elementos finitos	0
5	Variação da carcaça com a temperatura de medição da HCBSBS na usinagem e na montagem.	Elementos finitos	$2,35. 10^{-2}$
6	Erro dimensional do PHBFRGCP no fornecedor	Estatístico	$1,87. 10^{-2}$
7	Erro dimensional do PHH no fornecedor	Estatístico	$8,91. 10^{-3}$
8	Variação do gear set com a temperatura de medição e de montagem	Carga térmica	$3,93. 10^{-2}$
9	Erro de medição da altura do pinhão	Estatístico	$7,90. 10^{-3}$
10	Erro de medição do diâmetro do rolamento	Estatístico	$4,81. 10^{-3}$
11	Erro da aplicação da pré-carga	Estatístico	$8,6. 10^{-4}$
12	Erro devido a rigidez da máquina na medição da altura do pinhão	Outro	0
13	Erro no cálculo de compensação devido a interferência entre capa e carcaça	Ajuste de anéis	$1,14. 10^{-2}$
14	Variação no cálculo do shim devido ao erro de medição do TTR	Estatístico	$5,33. 10^{-3}$
15	Erro devido ao run-out da altura do pinhão.	Estatístico	0
16	Diferença entre shim montado e selecionado devido a seleção por classes.	Outro	$9,00. 10^{-3}$
17	Erro de medição do shim	Estatístico	0
18	Compressão plástica do shim, capa e carcaça devido a força de prensagem das capas	Compressão plástica	0

Tabela 7.1 – Resultado dos itens avaliados

Item	Descrição	Método	Erro (mm)
19	Erro dimensional do shim devido a variação de pré-carga dos rolamentos	Compressão elástica	$1,36. 10^{-5}$
20	Erro dimensional devido a diferença do TTR posto 40 e 70	Estatístico	$1,31. 10^{-2}$
21	Erro de medição na zeiss	Estatístico	$4,73. 10^{-3}$

Cada item individualmente representa um erro associado a um processo de medição ou de montagem do produto. O erro total pode ser calculado pela equação (18).

$$E_t = \sum_{i=1}^{21} E_i = 1,56. 10^{-1}mm \quad (18)$$

A tolerância de montagem do produto é de 0,06mm ( $\pm 0,03$ mm), portanto o erro total é maior que a tolerância de montagem do produto, este fato explica o alto número de reprovações da linha de montagem. Na prática ocorrem muitos outros fatores de erro como falhas na calibração, ponteiros de medição gastas, sujeira, óleo que prejudicam o processo.

Conforme citado anteriormente os erros foram somados pois os processos de medição são independentes entre si não existindo transmissão de variância.

## 7.1 Outros fatores de erro no processo de medição

Os valores dimensionais obtidos neste trabalho e utilizados para calculo dos erros foram realizados com as máquinas limpas, calibradas, estabilizadas, medindo peças de boa qualidade, dentro do dimensional e com bom acabamento superficial.

Durante a produção das peças é sabido que estas condições nem sempre ocorrem e os itens avaliados após algumas horas de operação sofrem variação, esta variação normalmente é proporcional ao nível de desgaste de cada processo, ao ambiente e ao tipo de máquina utilizada.

Os itens que apresentam maior variação são aqueles aonde existe medição dinâmica, vibração e desgaste das ponteiros de medição, como por exemplo, as ponteiros de medição da



altura do pinhão do posto 40, que estão sempre em contato com o produto durante o movimento rotacional do mesmo.

Outro ponto de constante perda de calibração é a máquina de Zeiss que realiza a medição da carcaça na usinagem (item 1), esta máquina foi projetada para trabalhar em ambiente laboratorial, onde o ar é filtrado com temperatura e umidade controladas. A máquina por sua vez esta inserida dentro da linha de usinagem em ambiente fabril, sem controle de temperatura, ar ambiente e umidade, fato que gera constante perda de calibração da máquina. Como a mesma já é o gargalo da linha de usinagem a calibração não é realizada com a frequência correta para minimizar este problema, portanto o erro é transferido para a usinagem.

Na linha de montagem o ambiente é controlado sendo mais fácil manter as calibrações das máquinas e também notar caso haja perda de calibração (este fato pode ser observado quando começam a aparecer reprovações sucessivas na posição do pinhão). A recalibração também é fácil visto que cada máquina possui padrão próprio e também rotina de calibração completamente desenvolvida.

Observe que esta sendo avaliado somente a perda de calibração e em nenhum momento foi abordado o problema de uma calibração realizada de forma errada (ponteira gasta, padrão mal posicionado, sujeira, peça com problema de acabamento). Qualquer problema destes, por menor que seja causa um estrago muito grande visto que o sistema funciona para medição de milésimo de milímetro. Por exemplo, um erro de medição sistemático de 0,05mm da carcaça na usinagem causada por erro de calibração, considerando que existe um estoque médio de 480pc (correspondente a 8h de produção) entre usinagem e montagem, este problema da calibração seria descoberto somente 8h depois com 480 peças intermediárias com informações erradas e grande possibilidade de reprovação na montagem.

## **7.2 Informações provenientes do banco de dados**

Conforme comentado no capítulo 3 o sistema supervisorio arquiva todas as informações de processo no banco de dados da linha de montagem, incluindo os valores da cota calculada para o shim e a cota medida para conferir a montagem na máquina tridimensional do posto 80.

Avaliando a diferença entre a cota teórica calculada e a cota real medida é possível calcular o erro de montagem como sendo a diferença entre estes 2 valores (teoricamente os valores deveriam ser iguais, mas são diferentes pelo erro).

Utilizando um banco com 10.000 peças, foi realizado um filtro para o produto front resultando em 4244 ocorrências, para cada ocorrência foi calculado o erro de montagem. Segue na figura 7.1 a curva normal destes valores (no anexo I estão listados todos os valores de erro em ordem crescente).

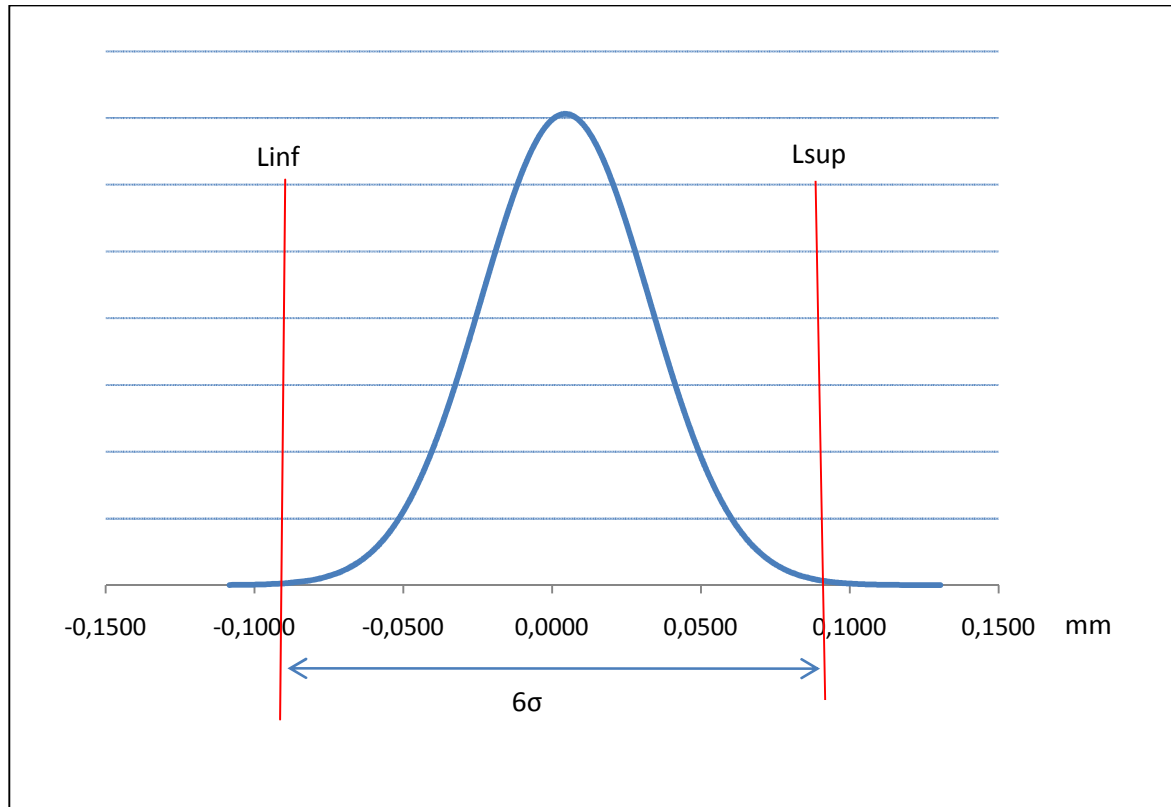


Figura 7.1- Valores de erro de montagem para 4244 peças (valores obtidos no banco de dados da linha de montagem).

Utilizando os 4244 valores citados, pode-se calcular a média e desvio padrão com as equações (5) e (6).

$$\bar{x}_{BD} = 0,0044mm = 4,4 \cdot 10^{-3}mm$$

$$\sigma_{BD} = 0,0282mm = 2,82 \cdot 10^{-2}mm$$

Onde:

$\bar{x}_{BD}$  é o valor da média do erro de montagem obtido no Banco de Dados da linha de montagem

$\sigma_{BD}$  é o desvio padrão do erro de montagem obtido no Banco de Dados da linha de montagem

Com o desvio padrão é possível calcular a dispersão do processo através da equação (4).

$$\text{Dispersão} = 6\sigma = 6 \times 2,82.10^{-2} = 1,69.10^{-1}mm$$

Esta dispersão representa o erro de montagem da população de 4244 peças para um intervalo de confiança de 99,73%.

### 7.3 Conclusão sobre o processo de montagem atual

O valor de erro total calculado no capítulo 7 é de  $1,56.10^{-1}mm$ , porém o valor de erro encontrado no processo real em uma amostra de 4244 peças é de  $1,69.10^{-1}mm$ , o que resulta em uma diferença de  $1,30.10^{-2}mm$  (8,33%).

Não é possível saber ao certo quantos erros foram esquecidos ou mesmo os valores dos mesmos, porém o limite máximo deste valor pode ser estimado como sendo a diferença entre o valor calculado e o valor obtido no banco de dados ( $1,30.10^{-2}mm$ ). Também ficam inclusos dentro deste valor os erros de calibração, erros de operação, sujeira, desgaste de ponteiras de medição, desregulagem de máquinas e até mesmo algum item de menor importância que não foi levado em consideração.

Utilizando o erro real obtido no banco de dados pode ser avaliada a capacidade do processo em produzir peças dentro da tolerância através do índice de Capacidade de Processo ( $C_p$ ), representado na equação (19)

$$C_p = \frac{\text{Tolerância}}{\text{Dispersão}} \quad (19)$$

Algumas indústrias, assim como a Dana, utilizam como parâmetro desejado de qualidade um  $C_p > 1,33$ , correspondente a uma proporção de defeitos menor que 64ppm. Quando o índice  $C_p = 1,0$  a fração de defeito é na ordem de 2700ppm. Se valor de  $C_p$  for menor que 1 ( $C_p < 1,0$ ) o processo é considerado incapaz de atender as especificações (Siqueira, 1997; Werkema, 1995).

Utilizando a equação 19 é possível calcular o  $C_p$  do processo atual. A dispersão utilizada é o valor real do processo retirado do bando de dados:

$$Cp = \frac{0,060}{0,169} = 0,36$$

Como o valor de Cp é menor que 1 o processo é considerado incapaz de atender a especificação.

Devido a este problema de processo, a tolerância de montagem foi aberta para 0,12mm ( $\pm 0,06$ ) para aumentar a produção de peças dentro do dimensional na primeira tentativa. Segue abaixo o cálculo de Cp correspondente.

$$Cp = \frac{0,120}{0,169} = 0,71$$

O aumento da tolerância para 0,12mm causa o funcionamento do produto fora das condições ideais, favorecendo o ruído, desgaste e perda da vida útil, porém frente ao problema de montagem existente esta foi a solução imediata encontrada.

Embora seja possível sempre montar o shim corretamente da segunda tentativa, esta montagem não pode ser realizada em todas as peças, pois serão necessários 2 ciclos para a produção de 1 peça o que resulta em uma linha de montagem com a metade da produção necessária. O processo de retrabalho foi projetado para um pequeno índice de reprovação (1 a 2%), portanto o retrabalho é manual e demorado, algumas vezes até causando estrago e perda de componentes, é o caso por exemplo, do anel colapsível que pode ser utilizado somente uma vez, e as capas, porcas e a carcaça que podem sofrer danos do processo de desmontagem.

Como foi constatado que o processo é incapaz de produzir peças dentro da tolerância ideal de funcionamento do produto, estão sendo sugeridos 2 métodos para diminuir o erro ou dispersão de montagem. No próximo capítulo estes métodos serão explicados, incluindo também uma análise de erro ou dispersão dos mesmos.

## **8 MÉTODOS PROPOSTOS PARA DIMINUIR O ERRO DE MONTAGEM**

De acordo com os resultados apresentados no capítulo 7 foi concluído que o processo de montagem do pinhão não é satisfatório.

Um dos principais problemas que torna o processo inadequado é a grande quantidade de medições realizadas para a montagem, pois cada uma delas possui um erro associado, e o somatório dos erros fica acima da tolerância do produto. Além da falta de controle que existe nas medições realizadas em outros lugares fora da linha de montagem.

Existem duas idéias básicas para melhorar o processo, a primeira é simplesmente diminuir o número de medições, pré-montando os componentes em conjuntos e depois medindo. A segunda idéia seria reposicionar o shim, permitindo que todo o conjunto seja montado faltando somente o shim, e com um único processo de medição o mesmo seria determinado.

Segue nos itens 8.1 e 8.2 a descrição destes 2 métodos e a avaliação do erro de cada um tendo como base as medições semelhantes analisadas no capítulo 6.

### **8.1 Melhoria do processo através da pré-montagem dos componentes**

A idéia básica deste processo é montar o máximo de componentes possíveis na carcaça, e depois medi-los em conjunto aplicando a pré-carga de montagem. Utilizando este método são reduzidas as medições e conseqüentemente o erro total resultante.

Com este processo também é eliminado a medição da HCBSBS na carcaça na usinagem e também a medição da altura do pinhão proveniente do fornecedor do gear set, eliminado desta forma boa parte do problema que são as medições realizadas nos fornecedores.

Este procedimento seria executado de acordo com os passos descritos abaixo:

- Passo 1, prensagem da capa do rolamento traseira;
- Passo 2, posicionamento de uma capa de processo com espessura igual a nominal da capa + shim na nominal (sem prensagem);
- Passo 3, posicionamento dos 2 cones dos rolamentos;
- Passo 4, posicionamento da ferramenta de pré-carga e giro do conjunto;
- Passo 5.1, medição da face do rolamento até o centro da carcaça com pré-carga;
- Passo 5.2, medição do diâmetro da capa do rolamento que será posteriormente prensada na carcaça. Item medido em paralelo com a cota da figura 8.1;

- Passo 5.3, medição da altura do pinhão, apenas para comparar os valores com o posto 80, não sendo utilizada no cálculo. Item medido em paralelo com a cota da figura 8.1;
- Passo 5.4, medição do diâmetro de prensagem do rolamento na carcaça . Item medido em paralelo com a cota da figura 8.1;
- Passo 6, desmontagem da capa de processo e dos cones dos rolamentos;
- Passo 7, seleção do shim;
- Passo 8, prensagem da capa com o shim selecionado;
- Passo 9, aperto da porca;
- Passo 10, medição da posição do pinhão na máquina tridimensional.

Segue na figura 8.1 um desenho do produto onde é possível visualizar o processo citado.

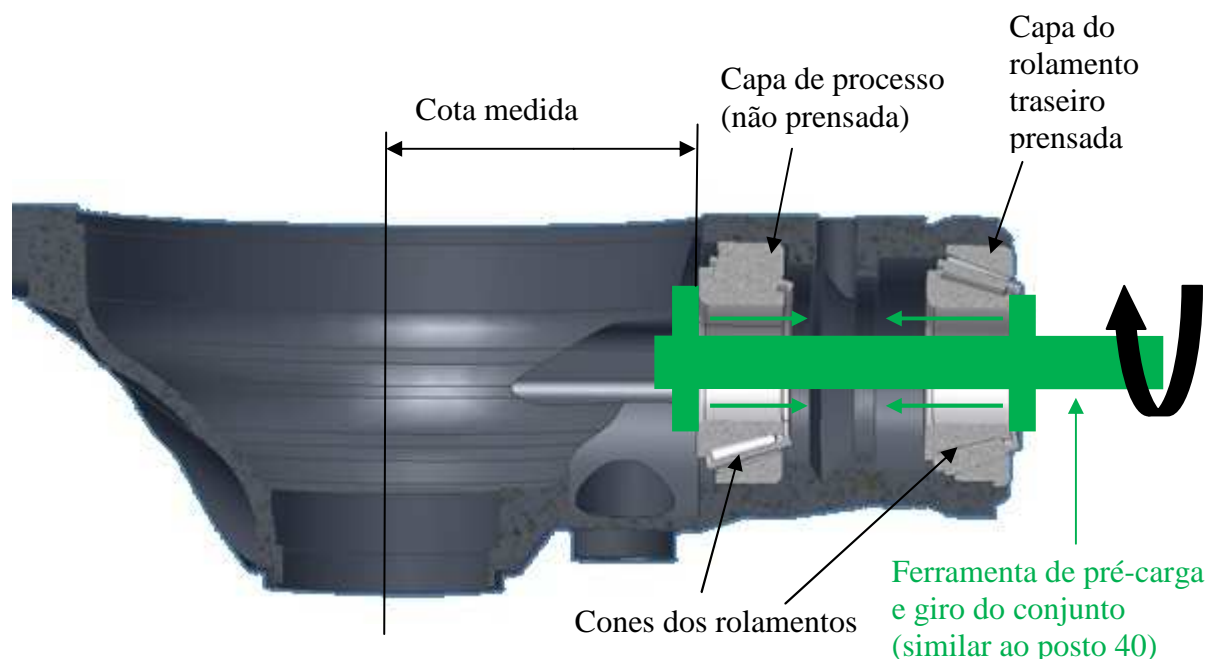


Figura 8.1- Desenho do procedimento de montagem sugerido

Na figura 8.1 é possível visualizar os componentes pré-montados para a medição da cota da face do rolamento até o centro da carcaça (observar que esta é a própria cota de montagem do pinhão, ver figura 3.15). Utilizando a capa de processo é possível montar os componentes sem prensagem, permitindo a determinação da cota, após a medição a capa de processo é desmontada para a prensagem da capa do produto + shim.

Para este processo o shim pode ser calculado através da equação 31, descrita abaixo:

$$SHIM = PHBFRGCP - CM - CP2 + CP1 - PHBCIDC \quad (31)$$

Onde:

- PHBFRGCP Pinion Head Bottom Face to Ring Gear Center Point é o dado proveniente do gear set e do desvio de montagem do posto 25 (mesmo dado proveniente do processo atual).
- PHBCIDC Pinion Head Bearing Cap Internal Diameter Compensation. É uma compensação realizada no cálculo devido a interferência de prensagem da capa do rolamento na carcaça (será utilizada o valor de compensação corrigido conforme item 6.13).
- CM é a cota medida da face do rolamento até o centro da carcaça [mm]
- CP1 é a espessura da capa do produto [mm]
- CP2 é a espessura da capa de processo [mm]

### 8.1.1 Análise de erro do processo proposto

O processo descrito no item 8.1 também possui erros de medição e montagem. Alguns já foram determinados no capítulo 6 deste trabalho, porém outros não são conhecidos pois as máquinas que poderiam realizar este tipo de medição não existem.

As medições novas sugeridas baseiam-se nos mesmos princípios das medições realizadas na linha de montagem, utilizando os mesmos dispositivos, processos e transdutores, somente variando o dimensional do componente a ser medido. Para determinar o erro de cada item deste processo novo será utilizado o erro existente para o processo atual correspondente.

O primeiro item que demanda esta avaliação é a CM (cota medida) que compreende a distância do centro da carcaça até a face do rolamento. O erro de medição desta máquina pode ser estimado como sendo igual ao erro de medição do posto 80 que mede a distância do centro da carcaça para a face do rolamento.

A espessura da capa do produto (CP1) é uma medida linear e simples, similar ao processo de medição da espessura do shim realizado no posto 80, já para a CP2 (capa de processo) não existe erro associado, pois esta é uma peça única de medida conhecida utilizada para todos os produtos.

Para avaliar o valor do erro deste novo processo foi utilizada a mesma tabela do processo atual (tabela 7.1), tornando zero os itens que não possuem influência e adicionando os itens novos devido ao processo proposto.

Nesta avaliação será eliminado o problema de variação térmica do gear set entre o fornecedor e montagem, incluindo a informação da temperatura que foi realizada a medição, desta forma o dimensional será corrigido para a temperatura de montagem.

Segue na tabela 8.1 o resultado de erro para os itens do processo proposto.

Tabela 8.1 – Resultado dos itens avaliados para o processo 8.1.

Item	Descrição	Método	Erro (mm)
1	Erro de medição da HCBSBS	Estatístico	0
2	Variação da HCBSBS devido ao erro de perpendicularidade da carcaça	Outro	0
3	Variação dimensional da HCBSBS com a pré-carga dos rolamentos do pinhão	Elementos finitos	0
4	Variação $\varnothing$ de prensagem dos rolamentos do pinhão devido a pré-carga do diff-case	Elementos finitos	0
5	Variação da carcaça com a temperatura de medição da HCBSBS na usinagem e na montagem.	Elementos finitos	0
6	Erro dimensional do PHBFRGCP no fornecedor	Estatístico	$1,87 \cdot 10^{-2}$
7	Erro dimensional do PHH no fornecedor	Estatístico	0
8	Variação do gear set com a temperatura de medição e de montagem	Carga térmica	0
9	Erro de medição da altura do pinhão	Estatístico	0
10	Erro de medição do diâmetro do rolamento	Estatístico	$4,81 \cdot 10^{-3}$
11	Erro da aplicação da pré-carga	Estatístico	$8,57 \cdot 10^{-4}$
12	Erro devido a rigidez da máquina na medição da altura do pinhão	Outro	0
13	Erro no cálculo de compensação devido a interferência entre capa e carcaça	Ajuste de anéis	$1,14 \cdot 10^{-2}$
14	Variação no cálculo do shim devido ao erro de medição do TTR	Estatístico	$5,33 \cdot 10^{-3}$
15	Erro devido ao run-out da altura do pinhão.	Estatístico	0
16	Diferença entre shim montado e selecionado devido a seleção por classes.	Outro	$9,00 \cdot 10^{-3}$
17	Erro de medição do shim	Estatístico	0



Tabela 8.1 – Resultado dos itens avaliados para o processo 8.1.

18	Compressão plástica do shim, capa e carcaça devido a força de prensagem das capas	Compressão plástica	0
19	Erro dimensional do shim devido a variação de pré-carga dos rolamentos	Compressão elástica	$1,36. 10^{-5}$
20	Erro dimensional devido a diferença do TTR posto 40 e 70	Estatístico	$1,31. 10^{-2}$
21	Erro de medição na zeiss	Estatístico	$4,73. 10^{-3}$
	Erro de medição de CM	Estatístico	$4,73. 10^{-3}$
	Erro de medição de CP1	Estatístico	$2,24. 10^{-3}$

O erro combinado pode ser calculado da mesma maneira realizado no capítulo 7:

$$E_t = \sum_{i=1}^{23} E_i = 7,69. 10^{-2} mm$$

Outro fator positivo é não utilizar a cota da carcaça medida na usinagem, pois conforme já comentado este processo é problemático, com problemas de medição, calibração e etc.

### 8.1.2 Correção da dispersão calculada

Conforme demonstrado nos itens 7.2 e 7.3 existe uma diferença de 8,33% entre os valores de erro calculados e os valores reais obtidos no banco de dados da linha de montagem. Como o produto é o mesmo e os processos são praticamente iguais é esperada uma diferença na mesma ordem de grandeza. Portanto para ajustar a variável será somado 8,33% ao valor calculado no item 8.1.1:

$$E_t = 7,69. 10^{-2} \times 1,0833 = 8,33. 10^{-2} mm$$

Utilizando a equação 19 é possível calcular o Cp deste processo

$$Cp = \frac{0,060}{0,0833} = 0,72$$

Embora o processo ainda seja considerado incapaz para os padrões de qualidade da Dana, na qual demanda  $C_p \geq 1,33$ , houve uma redução do erro de montagem na ordem de 50%.

### **8.1.3 Conclusão para o processo 8.1**

Embora o  $C_p$  do processo 8.1 ainda fique abaixo do valor recomendado pela literatura e também abaixo do valor mínimo de 1,33 aceitado da Dana ele traz uma melhora significativa em relação ao processo atual, o que não resolve o problema do erro da montagem, mas atenua o mesmo na ordem de 50%, o que já é representativo.

Uma grande característica positiva deste processo é a não alteração do produto, ou seja, a sua implementação seria apenas uma questão de processo sem envolver a engenharia de produto. Outro ponto positivo é não necessitar da cota de HCBSBS proveniente da usinagem, pois conforme já comentado anteriormente este é um item problemático para a linha de montagem.

## **8.2 Melhoria do processo através do reposicionamento do shim**

Analisando o desenho de montagem do produto foi percebido que reposicionando o shim entre o pinhão e o cone do rolamento é possível montar todas as peças intermediárias realizando as medições com todo o conjunto montado na carcaça melhorando ainda mais o procedimento proposto no item 8.1

Segue na figura 8.2 a representação do reposicionamento do shim entre o pinhão e cone do rolamento.

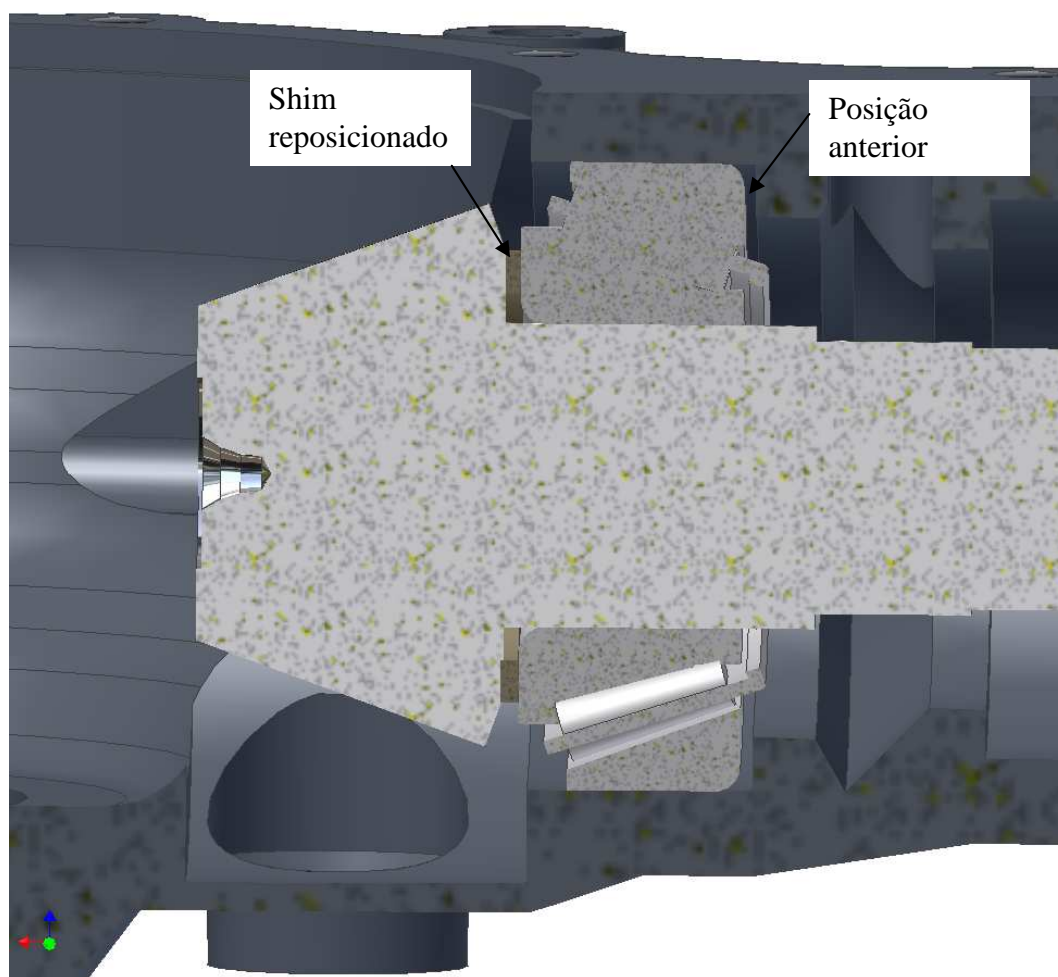


Figura 8.2 – Shim reposicionado entre o pinhão e cone do rolamento.

Com o reposicionamento do shim fica ainda mais fácil realizar o cálculo do espaçador, pois é possível prensar a capa do rolamento não sendo necessário utilizar a capa de processo e nem acrescentar o erro devido a compensação de prensagem. Com este processo não é necessário utilizar nenhuma medição na usinagem (HCBSBS e HPHBD) e também não a medição da capa do rolamento.

Este procedimento seria executado de acordo com os passos descritos abaixo:

- Passo 1, prensagem das capas traseira e dianteira dos rolamentos;
- Passo 2, posicionamento dos 2 cones dos rolamentos;
- Passo 3, posicionamento da ferramenta de pré-carga e giro do conjunto;
- Passo 4.1, medição da face do rolamento até o centro da carcaça com pré-carga;
- Passo 4.2, medição da altura do pinhão, apenas para comparar os valores com o posto 80, não sendo utilizada no cálculo. Item medido em paralelo com a cota da figura 8.2;
- Passo 5, desmontagem dos cones dos rolamentos;

- Passo 6, seleção do shim;
- Passo 7, prensagem do cone do rolamento no pinhão com o shim selecionado;
- Passo 8, aperto da porca;
- Passo 9, medição da posição do pinhão na máquina tridimensional.

Segue na figura 8.3 a indicação dos itens montados e do processo de medição (similar ao processo descrito no item 8.1).

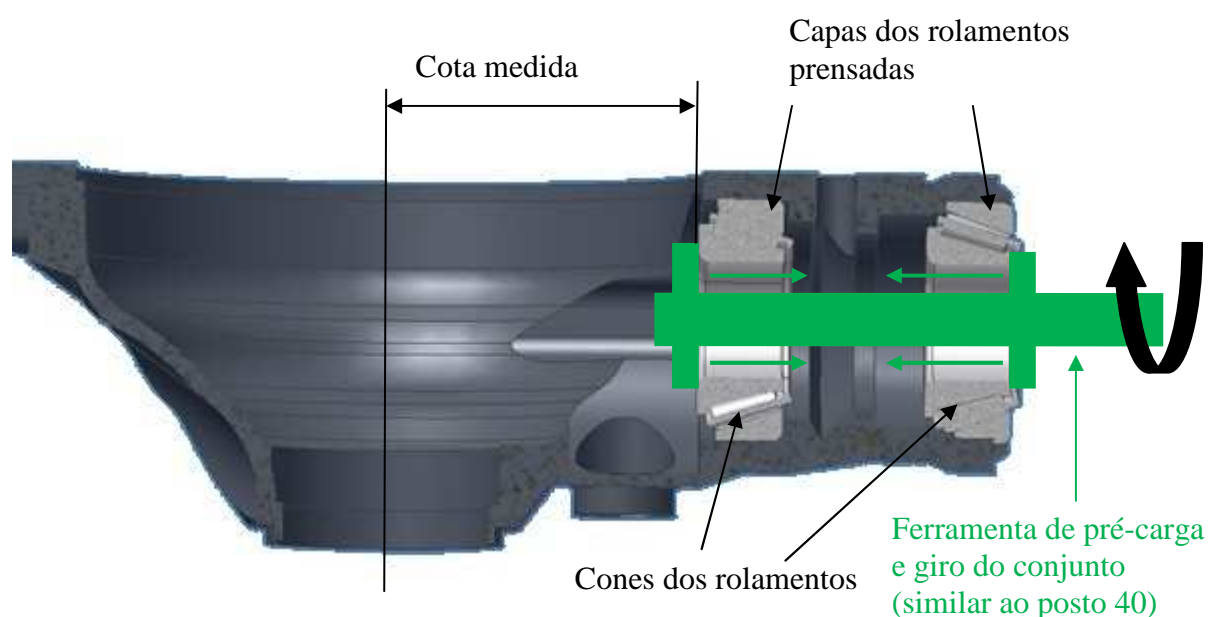


Figura 8.3 – Processo de medição com as capas já prensadas.

Para este processo o shim pode ser calculado através da equação 32, descrita abaixo:

$$SHIM = PHBFRGCP - CM \quad (32)$$

Onde:

- PHBFRGCP Pinion Head Bottom Face to Ring Gear Center Point é o dado proveniente do gear set e do desvio de montagem do posto 25 (mesmo dado proveniente do processo atual).
- CM é a cota medida da face do rolamento até o centro da carcaça [mm]

### 8.2.1 Análise de erro do processo proposto

Este método de seleção dos shim é mais robusto do que o método descrito no item 8.1 e muito mais robusto do que o método utilizado atualmente pelo fato de utilizar apenas a informação do PHBFRGCP e uma única medição para determinar o shim.

Utilizando o mesmo procedimento descrito no item 8.1.1 é possível relacionar os erros envolvidos neste processo através da tabela 8.2

Tabela 8.2 – Resultado dos itens avaliados para o processo 8.2.

Item	Descrição	Método	Erro (mm)
1	Erro de medição da HCBSBS	Estatístico	0
2	Variação da HCBSBS devido ao erro de perpendicularidade da carcaça	Outro	0
3	Variação dimensional da HCBSBS com a pré-carga dos rolamentos do pinhão	Elementos finitos	0
4	Variação Ø de prensagem dos rolamentos do pinhão devido a pré-carga do diff-case	Elementos finitos	0
5	Variação da carcaça com a temperatura de medição da HCBSBS na usinagem e na montagem.	Elementos finitos	0
6	Erro dimensional do PHBFRGCP no fornecedor	Estatístico	$1,87 \cdot 10^{-2}$
7	Erro dimensional do PHH no fornecedor	Estatístico	0
8	Variação do gear set com a temperatura de medição e de montagem	Carga térmica	0
9	Erro de medição da altura do pinhão	Estatístico	0
10	Erro de medição do diâmetro do rolamento	Estatístico	$4,81 \cdot 10^{-3}$
11	Erro da aplicação da pré-carga	Estatístico	$8,57 \cdot 10^{-4}$
12	Erro devido a rigidez da máquina na medição da altura do pinhão	Outro	0
13	Erro no cálculo de compensação devido a interferência entre capa e carcaça	Ajuste de anéis	0
14	Variação no cálculo do shim devido ao erro de medição do TTR	Estatístico	$5,33 \cdot 10^{-3}$
15	Erro devido ao run-out da altura do pinhão.	Estatístico	0
16	Diferença entre shim montado e selecionado devido a seleção por classes.	Outro	$9,00 \cdot 10^{-3}$
17	Erro de medição do shim	Estatístico	0

Tabela 8.2 – Resultado dos itens avaliados para o processo 8.2.

18	Compressão plástica do shim, capa e carcaça devido a força de prensagem das capas	Compressão plástica	0
19	Erro dimensional do shim devido a variação de pré-carga dos rolamentos	Compressão elástica	$1,36. 10^{-5}$
20	Erro dimensional devido a diferença do TTR posto 40 e 70	Estatístico	$1,31. 10^{-2}$
21	Erro de medição na zeiss	Estatístico	$4,73. 10^{-3}$
	Erro de medição de CM	Estatístico	$4,73. 10^{-3}$

O erro combinado pode ser calculado da mesma maneira realizado no capítulo 7:

$$E_t = \sum_{i=1}^{22} E_i = 5,65. 10^{-2} mm$$

Outro fator positivo é não utilizar o diâmetro e nem a cota da carcaça medida na usinagem, eliminado assim por completo o processo de medição na usinagem (observar que no processo proposto no item 8.2 ainda esta sendo utilizada a medição do diâmetro da carcaça na usinagem).

### 8.2.2 Correção da dispersão calculada

Conforme realizado no item 8.1.2 é necessário corrigir a dispersão em 8,33%:

$$E_t = 5,65. 10^{-2} \times 1,0833 = 6,12. 10^{-2} mm$$

Esse valor de erro representa 36% do erro do processo atual, ou seja, representa uma melhoria do processo de montagem de 64% em relação ao existente.

Utilizando a equação 19 é possível calcular o Cp deste processo

$$Cp = \frac{0,060}{0,0612} = 0,98$$

Conforme descrito anteriormente a Dana estabelece como requisito de qualidade um  $Cp \geq 1,33$  para aprovação do processo. Na literatura consultada consta que um  $Cp = 1$  produz defeitos na ordem de 2700ppm (0,27%), e como o resultado é de  $Cp = 0,98$  é esperado uma taxa de defeitos um pouco maior do que 0,27%.

### 8.2.3 Conclusão para o processo 8.2

Apesar da empresa solicitar  $Cp \geq 1,33$  e a literatura não recomendar valores de  $Cp$  menores que 1, a linha de montagem foi projetada com bancada de retrabalho, locais para entrada e saída de pallets e sistema para recalculo do shim. Este sistema pode comportar de 1 a 2% de reprovações na montagem do shim na primeira tentativa sem problemas de perda de produção.

Considerando 2% de reprovação na primeira tentativa em um turno de produção de 7,5h (450 minutos) seriam montadas 450 peças, sendo montadas 441 diretamente (primeira tentativa) e 9 retrabalhadas (montadas na segunda tentativa). Nove retrabalhos em um turno de produção podem ser administrados sem perda de produtividade.

Como ponto desfavorável deste processo existe a necessidade de alteração do desenho de produto, mesmo que esta alteração seja muito simples a mesma deve ser aprovada pelo engenheiro de produto responsável, também podem ser necessários alguns testes ou re-certificação do produto final junto a montadora.

Como aspecto positivo pode-se citar uma grande redução do erro total e uma grande melhora no  $Cp$  que fica próximo a 1. Outro aspecto positivo importante é não necessitar de nenhuma dimensão da carcaça proveniente da usinagem, eliminado desta maneira o erro devido a medição da HCBSBS e do HPHBD.

A realização de somente uma medição para determinar o shim (equação 32) é um aspecto favorável, o que resultará em um melhor controle e fácil análise sobre qualquer falha de processo ou medição.

#### **8.2.4 Erro final esperado para o processo 8.2**

Uma boa estimativa da origem da variação percentual de 8,33% encontrada entre o erro calculado e o erro real são os próprios processos de medição e comportamento das peças frente os mesmos, ou seja é esperado que diminuindo as etapas de medição esta diferença percentual caia também.

No processo atual são utilizadas 7 variáveis na equação do shim (equação 1 e 2) e neste processo proposto somente 2 (equação 32). Considerando que a diferença caia de acordo com o número de variáveis ( $7/2$ ) é esperada uma variação percentual de 2,38% ( $8,33/3,5$ ), o  $C_p$  pode ser recalculado como sendo  $C_p=1,04$  o que caracteriza um valor acima de 1. Esta redução percentual é esperada, porém não pode ser confirmada sem dados reais que seriam obtidos somente após a sua implementação.



## 9 CONCLUSÃO GERAL

Através das análises individuais foi possível obter um melhor conhecimento do eixo diferencial, dos processos de medição e montagem. Como este conhecimento foi possível calcular cada erro individual e o somatório dos mesmos.

Como o somatório ficou perto do valor real retirado do banco de dados é possível concluir que o mesmo foi realizado de forma satisfatória, com exceção de alguns itens não conhecidos ou não identificados que resultam na diferença de quase 8,33% encontrada.

Poderia ser realizada uma análise mais profunda para buscar os 8,33% faltantes, porém esta análise não é necessária visto que os processos foram corrigidos com o valor real obtido em uma amostra significativa no banco de dados.

Os processos de melhoria foram propostos para diminuir o erro de montagem existente, sendo que a idéia básica foi diminuir a quantidade de processos e medições para diminuir o somatório de erros. Estas idéias são simples, mas requerem uma modificação no processo existente, principalmente no atual posto 40 que precisaria ser alterado para medir a distancia CM ao invés da altura do pinhão PHH2. O processo de medição em si seria o mesmo, aplicando a pré-carga e girando o conjunto, porém o dimensional da carcaça é muito maior. Devido a esta diferença dimensional provavelmente seria necessário substituir o atual posto 40 por uma máquina nova.

Sobre os 2 processos propostos a recomendação seria implementar a de reposicionamento do shim (8.2), pela elevada redução do erro obtida e demais características citadas no capítulo anterior.

Como a implementação do processo proposto requer a construção de uma nova máquina de montagem, em substituição ao posto 40, fica como sugestão para uma próxima linha de montagem. Como estão sendo eliminadas medições tanto da carcaça na usinagem, como dos componentes na linha de montagem é esperado que uma linha desenvolvida com este conceito novo seja um pouco mais simples e mais barata que o projeto original.

O correto seria verificar também o erro de posicionamento após o processo implementado, com uma amostra significativa obtida no banco de dados, igual a realizada para o processo atual, comparando o erro calculado com o medido no produto. Porém como as variáveis medidas e utilizadas entre o processo atual e proposto são as mesmas, (com exceção da cota CM que foi estimada com base em uma medição semelhante realizada no processo atual) é concluído que para o processo proposto não existem erros diferentes dos citados no processo atual, deste modo a diferença entre valor calculado e obtido no banco de dados é a mesma.

Para resolver completamente o problema de montagem do eixo diferencial caberia ainda uma avaliação da montagem dos shims do sistema planetário (diff-case). Segue no item 9.1 uma breve descrição deste problema, que é uma sugestão para uma análise futura.

## 9.1 Recomendação para análise futura

Para o sistema diferencial tanto o posicionamento da coroa quanto a pré-carga nos rolamentos é dada diretamente pelos 2 shims, diferente do caso do pinhão onde a porca é apertada para obter a pré-carga.

A carcaça e a tampa funcionam como “molas” conforme explicado no posto 20 (item 3.4), e o número de variáveis é muito maior, pois são utilizadas várias cotas medidas na usinagem, são medidos e prensados 2 rolamentos, prensadas 2 capas, selecionados 2 shims. Ainda existe o problema da junta parafusada de montagem entre a carcaça e tampa, enfim a variedade de itens de influência é muito maior que o caso do pinhão.

Seguem nas equações 33 e 34 as fórmulas utilizadas para o cálculo do shim da carcaça e da tampa, somente para nível de conhecimento.

$$HS = RGFSPCP + HMSSBS - HMSPCP - RGFS2 - DIFFLBC + HPRELOAD - MOFFS + OL5 + OL2 \quad (33)$$

$$CS = CMSSBS + HMSSBS + HPRELOAD + CPRELOAD - DIFFCH2 - MOFFSET - DIFFLBC - DIFFUBC + GTHC - HS + OL3 \quad (34)$$

Onde:

*HS* (Housing Shim) é a espessura do shim do lado da carcaça [mm].

*RGFSPCP* (Ring Gear Flat Surface to Pinion Center Point) é a cota de altura da face da coroa até a linha de centro do pinhão. Este dado é proveniente do fornecedor do gear set e entra na linha de montagem no posto 25 [mm].

*HMSSBS* (Housing Mating Surface to Shim Bearing Surface) é a cota da face de montagem da carcaça na tampa até a face de montagem do shim. Este dado é proveniente da usinagem e entra na linha de montagem no posto 15 [mm].

*HMSPCP* (Housing Mating Surface to Pinion Center Point) é a cota da face de montagem da carcaça até a linha de centro de montagem do pinhão. Este dado é proveniente da usinagem e entra na linha de montagem no posto 15 [mm].

*DIFFLBC* (DIFF-case Lower Bearing Compensation) é a compensação de prensagem do diâmetro do rolamento inferior na carcaça, semelhante a compensação de prensagem realizada no pinhão (PHBCIDC) [mm].

*HPRELOAD* (Housing PRELOAD) é a cota de altura da carcaça com a correção elástica para a carga nominal de pré-carga. A medida inicial é proveniente da usinagem e entra na linha de montagem no posto 15, a correção é realizada com o stiffness medido no posto 20 [mm].

*MOFFSET* (Measurement OFF-SET) é o off-set de montagem, valor constante utilizado para completar a cota de posicionamento e proporcionar montagem correta para o sistema [mm].

*OL5* é uma o constante de ajuste similar a C1 utilizada para ao ajuste do pinhão [mm].

*OL2* é uma o constante de ajuste similar a C1 utilizada para ao ajuste do pinhão [mm].

*CS* (Cover Shim) é a espessura do shim do lado da tampa [mm].

*CMSSBS* (Cover Mating Surface to Shim Bearing Surface) é a cota da face de montagem da tampa até a face de montagem do shim. Este dado é proveniente da usinagem e entra na linha de montagem no posto 15 [mm].

*CPRELOAD* (Cover PRELOAD) é a cota de altura da tampa com a correção elástica para a carga nominal de pré-carga. A medida inicial é proveniente da usinagem e entra na linha de montagem no posto 15, a correção é realizada com o stiffness medido no posto 20 [mm].

*DIFFCH2* (DIFF-Case Height 2) é a cota de altura do diff-case com a pré-carga aplicada. Este cota é medida com a pré-carga e girando o conjunto no posto 110. A medição é realizada de forma semelhante a realizada para o pinhão no posto 40 [mm].

*DIFFUBC* (DIFF-case Upper Bearing Compensation) é a compensação de prensagem do diâmetro do rolamento superior na tampa, semelhante a compensação de prensagem realizada no pinhão (PHBCIDC) [mm].

*GTHC* (GaskeT Housing Compensation) é a compensação de altura realizada devido a aplicação de adesivo de vedação entre a tampa e carcaça, realizada no posto 130 [mm].

*OL3* é uma o constante de ajuste similar a C1 utilizada para ao ajuste do pinhão [mm].

Conforme observado nos itens descritos acima é possível concluir que existem muitos itens que podem influenciar os cálculos e seleção dos shim. Esta análise segue como sugestão para continuação deste trabalho.

## 10 BIBLIOGRAFIA

Agraval, R. Lawless, J.F. and Mackay, R.J. 1999 **“Analysis of Variation Transmission in Manufacturing Process - Part II”** . Journal of Quality Technology.

Fong, D. Y. T. and Lawless, J. F. 1998 **“The Analysis of Process Variation Transmission with Multivariate Measurements”**. Statistica Sinica 8.

Fonseca, J. 2002 **“Mecânica dos Sólidos para a Engenharia Mecânica”**. Apostila de aula mecânica dos sólidos.

Huang, Q. and Shi, J. **“Variation Transmission Analysis and Diagnosis of Multi-operational Machining Process”**. IIE Transactions 1545-8830, volume 36, 2004.

Lawless, J. F. Mackay, R. J. and Robinson J.A. **“Analysis of Variation Transmission in Manufacturing Process - Part I”** . Journal of Quality Technology 1999.

Rosário, M. B. 2004 **“Controle Estatístico de Processo: um estudo de caso de uma empresa de eletrodomésticos”** Tese de mestrado profissionalizante, UFRGS.

Shigley, J.E. 1984 **“Elementos de Máquinas”** McGraw-Hill.

Siqueira, L.G.P. 1997 **“Controle estatístico do processo”** Pioneira.

Souza, G. R. 2002 **“Implantação de Controle Estatístico de Processo em uma Empresa de Bebidas”** Tese de mestrado profissionalizante ênfase em qualidade e desenvolvimento de produtos e processos, UFRGS

Thimoshenko, S.P. 1907 **“Teoria da elasticidade”** McGraw-Hill.

Werkema, M.C.C. 1995 **“Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos”** Fundação Christiano Ottoni.

## 10.1 Bibliografia utilizada como fonte para as figuras do eixo diferencial

Envenenado, <http://www.envenenado.com.br/howwork/diferencial/diferencial.html>

How Stuff Works, <http://www.hsw.uol.com.br/>

Matweb, <http://www.matweb.com>



ITEM NO.	SHEET	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY
1	2	E55337	CARRIER - FIN	1
--	--	E85874	COVER - ASSY	-
2	2	E55339	COVER - CARRIER FIN	1
3	2	E54038	BUSHING ASSY MOUNTING	1
4	2	55192-2	SCREW - FLANGE HEAD (30 MM LONG)	14
--	--	SEE TAB	CASE ASSY - DIFF STD	-
5	2	X53647	CASE DIFF - FIN STD	1
--	--	SEE TAB	CASE ASSY - DIFF STD	-
5	2	X53888	CASE DIFF - FIN STD	1
--	--	SEE TAB	CASE ASSY - DIFF STD	-
5	2	X53886	CASE DIFF - FIN STD	1
6	2	E54177	THRUSTWASHER - DIFF PINION	2
7	2	E52908	PINION - NET FORMED DIFF FIN	2
8	2	E52907	GEAR - NET FORMED DIFF FIN	2
9	2	E53201	THRUSTWASHER - DIFF GEAR	2
10	2	E53675	SHAFT- DIFF STD & T/L	1
11	2	E53287	PIN - ROLL	1
12	2	SEE TAB	GEAR & PINION ASSY	-
13	2	E53323-1	SCREW - DRIVE GEAR	10
14	2	E53197	SHIM - ADJ (AS REQD)	1
15	2	E53642	SPACER - COLLAPSIBLE	1
16	2	E566233	BEARING CONE - ROLLER	1
17	2	E566234	BEARING CUP - ROLLER	1
18	2	E566232	BEARING CUP - ROLLER	1
19	2	E566231	BEARING CONE - ROLLER	1
20	2	<C1>54263	SEAL - OIL	1
--	--	E86813	COMPANION FLANGE ASSY	-
21	2	E54295	COMPANION FLANGE - FIN	1
22	2	50312	DEFLECTOR OUTER	1
23	2	E55171	DEFLECTOR INNER	1
24	2	E53456	NUT - PINION	1
25	2	E53460	RETAINER - PINION NUT	1
--	--	E85779	BRACKET ASSY - MOUNTING	-
26	2	E55120	BRACKET - AXLE MOUNTING - FIN	1
27	2	E55300	BUSHING ASSY MOUNTING	1
28	2	E55277-5	SCREW - FLANGE HEAD (55 MM LONG)	3
29	2	50113	SEAL - OIL	2
30	2	50116	SPACER - BEARING PRELOAD	1
31	2	E566279 OR E566303	BEARING CONE - ROLLER	1
32	2	E566280 OR E566304	BEARING CUP - ROLLER	1
33	2	E566282 OR E566306	BEARING CUP - ROLLER	1
34	2	E566281 OR E566305	BEARING CONE - ROLLER	1
35	2	E53810	SPACER - BEARING PRELOAD	1
--	--	E85411	TUBE ASSY	-
36	2	E54165	TUBE FRONT FIN	1
37	2	E54039	BUSHING ASSY MOUNTING	1
38	2	566063	BEARING ASSY - W/O RACE	1
39	2	E53672-3	SCREW - FLANGE HEAD (30 MM LONG)	4
40	2	E53968	RING - O	1
41	2	E55461	VENT	1
42	2	E55117	PLUG - PIPE (FILL)	1
43	3	50122	PLUG - PIPE (DRAIN)(MAGNETIC)	1
44	2	43088	CAP - PROTECTION (VENT)	1
45	2	E54033	CAP - PROTECTION (TUBE BORES)	1
46	3	50189	LOCTITE 574 (COVER SEALANT)	1
47	--	X2001287	CASTROL SAF-X0	SEE TABLE

Figura A2 - Lista de componentes do eixo diferencial frontal.

## ANEXO B – demais postos da linha de montagem

### B.1 Posto 90

Neste posto ocorre a prensagem e parafusamento da coroa no diff-case, sendo que a coroa já esta no pallet (posicionada juntamente com o pinhão no posto 25) e o diff-case é proveniente da célula de montagem do diff-case, máquinas representadas por 1684-10, 1684-20 e 164-30 no lay-out da figura 3.1.

Este posto é totalmente automático, o robô pega a coroa e posiciona na prensa, pega um diff-case no alimentador e posiciona na coroa, avança o cilindro e prensa o conjunto. Após a prensagem um sistema automático de alimentação posiciona os 10 parafusos com pré-torque. Segue na figura B.1 uma foto deste posto.

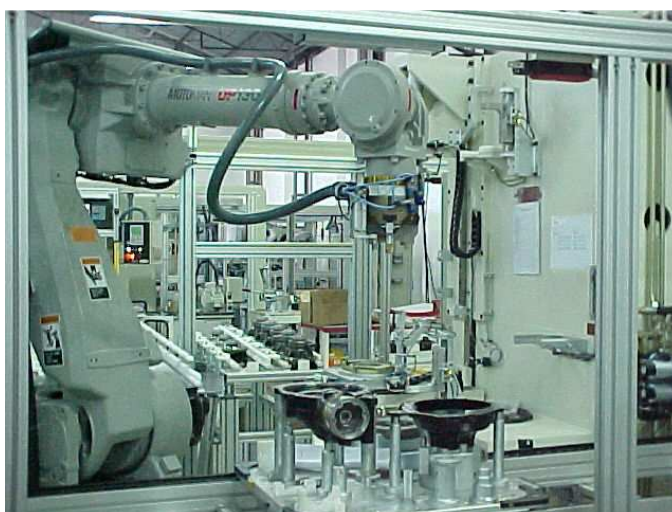


Figura B.1- Foto do posto 90.

### B.2 Posto 100

Nesta estação ocorre o parafusamento automático dos parafusos da coroa diff-case, este torque é realizado através da técnica “yeld-point”, através da monitoração do gradiente de ângulo e torque para cada incremento de ângulo dado ao parafuso. Segue na figura A.2 uma foto do posto 100.



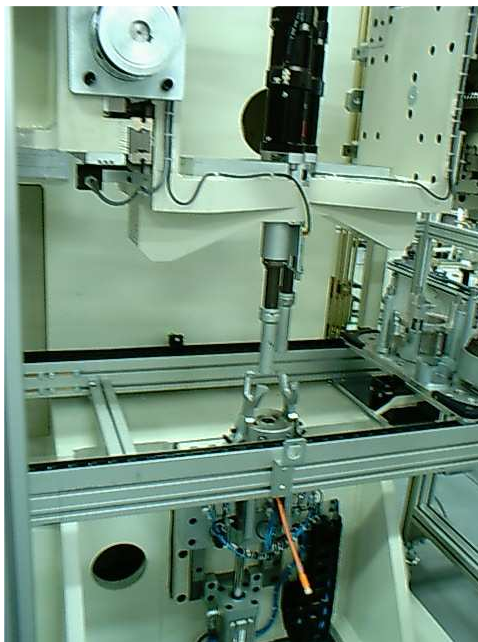


Figura B.2 - Foto do posto 100.

### B.3 Posto 110

Neste posto é medido o diff-case e calculados os shims da tampa e da carcaça. Para o sistema diferencial a pré-carga é dada através da seleção dos shims sem ajuste final, diferente do pinhão onde é possível apertar a porca até a pré-carga determinada. Devido a precisão do cálculo este é um dos postos mais importantes da linha de montagem.

No ciclo de operação o operador posiciona o diff-case com os rolamentos e aplica a pré-carga axial, com esta pré-carga é lido o torque de giro do conjunto, sendo este torque o objetivo de montagem do diff-case (mesmo procedimento realizado no posto 40 para os rolamentos do pinhão).

Também é medida a altura do diff-case, da coroa e dos diâmetros dos rolamentos, todos estes valores mais os dados de entrada da carcaça e tampa serão utilizados para determinar os dois shims do produto (um para a tampa e outro para a carcaça). Segue na figura B.3 uma foto deste posto.



Figura B.3 – Foto do posto 110.

Esta pré-carga e posicionamento da coroa é mais difícil de ser obtida do que no caso do pinhão porque existe deslocamento da carcaça e da coroa com a pré-carga aplicada, ou seja é necessário corrigi-las com o shim, proporcionalmente ao stiffness calculado no posto 20.

Ainda existe o deslocamento do conjunto diferencial e também das planetárias e as compensações de prensagem dos dois rolamentos, enfim um número de variáveis muito maior que na montagem do pinhão.

Como existem muitas medições e cálculos executados para determinar a espessura destes 2 shims este procedimento não será abordado no presente trabalho pois foge aos escopo do mesmo.

#### **B.4 Posto 120**

No posto 120 ocorre a seleção dos shims da carcaça e tampa. O sistema de seleção e montagem é semelhantes ao posto 50 onde acende um led indicando a classe do shim, o operador retira o mesmo do magazine e posiciona no verificador, após a verificação é realizada a prensagem destes shims juntamente com as capas. Segue uma foto deste posto na figura B.4.



Figura B.4 - Foto do posto 120.

### B.5 Posto 130

Na entrada deste posto o operador posiciona o diff-case dentro da carcaça e monta o anel de vedação para o caso dos modelos rear. No caso do modelo front existe um robô com um sistema automático de aplicação de adesivo que aplica o mesmo sobre a carcaça, após a peça sair da região de aplicação o operador posiciona a tampa sobre a carcaça fechando o eixo e liberando o produto para a próxima estação. Segue uma foto deste posto na figura B.5.



Figura B.5 - Foto do posto 130.

## B.6 Posto 140

Neste local é realizado posicionamento e pré torque dos parafusos da tampa e carcaça, este processo é realizado de forma totalmente automática por um robô e sistema de alimentação de parafusos. No caso do modelo rear existem 12 parafusos, no caso do front existem 14 parafusos. Este pré-torque visa somente posicionar os parafusos para diminuir o tempo de aperto na próxima estação. Segue na figura B.6 uma foto desta estação.



Figura B.6 - Foto do posto 140.

## B.7 Posto 150

No posto 150 ocorre o parafusamento automático de todos os parafusos posicionados no posto 140. O método de parafusamento e equipamentos de aperto são os mesmos utilizados no posto 100.

## B.8 Posto 160

Este é posto onde é medido o “backlash” que é a folga do engrenamento entre pinhão e coroa e também a pré-carga dos rolamento do diff-case através do TTR. Segue na figura B.7 uma foto deste posto.



Figura B.7 - Foto do posto 160.

Para medir o backlash dente a dente da engrenagem o conjunto é girado no sentido horário, medindo o ângulo do eixo do pinhão e também o ângulo do eixo do diff-case com encoders de alta precisão, após o sistema é girado novamente no sentido anti-horário e medidos novamente os ângulos, a diferença angular entre o giro nos dois sentidos representa o backlash em cada ponto da engrenagem. Segue na figura B.8 um gráfico dos pontos obtidos nos encoders.

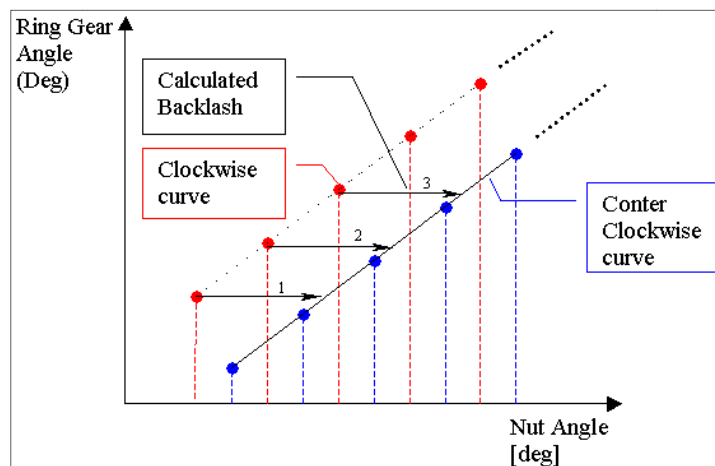


Figura B.8 - Pontos gerados pelo came.

A grande dificuldade da máquina é medir o TTR do diff-case pois o pinhão já está montado no conjunto, desta maneira girando o diff-case o pinhão seria girado também e o torque lido acabaria sendo a somatória de todo o conjunto.

Para esta medição são utilizados os valores de backlash de cada ponto, com estes valores a máquina calcula o ponto intermediário entre os dentes gerando um came virtual que é a trajetória dos pontos médios no sentido horário e anti-horário. Com o came gerado os sistemas de giro do pinhão e diff-case giram em sincronismo percorrendo este came virtual, percorrendo esta trajetória com precisão não existe contato entre os dentes da engrenagem possibilitando uma leitura de torque somente dos rolamentos do diff-case.

### **B.9 Posto 165 e 170**

Estes postos são utilizados para aplicar de adesivo e montar os motores ETM dos produtos Rear L319ETM e Rear L322ETM. Para o produto front não existe ciclo nesta estação. Segue na figura B.9 uma foto deste posto.



Figura B.9 - Foto posto 170.

### **B.10 Posto 180**

Este posto é destinado para a montagem completa do tubo no modelo front, e também a marcação do produto através de um código micropuncionado, esta marcação é realizada para todos os modelos de peças. Segue na figura B.10 uma foto deste posto.

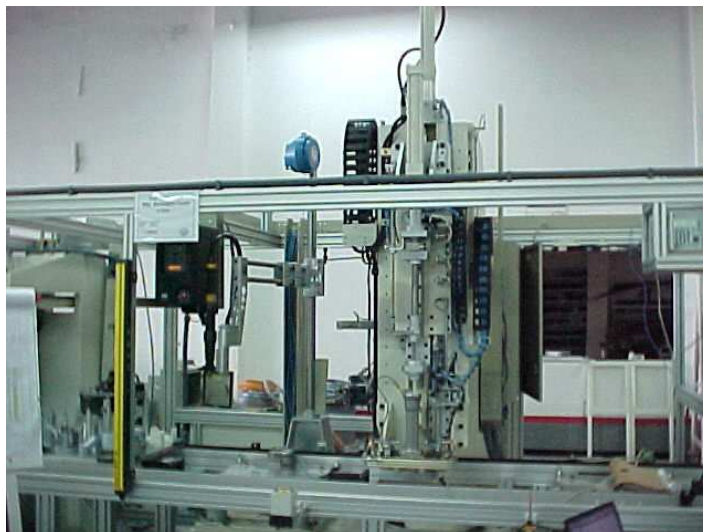


Figura B.10 - Foto posto 180.

### **B.11 Posto 190 e 195**

No posto 190 ocorre a prensagem dos rolamentos de rolos na carcaça e no tubo do front e também a prensagem do vent tube. No posto 195 ocorre a prensagem dos retentores e trava da porca além do teste de estanqueidade. Seguem nas figuras B.11 e B.12 fotos do posto 190 e 195 respectivamente.

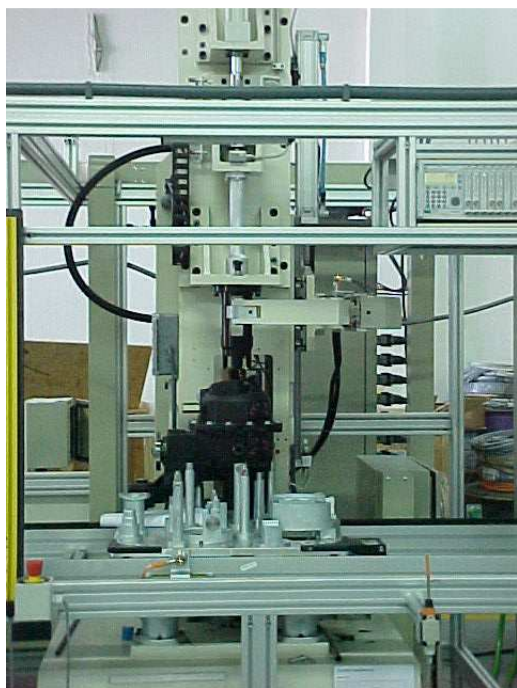


Figura B.11 - Foto posto 190.



Figura B.12 - Foto posto 195.

## **B.12 Posto 200 e 210**

O posto 200 é a máquina de teste funcional onde é simulado o funcionamento do produto no veículo (máquina não foi fabricada pela Muri Linhas de montagem). O posto 210 é o local de descarga e montagem da etiqueta e tampões final para transporte do produto.



**ANEXO C – Valores de erro obtidos no banco de dados**

Segue na tabela C.1 os valores de erro obtidos no banco de dados.

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,1304	0,0398	0,0277	0,0187	0,0106	0,0040	-0,0036	-0,0106	-0,0183	-0,0315
0,1298	0,0398	0,0277	0,0186	0,0105	0,0040	-0,0036	-0,0106	-0,0184	-0,0315
0,1174	0,0398	0,0277	0,0186	0,0105	0,0040	-0,0036	-0,0106	-0,0184	-0,0315
0,1172	0,0397	0,0277	0,0186	0,0105	0,0040	-0,0036	-0,0106	-0,0184	-0,0315
0,1156	0,0397	0,0277	0,0186	0,0105	0,0039	-0,0036	-0,0106	-0,0184	-0,0315
0,1155	0,0397	0,0277	0,0186	0,0105	0,0038	-0,0036	-0,0106	-0,0185	-0,0316
0,1119	0,0397	0,0277	0,0186	0,0105	0,0038	-0,0037	-0,0106	-0,0186	-0,0316
0,1079	0,0396	0,0276	0,0186	0,0104	0,0038	-0,0037	-0,0107	-0,0186	-0,0317
0,1073	0,0396	0,0276	0,0186	0,0104	0,0038	-0,0037	-0,0107	-0,0186	-0,0317
0,1050	0,0396	0,0276	0,0186	0,0104	0,0038	-0,0037	-0,0107	-0,0186	-0,0317
0,1046	0,0396	0,0275	0,0185	0,0104	0,0037	-0,0037	-0,0107	-0,0186	-0,0318
0,1041	0,0396	0,0275	0,0185	0,0103	0,0037	-0,0037	-0,0107	-0,0186	-0,0318
0,1040	0,0395	0,0275	0,0185	0,0103	0,0037	-0,0037	-0,0107	-0,0186	-0,0319
0,1024	0,0395	0,0275	0,0185	0,0103	0,0037	-0,0037	-0,0107	-0,0187	-0,0320
0,0999	0,0394	0,0275	0,0185	0,0103	0,0037	-0,0037	-0,0108	-0,0187	-0,0320
0,0991	0,0394	0,0275	0,0185	0,0103	0,0037	-0,0038	-0,0109	-0,0188	-0,0321
0,0986	0,0394	0,0275	0,0184	0,0103	0,0037	-0,0038	-0,0109	-0,0188	-0,0321
0,0958	0,0393	0,0274	0,0184	0,0102	0,0037	-0,0038	-0,0109	-0,0189	-0,0322
0,0953	0,0393	0,0274	0,0184	0,0102	0,0037	-0,0039	-0,0109	-0,0189	-0,0322
0,0943	0,0393	0,0274	0,0184	0,0102	0,0036	-0,0039	-0,0109	-0,0189	-0,0322
0,0937	0,0393	0,0273	0,0184	0,0102	0,0036	-0,0039	-0,0109	-0,0190	-0,0323
0,0927	0,0392	0,0273	0,0183	0,0102	0,0036	-0,0039	-0,0109	-0,0190	-0,0323
0,0903	0,0392	0,0273	0,0183	0,0102	0,0036	-0,0039	-0,0109	-0,0191	-0,0323
0,0889	0,0392	0,0272	0,0183	0,0101	0,0036	-0,0039	-0,0110	-0,0192	-0,0323
0,0887	0,0392	0,0272	0,0183	0,0101	0,0036	-0,0040	-0,0110	-0,0192	-0,0324
0,0845	0,0392	0,0272	0,0183	0,0101	0,0036	-0,0040	-0,0110	-0,0192	-0,0325
0,0832	0,0392	0,0271	0,0183	0,0101	0,0036	-0,0040	-0,0110	-0,0193	-0,0325
0,0828	0,0392	0,0271	0,0182	0,0101	0,0035	-0,0040	-0,0110	-0,0193	-0,0326
0,0826	0,0391	0,0271	0,0182	0,0101	0,0035	-0,0040	-0,0110	-0,0193	-0,0326
0,0825	0,0391	0,0271	0,0181	0,0101	0,0035	-0,0040	-0,0110	-0,0194	-0,0326
0,0816	0,0391	0,0270	0,0181	0,0100	0,0035	-0,0041	-0,0110	-0,0194	-0,0327
0,0803	0,0390	0,0270	0,0181	0,0100	0,0035	-0,0042	-0,0111	-0,0195	-0,0327
0,0795	0,0390	0,0270	0,0180	0,0100	0,0035	-0,0042	-0,0111	-0,0195	-0,0328
0,0793	0,0390	0,0269	0,0180	0,0100	0,0035	-0,0042	-0,0111	-0,0195	-0,0328
0,0789	0,0388	0,0269	0,0180	0,0100	0,0035	-0,0042	-0,0111	-0,0195	-0,0329
0,0786	0,0387	0,0269	0,0180	0,0100	0,0035	-0,0042	-0,0111	-0,0196	-0,0329
0,0783	0,0386	0,0269	0,0179	0,0099	0,0035	-0,0042	-0,0111	-0,0196	-0,0330

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0782	0,0386	0,0268	0,0179	0,0099	0,0034	-0,0042	-0,0112	-0,0196	-0,0330
0,0781	0,0385	0,0268	0,0179	0,0099	0,0034	-0,0043	-0,0112	-0,0197	-0,0331
0,0771	0,0385	0,0268	0,0178	0,0099	0,0034	-0,0043	-0,0112	-0,0197	-0,0331
0,0771	0,0385	0,0268	0,0178	0,0098	0,0034	-0,0043	-0,0112	-0,0197	-0,0331
0,0760	0,0385	0,0268	0,0178	0,0098	0,0033	-0,0043	-0,0112	-0,0197	-0,0331
0,0753	0,0385	0,0268	0,0178	0,0098	0,0033	-0,0043	-0,0113	-0,0197	-0,0332
0,0746	0,0384	0,0268	0,0177	0,0098	0,0033	-0,0043	-0,0113	-0,0198	-0,0332
0,0746	0,0384	0,0267	0,0177	0,0098	0,0032	-0,0043	-0,0113	-0,0198	-0,0332
0,0745	0,0384	0,0267	0,0177	0,0097	0,0032	-0,0043	-0,0113	-0,0198	-0,0333
0,0744	0,0384	0,0267	0,0177	0,0097	0,0032	-0,0044	-0,0113	-0,0198	-0,0333
0,0743	0,0384	0,0265	0,0177	0,0097	0,0032	-0,0044	-0,0113	-0,0199	-0,0333
0,0743	0,0383	0,0265	0,0177	0,0097	0,0032	-0,0044	-0,0114	-0,0199	-0,0334
0,0731	0,0383	0,0265	0,0177	0,0097	0,0032	-0,0044	-0,0114	-0,0199	-0,0335
0,0730	0,0382	0,0265	0,0176	0,0097	0,0032	-0,0045	-0,0114	-0,0199	-0,0335
0,0724	0,0382	0,0265	0,0176	0,0097	0,0031	-0,0045	-0,0114	-0,0200	-0,0335
0,0724	0,0381	0,0264	0,0176	0,0097	0,0031	-0,0045	-0,0115	-0,0200	-0,0335
0,0718	0,0381	0,0264	0,0176	0,0097	0,0031	-0,0045	-0,0115	-0,0200	-0,0336
0,0709	0,0380	0,0264	0,0176	0,0096	0,0031	-0,0046	-0,0115	-0,0200	-0,0336
0,0709	0,0380	0,0264	0,0176	0,0096	0,0030	-0,0046	-0,0115	-0,0200	-0,0336
0,0689	0,0380	0,0264	0,0175	0,0096	0,0030	-0,0046	-0,0116	-0,0201	-0,0338
0,0682	0,0380	0,0263	0,0175	0,0096	0,0030	-0,0046	-0,0116	-0,0201	-0,0339
0,0681	0,0380	0,0263	0,0175	0,0096	0,0030	-0,0046	-0,0116	-0,0201	-0,0340
0,0678	0,0379	0,0262	0,0174	0,0096	0,0030	-0,0046	-0,0116	-0,0202	-0,0340
0,0677	0,0379	0,0262	0,0174	0,0095	0,0030	-0,0047	-0,0117	-0,0202	-0,0340
0,0676	0,0379	0,0261	0,0173	0,0095	0,0030	-0,0047	-0,0117	-0,0202	-0,0340
0,0674	0,0379	0,0261	0,0173	0,0095	0,0030	-0,0047	-0,0117	-0,0203	-0,0341
0,0664	0,0378	0,0261	0,0173	0,0095	0,0030	-0,0047	-0,0117	-0,0203	-0,0341
0,0658	0,0378	0,0260	0,0172	0,0095	0,0030	-0,0048	-0,0117	-0,0203	-0,0341
0,0653	0,0377	0,0260	0,0172	0,0095	0,0029	-0,0048	-0,0118	-0,0203	-0,0342
0,0652	0,0377	0,0260	0,0172	0,0095	0,0029	-0,0049	-0,0118	-0,0203	-0,0342
0,0649	0,0377	0,0260	0,0172	0,0095	0,0029	-0,0049	-0,0119	-0,0203	-0,0343
0,0641	0,0377	0,0260	0,0172	0,0094	0,0029	-0,0049	-0,0119	-0,0203	-0,0343
0,0637	0,0377	0,0260	0,0171	0,0094	0,0029	-0,0049	-0,0119	-0,0203	-0,0343
0,0630	0,0377	0,0259	0,0171	0,0094	0,0028	-0,0049	-0,0119	-0,0204	-0,0343
0,0627	0,0377	0,0259	0,0171	0,0094	0,0028	-0,0049	-0,0119	-0,0204	-0,0344
0,0624	0,0377	0,0259	0,0171	0,0094	0,0028	-0,0049	-0,0119	-0,0204	-0,0344
0,0620	0,0377	0,0259	0,0171	0,0094	0,0028	-0,0049	-0,0119	-0,0204	-0,0344
0,0620	0,0376	0,0259	0,0171	0,0094	0,0028	-0,0050	-0,0120	-0,0204	-0,0344
0,0616	0,0376	0,0259	0,0171	0,0094	0,0027	-0,0050	-0,0120	-0,0205	-0,0346
0,0616	0,0376	0,0259	0,0170	0,0093	0,0027	-0,0050	-0,0120	-0,0205	-0,0347
0,0611	0,0375	0,0259	0,0170	0,0093	0,0027	-0,0051	-0,0120	-0,0205	-0,0347
0,0608	0,0375	0,0258	0,0170	0,0092	0,0027	-0,0051	-0,0120	-0,0205	-0,0347

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0604	0,0375	0,0258	0,0170	0,0092	0,0027	-0,0051	-0,0120	-0,0206	-0,0347
0,0602	0,0374	0,0258	0,0170	0,0092	0,0026	-0,0051	-0,0120	-0,0206	-0,0349
0,0602	0,0374	0,0258	0,0169	0,0092	0,0026	-0,0051	-0,0120	-0,0207	-0,0349
0,0599	0,0373	0,0258	0,0169	0,0092	0,0026	-0,0051	-0,0121	-0,0207	-0,0349
0,0598	0,0372	0,0257	0,0169	0,0092	0,0026	-0,0052	-0,0121	-0,0207	-0,0349
0,0598	0,0372	0,0257	0,0169	0,0092	0,0026	-0,0052	-0,0121	-0,0207	-0,0349
0,0597	0,0372	0,0257	0,0168	0,0092	0,0026	-0,0052	-0,0121	-0,0207	-0,0350
0,0596	0,0372	0,0257	0,0168	0,0092	0,0026	-0,0052	-0,0121	-0,0207	-0,0350
0,0596	0,0372	0,0256	0,0168	0,0091	0,0026	-0,0052	-0,0121	-0,0208	-0,0351
0,0595	0,0371	0,0256	0,0168	0,0091	0,0026	-0,0052	-0,0122	-0,0208	-0,0351
0,0595	0,0371	0,0256	0,0168	0,0091	0,0026	-0,0053	-0,0122	-0,0208	-0,0351
0,0594	0,0371	0,0256	0,0168	0,0091	0,0026	-0,0053	-0,0122	-0,0208	-0,0351
0,0594	0,0371	0,0256	0,0168	0,0091	0,0026	-0,0053	-0,0122	-0,0209	-0,0352
0,0593	0,0370	0,0256	0,0167	0,0091	0,0025	-0,0054	-0,0122	-0,0209	-0,0352
0,0591	0,0370	0,0256	0,0167	0,0091	0,0025	-0,0054	-0,0122	-0,0209	-0,0352
0,0591	0,0370	0,0255	0,0167	0,0091	0,0025	-0,0055	-0,0122	-0,0209	-0,0352
0,0589	0,0370	0,0255	0,0167	0,0091	0,0024	-0,0055	-0,0122	-0,0209	-0,0353
0,0588	0,0369	0,0255	0,0167	0,0091	0,0024	-0,0055	-0,0123	-0,0209	-0,0353
0,0588	0,0369	0,0254	0,0167	0,0090	0,0024	-0,0055	-0,0123	-0,0210	-0,0354
0,0587	0,0369	0,0254	0,0166	0,0090	0,0024	-0,0055	-0,0123	-0,0210	-0,0354
0,0586	0,0369	0,0254	0,0166	0,0090	0,0024	-0,0055	-0,0123	-0,0211	-0,0354
0,0584	0,0368	0,0254	0,0166	0,0090	0,0024	-0,0055	-0,0123	-0,0212	-0,0356
0,0583	0,0368	0,0254	0,0166	0,0089	0,0024	-0,0055	-0,0123	-0,0212	-0,0356
0,0582	0,0367	0,0254	0,0166	0,0089	0,0023	-0,0055	-0,0123	-0,0212	-0,0357
0,0582	0,0367	0,0254	0,0166	0,0089	0,0023	-0,0055	-0,0123	-0,0213	-0,0358
0,0582	0,0366	0,0253	0,0166	0,0089	0,0023	-0,0055	-0,0124	-0,0213	-0,0358
0,0580	0,0366	0,0253	0,0165	0,0089	0,0023	-0,0056	-0,0124	-0,0213	-0,0359
0,0580	0,0366	0,0253	0,0165	0,0089	0,0023	-0,0056	-0,0124	-0,0213	-0,0359
0,0579	0,0365	0,0253	0,0165	0,0089	0,0023	-0,0056	-0,0124	-0,0214	-0,0360
0,0578	0,0365	0,0253	0,0165	0,0089	0,0023	-0,0056	-0,0124	-0,0214	-0,0360
0,0577	0,0365	0,0253	0,0165	0,0088	0,0022	-0,0057	-0,0124	-0,0215	-0,0361
0,0577	0,0365	0,0253	0,0165	0,0088	0,0022	-0,0057	-0,0124	-0,0215	-0,0362
0,0576	0,0365	0,0252	0,0165	0,0088	0,0022	-0,0057	-0,0125	-0,0215	-0,0362
0,0575	0,0364	0,0252	0,0164	0,0088	0,0022	-0,0057	-0,0125	-0,0216	-0,0362
0,0575	0,0364	0,0252	0,0164	0,0087	0,0021	-0,0057	-0,0125	-0,0216	-0,0363
0,0574	0,0363	0,0252	0,0164	0,0087	0,0021	-0,0057	-0,0125	-0,0216	-0,0363
0,0573	0,0363	0,0252	0,0164	0,0087	0,0021	-0,0057	-0,0125	-0,0217	-0,0363
0,0572	0,0363	0,0251	0,0164	0,0087	0,0021	-0,0057	-0,0125	-0,0217	-0,0364
0,0571	0,0362	0,0251	0,0164	0,0087	0,0021	-0,0057	-0,0125	-0,0217	-0,0364
0,0569	0,0362	0,0250	0,0164	0,0087	0,0021	-0,0059	-0,0125	-0,0217	-0,0364
0,0568	0,0362	0,0250	0,0164	0,0086	0,0021	-0,0059	-0,0125	-0,0217	-0,0365
0,0568	0,0361	0,0250	0,0163	0,0086	0,0021	-0,0059	-0,0126	-0,0218	-0,0365

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0567	0,0361	0,0250	0,0163	0,0086	0,0020	-0,0060	-0,0126	-0,0218	-0,0367
0,0567	0,0361	0,0250	0,0163	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0126	-0,0219	-0,0367
0,0567	0,0361	0,0250	0,0163	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0126	-0,0219	-0,0367
0,0566	0,0360	0,0249	0,0163	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0126	-0,0219	-0,0367
0,0566	0,0360	0,0249	0,0163	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0127	-0,0219	-0,0368
0,0566	0,0359	0,0249	0,0163	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0127	-0,0219	-0,0368
0,0565	0,0359	0,0248	0,0162	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0127	-0,0220	-0,0368
0,0565	0,0359	0,0248	0,0162	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0127	-0,0220	-0,0369
0,0565	0,0359	0,0248	0,0162	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0128	-0,0221	-0,0369
0,0564	0,0359	0,0247	0,0161	0,0085	0,0020	-0,0060	-0,0128	-0,0221	-0,0370
0,0563	0,0359	0,0247	0,0161	0,0084	0,0019	-0,0060	-0,0128	-0,0221	-0,0370
0,0562	0,0358	0,0247	0,0161	0,0084	0,0019	-0,0061	-0,0128	-0,0221	-0,0370
0,0562	0,0358	0,0247	0,0161	0,0084	0,0018	-0,0061	-0,0128	-0,0222	-0,0370
0,0562	0,0358	0,0247	0,0161	0,0084	0,0018	-0,0061	-0,0128	-0,0222	-0,0371
0,0562	0,0357	0,0247	0,0161	0,0084	0,0018	-0,0061	-0,0128	-0,0222	-0,0371
0,0561	0,0357	0,0247	0,0161	0,0084	0,0017	-0,0061	-0,0128	-0,0222	-0,0371
0,0557	0,0357	0,0246	0,0160	0,0084	0,0017	-0,0061	-0,0129	-0,0223	-0,0372
0,0556	0,0357	0,0246	0,0160	0,0084	0,0017	-0,0061	-0,0129	-0,0224	-0,0372
0,0556	0,0357	0,0246	0,0160	0,0084	0,0017	-0,0062	-0,0129	-0,0224	-0,0372
0,0554	0,0357	0,0245	0,0160	0,0084	0,0017	-0,0062	-0,0129	-0,0224	-0,0373
0,0553	0,0356	0,0244	0,0160	0,0084	0,0017	-0,0062	-0,0129	-0,0224	-0,0373
0,0552	0,0356	0,0244	0,0160	0,0083	0,0016	-0,0062	-0,0129	-0,0224	-0,0374
0,0551	0,0356	0,0244	0,0160	0,0083	0,0016	-0,0062	-0,0129	-0,0224	-0,0374
0,0551	0,0355	0,0244	0,0160	0,0083	0,0016	-0,0062	-0,0129	-0,0224	-0,0374
0,0551	0,0355	0,0244	0,0159	0,0083	0,0016	-0,0062	-0,0129	-0,0225	-0,0376
0,0550	0,0355	0,0243	0,0158	0,0083	0,0016	-0,0062	-0,0129	-0,0225	-0,0376
0,0550	0,0354	0,0243	0,0158	0,0083	0,0016	-0,0062	-0,0130	-0,0225	-0,0376
0,0550	0,0354	0,0243	0,0158	0,0083	0,0016	-0,0063	-0,0130	-0,0226	-0,0376
0,0550	0,0354	0,0243	0,0157	0,0083	0,0015	-0,0063	-0,0130	-0,0226	-0,0377
0,0549	0,0354	0,0243	0,0157	0,0083	0,0015	-0,0063	-0,0130	-0,0226	-0,0377
0,0549	0,0353	0,0243	0,0157	0,0083	0,0015	-0,0063	-0,0130	-0,0227	-0,0377
0,0548	0,0353	0,0242	0,0157	0,0082	0,0015	-0,0063	-0,0131	-0,0227	-0,0378
0,0547	0,0353	0,0242	0,0157	0,0082	0,0015	-0,0064	-0,0131	-0,0227	-0,0379
0,0547	0,0353	0,0242	0,0156	0,0082	0,0015	-0,0064	-0,0131	-0,0228	-0,0380
0,0546	0,0353	0,0242	0,0156	0,0082	0,0015	-0,0064	-0,0131	-0,0228	-0,0380
0,0546	0,0352	0,0242	0,0156	0,0082	0,0014	-0,0064	-0,0132	-0,0228	-0,0380
0,0544	0,0352	0,0241	0,0156	0,0082	0,0014	-0,0064	-0,0133	-0,0228	-0,0380
0,0544	0,0352	0,0241	0,0155	0,0082	0,0014	-0,0064	-0,0133	-0,0228	-0,0380
0,0543	0,0351	0,0241	0,0155	0,0082	0,0014	-0,0064	-0,0133	-0,0228	-0,0381
0,0543	0,0351	0,0240	0,0155	0,0081	0,0014	-0,0064	-0,0133	-0,0228	-0,0383
0,0543	0,0350	0,0240	0,0155	0,0081	0,0014	-0,0064	-0,0133	-0,0228	-0,0383
0,0541	0,0350	0,0240	0,0155	0,0081	0,0013	-0,0065	-0,0133	-0,0228	-0,0385

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0540	0,0350	0,0240	0,0155	0,0081	0,0013	-0,0065	-0,0133	-0,0228	-0,0386
0,0540	0,0350	0,0239	0,0155	0,0081	0,0013	-0,0065	-0,0134	-0,0229	-0,0386
0,0540	0,0349	0,0239	0,0155	0,0081	0,0013	-0,0065	-0,0134	-0,0229	-0,0387
0,0538	0,0349	0,0239	0,0154	0,0081	0,0013	-0,0065	-0,0134	-0,0229	-0,0387
0,0537	0,0349	0,0239	0,0154	0,0080	0,0012	-0,0065	-0,0134	-0,0229	-0,0388
0,0537	0,0349	0,0239	0,0154	0,0080	0,0012	-0,0066	-0,0134	-0,0229	-0,0388
0,0537	0,0349	0,0239	0,0154	0,0080	0,0012	-0,0066	-0,0134	-0,0229	-0,0388
0,0537	0,0349	0,0239	0,0154	0,0080	0,0012	-0,0066	-0,0134	-0,0229	-0,0388
0,0537	0,0348	0,0238	0,0153	0,0080	0,0012	-0,0066	-0,0135	-0,0229	-0,0389
0,0536	0,0348	0,0238	0,0153	0,0080	0,0012	-0,0066	-0,0135	-0,0230	-0,0389
0,0536	0,0348	0,0238	0,0153	0,0080	0,0012	-0,0066	-0,0135	-0,0230	-0,0389
0,0536	0,0348	0,0238	0,0153	0,0079	0,0012	-0,0066	-0,0135	-0,0230	-0,0391
0,0536	0,0347	0,0238	0,0153	0,0079	0,0011	-0,0066	-0,0135	-0,0230	-0,0393
0,0534	0,0347	0,0237	0,0153	0,0079	0,0011	-0,0066	-0,0135	-0,0230	-0,0394
0,0534	0,0346	0,0237	0,0152	0,0079	0,0011	-0,0067	-0,0135	-0,0230	-0,0395
0,0534	0,0346	0,0237	0,0152	0,0079	0,0011	-0,0067	-0,0136	-0,0231	-0,0396
0,0533	0,0346	0,0236	0,0152	0,0079	0,0011	-0,0067	-0,0136	-0,0231	-0,0399
0,0532	0,0346	0,0236	0,0151	0,0078	0,0011	-0,0067	-0,0136	-0,0231	-0,0400
0,0530	0,0345	0,0235	0,0151	0,0078	0,0010	-0,0067	-0,0136	-0,0231	-0,0401
0,0529	0,0344	0,0235	0,0151	0,0078	0,0010	-0,0067	-0,0136	-0,0232	-0,0401
0,0528	0,0344	0,0235	0,0151	0,0078	0,0010	-0,0068	-0,0136	-0,0232	-0,0402
0,0527	0,0343	0,0235	0,0150	0,0078	0,0009	-0,0068	-0,0136	-0,0232	-0,0404
0,0527	0,0342	0,0234	0,0150	0,0078	0,0009	-0,0068	-0,0136	-0,0232	-0,0404
0,0526	0,0342	0,0234	0,0150	0,0078	0,0009	-0,0068	-0,0137	-0,0232	-0,0405
0,0526	0,0342	0,0234	0,0150	0,0077	0,0009	-0,0069	-0,0138	-0,0233	-0,0406
0,0524	0,0342	0,0233	0,0150	0,0077	0,0009	-0,0069	-0,0138	-0,0233	-0,0406
0,0524	0,0342	0,0233	0,0150	0,0077	0,0008	-0,0069	-0,0138	-0,0233	-0,0407
0,0523	0,0341	0,0233	0,0150	0,0077	0,0008	-0,0069	-0,0138	-0,0233	-0,0408
0,0523	0,0339	0,0233	0,0150	0,0077	0,0008	-0,0069	-0,0138	-0,0234	-0,0408
0,0522	0,0339	0,0232	0,0150	0,0076	0,0008	-0,0069	-0,0139	-0,0235	-0,0408
0,0522	0,0339	0,0231	0,0149	0,0076	0,0008	-0,0069	-0,0139	-0,0235	-0,0408
0,0519	0,0339	0,0231	0,0149	0,0076	0,0007	-0,0069	-0,0139	-0,0235	-0,0409
0,0519	0,0338	0,0231	0,0149	0,0075	0,0007	-0,0070	-0,0139	-0,0235	-0,0409
0,0518	0,0337	0,0230	0,0149	0,0075	0,0007	-0,0070	-0,0139	-0,0235	-0,0411
0,0517	0,0337	0,0230	0,0149	0,0075	0,0007	-0,0070	-0,0139	-0,0236	-0,0411
0,0516	0,0336	0,0230	0,0149	0,0075	0,0007	-0,0070	-0,0140	-0,0236	-0,0412
0,0516	0,0336	0,0230	0,0149	0,0075	0,0007	-0,0070	-0,0140	-0,0236	-0,0414
0,0516	0,0336	0,0230	0,0148	0,0075	0,0007	-0,0071	-0,0140	-0,0236	-0,0415
0,0515	0,0336	0,0230	0,0148	0,0075	0,0007	-0,0071	-0,0140	-0,0237	-0,0415
0,0515	0,0336	0,0230	0,0148	0,0075	0,0006	-0,0071	-0,0140	-0,0237	-0,0415
0,0514	0,0335	0,0230	0,0148	0,0075	0,0006	-0,0071	-0,0141	-0,0237	-0,0417
0,0513	0,0335	0,0229	0,0148	0,0075	0,0005	-0,0071	-0,0141	-0,0237	-0,0418

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0513	0,0334	0,0229	0,0147	0,0074	0,0005	-0,0071	-0,0141	-0,0237	-0,0418
0,0513	0,0334	0,0229	0,0147	0,0074	0,0005	-0,0071	-0,0141	-0,0238	-0,0419
0,0510	0,0334	0,0229	0,0147	0,0074	0,0005	-0,0072	-0,0141	-0,0238	-0,0420
0,0510	0,0334	0,0229	0,0147	0,0074	0,0005	-0,0072	-0,0142	-0,0238	-0,0420
0,0509	0,0333	0,0228	0,0146	0,0074	0,0005	-0,0072	-0,0142	-0,0238	-0,0420
0,0508	0,0333	0,0228	0,0146	0,0074	0,0005	-0,0072	-0,0142	-0,0238	-0,0420
0,0508	0,0333	0,0228	0,0145	0,0073	0,0005	-0,0072	-0,0142	-0,0238	-0,0420
0,0508	0,0333	0,0228	0,0145	0,0073	0,0005	-0,0072	-0,0142	-0,0239	-0,0421
0,0507	0,0333	0,0228	0,0145	0,0073	0,0005	-0,0072	-0,0143	-0,0239	-0,0421
0,0507	0,0333	0,0228	0,0144	0,0073	0,0004	-0,0072	-0,0143	-0,0239	-0,0423
0,0507	0,0332	0,0227	0,0144	0,0073	0,0004	-0,0072	-0,0143	-0,0239	-0,0423
0,0506	0,0332	0,0227	0,0144	0,0073	0,0004	-0,0073	-0,0143	-0,0239	-0,0423
0,0506	0,0332	0,0227	0,0144	0,0073	0,0004	-0,0073	-0,0144	-0,0240	-0,0423
0,0505	0,0332	0,0227	0,0144	0,0073	0,0004	-0,0073	-0,0144	-0,0240	-0,0423
0,0504	0,0332	0,0226	0,0144	0,0072	0,0004	-0,0073	-0,0145	-0,0240	-0,0424
0,0503	0,0332	0,0226	0,0143	0,0072	0,0003	-0,0073	-0,0145	-0,0240	-0,0425
0,0502	0,0331	0,0226	0,0143	0,0072	0,0003	-0,0073	-0,0145	-0,0240	-0,0425
0,0502	0,0331	0,0226	0,0143	0,0072	0,0003	-0,0074	-0,0145	-0,0241	-0,0425
0,0501	0,0331	0,0226	0,0143	0,0072	0,0003	-0,0074	-0,0145	-0,0241	-0,0425
0,0500	0,0330	0,0226	0,0143	0,0071	0,0002	-0,0074	-0,0145	-0,0241	-0,0425
0,0499	0,0330	0,0226	0,0143	0,0071	0,0002	-0,0074	-0,0146	-0,0242	-0,0426
0,0499	0,0330	0,0225	0,0143	0,0071	0,0002	-0,0075	-0,0146	-0,0242	-0,0426
0,0499	0,0330	0,0225	0,0142	0,0070	0,0001	-0,0075	-0,0146	-0,0242	-0,0426
0,0497	0,0329	0,0225	0,0141	0,0070	0,0001	-0,0075	-0,0146	-0,0243	-0,0426
0,0497	0,0329	0,0225	0,0141	0,0070	0,0001	-0,0075	-0,0146	-0,0243	-0,0427
0,0497	0,0328	0,0225	0,0141	0,0070	0,0001	-0,0075	-0,0147	-0,0243	-0,0428
0,0496	0,0328	0,0225	0,0141	0,0070	0,0001	-0,0075	-0,0147	-0,0243	-0,0428
0,0495	0,0328	0,0224	0,0141	0,0070	0,0000	-0,0076	-0,0147	-0,0244	-0,0429
0,0494	0,0327	0,0224	0,0141	0,0070	0,0000	-0,0076	-0,0147	-0,0245	-0,0429
0,0493	0,0327	0,0224	0,0141	0,0070	0,0000	-0,0076	-0,0147	-0,0245	-0,0429
0,0493	0,0327	0,0224	0,0140	0,0070	0,0000	-0,0076	-0,0147	-0,0245	-0,0430
0,0492	0,0327	0,0224	0,0140	0,0070	0,0000	-0,0076	-0,0147	-0,0245	-0,0430
0,0492	0,0326	0,0224	0,0140	0,0070	-0,0001	-0,0076	-0,0147	-0,0246	-0,0430
0,0491	0,0326	0,0223	0,0139	0,0070	-0,0001	-0,0076	-0,0147	-0,0246	-0,0430
0,0490	0,0326	0,0223	0,0139	0,0069	-0,0001	-0,0076	-0,0148	-0,0246	-0,0430
0,0489	0,0326	0,0223	0,0139	0,0069	-0,0001	-0,0076	-0,0148	-0,0246	-0,0431
0,0489	0,0326	0,0223	0,0139	0,0069	-0,0001	-0,0077	-0,0148	-0,0247	-0,0431
0,0488	0,0326	0,0223	0,0139	0,0069	-0,0002	-0,0077	-0,0148	-0,0247	-0,0432
0,0488	0,0326	0,0222	0,0138	0,0069	-0,0002	-0,0077	-0,0148	-0,0247	-0,0432
0,0487	0,0326	0,0222	0,0138	0,0069	-0,0002	-0,0077	-0,0148	-0,0248	-0,0432
0,0487	0,0325	0,0221	0,0138	0,0069	-0,0003	-0,0077	-0,0149	-0,0248	-0,0433
0,0487	0,0324	0,0221	0,0138	0,0069	-0,0003	-0,0078	-0,0149	-0,0249	-0,0434

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0486	0,0324	0,0221	0,0138	0,0069	-0,0003	-0,0078	-0,0149	-0,0249	-0,0434
0,0486	0,0324	0,0221	0,0138	0,0069	-0,0003	-0,0078	-0,0149	-0,0249	-0,0434
0,0485	0,0324	0,0221	0,0138	0,0069	-0,0003	-0,0078	-0,0149	-0,0249	-0,0435
0,0484	0,0324	0,0221	0,0138	0,0069	-0,0003	-0,0078	-0,0150	-0,0249	-0,0435
0,0484	0,0324	0,0220	0,0138	0,0068	-0,0003	-0,0079	-0,0150	-0,0250	-0,0436
0,0484	0,0323	0,0220	0,0138	0,0068	-0,0004	-0,0079	-0,0150	-0,0250	-0,0437
0,0484	0,0323	0,0220	0,0137	0,0067	-0,0004	-0,0079	-0,0150	-0,0250	-0,0438
0,0482	0,0323	0,0220	0,0137	0,0067	-0,0004	-0,0079	-0,0150	-0,0250	-0,0439
0,0480	0,0323	0,0220	0,0137	0,0067	-0,0004	-0,0079	-0,0151	-0,0251	-0,0439
0,0480	0,0322	0,0220	0,0137	0,0067	-0,0004	-0,0080	-0,0151	-0,0251	-0,0444
0,0479	0,0322	0,0219	0,0136	0,0067	-0,0005	-0,0080	-0,0151	-0,0251	-0,0445
0,0479	0,0322	0,0219	0,0136	0,0067	-0,0005	-0,0080	-0,0151	-0,0251	-0,0445
0,0478	0,0321	0,0219	0,0136	0,0066	-0,0005	-0,0081	-0,0152	-0,0252	-0,0446
0,0478	0,0320	0,0219	0,0136	0,0066	-0,0005	-0,0081	-0,0152	-0,0252	-0,0446
0,0477	0,0320	0,0219	0,0136	0,0066	-0,0005	-0,0081	-0,0152	-0,0252	-0,0447
0,0476	0,0319	0,0218	0,0136	0,0066	-0,0005	-0,0081	-0,0152	-0,0253	-0,0447
0,0476	0,0319	0,0218	0,0136	0,0066	-0,0005	-0,0081	-0,0153	-0,0255	-0,0447
0,0475	0,0319	0,0218	0,0136	0,0066	-0,0005	-0,0081	-0,0153	-0,0255	-0,0448
0,0475	0,0319	0,0218	0,0136	0,0065	-0,0005	-0,0082	-0,0153	-0,0256	-0,0448
0,0475	0,0318	0,0218	0,0136	0,0065	-0,0005	-0,0082	-0,0153	-0,0256	-0,0449
0,0475	0,0318	0,0218	0,0136	0,0065	-0,0006	-0,0082	-0,0153	-0,0256	-0,0449
0,0474	0,0318	0,0218	0,0135	0,0065	-0,0006	-0,0082	-0,0153	-0,0256	-0,0449
0,0474	0,0318	0,0217	0,0135	0,0065	-0,0006	-0,0082	-0,0154	-0,0257	-0,0451
0,0473	0,0318	0,0217	0,0135	0,0065	-0,0007	-0,0082	-0,0154	-0,0257	-0,0451
0,0473	0,0318	0,0217	0,0134	0,0065	-0,0007	-0,0083	-0,0154	-0,0257	-0,0451
0,0472	0,0317	0,0216	0,0134	0,0064	-0,0007	-0,0083	-0,0154	-0,0257	-0,0453
0,0472	0,0317	0,0216	0,0133	0,0064	-0,0007	-0,0083	-0,0154	-0,0257	-0,0453
0,0472	0,0317	0,0215	0,0132	0,0064	-0,0007	-0,0083	-0,0154	-0,0257	-0,0453
0,0471	0,0316	0,0215	0,0132	0,0064	-0,0007	-0,0083	-0,0154	-0,0258	-0,0455
0,0471	0,0316	0,0215	0,0132	0,0064	-0,0007	-0,0083	-0,0154	-0,0259	-0,0456
0,0470	0,0316	0,0215	0,0132	0,0064	-0,0007	-0,0083	-0,0155	-0,0259	-0,0456
0,0469	0,0315	0,0215	0,0132	0,0063	-0,0007	-0,0084	-0,0155	-0,0260	-0,0456
0,0469	0,0315	0,0214	0,0131	0,0063	-0,0007	-0,0084	-0,0155	-0,0260	-0,0457
0,0468	0,0315	0,0214	0,0131	0,0063	-0,0007	-0,0084	-0,0155	-0,0260	-0,0458
0,0467	0,0314	0,0214	0,0131	0,0063	-0,0008	-0,0084	-0,0155	-0,0260	-0,0461
0,0467	0,0313	0,0214	0,0131	0,0062	-0,0008	-0,0084	-0,0155	-0,0260	-0,0462
0,0466	0,0313	0,0214	0,0131	0,0062	-0,0008	-0,0084	-0,0155	-0,0260	-0,0463
0,0466	0,0313	0,0213	0,0131	0,0062	-0,0008	-0,0084	-0,0156	-0,0261	-0,0464
0,0466	0,0313	0,0213	0,0131	0,0062	-0,0008	-0,0084	-0,0156	-0,0262	-0,0466
0,0466	0,0312	0,0213	0,0130	0,0061	-0,0008	-0,0084	-0,0156	-0,0262	-0,0467
0,0465	0,0311	0,0213	0,0130	0,0061	-0,0009	-0,0085	-0,0156	-0,0262	-0,0468
0,0465	0,0311	0,0213	0,0130	0,0061	-0,0009	-0,0085	-0,0157	-0,0263	-0,0468

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0463	0,0311	0,0212	0,0130	0,0061	-0,0009	-0,0085	-0,0157	-0,0263	-0,0470
0,0461	0,0311	0,0212	0,0130	0,0061	-0,0009	-0,0085	-0,0157	-0,0263	-0,0471
0,0460	0,0311	0,0212	0,0129	0,0061	-0,0009	-0,0085	-0,0157	-0,0263	-0,0472
0,0459	0,0310	0,0211	0,0129	0,0061	-0,0009	-0,0085	-0,0157	-0,0263	-0,0472
0,0458	0,0310	0,0211	0,0129	0,0060	-0,0010	-0,0086	-0,0157	-0,0264	-0,0472
0,0458	0,0310	0,0211	0,0128	0,0060	-0,0010	-0,0086	-0,0158	-0,0264	-0,0474
0,0457	0,0310	0,0211	0,0128	0,0059	-0,0010	-0,0086	-0,0158	-0,0265	-0,0474
0,0456	0,0310	0,0211	0,0128	0,0059	-0,0010	-0,0086	-0,0158	-0,0266	-0,0475
0,0456	0,0310	0,0211	0,0128	0,0059	-0,0010	-0,0086	-0,0158	-0,0266	-0,0479
0,0456	0,0310	0,0211	0,0128	0,0059	-0,0010	-0,0086	-0,0158	-0,0267	-0,0480
0,0455	0,0310	0,0211	0,0128	0,0059	-0,0011	-0,0086	-0,0158	-0,0268	-0,0480
0,0453	0,0310	0,0210	0,0128	0,0059	-0,0011	-0,0086	-0,0158	-0,0268	-0,0480
0,0452	0,0310	0,0210	0,0128	0,0059	-0,0011	-0,0086	-0,0158	-0,0268	-0,0481
0,0452	0,0310	0,0210	0,0128	0,0059	-0,0011	-0,0087	-0,0159	-0,0270	-0,0482
0,0452	0,0309	0,0210	0,0128	0,0058	-0,0011	-0,0088	-0,0159	-0,0270	-0,0482
0,0451	0,0309	0,0210	0,0128	0,0058	-0,0011	-0,0088	-0,0159	-0,0270	-0,0484
0,0451	0,0309	0,0209	0,0128	0,0058	-0,0011	-0,0088	-0,0160	-0,0270	-0,0485
0,0448	0,0308	0,0209	0,0128	0,0058	-0,0011	-0,0088	-0,0161	-0,0271	-0,0485
0,0448	0,0308	0,0209	0,0128	0,0058	-0,0013	-0,0088	-0,0161	-0,0271	-0,0486
0,0447	0,0307	0,0209	0,0128	0,0058	-0,0013	-0,0088	-0,0161	-0,0271	-0,0486
0,0447	0,0307	0,0209	0,0127	0,0058	-0,0013	-0,0088	-0,0161	-0,0271	-0,0486
0,0446	0,0307	0,0209	0,0127	0,0058	-0,0013	-0,0088	-0,0161	-0,0272	-0,0488
0,0446	0,0307	0,0208	0,0127	0,0058	-0,0013	-0,0088	-0,0162	-0,0272	-0,0488
0,0445	0,0307	0,0208	0,0127	0,0058	-0,0013	-0,0088	-0,0162	-0,0272	-0,0489
0,0444	0,0307	0,0208	0,0127	0,0057	-0,0013	-0,0088	-0,0162	-0,0272	-0,0491
0,0444	0,0306	0,0208	0,0127	0,0057	-0,0014	-0,0089	-0,0162	-0,0273	-0,0491
0,0444	0,0306	0,0208	0,0127	0,0057	-0,0014	-0,0089	-0,0162	-0,0273	-0,0493
0,0444	0,0306	0,0208	0,0127	0,0057	-0,0015	-0,0089	-0,0162	-0,0273	-0,0493
0,0443	0,0305	0,0208	0,0127	0,0056	-0,0016	-0,0089	-0,0162	-0,0273	-0,0493
0,0443	0,0305	0,0207	0,0126	0,0056	-0,0016	-0,0089	-0,0162	-0,0274	-0,0495
0,0443	0,0304	0,0207	0,0126	0,0056	-0,0016	-0,0089	-0,0162	-0,0274	-0,0496
0,0443	0,0304	0,0207	0,0126	0,0056	-0,0016	-0,0089	-0,0163	-0,0274	-0,0497
0,0442	0,0304	0,0207	0,0126	0,0056	-0,0016	-0,0089	-0,0163	-0,0275	-0,0497
0,0442	0,0303	0,0206	0,0126	0,0056	-0,0017	-0,0090	-0,0164	-0,0275	-0,0498
0,0441	0,0303	0,0206	0,0125	0,0055	-0,0017	-0,0090	-0,0164	-0,0275	-0,0501
0,0440	0,0303	0,0206	0,0125	0,0055	-0,0017	-0,0090	-0,0164	-0,0276	-0,0503
0,0440	0,0303	0,0206	0,0125	0,0055	-0,0017	-0,0090	-0,0164	-0,0277	-0,0504
0,0440	0,0303	0,0206	0,0125	0,0055	-0,0017	-0,0090	-0,0164	-0,0278	-0,0507
0,0440	0,0302	0,0206	0,0124	0,0055	-0,0018	-0,0090	-0,0165	-0,0279	-0,0507
0,0439	0,0302	0,0206	0,0123	0,0055	-0,0018	-0,0090	-0,0165	-0,0279	-0,0508
0,0439	0,0301	0,0206	0,0123	0,0055	-0,0018	-0,0090	-0,0165	-0,0279	-0,0509
0,0438	0,0301	0,0206	0,0123	0,0055	-0,0018	-0,0090	-0,0165	-0,0279	-0,0513



Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0437	0,0301	0,0206	0,0123	0,0054	-0,0019	-0,0090	-0,0165	-0,0280	-0,0513
0,0437	0,0301	0,0205	0,0123	0,0054	-0,0019	-0,0090	-0,0165	-0,0280	-0,0515
0,0436	0,0300	0,0205	0,0123	0,0054	-0,0019	-0,0091	-0,0165	-0,0280	-0,0516
0,0436	0,0300	0,0205	0,0123	0,0054	-0,0019	-0,0091	-0,0165	-0,0280	-0,0517
0,0435	0,0300	0,0205	0,0122	0,0054	-0,0019	-0,0091	-0,0166	-0,0280	-0,0518
0,0434	0,0300	0,0205	0,0122	0,0053	-0,0020	-0,0091	-0,0166	-0,0280	-0,0518
0,0434	0,0300	0,0205	0,0122	0,0053	-0,0020	-0,0091	-0,0166	-0,0280	-0,0519
0,0434	0,0300	0,0205	0,0122	0,0053	-0,0020	-0,0092	-0,0166	-0,0280	-0,0520
0,0434	0,0299	0,0204	0,0121	0,0053	-0,0020	-0,0092	-0,0166	-0,0280	-0,0520
0,0433	0,0299	0,0204	0,0121	0,0053	-0,0020	-0,0092	-0,0166	-0,0281	-0,0521
0,0433	0,0299	0,0203	0,0121	0,0053	-0,0020	-0,0092	-0,0166	-0,0281	-0,0522
0,0432	0,0299	0,0203	0,0121	0,0053	-0,0020	-0,0092	-0,0166	-0,0281	-0,0523
0,0432	0,0298	0,0203	0,0121	0,0052	-0,0020	-0,0092	-0,0166	-0,0281	-0,0523
0,0431	0,0298	0,0203	0,0120	0,0052	-0,0021	-0,0092	-0,0166	-0,0283	-0,0524
0,0431	0,0298	0,0203	0,0120	0,0052	-0,0021	-0,0093	-0,0167	-0,0283	-0,0526
0,0430	0,0297	0,0203	0,0120	0,0052	-0,0021	-0,0093	-0,0167	-0,0283	-0,0526
0,0430	0,0297	0,0203	0,0119	0,0052	-0,0021	-0,0093	-0,0167	-0,0283	-0,0526
0,0430	0,0297	0,0203	0,0119	0,0052	-0,0021	-0,0093	-0,0167	-0,0283	-0,0530
0,0430	0,0297	0,0202	0,0119	0,0052	-0,0021	-0,0093	-0,0167	-0,0284	-0,0531
0,0430	0,0297	0,0202	0,0118	0,0052	-0,0022	-0,0093	-0,0169	-0,0285	-0,0533
0,0429	0,0297	0,0202	0,0118	0,0051	-0,0022	-0,0093	-0,0169	-0,0286	-0,0534
0,0429	0,0297	0,0202	0,0118	0,0051	-0,0022	-0,0093	-0,0169	-0,0286	-0,0535
0,0429	0,0297	0,0202	0,0118	0,0051	-0,0022	-0,0094	-0,0169	-0,0286	-0,0535
0,0429	0,0296	0,0201	0,0118	0,0051	-0,0023	-0,0094	-0,0169	-0,0286	-0,0536
0,0428	0,0296	0,0201	0,0118	0,0051	-0,0023	-0,0094	-0,0169	-0,0287	-0,0536
0,0428	0,0295	0,0201	0,0118	0,0050	-0,0023	-0,0094	-0,0169	-0,0287	-0,0536
0,0427	0,0295	0,0201	0,0118	0,0050	-0,0023	-0,0094	-0,0169	-0,0287	-0,0537
0,0427	0,0295	0,0201	0,0118	0,0050	-0,0024	-0,0094	-0,0169	-0,0287	-0,0540
0,0427	0,0295	0,0201	0,0118	0,0050	-0,0024	-0,0094	-0,0170	-0,0287	-0,0542
0,0426	0,0294	0,0200	0,0118	0,0050	-0,0024	-0,0094	-0,0170	-0,0288	-0,0544
0,0425	0,0294	0,0200	0,0117	0,0050	-0,0024	-0,0095	-0,0171	-0,0289	-0,0545
0,0425	0,0294	0,0200	0,0117	0,0050	-0,0024	-0,0095	-0,0171	-0,0290	-0,0552
0,0423	0,0294	0,0199	0,0117	0,0050	-0,0025	-0,0095	-0,0171	-0,0290	-0,0554
0,0423	0,0293	0,0199	0,0117	0,0050	-0,0025	-0,0095	-0,0171	-0,0290	-0,0555
0,0423	0,0293	0,0199	0,0117	0,0050	-0,0025	-0,0096	-0,0171	-0,0292	-0,0556
0,0422	0,0293	0,0198	0,0116	0,0049	-0,0025	-0,0096	-0,0172	-0,0292	-0,0559
0,0422	0,0292	0,0198	0,0116	0,0049	-0,0025	-0,0096	-0,0172	-0,0292	-0,0560
0,0421	0,0292	0,0198	0,0116	0,0048	-0,0026	-0,0096	-0,0172	-0,0293	-0,0560
0,0420	0,0292	0,0198	0,0116	0,0048	-0,0026	-0,0096	-0,0172	-0,0293	-0,0561
0,0420	0,0292	0,0197	0,0116	0,0048	-0,0026	-0,0096	-0,0172	-0,0293	-0,0561
0,0420	0,0291	0,0197	0,0116	0,0048	-0,0026	-0,0096	-0,0173	-0,0294	-0,0561
0,0420	0,0291	0,0197	0,0116	0,0048	-0,0026	-0,0096	-0,0173	-0,0294	-0,0565

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0420	0,0291	0,0197	0,0116	0,0047	-0,0027	-0,0097	-0,0173	-0,0294	-0,0565
0,0419	0,0291	0,0197	0,0116	0,0047	-0,0027	-0,0097	-0,0173	-0,0295	-0,0566
0,0419	0,0290	0,0196	0,0116	0,0047	-0,0028	-0,0097	-0,0173	-0,0295	-0,0566
0,0419	0,0290	0,0196	0,0115	0,0047	-0,0028	-0,0098	-0,0173	-0,0295	-0,0568
0,0418	0,0290	0,0196	0,0115	0,0047	-0,0028	-0,0098	-0,0173	-0,0295	-0,0569
0,0418	0,0290	0,0196	0,0115	0,0047	-0,0028	-0,0098	-0,0173	-0,0296	-0,0578
0,0418	0,0290	0,0196	0,0115	0,0047	-0,0028	-0,0098	-0,0174	-0,0296	-0,0579
0,0417	0,0290	0,0196	0,0115	0,0047	-0,0028	-0,0098	-0,0174	-0,0296	-0,0581
0,0417	0,0290	0,0196	0,0115	0,0046	-0,0029	-0,0098	-0,0174	-0,0296	-0,0581
0,0417	0,0290	0,0195	0,0115	0,0046	-0,0029	-0,0098	-0,0174	-0,0297	-0,0584
0,0416	0,0289	0,0195	0,0114	0,0046	-0,0029	-0,0098	-0,0175	-0,0297	-0,0588
0,0416	0,0289	0,0195	0,0114	0,0046	-0,0030	-0,0099	-0,0175	-0,0297	-0,0588
0,0415	0,0288	0,0195	0,0114	0,0046	-0,0030	-0,0099	-0,0175	-0,0298	-0,0590
0,0414	0,0288	0,0194	0,0114	0,0046	-0,0030	-0,0099	-0,0175	-0,0298	-0,0595
0,0414	0,0288	0,0194	0,0113	0,0046	-0,0030	-0,0099	-0,0175	-0,0298	-0,0598
0,0414	0,0288	0,0194	0,0113	0,0046	-0,0030	-0,0099	-0,0175	-0,0300	-0,0611
0,0414	0,0287	0,0194	0,0113	0,0046	-0,0030	-0,0100	-0,0175	-0,0300	-0,0613
0,0414	0,0287	0,0193	0,0113	0,0046	-0,0030	-0,0100	-0,0175	-0,0301	-0,0614
0,0414	0,0287	0,0193	0,0112	0,0045	-0,0030	-0,0100	-0,0175	-0,0302	-0,0619
0,0414	0,0286	0,0193	0,0112	0,0045	-0,0030	-0,0100	-0,0176	-0,0302	-0,0620
0,0413	0,0286	0,0193	0,0112	0,0045	-0,0030	-0,0100	-0,0177	-0,0302	-0,0630
0,0413	0,0286	0,0193	0,0112	0,0045	-0,0031	-0,0100	-0,0177	-0,0303	-0,0632
0,0413	0,0285	0,0193	0,0112	0,0045	-0,0031	-0,0100	-0,0177	-0,0303	-0,0636
0,0412	0,0285	0,0192	0,0112	0,0045	-0,0031	-0,0100	-0,0177	-0,0304	-0,0645
0,0412	0,0285	0,0192	0,0111	0,0045	-0,0031	-0,0101	-0,0177	-0,0304	-0,0645
0,0411	0,0285	0,0192	0,0111	0,0045	-0,0031	-0,0101	-0,0177	-0,0304	-0,0653
0,0410	0,0285	0,0192	0,0111	0,0044	-0,0032	-0,0101	-0,0177	-0,0304	-0,0655
0,0410	0,0284	0,0192	0,0111	0,0044	-0,0032	-0,0101	-0,0177	-0,0305	-0,0668
0,0408	0,0284	0,0192	0,0111	0,0044	-0,0032	-0,0101	-0,0178	-0,0305	-0,0683
0,0408	0,0283	0,0192	0,0111	0,0044	-0,0032	-0,0102	-0,0178	-0,0307	-0,0685
0,0408	0,0283	0,0192	0,0110	0,0044	-0,0032	-0,0102	-0,0178	-0,0307	-0,0706
0,0406	0,0282	0,0191	0,0110	0,0044	-0,0032	-0,0102	-0,0178	-0,0308	-0,0709
0,0406	0,0282	0,0191	0,0110	0,0044	-0,0032	-0,0102	-0,0178	-0,0308	-0,0712
0,0405	0,0281	0,0191	0,0109	0,0044	-0,0032	-0,0102	-0,0178	-0,0308	-0,0717
0,0404	0,0281	0,0191	0,0109	0,0043	-0,0033	-0,0102	-0,0179	-0,0308	-0,0723
0,0404	0,0281	0,0191	0,0109	0,0043	-0,0033	-0,0102	-0,0179	-0,0308	-0,0723
0,0404	0,0281	0,0191	0,0109	0,0043	-0,0033	-0,0102	-0,0179	-0,0308	-0,0764
0,0404	0,0281	0,0191	0,0109	0,0043	-0,0034	-0,0103	-0,0179	-0,0309	-0,0786
0,0403	0,0281	0,0191	0,0108	0,0043	-0,0034	-0,0103	-0,0180	-0,0309	-0,0792
0,0402	0,0281	0,0190	0,0108	0,0043	-0,0034	-0,0103	-0,0180	-0,0309	-0,0815
0,0402	0,0281	0,0190	0,0108	0,0042	-0,0034	-0,0104	-0,0180	-0,0310	-0,0890
0,0402	0,0281	0,0190	0,0108	0,0042	-0,0035	-0,0104	-0,0181	-0,0310	-0,0891

Tabela C.1 – Valores de erros obtidos no banco de dados.

0,0402	0,0280	0,0190	0,0107	0,0042	-0,0035	-0,0104	-0,0181	-0,0310	-0,0899
0,0401	0,0280	0,0190	0,0107	0,0042	-0,0035	-0,0104	-0,0181	-0,0311	-0,0963
0,0401	0,0279	0,0190	0,0107	0,0042	-0,0035	-0,0104	-0,0181	-0,0312	-0,1007
0,0401	0,0279	0,0188	0,0107	0,0042	-0,0035	-0,0105	-0,0181	-0,0312	-0,1083
0,0400	0,0278	0,0188	0,0107	0,0041	-0,0035	-0,0105	-0,0181	-0,0312	
0,0400	0,0278	0,0187	0,0107	0,0041	-0,0035	-0,0105	-0,0182	-0,0314	
0,0400	0,0278	0,0187	0,0107	0,0041	-0,0036	-0,0105	-0,0182	-0,0314	
0,0399	0,0278	0,0187	0,0107	0,0041	-0,0036	-0,0105	-0,0182	-0,0314	
0,0398	0,0278	0,0187	0,0106	0,0041	-0,0036	-0,0105	-0,0182	-0,0315	
0,0398	0,0277	0,0187	0,0106	0,0040	-0,0036	-0,0106	-0,0183	-0,0315	

Nota: Foram excluídos 6 valores inferiores e 5 valores superiores do banco de dados original, pois os mesmos representam valores de erro muito acima dos demais sendo resultantes provavelmente de testes realizados na linha de montagem, calibrações erradas, ou ainda dados entrados manualmente pelos operadores.