Carlos Manuel Silva Mateus

"DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS CONSTRANGIMENTOS DIMENSIONAIS NA MAQUINAÇÃO DE PEÇAS COMPLEXAS EM ALUMÍNIO

Dissertação para a obtenção do grau de

Mestre em Engenharia Electromecânica

UBI
Covilhã
Portugal

UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

JULHO 2008

Agradecimentos

A realização deste trabalho não teria sido possível sem a ajuda de muitas pessoas. Gostaria de expressar, os meus sinceros agradecimentos a todos os que, de uma forma ou de outra, contribuíram para a realização deste trabalho. Sendo assim, gostaria de agradecer, nomeadamente:

- Ao Prof. Abilio Silva, do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, pela sua orientação, conselho, disponibilidade, ajuda e incentivo;

- Ao Eng. Rui Cerejo, pela realização dos ensaios e elaboração da base de dados para exploração;

- Ao Eng. Francisco Morais, pela disponibilidade demonstrada para a realização dos ensaios;

- Aos meus pais pelo seu apoio e ajuda;

- À minha esposa pelo seu apoio, incentivo, compreensão, disponibilidade, ajuda e presença;

- Às minhas filhas, pelo carinho.

INDICE

Agradecimentos 2
INDICE 3
Índice de Figuras 5
Índice de Tabelas 8
Resumo 9
Abstract 10
1 – Introdução 11
1.1 Maquinação do alumínio 12
1.2 – Organização do trabalho 12
1.3 Limitações do trabalho 13
2 – O alumínio e suas aplicações 14
2.1 – Introdução 14
2.2 – Propriedades do alumínio 14
2.2 – O alumínio e as suas aplicações 15
2.3 – Alumínio e suas ligas 17
2.4 – Cárteres de caixa de velocidades 18
2.5 – Problemas associados 19
2.5.1 - Porosidades 19
2.5.2 - Dilatação 20
3 – Procedimentos e metodologia 21
3.1 – Modo de funcionamento 21
3.1.1 – Meter as peças à temperatura de maquinação 21
3.1.2 – Maquinação dos cárteres 22
3.1.3 – Medição dos cárteres 24
3.2 – Metodologia do ensaio experimental 24
3.2.1 – Objectivo 24
3.2.2 – Metodologia 25
3.2.3 – Leitura da temperatura 26
4 – Resultados 27
4.1 – Dados Analisados 27
4.2 – Apresentação do cárter 27
4.2.1 – Apresentação das características 27

4.2.2 – Características analisadas 29
4.2.3 – Dimensões e tolerâncias das características 29
4.3 - Apresentação Gráfica 33
4.3.1 – Característica 2001 – Arvore primária 34
4.3.2 – Característica 2002 – Árvore secundaria 40
4.3.3 – Característica 2003 – Diferencial 44
4.3.4 – Característica 2004 – Eixo de marcha-atrás 49
4.3.5 – Característica 2106 – Centragem caixa 52
4.3.6 – Característica 1101/1102 – Centragem motor 53
4.3.7 – Característica 1000 – Face Motor 54
4.3.8 – Característica 2000 – Face mecanismo 55
4.3.9 – Característica 1000/2000 – Altura do cárter 55
4.3.10 – Gráfico Correlação vs Desvio de IT 57
5 – Conclusão 58
5.1 – Interpretação dos resultados 58
5.2 – Aplicação do estudo 59
5.2.1 – Vantagens e custos 60
5.2.2 – Desvantagens 60
5.3 – Proposição de investigações 62
Bibliografia 63

Índice de Figuras

Fig. 2. 1 – Produção de alumínio ao longo dos anos (in ‘sam.davyson.com’) 14
Fig. 2. 2 – Evolução da quantidade de alumínio utilizado por veiculo segundo a IAI 15
Fig. 2. 3 – Da esquerda para a direita bloco do motor cárter inferior de cilindros e cabeça do motor 16
Fig. 2. 4 – Da esquerda para a direita colector de admissão e tampa do motor 16
Fig. 2. 5 – Caixa de velocidades CVT 17
Fig. 2. 6 – Poros no alojamento de um casquilho (esquerda) e alojamento de junta de vedação (direita) 19

Fig. 3. 1 – Sinóptico de maquinação do cárter 21
Fig. 3. 2 – Estufa de estabilização de temperatura dos cárteres 22
Fig. 3. 3 – Montagem de maquinação na OP110 (posição vertical) 23
Fig. 3. 4 – Montagem de maquinação na OP120 (posição horizontal) 23
Fig. 3. 5 – Meios de controlo dos cárteres. Lodo esquerdo controlo 3D lado direito controlo na linha 24
Fig. 3. 6 – Zona de medição da temperatura 26

Fig. 4. 1 – Representação de todas as características analisadas 28
Fig. 4. 2 – Características analisadas na árvore primária (2001) 29
Fig. 4. 3 – Características analisadas na árvore secundaria (2002) 30
Fig. 4. 4 – Características analisadas no diferencial (2003) 30
Fig. 4. 5 – Características analisadas no eixo de marcha-atrás (2004) 31
Fig. 4. 6 – Distância entre furos de centragem caixa (2105/2106) 31
Fig. 4. 7 – Distancia entre linhas 2002/2003, 2002/2004 e 2001/2004 32
Fig. 4. 8 – Características analisadas no centrador motor (1101) 32
Fig. 4. 9 – Características analisadas no centrador motor (1102) 33
Fig. 4. 10 – Características analisadas na face motor (1000) e na face mecanismos (2000) 33
Fig. 4. 11 – Gráfico com a característica #043 que representa o Ø68H6 do 2001 (árvore primária) 34
Fig. 4. 12 – Gráfico com a caracteristica#045, circularidade 0,01 mm do Ø68H6 do 2001 36
Fig. 4. 13 – Gráfico com característica #046, perpendicularidade do Ø68H6 do 2001 37

Fig. 4. 14 - Gráfico com a característica #047, localização 0,05 em relação ao referencial (2105/2106) 37
Fig. 4. 15 – Gráfico com a característica #048, paralelismo entre a face de assentamento do rolamento e a face 2000 38
Fig. 4. 16 – Gráfico com a característica #049 que é Ø42H7 do 2001 (alojamento da junta de estanqueidade) 38
Fig. 4. 17 – Gráfico com a característica #051, concentricidade do Ø42H7 em relação ao Ø68H6 . 39
Fig. 4. 18 – Gráfico com a característica #052, posição do apoio do rolamento em relação à face 2000 40
Fig. 4. 19 – Gráfico com a característica #58, Ø66H6 do 2002 (arvore secundaria) 40
Fig. 4. 20 – Gráfico com a característica #60, circularidade do Ø66H6 (2002) 41
Fig. 4. 21 – Gráfico com a característica #061, perpendicularidade do Ø66H6 (2002) em relação à face 2000 42
Fig. 4. 22 – Gráfico com a característica #062, localização de 0,06mm do 2002 em relação ao referencial 42
Fig. 4. 23 – Gráfico com a característica #063, posição do apoio do rolamento do 2002 em relação a face A 43
Fig. 4. 24 – Gráfico com a característica #064, paralelismo do fundo do Ø66H6 em relação à face A (2000) 43
Fig. 4. 25 – Gráfico com a característica 2003_01, Ø75P7 do 2003 (diferencial) 44
Fig. 4. 26 – Gráfico com a característica #070, circularidade do Ø75P7 45
Fig. 4. 27 – Gráfico com a característica #071, perpendicularidade do Ø75P7 em relação à face 2000 45
Fig. 4. 28 – Gráfico com a característica #072, localização do Ø75P7 46
Fig. 4. 29 – Gráfico com a característica #074, paralelismo do fundo do Ø75P7 em relação à face 2000 46
Fig. 4. 30 – Gráfico com a característica #076, Ø59H8 (alojamento da junta de estanqueidade) 47
Fig. 4. 31 – Gráfico com a característica #75, posição do fundo do Ø75P7 relativamente à face 2000 48
Fig. 4. 32 – Gráfico com a característica #078, concentricidade do Ø59H8 em relação ao Ø75P7 .. 48
Fig. 4. 33 – Gráfico com a característica #079, distancia entre 2002 (árvore secundaria) e 2003 (diferencial) 49
Fig. 4. 34 – Gráfico com a característica #084, Ø25+0,003/+0,021 do 2004 (eixo marcha atrás) 49
Fig. 4. 35 – Gráfico com a característica #085, localização do Ø25+0,004/+0,021 50

Fig. 4. 36 – Gráfico com a característica #087, paralelismo da face de apoio do eixo de marcha-atrás 51
Fig. 4. 37 – Gráfico com a característica #089, distância entre o 2002 (árvore secundaria) e 2004 (eixo marcha atrás).....51
Fig. 4. 38 – Gráfico com a característica #090, distância entre o 2001 (árvore primaria) e 2004 (eixo marcha atrás).....52
Fig. 4. 39 – Gráfico com a característica #102, distancia de entre os dois furos de centragem, 2105/2106 52
Fig. 4. 40 – Gráfico com a característica #024, localização do furo centragem motor 1101 53
Fig. 4. 41 – Gráfico com a característica #031, localização do furo de centragem motor o 1102.....54
Fig. 4. 42 – Gráfico com a característica #001, planicidade da face 1000 (face motor).....54
Fig. 4. 43 – Gráfico com a característica #036, planicidade da face 2000 (face mecanismo).....55
Fig. 4. 44 – Gráfico com a característica #003, distância entre a face 1000 e 2000.....55
Fig. 4. 45 – Gráfico com a característica #031, paralelismo entre a face 1000 e 2000 56
Fig. 4. 46 – Gráfico correlação/desvio de IT 57

Fig. 5. 1 – Gráfico com o desvio IT/correlação 58
Fig. 5. 2 – Gráfico com a característica 2002_16, distância entre o 2002 e locating bruto.....59
Fig. 5. 3 – Medições efectuadas na característica 2002_16 desde inicio de Fevereiro a Junho de 08 em cada centro de maquinação 61
Fig. 5. 4 – Medições efectuadas na característica 2002_16 desde inicio de Fevereiro a Junho de 08 em cada centro de maquinação 61

Índice de Tabelas

Tabela 2. 1 – Tabela comparativa das propriedades do alumínio com outros materiais (in ‘hydro.com’) 15
Tabela 2. 2 – Ligas de alumínio mais utilizadas na industria automóvel e suas principais propriedades mecânicas 18
Tabela 2. 3 – Tabela com a composição química do AlSi9Cu3 19

Tabela 3. 1 – Quadro do filme de produção das peças 25

Resumo

Actualmente os cárteres das caixas de embraiagem utilizados na indústria automóvel são de ligas de alumínio. Estas ligas metálicas leves têm o grande inconveniente de possuírem elevados coeficientes de expansão térmica e suas alterações dimensionais requerem especial atenção durante o seu processamento. Assim é usual que a maquinação de alta velocidade de ligas de alumínio implique a prévia estabilização térmica das peças de forma a evitar que alterações dimensionais ultrapassem as tolerâncias admissíveis.

Com este trabalho pretende verificar-se a possibilidade de evitar a estabilização térmica numa estufa, de um cárter de embraiagem em alumínio, antes da sua maquinação. A estabilização dimensional do cárter será feita no interior do centro de maquinação, recorrendo à “duchagem” das peças com o óleo de corte refrigeração a uma temperatura estabilizada.

Foi desenvolvido uma extensa metodologia experimental aplicada a um sistema de maquinação e usando um sistema de “duchagem” com temperatura controlada, analisando-se cerca de 35 características em mais de 40 peças. Este estudo exaustivo foi efectuado através da determinação das temperaturas das peças antes de entrarem no centro de maquinação, da temperatura no interior do centro de maquinação, das cotas, seus limites e seus desvios em função do intervalo de confiança do lote de referência.

Os resultados obtidos permitiram verificar quais as características em que a correlação com a temperatura é mais sensível e constatar que as cotas de profundidade são as que apresentam maiores desvios. Sendo este um trabalho de aplicação prática verificou-se que através duma regulação sistemática de algumas cotas e da sequencia de maquinação se podia aplicar o método desenvolvido aumentando a eficiência e alcançando uma importante poupança de energia e de manutenção.

Abstract

At the present time both clutch and mechanism housings, which are the main components from automotive gear boxes, are made of special aluminium alloys. These alloys are extremely light when compared with steel, making them a perfect choice to mitigate the cars weight and machining costs. Nonetheless they possess a high thermal expansion coefficient, which can be considered a major disadvantage since it makes necessary to pay extraordinary attention to dimensional variations during the production cycle due to temperature deviations. High speed machining of precision components made of aluminium requests thus their temperature to become previously stable. This procedure is the only way to force dimensions to stay inside its tolerance intervals.

The main purpose of the work presented herewith was to assess the possibility to avoid the use of special ovens to make the clutch housing temperature become stable prior to machining.

The experimental methodology was carefully outlined by exploring the existence of a cooling oil showering system with controlled temperature, installed in the loading chamber. The dimensional stabilization of 40 sample parts, pre-heated at 3 temperature levels, was accomplished through the use of this system. The achieved results were made possible by analysing the part's temperature at the machine's entrance, the machine's interior temperature, 35 measured dimensions and their tolerance intervals as well as the average temperature deviations of each of the 5 considered batches.

By analysing the obtained results in detail it was possible to determine which dimensions show high sensitiveness to temperature (high correlation between dimension's variation and temperature). Among this dimensions we can point out the ones related with depth, since they display the highest deviations due to temperature. Being a work with practical application it was possible to confirm the benefit of using this methodology by achieving significant enhancements on production efficiency, energy savings and reduction on maintenance costs, through the application of small adjustments to the machining sequence and by adopting a systematic tuning of certain dimensions.

1 – Introdução

Na indústria automóvel dos nossos dias a utilização do alumínio é cada vez mais frequente, pois a sua aplicação em componentes nesta indústria duplicou desde 1990 (in 'IAI- International Aliminium Institute'). Este aumento deve-se não só a obrigatoriedade de redução do peso dos automóveis, por forma a cumprir as exigências de menor poluição, pois uma redução de 100Kg no peso de num automóvel, sem modificar o motor, significa uma redução de 9g por Km de CO2 (in 'Improving Sustainability in the Transport Sector through Weight Reduction and the Application of Aluminium' in IAI) o que significa cerca de menos 300 a 800 litros de combustível na vida de um automóvel. Por este factor os construtores estão a aplicar de forma massiva ligas de alumínio na construção de novos motores, em que o ferro fundido foi substituído por este metal ser cerca de 2,8 vezes mais leve, e com melhores características mecânicas. Por outro lado com vista a aumentar a segurança activa, este material tem sido aplicado em toda a parte cinemática do veículo sempre que se quer melhorar esta vertente.

Assim sendo, tornou-se vital o domínio da tecnologia de fundição e maquinação, desta forma na fundição actualmente faz-se injecção em alta pressão não só para aumentar a rapidez de produção, como também as propriedades mecânicas dos componentes.

Na maquinação tem-se assistido ao desenvolvimento de centros de maquinação de alta velocidade cada vez mais rápidos, precisos, mais simples de operar, e cada vez mais flexíveis. Desde os anos 90 a velocidade de deslocamento dos eixos e a rotação da árvore duplicou, a aceleração dos mesmos quadruplicou (in 'toyoda.com') e a precisão permite hoje fazer diâmetros por interpolação. Com estas vantagens e com a necessidade de adaptar o produto rapidamente (flexibilidade) às necessidades do consumidor e ao aumento dos nichos de mercado, fez com que a indústria a automóvel cada vez mais utilize estes meios. No entanto um dos inconvenientes dos centros de alta velocidade é que devido ao facto de serem muito rápidos e, normalmente a peça sair logo acabada deles, ao contrário do que acontece com as linhas transfer, se a peça tiver problemas de estabilidade de temperatura, como é o caso do alumínio, tem previamente de haver uma estabilização de alguma forma.

No entanto não foi só nos centros de maquinação que se deu o avanço tecnológico também ao nível das ferramentas de corte, em que as velocidades de corte deram um salto enorme devido ao aparecimento do PCD (polycarbonate diamond), como os preços a que essas tecnologias têm vindo a ser proposta estão cada vez mais baixos, não há duvidas que hoje em dia se deve escolher os centros de maquinação como meio de produção de peças diversas.

1.1 Maquinação do alumínio

No entanto, o alumínio tem um grave problema ao nível da maquinação, pois uma das suas características é ter um coeficiente de dilatação térmica elevado, cerca de 0,015mm a 0,025mm por ºC. O que numa diferença de 10ºC provoca 0,1mm a 0,25mm, este facto torna-o incompatível com as tolerâncias que se utilizam na fabricação de peças na indústria automóvel. Por causa desta característica há que ter muita atenção com as temperaturas a que se maquina e controla as peças, isto porque, uma diferença de temperatura de alguns graus provoca diferenças de valores significativos, nas cotas a medir. Pois cada vez mais as tolerâncias exigidas são mais apertadas de modo a aumentar o desempenho cinemático do trabalho dos órgãos dos veículos.

Portanto, para resolver este problema temos que maquinar as peças a uma temperatura o mais próxima possível da temperatura de controlo (normalmente entre os 20ºC e 22ºC).

As soluções normalmente aplicadas são:

- Temperatura do edifício de maquinação controlada;
- Pré-estabilização das peças em estufa a temperatura controlada;
- Estabilização da temperatura dentro da máquina por meio de óleo de corte também à temperatura estabilizada (utilizado para peças pequenas e de pouca massa)

No caso que vamos analisar temos um cárter de embraiagem com uma massa significativa cerca de 9,5 kg em que antes do ensaio era estabilizado num túnel refrigerado à temperatura 22ºC ± 2ºC com um tempo de estabilização de 8 mim, o objectivo é a desactivação destes túneis e passar a estabilização dentro do centro de maquinação.

Se tal for possível, pretende-se identificar as condições e quais os cuidados a ter para respeitarmos as exigências ao nível das cotas e suas tolerâncias.

1.2 – Organização do trabalho

No capítulo II faz-se uma abordagem ao alumínio, suas ligas e propriedades e aplicações na indústria automobilística e em particular nas peças em análise (cárteres de caixas de velocidades).

No capítulo III descreve-se os procedimentos e metodologias com realce para a determinação das medidas.

No capítulo IV apresenta-se os resultados, com destaque para as representações gráficas das inúmeras características analisadas.

No capítulo V faz-se a conclusão com base nos resultados obtidos e na implementação prática das soluções propostas.

Referem-se também diversas propostas de trabalhos futuros e novas respostas que a industria necessita para o incremento da produtividade e sobretudo qualidade.

1.3 Limitações do trabalho

Devido ao ‘timing’ de execução do trabalho houve algumas limitações, uma das quais a falta de tempo para a repetição do trabalho utilizando 30 peças por cada uma das temperaturas, de modo a poder fazer um tratamento estatístico a todas as características. Outra limitação foi não poder comparar os resultados que obtivemos com um estudo utilizando o método de elementos finitos.

2 – O alumínio e suas aplicações

2.1 – Introdução

O alumínio é o 3º elemento mais abundante na crosta terrestre a seguir ao Oxigénio e Silício, com cerca de 7,3% do total da sua massa (in 'sam.davyson.com'), no entanto este raramente se encontra em estado puro. A dificuldade de o extrair das rochas fez dele um metal nobre tendo sido mais caro que o ouro.

Em 1885, Hall-Herout descobriu um método de extracção do mesmo que foi optimizado posteriormente por Bayer em 1889, desde então a produção de alumínio tem vindo a crescer vertiginosamente como se pode observar na Fig 2.1.

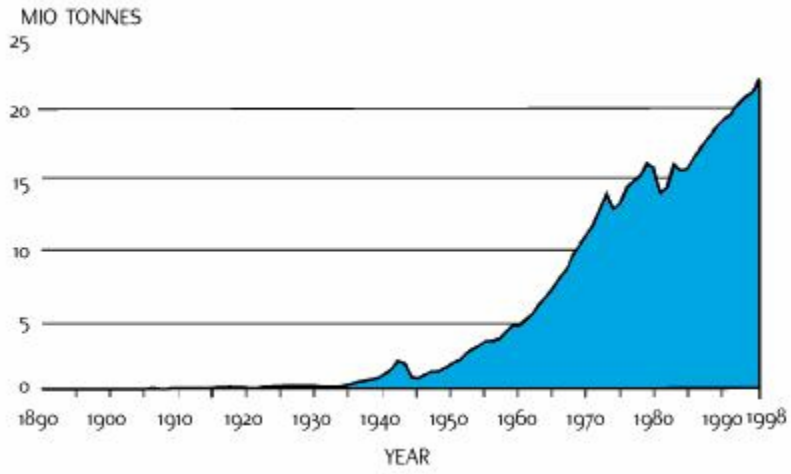

Fig. 2. 1 – Produção de alumínio ao longo dos anos (in 'sam.davyson.com')

Neste momento a produção do alumínio supera a produção de todos os metais não ferrosos.

2.2 – Propriedades do alumínio

O alumínio é um metal com características próprias, grandes vantagens em relação a outros materiais concorrentes, pois é cerca de 3 vezes mais leve que o ferro e o cobre, sendo o segundo metal mais maleável a seguir ao ouro e o 6º mais dúctil, têm uma excelente condutividade térmica e eléctrica. A juntar a tudo isto e às cada vez mais preocupações ambientais, ele tem um ponto de fusão 2,5 vezes menor que o aço (660ºC) logo a necessidade de menor energia (5% do total segundo a IAI 'International Aluminium Institute') para a sua transformação. A sua reciclagem tem sido elevada cerca de 29% do alumínio total produzido (in 'sam.davyson.com'). Além destas propriedades o alumínio é um material com um comportamento à corrosão, isto porque assim que é exposto ao ar este forma uma camada de óxido (Al_2O_3) de 1nm que o protege da corrosão.

Na fig. 2.2 esta a comparação das principais propriedades do alumínio com outros materiais.

Mas estas propriedades podem ser altamente melhoradas com os elementos de liga em pequenas quantidades como sejam o Si (Silício) e o Mg (magnésio) e o Cu (Cobre)

	Alumínio	Cobre	Aço 371	Plástico
Resistência/Tensão de rotura N/mm^2	250	250	400	50
Ductibilidade/Alongamento %	15	25	20	25
Elasticidade/Módulo de Young MPa	70.000	125.000	210.000	3.000
Densidade kg/m^3	2.700	8.900	7.800	1.400
Ponto de fusão °C	660	1080	1500	80
Amplitude da temperatura de trabalho °C	-250–150	-200-300	-50-500	-50-80
Conductividade eléctrica m/Ohm-mm2	29	55	7	-
Conductividade térmica W/m °C	200	400	76	0,15
Coeficiente de expansão linear x10^{-6}/ °C	24	17	12	60-100
Não-magnético	Sim	Sim	Não	Sim
Soldável	Sim	Sim	Sim	Sim

Tabela 2. 1 – Tabela comparativa das propriedades do alumínio com outros materiais (in 'hydro.com')

2.2 – O alumínio e as suas aplicações

O alumínio é um dos materiais mais utilizados na indústria automóvel dos nossos dias, para a produção de peças maquinadas. Devido à necessidade de, por um lado, combater o peso cada vez mais elevado dos automóveis, aumento devido à necessidade de elevar a segurança passiva, por outro lado, à maior facilidade de maquinação e às excelentes propriedades que hoje apresentam os elementos de liga moldados sobre pressão, elevando o número de peças maquinadas utilizando este material. Na fig. 2.2 mostra-se a evolução da utilização do alumínio nos veículos automóveis.

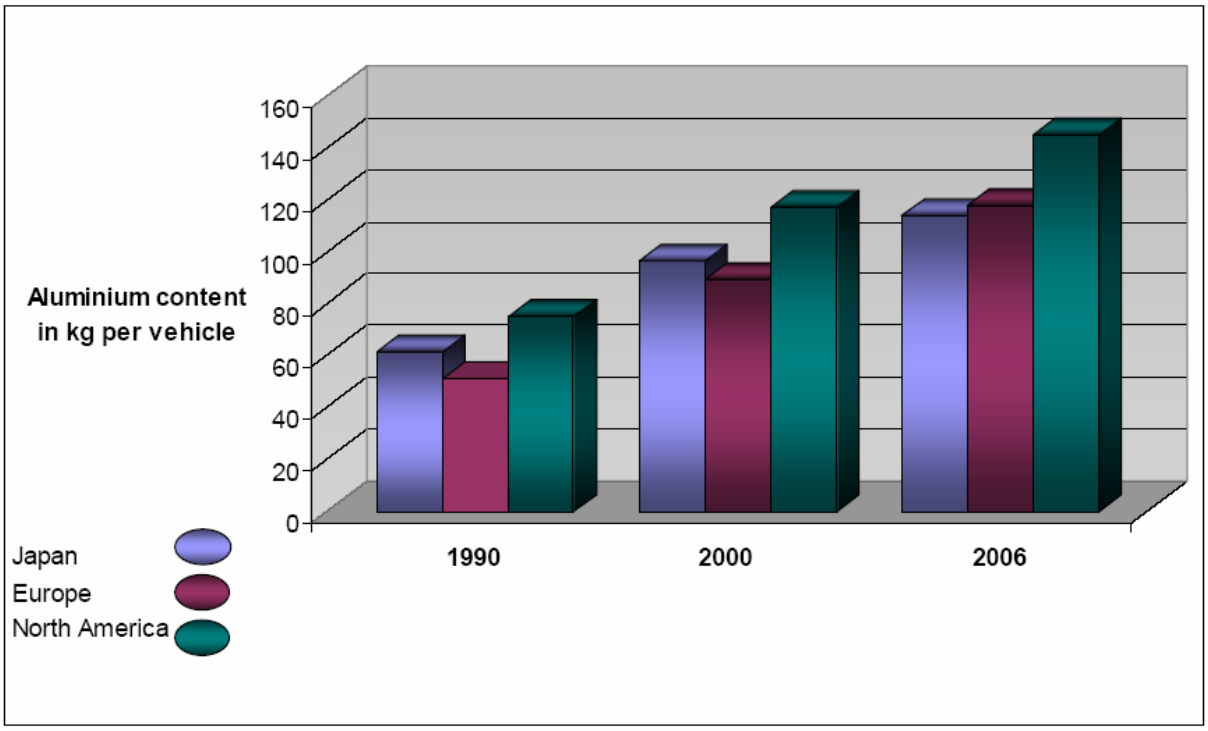

Fig. 2. 2 – Evolução da quantidade de alumínio utilizado por veiculo segundo a IAI

Com o desenvolvimento dos materiais em especial com os elementos de liga as aplicações do alumínio como elemento base multiplicaram-se nos automóveis. Desde a aplicação na construção de motores em que beneficia não só no peso mas também na maquinação, passando pelos elementos que constituem a suspensão o alumínio é utilizado um pouco por todo o automóvel inclusive nalguns casos nos elementos da carroçaria e chassis.

Nas figs. 2.3 e 2.4 podemos observar alguns exemplos de peças utilizadas nos automóveis fabricadas em alumínio.

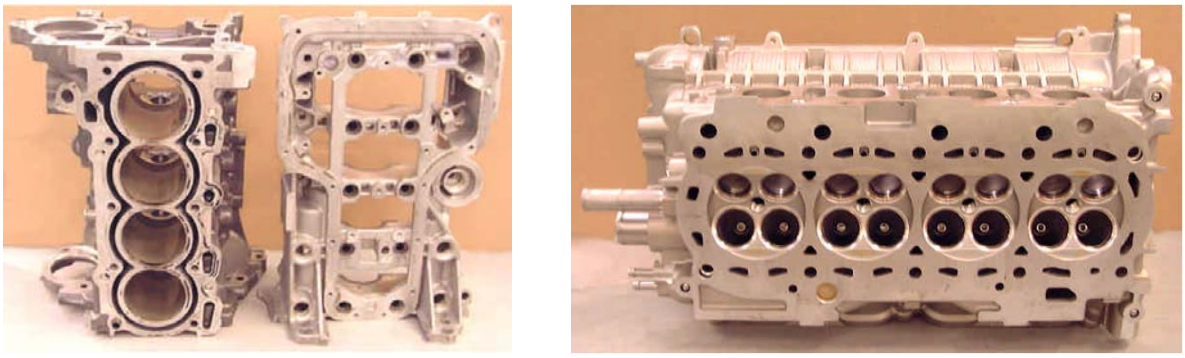

Fig. 2. 3 – Da esquerda para a direita bloco do motor cárter inferior de cilindros e cabeça do motor

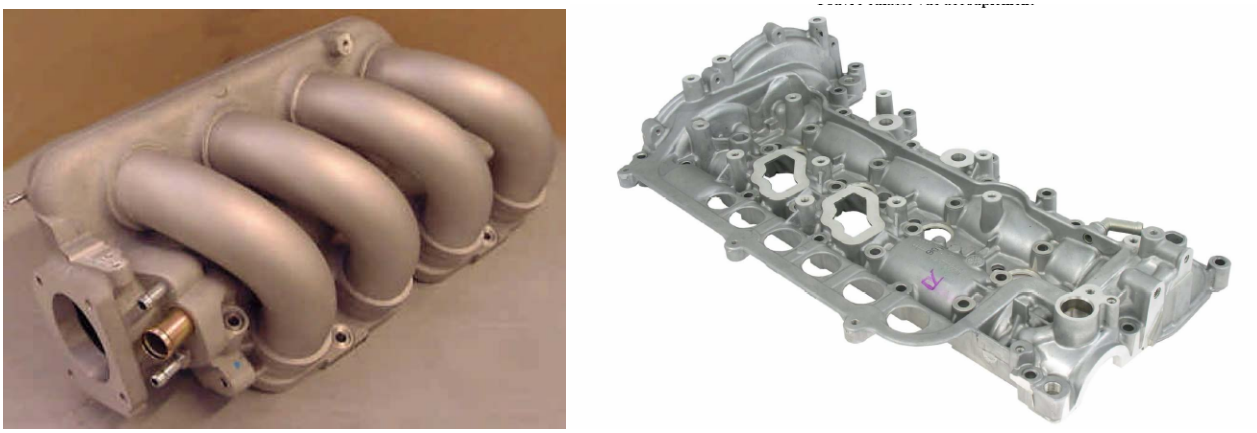

Fig. 2. 4 – Da esquerda para a direita colector de admissão e tampa do motor

No entanto este material já é utilizado há muitos anos nalguns componentes dos automóveis, como por exemplo os cárteres das caixas de velocidades do qual se mostra um exemplo na fig. 2.5

Fig. 2. 5 – Caixa de velocidades CVT

2.3 – Alumínio e suas ligas

O alumínio para a indústria automóvel é normalmente associados a outros elementos químicos de modo a melhorar tanto as suas propriedades mecânicas como de fluidez.

Estes elementos químicos são normalmente o Si (silício) o Mn (manganes) e o Cu (cobre). O Si é responsável pela melhoria da resistência à corrosão e fluidez no vazamento na fundição. O Mn além da fluidez dá-lhe resistência mecânica pois este é responsável pela formação de precipitados muito duros aumentando em mais de 10 vezes a resistência mecânica do alumínio puro e o Cu permite uma melhor maquinação ao contrário do Si.

No entanto é possível fazer peças em alumínio com uma boa resistência e economicamente viáveis devido à fundição de alta pressão que torna o processo rápido e mais barato que, por exemplo a moldação em areia.

Na tabela 2.2 podemos ver algumas das ligas mais utilizadas na industria automóvel, neste caso a fonte é uma norma Renault, e também algumas das suas principais características, em que:

* - Não aplicado

** - Para o desenvolvimento de novas cabeças de motor a gasolina, escolher preferencialmente AlSi7Cu3Mg(Fe) ou Al Si9Cu3Mg(Fe), derivada da precedente com adição de 2% de Silício

** - Para o desenvolvimento de novas cabeças de motor a gasolina, escolher preferencialmente AlSi7Cu3Mg0,35(Fe) ou Al Si9Cu3Mg0,35(Fe)

*** - A% é o alongamento em percentagem depois da ruptura, segundo a Norma NF EN10002-1.

ALUMINIOS	EXEMPLO DE APLICAÇÃO	TRACÇÃO			DUREZA BRINELL
		Rp0,2 MPa	RmMPa	A % ***	
Al Si5Cu3(Fe)	Cabeça do motor a gasolina **	100	190	1,5	> 71
Al Si5Cu3Mg	Cabeça do motor a diesel**	200	250	1,0	100-130
Al Si5Cu3Mg0,35(Fe)	Cabeça do motor a diesel**	175	190	0,5	> 85
Al Si7Cu3Mg(Fe)	Cabeça do motor a gasolina	100	190	1,5	> 71
Al Si7Cu3Mg0,35(Fe)	Cabeça do motor a diesel	175	190	0,5	> 85
Al Si8Cu3(Fe)	Colectores de admissão carregados termicamente	100 110	160 170	* *	> 66 > 76
Al Si9Cu3Mg0,35	Cabeça do motor a diesel	175	190	0,5	> 85
Al Si9Cu3Mg0,35(Fe)	Cabeça do motor a diesel	175	190	0,5	> 85
Al Si9Cu3(Fe)	Bloco motor Cárteres CV Distribuidores hidráulicos CVA Forquilhas Suportes	130 150	200 220	1 1	> 80 > 90
Al Si7Mg0,3	Suportes	80 170	150 230	2 2	> 54 > 80
Al Si9Mg	Forquilhas de caixa de velocidades	*	*	*	> 90

Tabela 2. 2 – Ligas de alumínio mais utilizadas na industria automóvel e suas principais propriedades mecânicas

2.4 – Cárteres de caixa de velocidades

Como foi dito no ponto anterior a liga mais utilizada nos cárteres de caixa de velocidades é a AlSi9Cu3, isto porque normalmente são peças complexas logo de fundição difícil e com muitas maquinações, portanto a liga de alumínio utilizada tem de ter estas características alem de ser economicamente competitiva.

Na tabela. 2.3 é apresentada a composição do AlSi9Cu3 segundo Norma EN 1676 : 1996

ALUMINIOS	TOLERANCIAS DE COMPOSIÇÃO (VALORES EM %)									
	Fe	**Si**	**Cu**	**Zn**	**Mg**	**Mn**	**Ni**	**Pb**	**Sn**	**Ti**
Al Si9Cu3(Fe)	<1,30	8,0-11,0	2,0-4,0	<1,20	0,05-0,55	<0,60	<0,55	<0,35	<0,25	<0,25

Tabela 2. 3 – Tabela com a composição química do AlSi9Cu3

2.5 – Problemas associados

Na fundição de peças em alumínio utilizando a moldação de alta pressão existem vários problemas associados, uns inerentes ao processo de moldagem, outro devido ao material em si.

Os problemas que aparecem na altura de maquinação das peças são essencialmente dois, que são:

- Porosidades que aparece nas partes maquinadas
- Dilatação térmica

2.5.1 - Porosidades

As porosidades nas partes maquinadas são um problema porque muitas vezes inviabiliza a função a que se destina uma determinada maquinação. Na Fig. 2.6 apresentam-se exemplos alojamento de casquilho com poros ou no alojamento de um rolamento e alojamento de uma junta de estanqueidade.

Este fenómeno aparece essencialmente por duas razões, uma é devido ao mau preenchimento quando se dá a injecção do alumínio no molde e outra é a formação destes mesmos poros enquanto a peça arrefece e ainda não está totalmente solidificada.

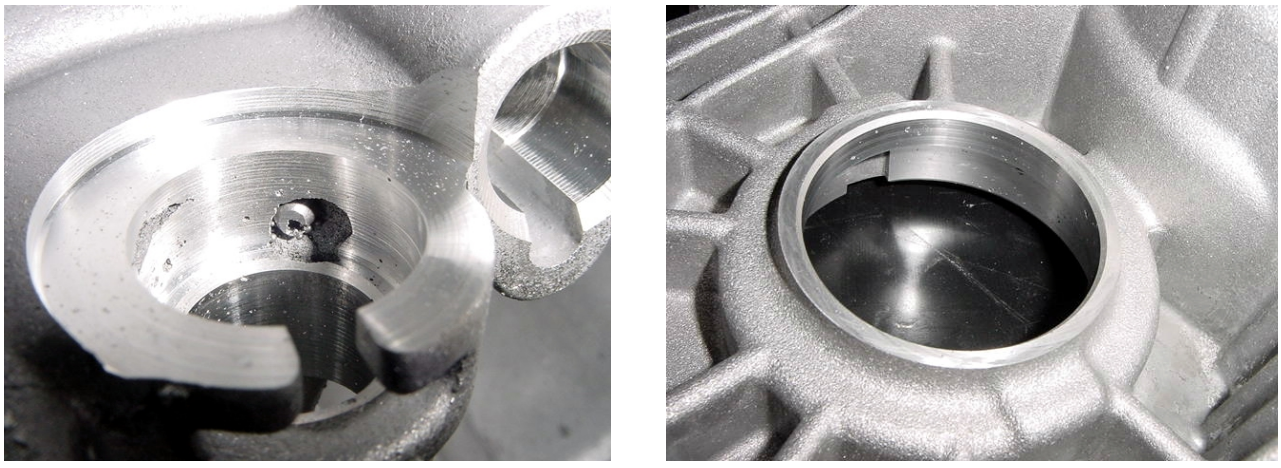

Fig. 2. 6 – Poros no alojamento de um casquilho (esquerda) e alojamento de junta de vedação (direita)

2.5.2 - Dilatação

O problema de dilatação térmica é um problema inerente ao material, alumínio, este fenómeno põe vários problemas na maquinação das peças feitas neste material.

Devido às exigências em termos dimensionais (tolerâncias mais apertadas) cada vez maiores na indústria automóvel de modo a conseguir melhores desempenhos de todos os órgãos constituintes de um carro, a temperatura a que se maquina as peças começa a ser crítica para cumprir estas mesmas exigências.

Como o alumínio apresenta um coeficiente de dilatação térmica entre os 0,015mm e os 0,025mm por metro por ºC, no caso da liga em analise é de 20,5mm por metro por ºC (in NF EN10002-1), há necessidade de fazer a maquinação com uma diferença muito pequena de temperatura em relação à medição das peças.

Com esta exigência em mente há vários métodos para o conseguir, dependendo sempre do termo custo benefício e dependente do tipo de peça a maquinar, assim como da localização geográfica da instalação industrial.

Assim para peças pequenas a estabilização da temperatura faz-se normalmente dentro da máquina com a precipitação do óleo de corte (duche) sobre as mesmas à temperatura estabilizada.

Para peças maiores ou o edifício onde se maquinam as peças é climatizado ou existem locais próprios refrigerados onde a temperatura e dimensões das peças estabilizam, estes dois sistemas são utilizados sempre que se utilizam centros de maquinação.

No entanto quando se utilizam linhas transfer, utilizadas normalmente para peças maiores como blocos de motor, esta estabilização é feita por óleo de corte à estrada dos mesmos, e começa-se a maquinação de desbaste de superfícies que vão ser acabadas mais tarde.

3 – Procedimentos e metodologia

3.1 – Modo de funcionamento

Como já foi dito anteriormente há necessidade de pôr as peças a maquinar a temperaturas muito próximas daquelas que vão ser controladas, deste modo, a seguir vai descrever-se o modo de funcionamento para conseguir tal objectivo, assim como a sequência de maquinação das mesmas.

Para melhor se compreender a maquinação a seguir é apresentado o sinóptico de fabricação dos cárteres, desde o carregamento na linha até à sua etiquetagem e envio para Stock.

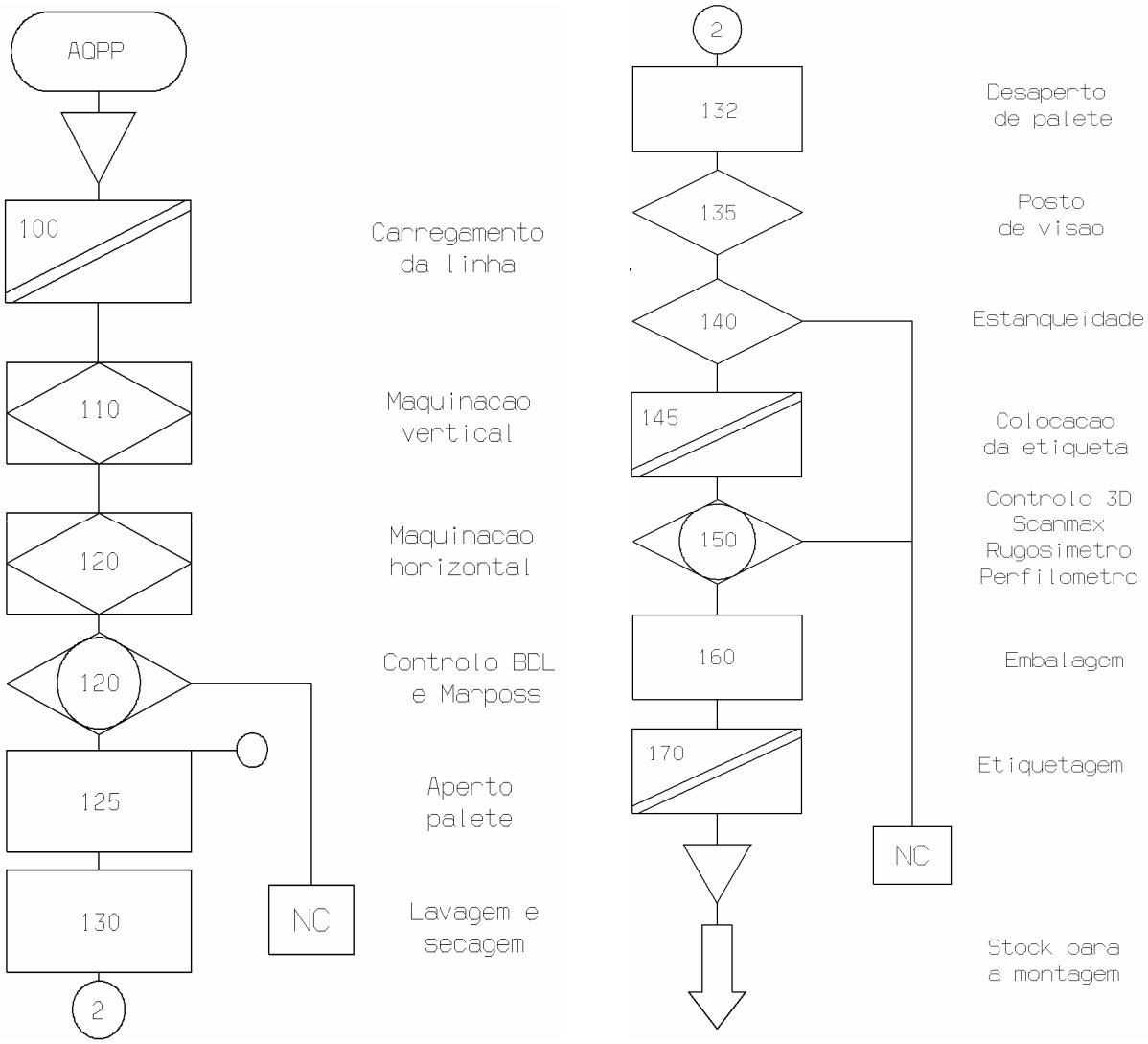

Fig. 3. 1 – Sinóptico de maquinação do cárter

3.1.1 – Meter as peças à temperatura de maquinação

As peças depois de serem postas em cima de paletes próprias à entrada da linha (carregamento OP100), são depois transportadas por meio de um transportador rolante até a um

túnel refrigerado. Neste túnel permanecem durante, pelo menos, 8 minutos (OP 105) de modo a que a sua temperatura estabilize, sendo depois retiradas para serem maquinadas no centro de maquinação.

A temperatura deste túnel é de $22 \pm 2\,^{o}C$, mantida por meio de permutadores de calor controlados por PLC.

Na fig. 3.2 que se segue podemos ver um destes túneis.

Fig. 3. 2 – Estufa de estabilização de temperatura dos cárteres

3.1.2 – Maquinação dos cárteres

Depois do cárter sair do túnel o operador numera-o, mete a data e o n.º da máquina no qual vai ser maquinado, introduzindo-o de seguida na montagem vertical (OP110), representada na fig. 3.3

Depois da introdução do cárter na montagem vertical representada na fig. 3.3 a palete roda, como indica a figura, para ser maquinada toda a zona interior do mesmo.

Depois da palete ter rodado para que o cárter na posição vertical possa ser maquinado na OP110, ficamos com a montagem horizontal disponível, fig. 3.4, para que em tempo encoberto, o tempo em que está a maquinar a OP110, se possa introduzir outro cárter, agora na horizontal (OP 120) vai-se maquinar todas as características da periferia do mesmo.

NOTA: Logo após a introdução do cárter em cada montagem o operador fecha as portas do centro de maquinação e o óleo de corte começa a cair em cima do mesmo.

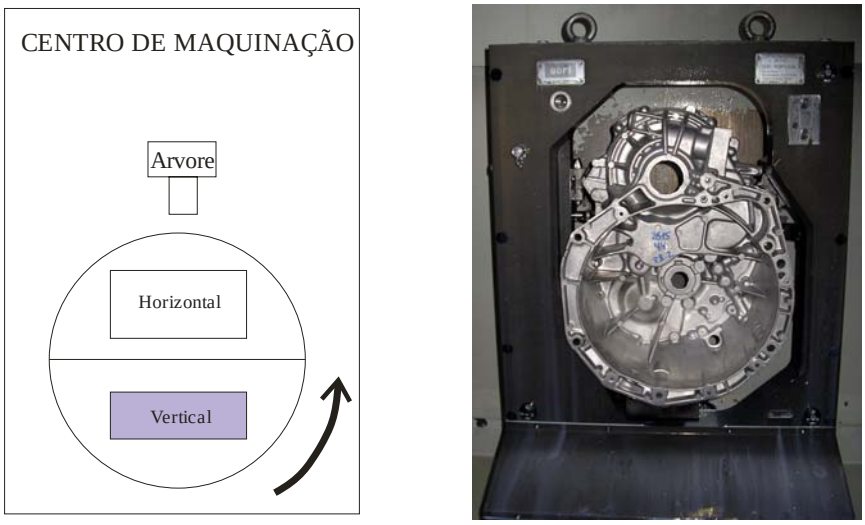

Fig. 3. 3 – Montagem de maquinação na OP110 (posição vertical)

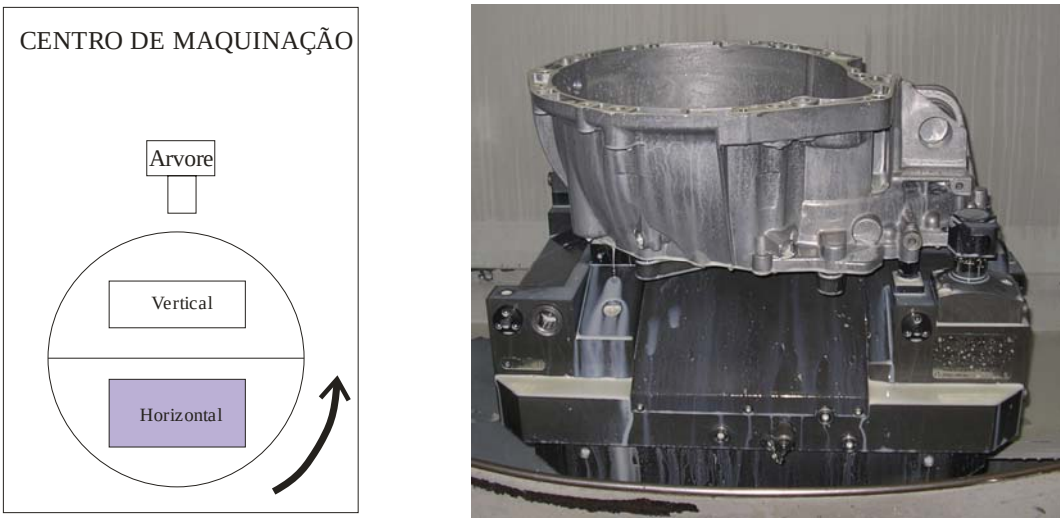

Fig. 3. 4 – Montagem de maquinação na OP120 (posição horizontal)

De modo a manter o cárter a temperatura pretendida, este é maquinado com óleo de corte à temperatura de $21 \pm 1.5\,^{o}C$, esta temperatura é mantida pela central de óleo de corte utilizando permutadores de calor.

Esta temperatura é registada por cada equipa, além disso existe um sistema de monitorização que faz disparar um alarme sempre que esta sai dos valores preestabelecidos.

3.1.3 – Medição dos cárteres

Depois da maquinação dos cárteres eles são medidos com uma frequência predeterminada ou no posto de controlo ao lado do centro de maquinação, Fig. 3.5, (1 por cada 6 centros de maquinação) ou na máquina 3D. No posto de controlo são medidas as características para as quais há um desgaste rápido das ferramentas ou com IT (intervalo de tolerância) muito apertados.

Na máquina de controlo 3D, fig. 3.5, são controladas todas as características dos cárteres, o controle é feito depois da estabilização da temperatura do cárter durante uma hora, numa cabine climatizada à temperatura de $20 \pm 1\,^{o}C$, só depois são controlados.

Fig. 3. 5 – Meios de controlo dos cárteres. Lodo esquerdo controlo 3D lado direito controlo na linha

Como se pode constatar, há um cuidado muito especial em maquinar os cárteres à mesma temperatura a que são controlados, de modo a poder garantir as dimensões apertadas que as exigências do gabinete de estudo pedem nos planos peça.

3.2 – Metodologia do ensaio experimental

3.2.1 – Objectivo

O ensaio prático teve como objectivo, por um lado, avaliar o impacto da temperatura no cárter de embraiagem na sua maquinação, assim como a importância da sua estabilização prévia, por outro lado, ponderar a desactivação das estufas responsáveis pela estabilização da temperatura das peças, em detrimento da utilização de um sistema de aspersão de óleo de corte sobre as peças (sistema de duche dentro do centro de maquinação).

3.2.2 – Metodologia

O ensaio realizou-se com os seguintes dados de entrada:

- Tipo de peça

  *Cárter **CED ND0** – Molde 2.2.2*

- Meio de produção

  Centro de Maquinação DMG 63H e Estufa

- Sensores de temperatura

  Temperatura ambiente → TESTO 615 (apar.EL006)

  Temperatura da peça → HANNA Instruments HI91530K (apar.CT41)

- Meio de controlo tridimensional

  ZEISS PRISMO

- Extracção e tratamento de dados

  QS-STAT (programa automático de seguimento de produção) e EXCEL

De modo a fazer um teste comparativo, foram feitos 5 lotes de peças seguidas com temperaturas diferentes, tal como mostra a tabela 3.1:

Na primeira linha nº do lote, na segunda linha a temperatura da estufa, na terceira linha a temperatura medida na peça (temperatura média), na quarta linha o numero da peça.

Lot 1										Lot 2										Lot 3					Lot 4										Lot 5				
22º C										30º C										22º C					40º C										22º C				
21.6º C										31.8º C										-					39.2º C										-				
1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	5	5	5	5	5	5
6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5

Tabela 3. 1 – Quadro do filme de produção das peças

Nos lotes 1, 3 e 5 foram utilizados as condições normais de produção ou seja, permanência na estufa de temperatura estabilizadas durante pelo menos 8 minutos.

Como já foi dito atrás, o objectivo deste teste foi avaliar qual era a viabilidade de substituir a aspersão de óleo de corte pela permanência do cárter na estufa de estabilização. Para tal, é necessário que o tempo de aspersão, mais o tempo de retirar e meter a peça na montagem vertical OP110 e marcação da mesma, seja inferior ao tempo de maquinação da OP 120 (operação que o centro de maquinação está a fazer) de modo a que este tempo seja encoberto e não haja perca de tempo de ciclo.

Como o tempo de ciclo da OP120 é de cerca de 3’22’’, a soma dos tempos acima tem de ser inferior a este. Então o tempo foi distribuído da seguinte forma:

- *1’- Simulação de paragem do centro de maquinação por espera de peça* – este tempo serve como tempo de margem do operador, já que este em situação normal conduz 4 centros de maquinação logo, não está imediatamente disponível assim que acaba a OP110.
- *35’’ - Remoção da peça maquinada e limpeza da montagem. Marcação da peça a maquinar, e introdução no centro de maquinação*
- *1’:43’’ → Permanência no posto de carregamento e sujeita ao duche*

3.2.3 – Leitura da temperatura

A leitura de temperatura nos cárteres foi feita numa zona plana por cima da árvore secundária como mostra a fig. 3.6. Foi escolhido este local porque alem de estar situado ao centro da peça permite um bom contacto com o aparelho de medida já que a zona é plana.

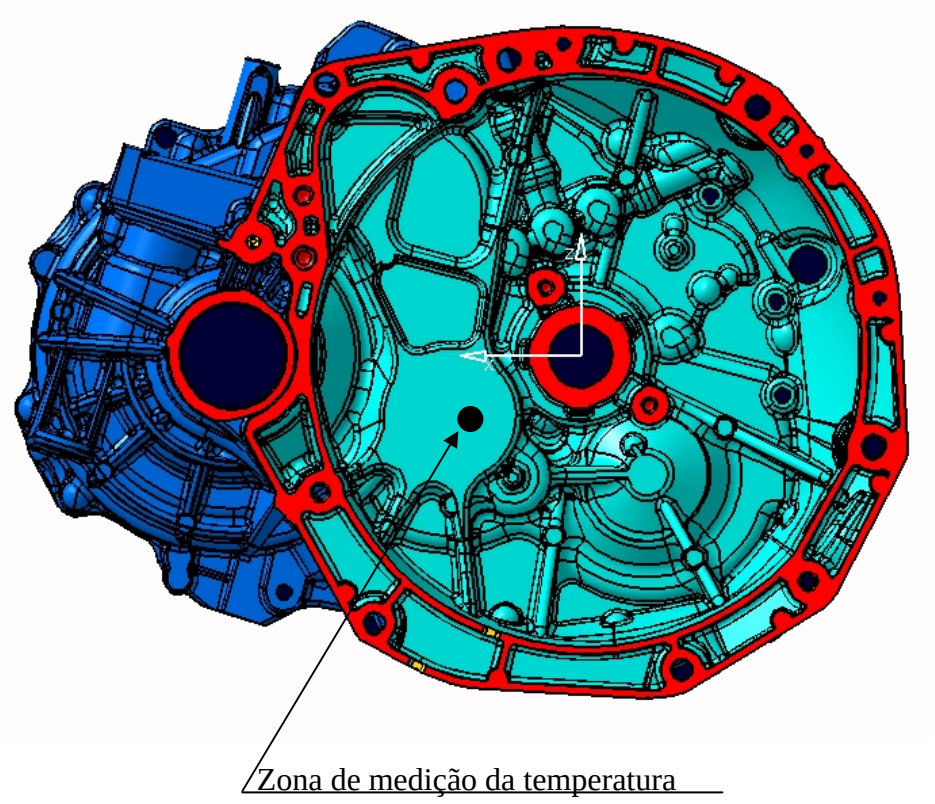

Fig. 3. 6 – Zona de medição da temperatura

4 – Resultados

4.1 – Dados Analisados

Depois de se terem fabricado as peças, estas foram controladas dimensionalmente (medidas as cotas) na 3D apresentada no ponto 3.1.3, procedendo-se antes do controlo à estabilização das mesmas pelo menos durante uma hora.

Foi efectuado o controle dimensional de toda a peça e em todas as peças à excepção da profundidade dos furos roscados e das rugosidades, no entanto a quantidade de dados a extrair dos relatórios é muito elevada, senão vejamos, são cerca de 35 características a retirar de um relatório que têm 163 a multiplicar por 40 peças analisadas o que faz um total de 1400 características a organizar e a analisar.

Devido à grande quantidade de dados a introduzir nas folhas em “Excel”, para serem analisados, optou-se por uma metodologia com representação gráfica, procedeu-se à sua recolha utilizando uma rotina no software Matlab. Embora fossem tratados todos os dados de todas as características, para este trabalho só vamos apresentar os mais significativos devido à grande extensão dos mesmos.

4.2 – Apresentação do cárter

Para podermos perceber os resultados que vão ser apresentados a seguir, vamos agora apresentar a designação das características e as cotas analisadas.

4.2.1 – Apresentação das características

Das figuras 4.2 até 4.10 são apresentadas as características maquinadas na OP110, as únicas que vamos analisar, já que as da OP120 não sofrem qualquer influência da temperatura inicial do cárter. Pois durante o tempo em que o está a ser maquinada a OP110 o cárter está permanentemente a ser sujeito ao duche do óleo de corte.

No cárter de embraiagem existem duas faces distintas que são: a face motor, designada por face 1000 e a face mecanismo, designada por face 2000. Nas figuras que se seguem são apresentadas as características nestas duas faces.

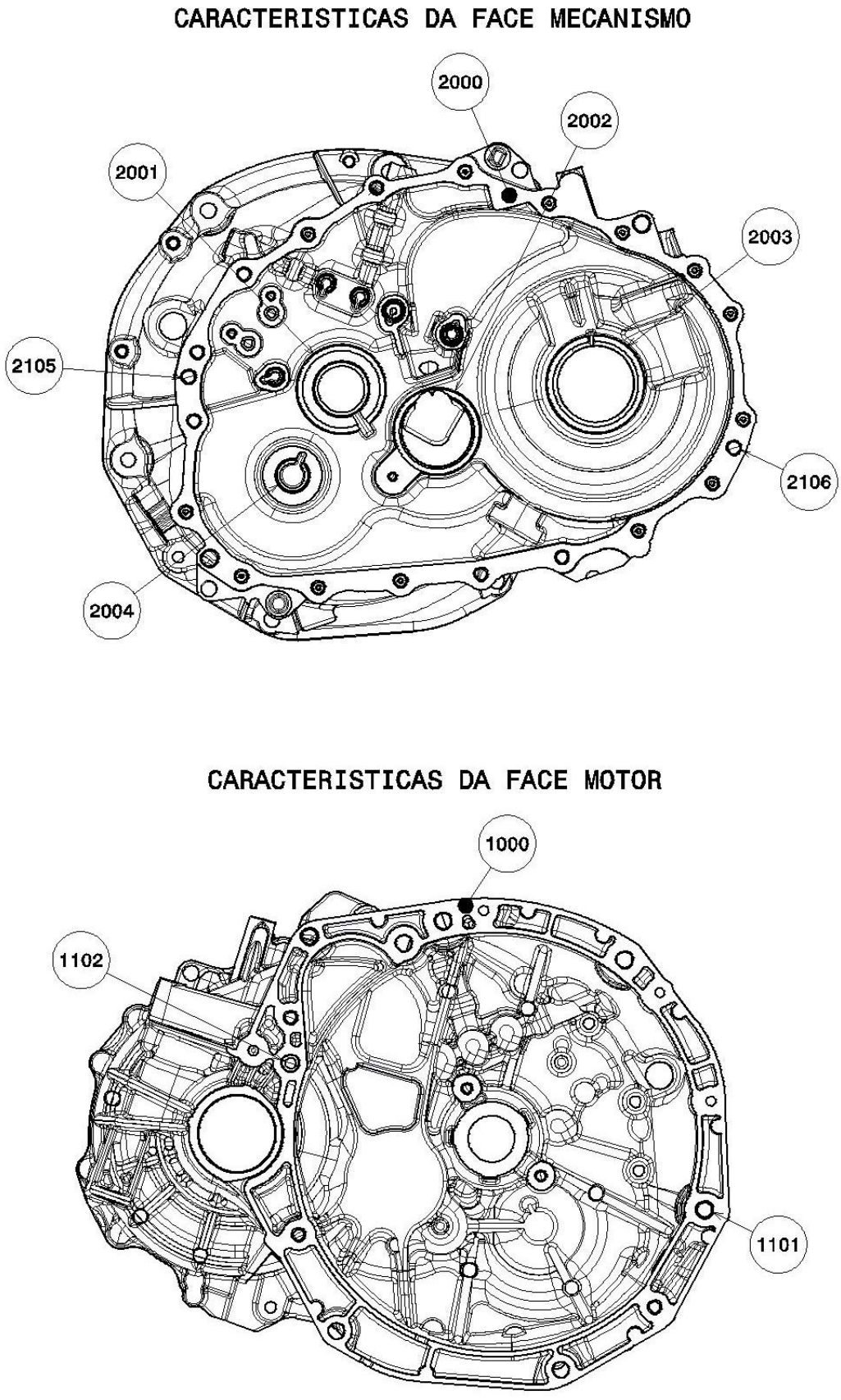

Fig. 4. 1 – Representação de todas as características analisadas

4.2.2 – Características analisadas

As características que se analisaram são aquelas cujo os seus números foram apresentados no ponto anterior, estas são as características mais difíceis de realizar, ou seja, aquelas com os IT (intervalo de tolerância) mais apertados. A designação delas é a seguinte:

- 2001 – Árvore primária
- 2002 - Árvore secundária
- 2003 – Diferencial
- 2004 – Eixo marcha-atrás
- Entre eixos de centragem caixa (2105/2106)
- 1101 – Centragem motor
- 1102 – Centragem motor
- Entre eixos centragem motor
- Face 2000
- Face 1000
- Entre faces 2000 e 1000

4.2.3 – Dimensões e tolerâncias das características

Nas figuras que se seguem são apresentadas as dimensões analisadas e suas tolerâncias:

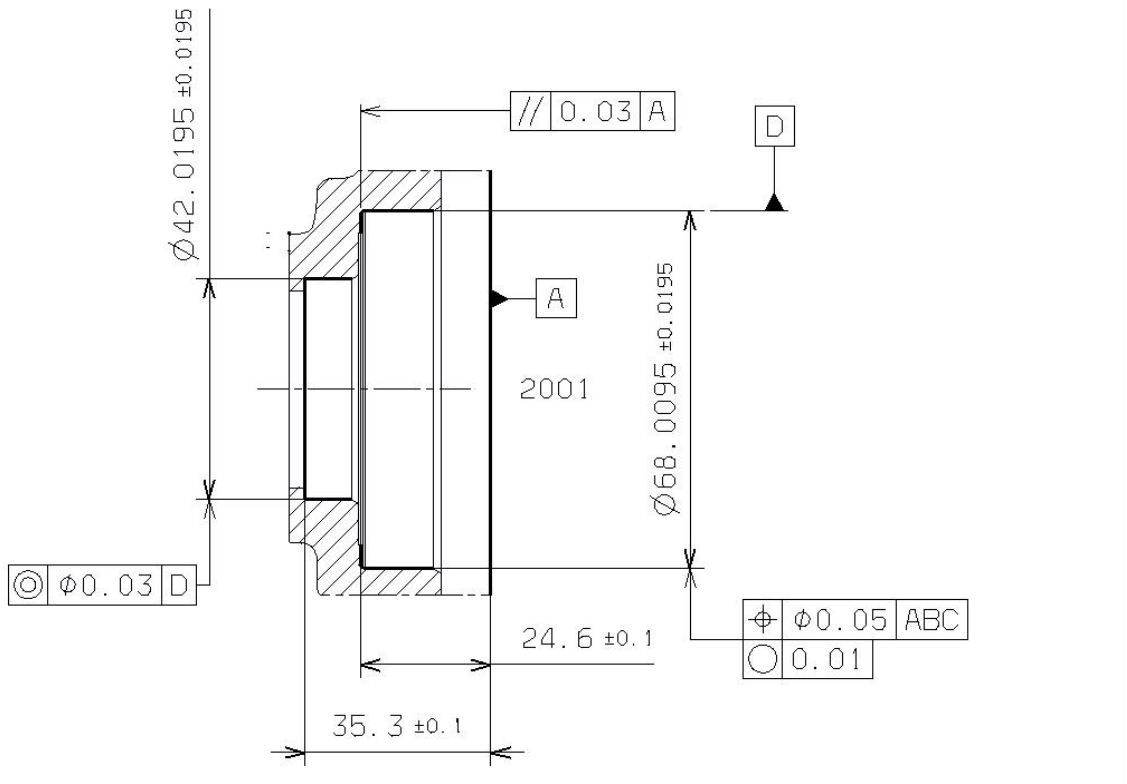

Fig. 4. 2 – Características analisadas na árvore primária (2001)

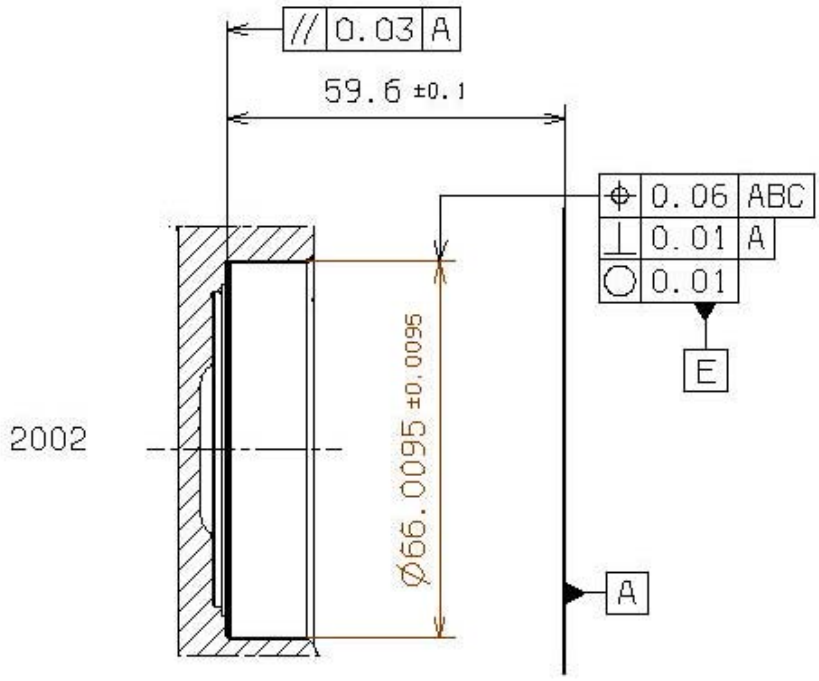

Fig. 4. 3 – Características analisadas na árvore secundaria (2002)

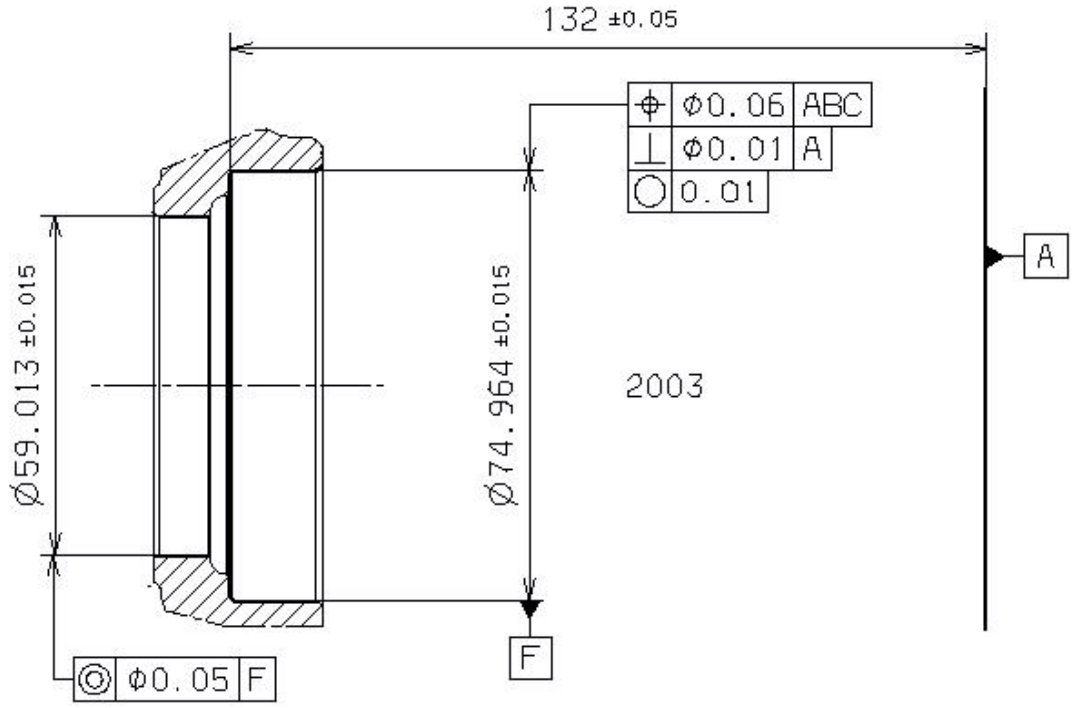

Fig. 4. 4 – Características analisadas no diferencial (2003)

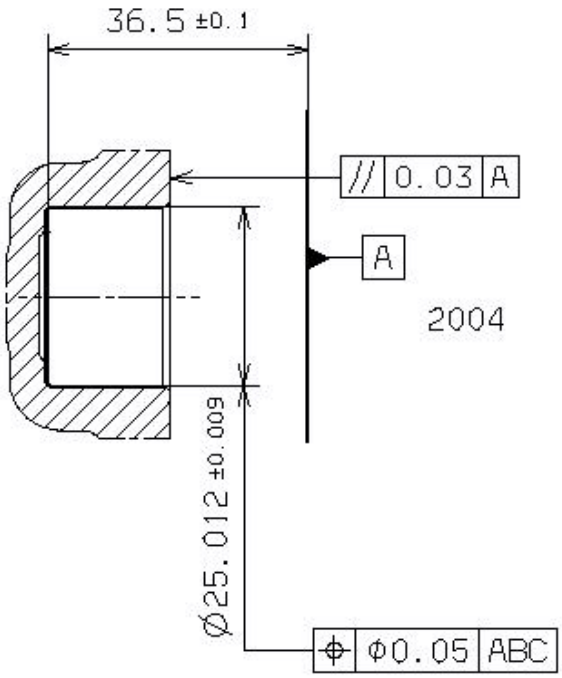

Fig. 4. 5 – Características analisadas no eixo de marcha-atrás (2004)

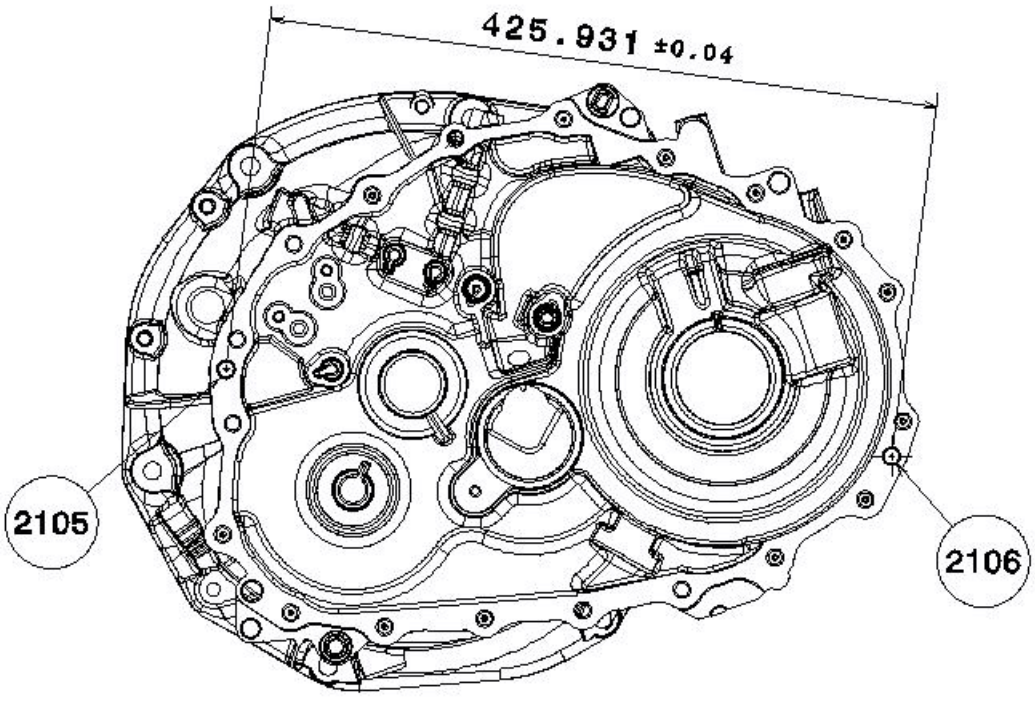

Fig. 4. 6 – Distância entre furos de centragem caixa (2105/2106)

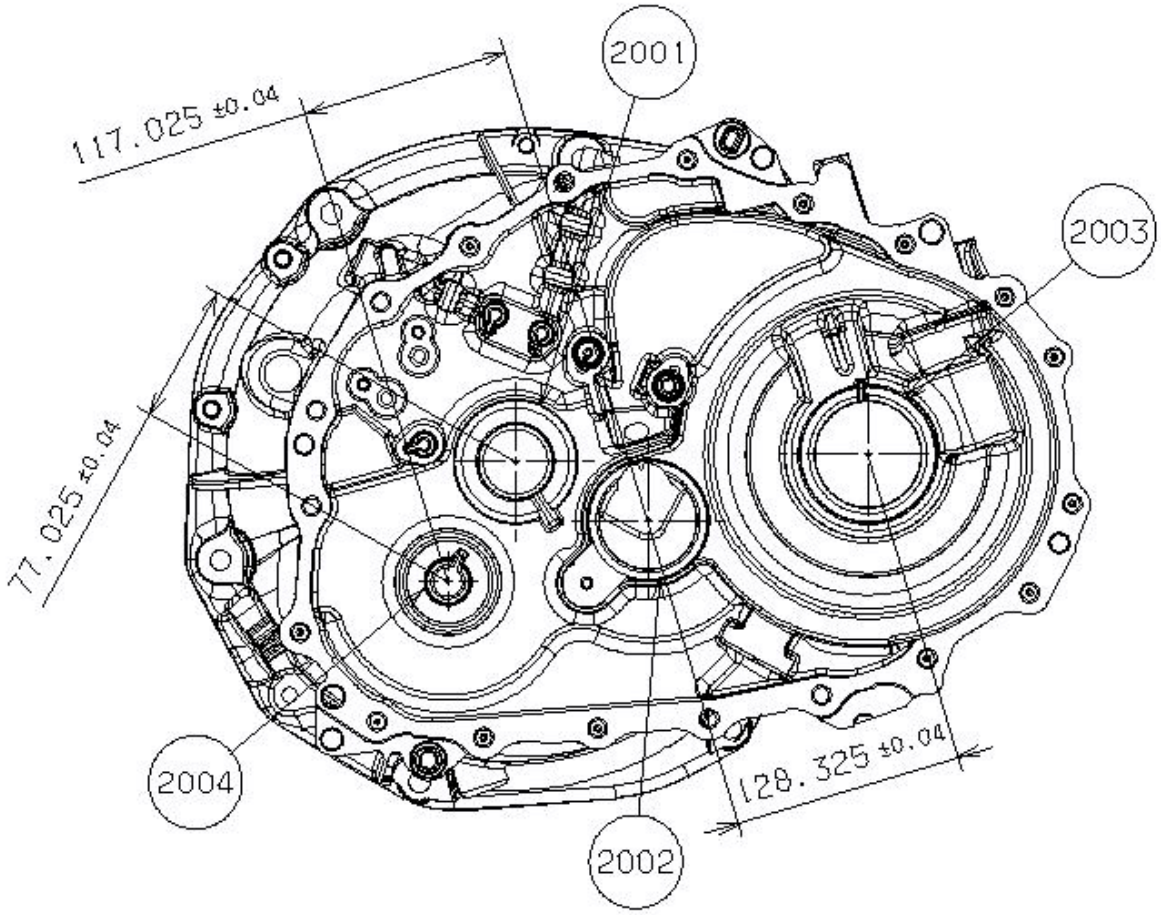

Fig. 4. 7 – Distancia entre linhas 2002/2003, 2002/2004 e 2001/2004

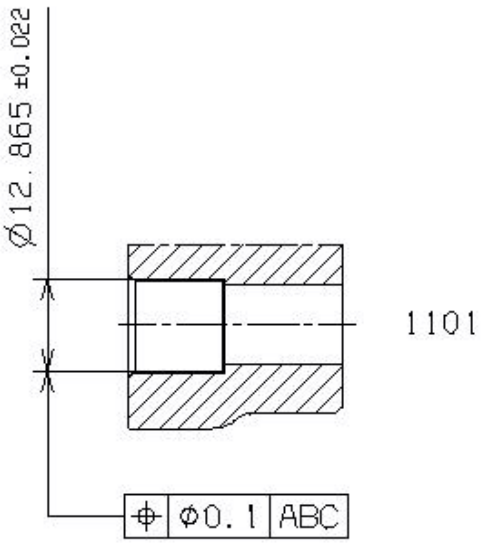

Fig. 4. 8 – Características analisadas no centrador motor (1101)

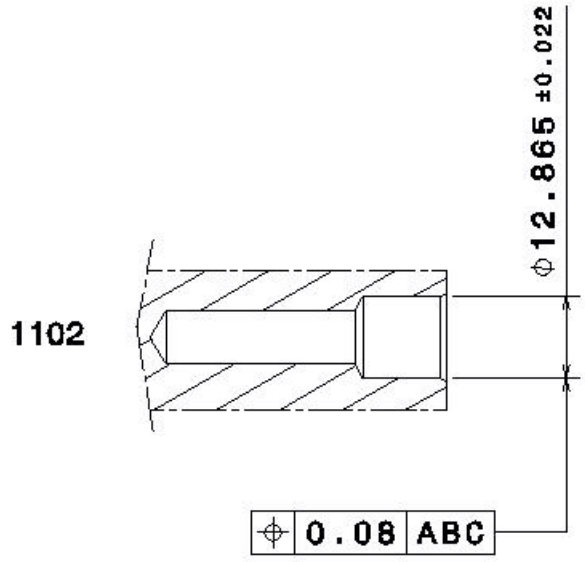

Fig. 4. 9 – Características analisadas no centrador motor (1102)

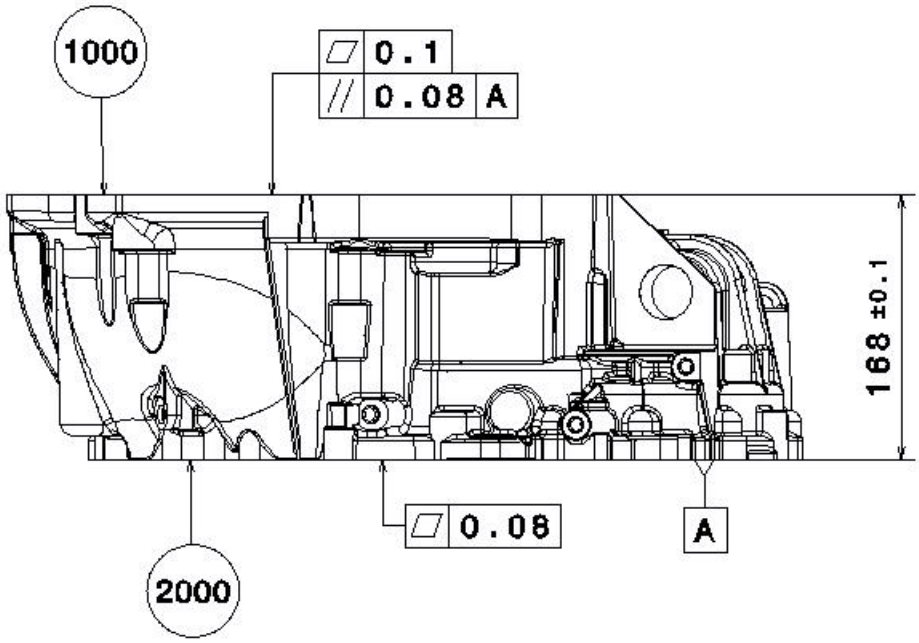

Fig. 4. 10 – Características analisadas na face motor (1000) e na face mecanismos (2000)

4.3 - Apresentação Gráfica

Para simplificar o modo de análise e compreensão vai apresentar-se os gráficos na sequência descrita no ponto 4.2.2

Todos os gráficos apresentam os seguintes resultados:

- *Temperatura medida nas peças (T. Peça)* – Esta temperatura foi tirada antes do cárter ter entrado para dentro do centro de maquinação por cima da árvore secundária como já foi explicado no ponto 3.2.3

- *Temperatura do ar na fábrica (T. Amb.)* – Esta representa a temperatura do ar no qual o centro de maquinação se encontra e tirada antes da entrada da peça para maquinação
- *Cota medida (L1, L2, L3, L4, L5)* – Representa a cota média em cada gráfico e em que o índice significa o lote a que se refere a media.
- *Limite superior e inferior da cota (LS, LI)* – representa os limites da cota representada em cada um dos gráficos
- *Cota objectiva (Obj)* – Esta cota é a centrada
- *Cota de trabalho superior e inferior (ALS e ALI)* – Esta cota representa os limites que a cota deve atingir ante de ser recentrada, este limite é 80% do IT
- *Desvio do IT* – Este valor representa $\frac{\Delta}{IT}$ em que Δ é diferença entre o valor médio mínimo e o valor médio máximo dos lotes 2 a 5 sendo calculada esta diferenças tendo como referencia o valor médio do lote 1 (lote de referência)
- *Coeficiente de correlação (Correl.)* – Este valor representa a relação entra a variação das medições com a temperatura.

4.3.1 – Característica 2001 – Arvore primária

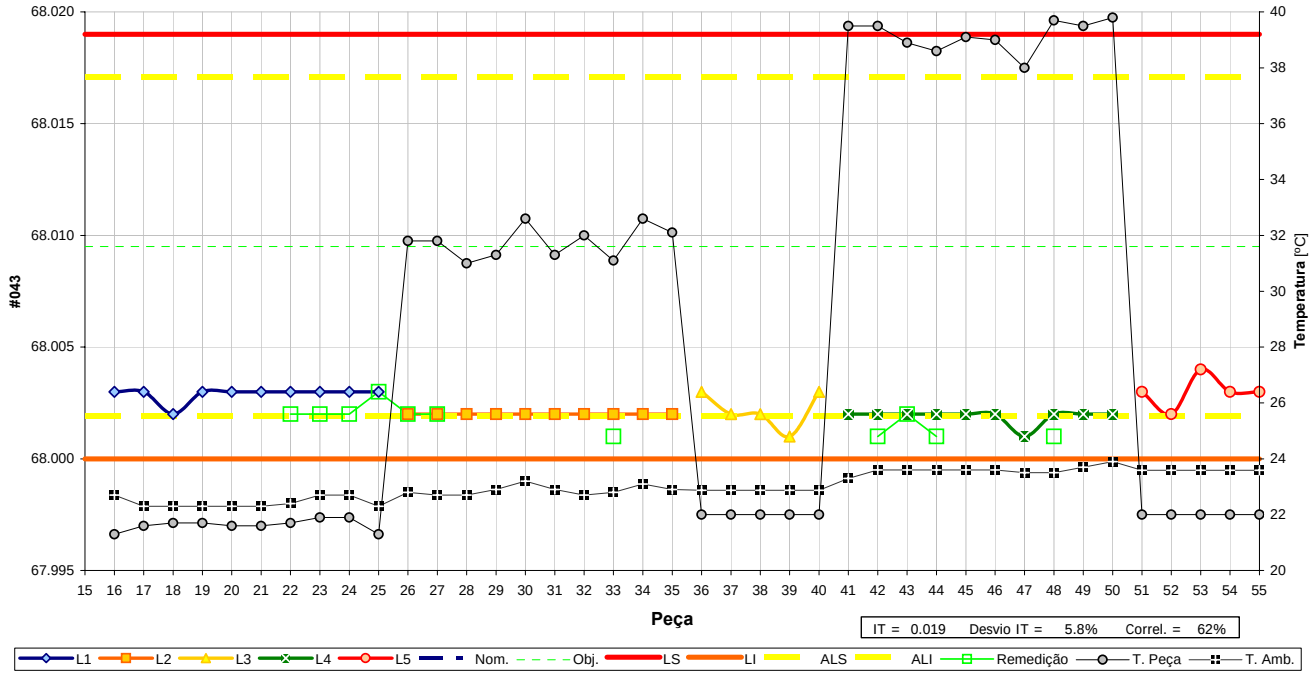

Fig. 4. 11 – Gráfico com a característica #043 que representa o Ø68H6 do 2001 (árvore primária)

No Fig. 4.11 no qual é representado o resultado das medições na (árvore primaria), vai-se explicar a informação contida neste gráfico, assim temos no eixo X o numero das peças, no eixo Y1 (lado esquerdo) a cota a que corresponde o gráfico, no eixo Y2 (lado direito) a temperatura, onde se

pode ler a temperatura de cada uma das peças assim como a temperatura do ar. Nas linhas do gráfico temos da esquerda para a direita:

- Linha a azul (L1), corresponde à medição feita nesta característica nas primeiras 10 peças, lote 1
- Linha laranja (L2), corresponde à medição feita nesta característica da 11ª peça até à 20ª peça, lote 2
- Linha amarela (L3), corresponde à medição feita nesta característica entre a 21ª peça e a 25ª peça, lote 3
- Linha verde (L4), corresponde à medição feita nesta característica entre a 26ª peça e a 30ª peça, lote 4
- Linha vermelha (L5), corresponde à medição nesta característica entre a 31ª peça e 35ª peça, lote 5
- Linha verde ponteada (Obj.), esta linha corresponde no gráfico à cota nominal, ou seja, à cota média, no entanto nas cotas de defeito de forma e localizações esta linha encontra-se na posição de zero.
- Linha vermelha a cheio (LS), corresponde ao limite superior da cota em questão.
- Linha laranja a cheio (LI), corresponde ao limite inferior da cota em questão.
- Linha amarela tracejado (ALS), corresponde à marcação dos 80% do IT em relação ao limite superior, esta linha demarca o limite admissível que se costuma trabalhar na produção, ou seja, se as medições forem superiores a esta linha têm de haver reajustes no processo, quer seja por troca de ferramenta ou por acertos da cota no centro de maquinação.
- Linha amarela tracejado, (ALI), mesma coisa que ALS só correspondente ao limite inferior.
- Linha verde fina (remedição), no decorrer do ensaio foi necessário remedir algumas peças o valor delas esta marcado com esta linha.
- Linha preta com circulo (T. Peça), temperatura medida em cada uma das peças.
- Linha preta com sinal de + (T. Amb.), é a temperatura medida na fábrica durante a realização do ensaio.

Em baixo dentro de um rectângulo temos:

- IT, intervalo de tolerância da característica medida
- Desvio de IT (Desvio IT), já explicado no ponto 4.3
- Correlação (Corr.), já explicado no ponto 4.3

Comentários ao gráfico:

Como podemos observar a relação entre a temperatura inicial do cárter e as medições é de média importância, correlação, é de 62% mas uma análise atenta podemos ver que o desvio do IT é somente de 5,8% e que representa somente cerca de 0,001 mm, portanto desprezável.

Nos gráficos que se seguem vai-se somente fazer um breve comentário sobre a informação mais relevante das análises.

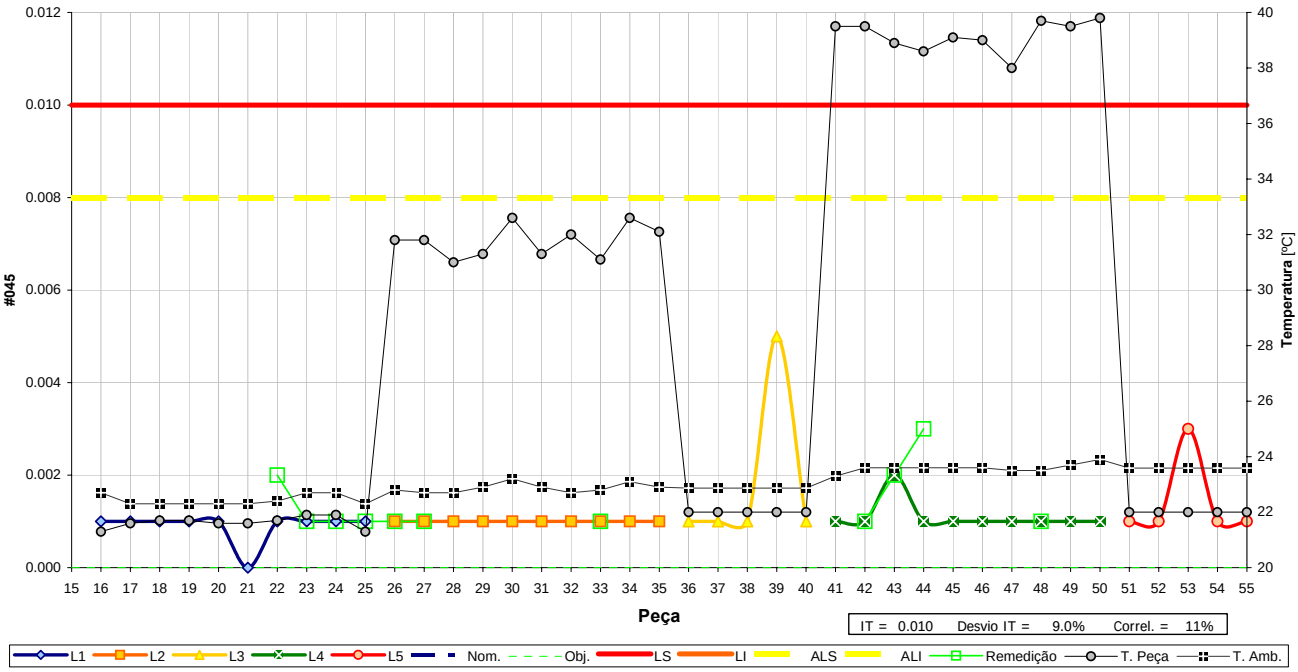

Fig. 4. 12 – Gráfico com a caracteristica#045, circularidade 0,01 mm do Ø68H6 do 2001

Na fig. 4.12 que representa o resultado da circularidade pode observar-se que tanto o desvio de IT como a correlação são baixos, o que é natural pois a circularidade depende somente da qualidade e do estado da ferramenta e não da temperatura.

Na fig. 4.13 onde é representada a medição sobre a perpendicularidade do 2001 em relação à face 2000, como podemos observar o desvio e a correlação são também baixos 4% e 15% respectivamente, o que era de esperar a menos que a face 2000 estivesse grandes deformações o que não acontece já que esta é maquinada por duas vezes (desbaste mais acabamento) e a última passagem é a ultima operação a fazer depois do cárter já ter cerca de 13min de “duchagem”.

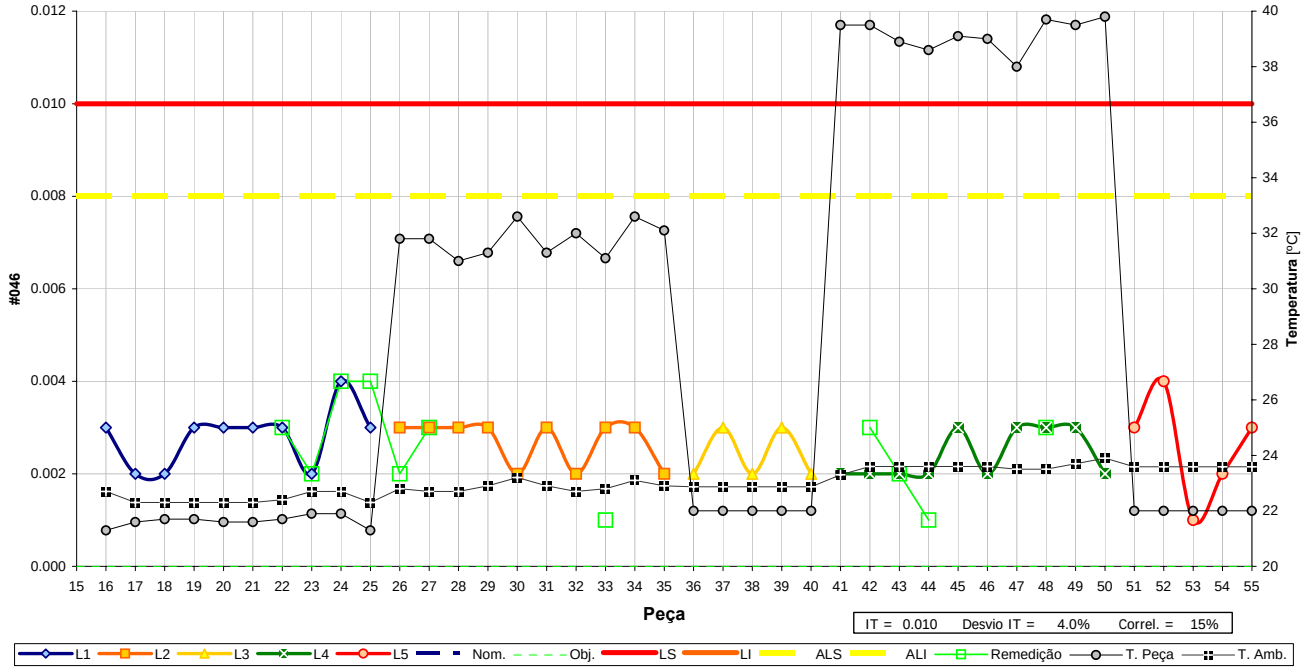

Fig. 4. 13 – Gráfico com característica #046, perpendicularidade do Ø68H6 do 2001

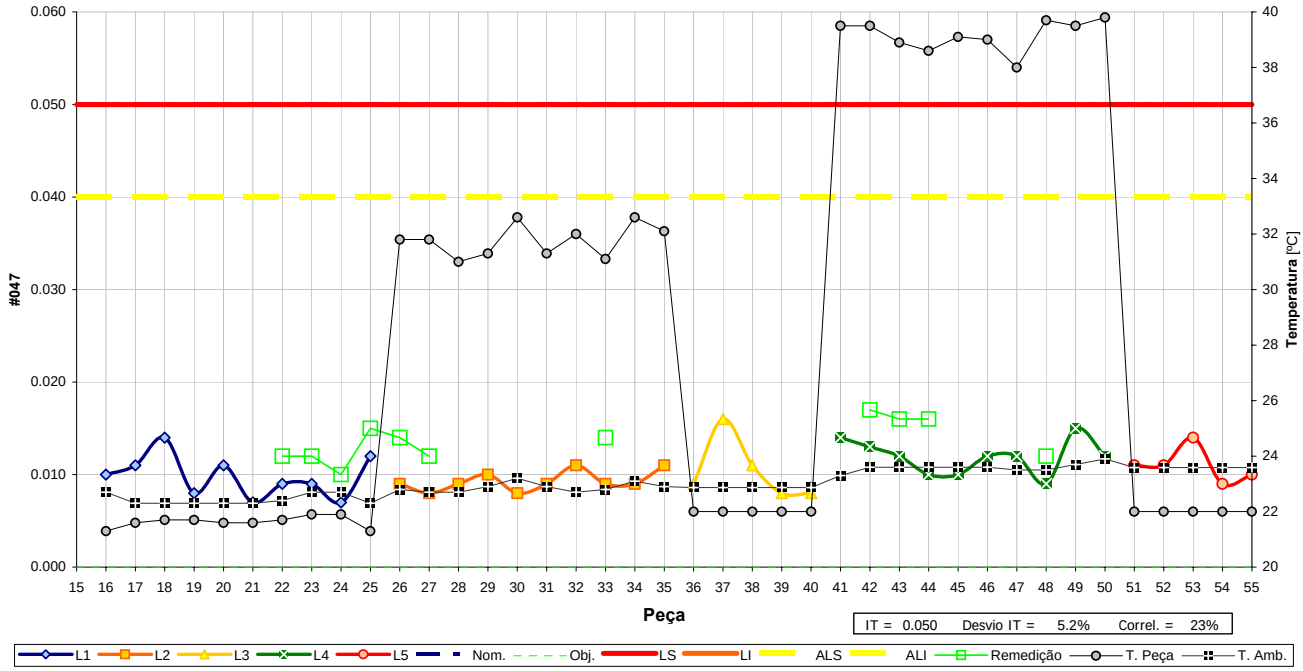

Fig. 4. 14 - Gráfico com a característica #047, localização 0,05 em relação ao referencial (2105/2106)

Na fig. 4.14 que representa o resultado das medições da localização do 2001, são respectivamente 5,2% e 23% o desvio do IT e correlação, sendo este o tipo de características em que a temperatura tem maior influência já que depende essencialmente da estabilidade dimensional do cárter que é influenciada essencialmente pela temperatura, podemos concluir que esta zona do cárter já está estabilizada na hora da sua maquinação.

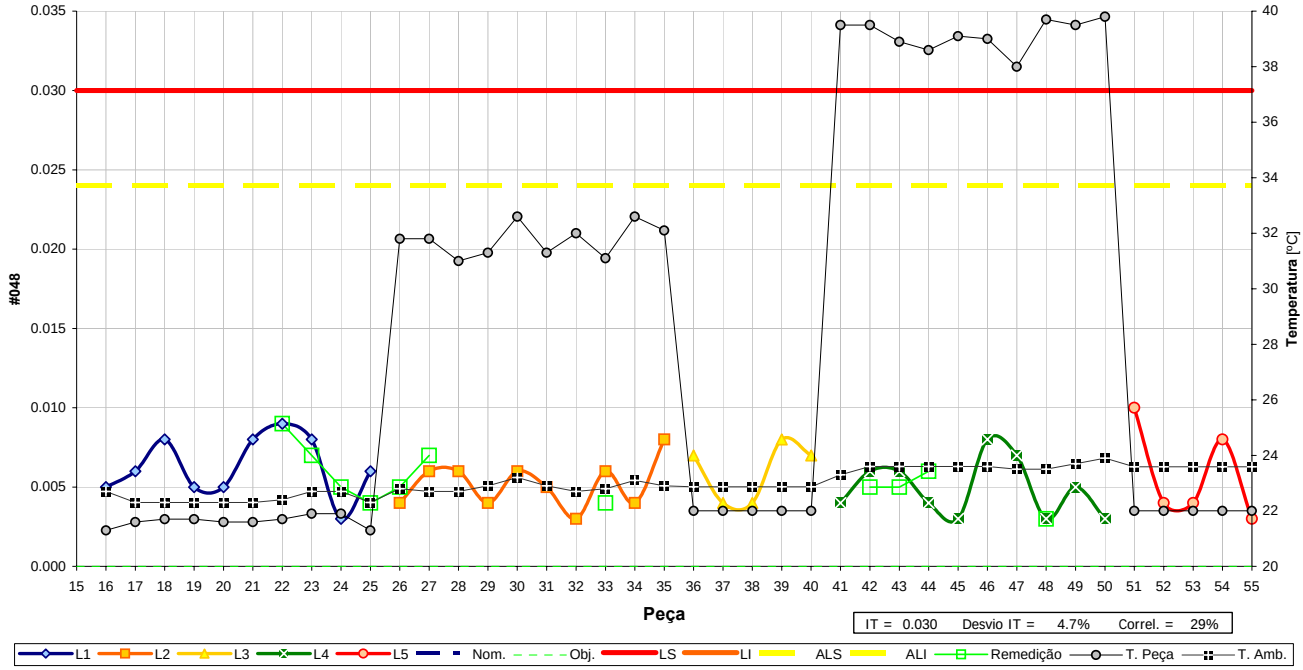

Fig. 4. 15 – Gráfico com a característica #048, paralelismo entre a face de assentamento do rolamento e a face 2000

Na fig. 4.15 onde é representado o resultado das medições do paralelismo entre a face de assentamento do rolamento da árvore primária e a face 2000 (referencia A) o desvio de IT e a correlação são baixos, 4,7% e 29% respectivamente. Pelo gráfico podemos também observar que o comportamento entre os diversos lotes, com a temperatura previamente estabilizada e não, é semelhante.

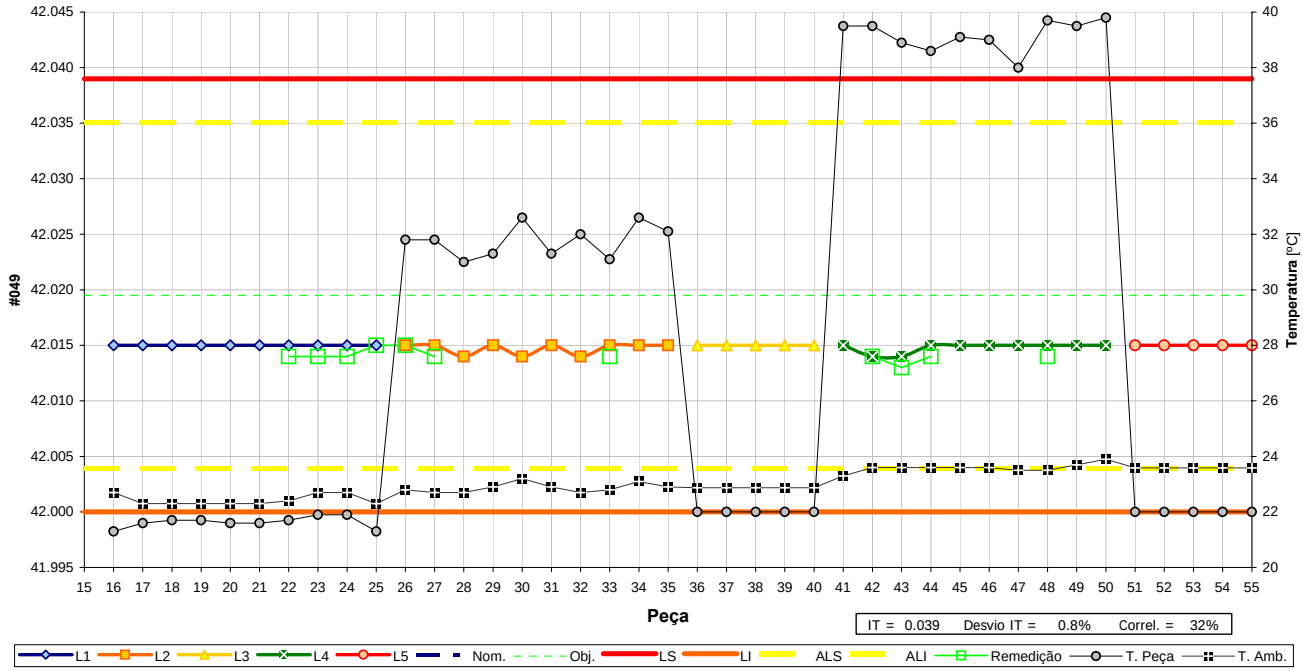

Fig. 4. 16 – Gráfico com a característica #049 que é Ø42H7 do 2001 (alojamento da junta de estanqueidade)

Na fig. 4.16 é representado o resultado das medições do diâmetro de alojamento da junta de estanqueidade em que como se pode observar o desvio e a correlação são baixos 0,8% e 32% respectivamente e tal como no Ø68H6 verificamos que a variação de diâmetro é desprezável cerca de 0,002 mm como máximo.

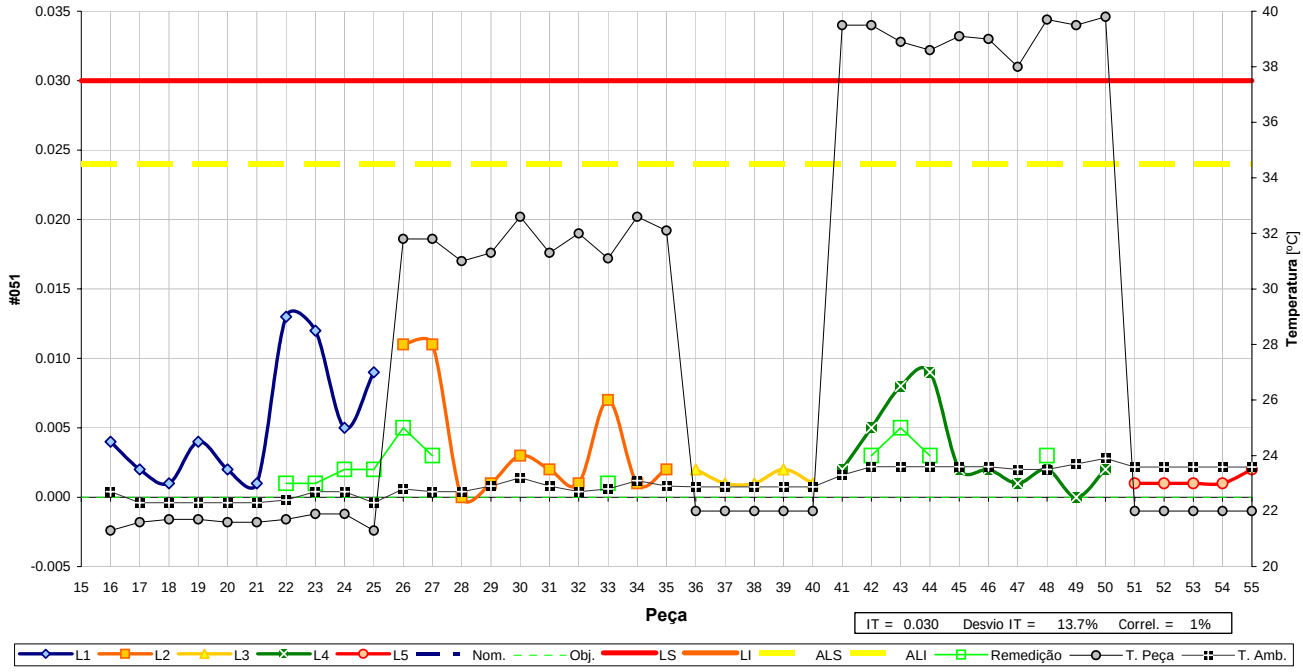

Fig. 4. 17 – Gráfico com a característica #051, concentricidade do Ø42H7 em relação ao Ø68H6

Na fig. 4.17 onde é representado o resultado das medições da concentricidade do Ø42H7 em relação ao Ø68H6, o desvio de IT é de 13,7% e a correlação é de 1%. O valor relativamente elevado do desvio deve-se essencialmente ao aos valores elevados e inconstantes do lote numero 1 e do lote numero 4 pois se introduzirmos os valores da remedição obtemos de correlação 4% e de desvio de IT 5,3%, o que são valores mais razoáveis e consentâneos com a característica, pois esta depende somente da ferramenta, já que os dois diâmetros são feitos com a mesma ferramenta.

Na Fig. 4.18 é representado o resultado das medições da posição do apoio do rolamentos relativamente à face 2000, em que temos 5,9% para o desvio IT e 91% para a correlação. Nesta característica podemos observar que a influência da temperatura é muito elevada para a cota obtida, o que quer dizer que o cárter, quando foi realizada esta cota, não estava estabilizado à temperatura de 22ºC, mas como o IT é relativamente elevado comparativamente à precisão do centro de maquinação a influencia em % da variação da cota é pequena.

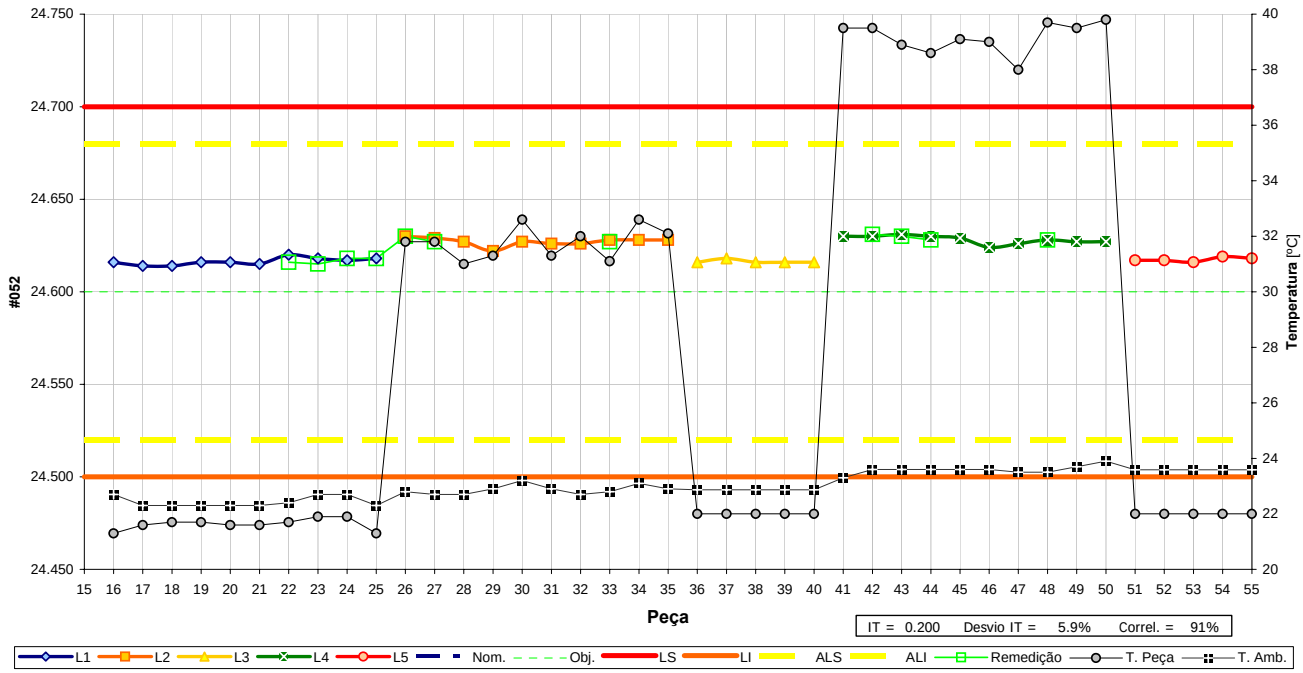

Fig. 4. 18 – Gráfico com a característica #052, posição do apoio do rolamento em relação à face 2000

4.3.2 – Característica 2002 – Árvore secundaria

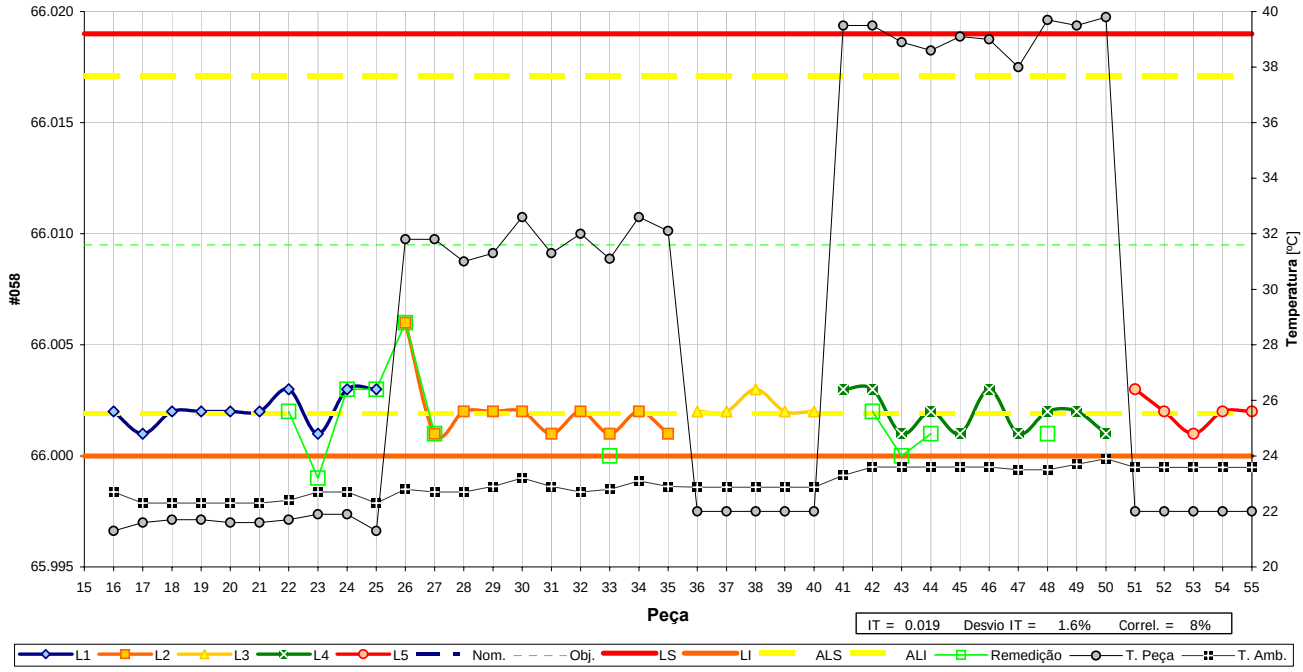

Fig. 4. 19 – Gráfico com a característica #58, Ø66H6 do 2002 (arvore secundaria)

Na Fig. 4.19 é representado o resultado das medições do Ø66H6, como se pode constatar a correlação é de 8% e o desvio de IT de 1,6 portanto ambos extremamente baixos e desprezáveis, estas variações podem ser ambas atribuídas à variação normal do conjunto centro de maquinação/ferramenta.

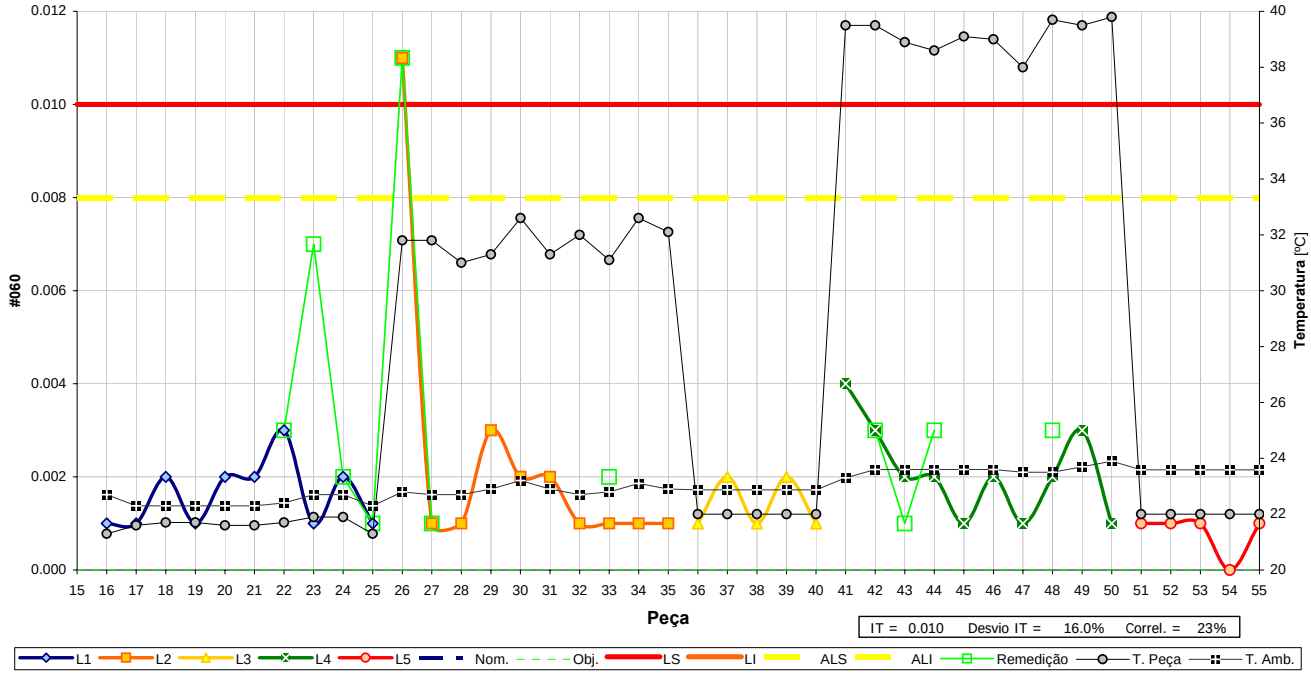

Fig. 4. 20 – Gráfico com a característica #60, circularidade do Ø66H6 (2002)

Na Fig. 4.20 é representado o resultado das medições da circularidade do Ø66H6, como já foi dito para a circularidade do 2001 (característica #45), esta característica depende quase exclusivamente do estado da ferramenta. Pode-se também observar no gráfico que existe uma peça (nº 26) em que o resultado está fora do IT, este deve-se à existência de um poro na zona de apalpação, que provocou um defeito de forma grande, logo a circularidade aumenta, assim como o diâmetro, como se pode observar na fig.4.19.

Na Fig. 4.21 é representado o resultado das medições da perpendicularidade do Ø66H6 em relação à face 2000, tal como na perpendicularidade do 2001 (característica #046), a correlação é baixa 17% o que quer dizer que a relação com a temperatura também é baixa, embora aqui o desvio do IT seja maior do que na perpendicularidade do 2001, este é um desvio que é normal em produção.

Na Fig. 4.22 é representado o resultado das medições da localização de 0,06mm do Ø66H6, na primeira análise feita ao gráfico podemos verificar valores anormalmente elevados principalmente no Lote 1. Estes resultados levaram a que se procedesse a uma segunda medição, isto depois de serem analisados os defeitos de forma, da primeira medição, e de serem novamente lavados os cárteres.

Se se fizer os cálculos tendo em conta os valores de remedição vai obter-se um desvio de IT de 14,8% e correlação 68%, ou seja, os dois com uma importância relevante.

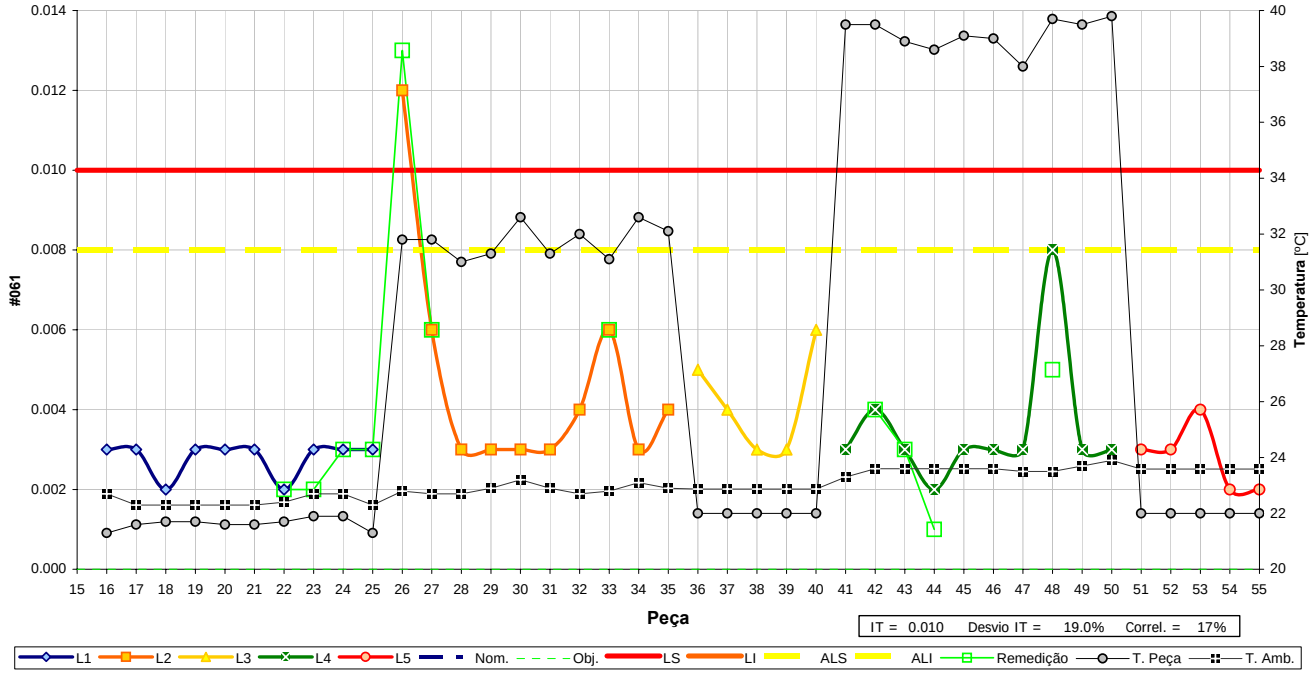

Fig. 4. 21 – Gráfico com a característica #061, perpendicularidade do Ø66H6 (2002) em relação à face 2000

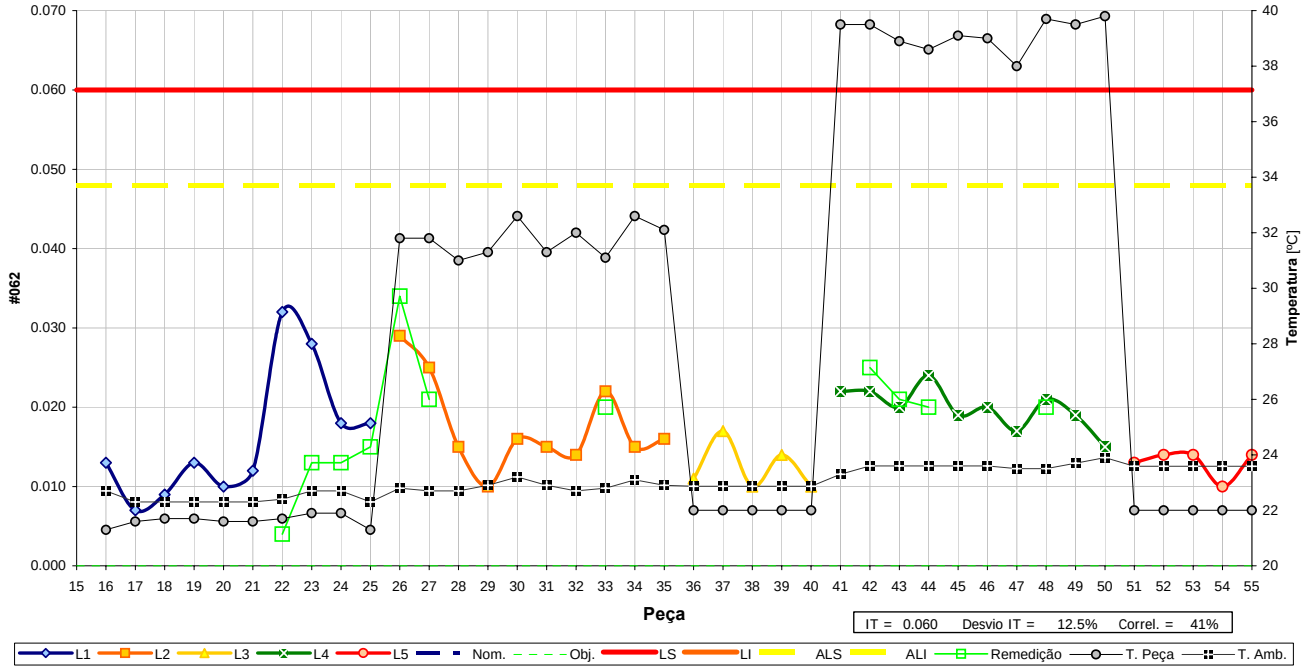

Fig. 4. 22 – Gráfico com a característica #062, localização de 0,06mm do 2002 em relação ao referencial

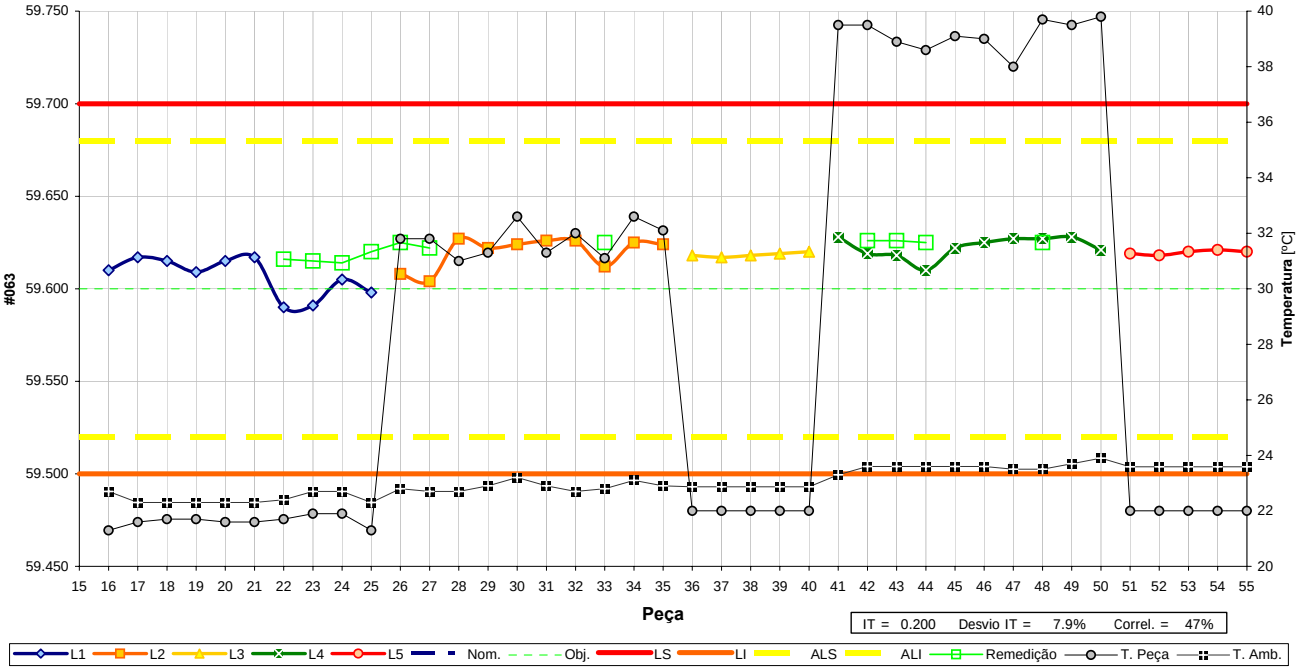

Fig. 4. 23 – Gráfico com a característica #063, posição do apoio do rolamento do 2002 em relação a face A

Na Fig. 4.23 é representado o resultado das medições da posição do apoio do rolamento do 2002 como podemos observar a correlação já tem um valor considerável 47% mas o desvio de IT é pequeno 7,9%.

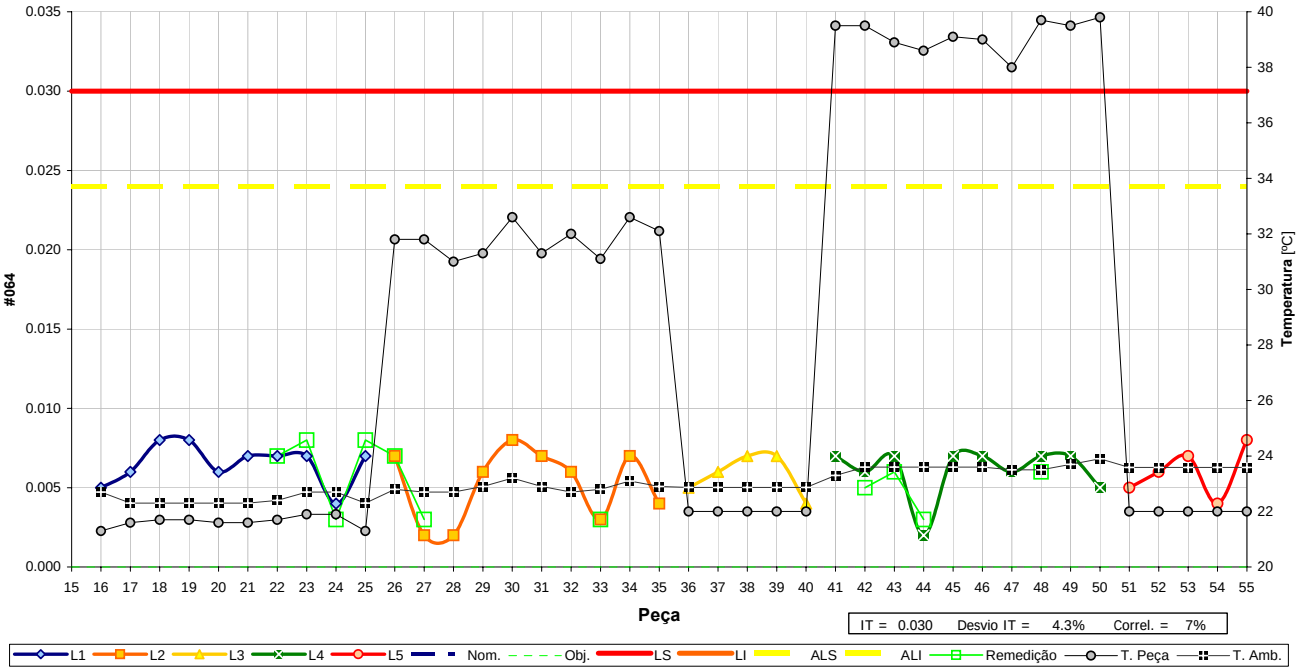

Fig. 4. 24 – Gráfico com a característica #064, paralelismo do fundo do Ø66H6 em relação à face A (2000)

Na Fig. 4.24 é representado o resultado das medições do paralelismo do fundo (apoio do rolamentos da arvore secundaria) do Ø66H6 e como podemos constatar a correlação e o desvio de IT têm valores negligenciáveis.

4.3.3 – Característica 2003 – Diferencial

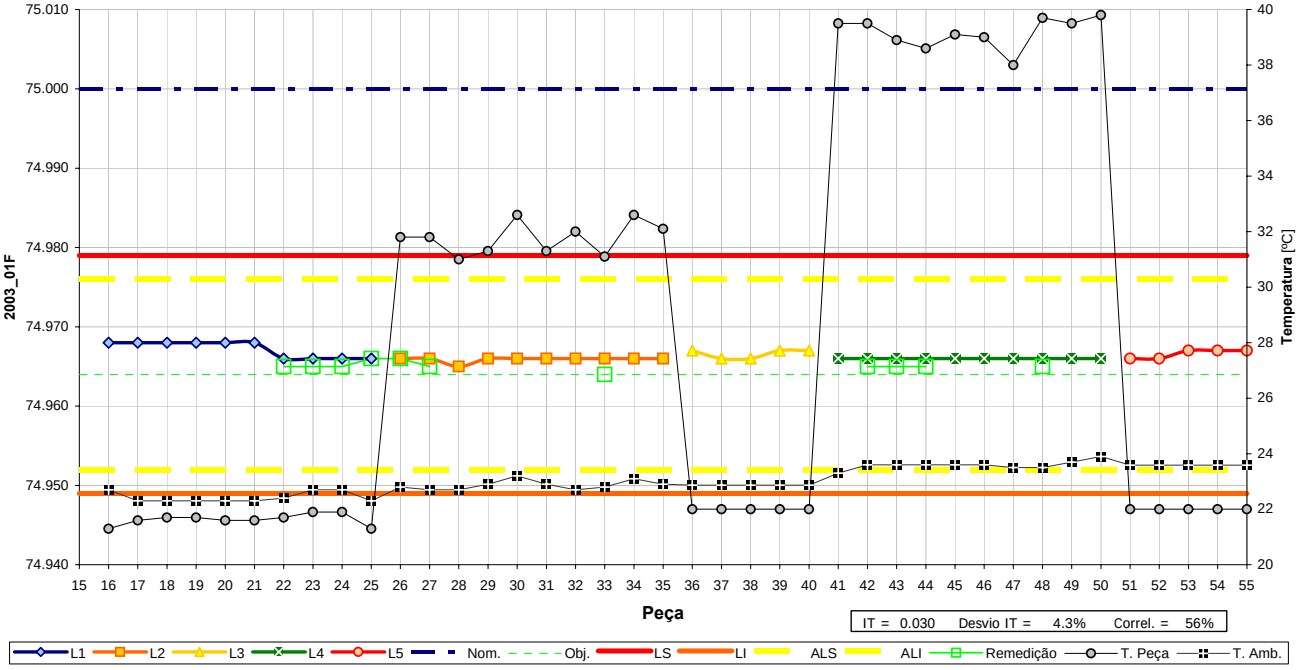

Fig. 4. 25 – Gráfico com a característica 2003_01, Ø75P7 do 2003 (diferencial)

Na Fig. 4.25 é representado o resultado das medições do Ø75P7 como se pode constatar a correlação é de 56% um valor relativamente elevado mas o desvio de IT de 4,6 ou seja um valor muito baixo, um valor idêntico às medições do Ø68H6 do 2001.

Na Fig. 4.26 é representado o resultado das medições da circularidade do Ø75P7, como foi dito para a circularidade do 2001 (característica #45), esta característica depende quase exclusivamente do estado da ferramenta, no entanto podemos constatar um desvio de IT de 15%, mas se substituirmos na peça nº 22 o resultado medido pelo resultado da remedição (marcada a verde), obtido depois de uma limpeza do diâmetro, obtemos como desvio de IT de 8% com uma correlação negligenciável de 2%, o que vem confirmar a dependência da ferramenta.

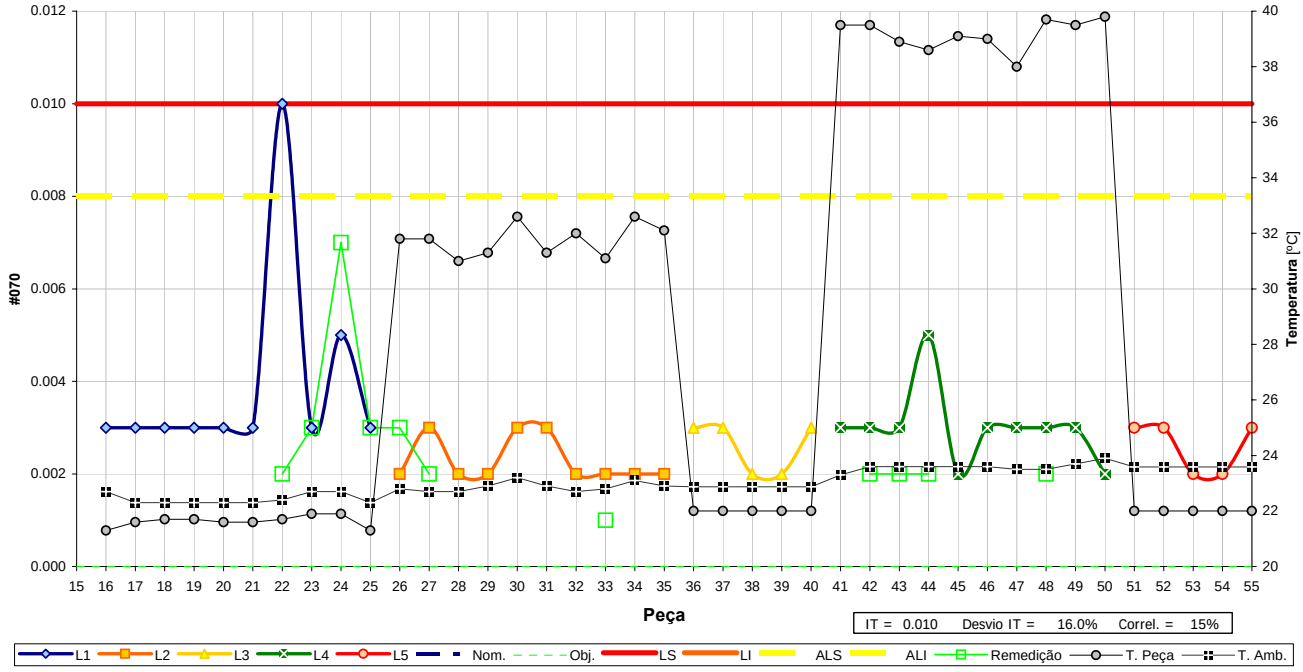

Fig. 4. 26 – Gráfico com a característica #070, circularidade do Ø75P7

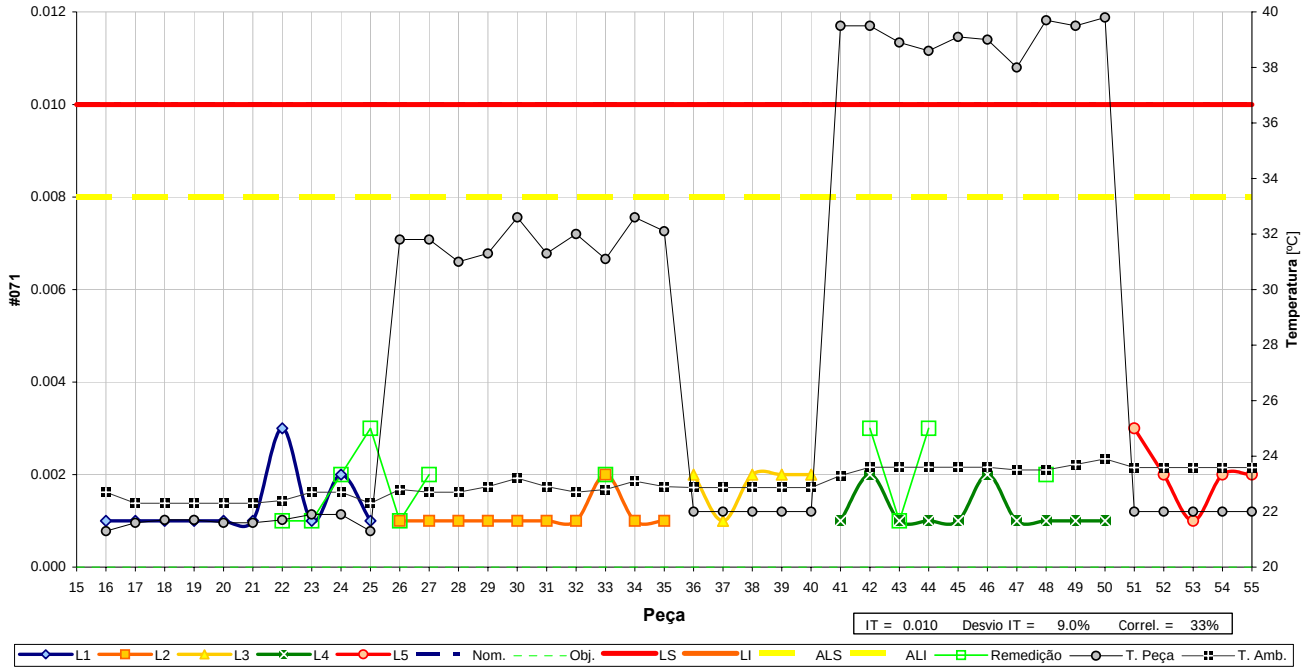

Fig. 4. 27 – Gráfico com a característica #071, perpendicularidade do Ø75P7 em relação à face 2000

Na Fig. 4.27 é representado o resultado das medições da perpendicularidade do Ø75P7 em relação à face 2000, a correlação é de 33% mas o desvio de IT é de 9% e fazendo uma observação mais atenta vemos que esta variação é na realidade somente de 0,001mm.

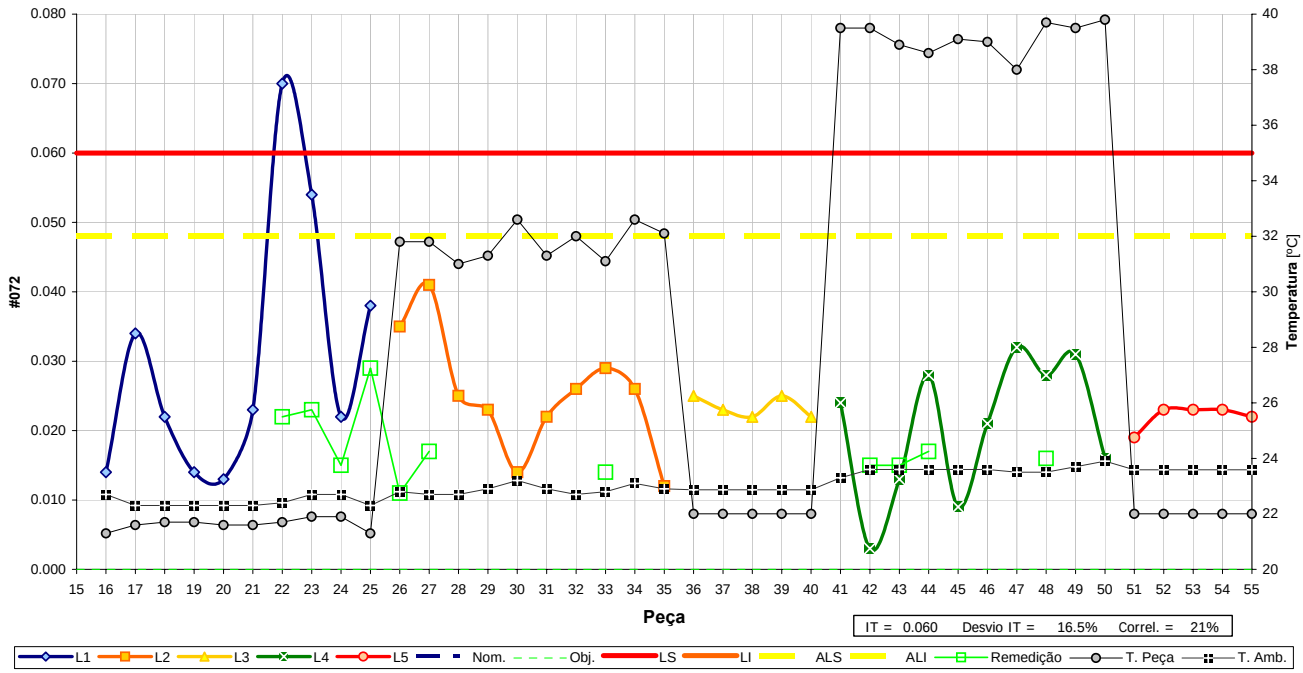

Fig. 4. 28 – Gráfico com a característica #072, localização do Ø75P7

Na Fig. 4.28 é representado o resultado das medições da localização do Ø75P7, em que o desvio do IT é de 16,5% mas só uma correlação de 21% portanto baixa, o que obrigou a remedir algumas peças, se introduzirmos os valores das peças remedidas obtemos um desvio de IT de 7,3% e uma correlação de 19%, valores mais de acordo com os da produção normal.

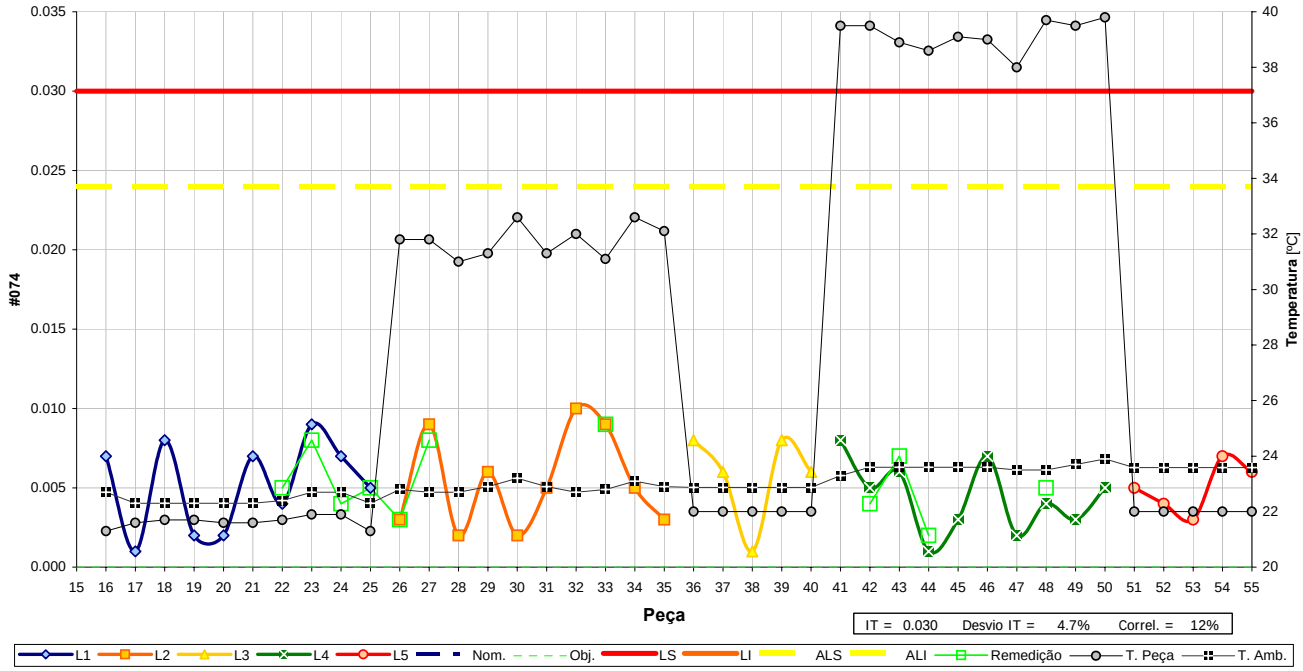

Fig. 4. 29 – Gráfico com a característica #074, paralelismo do fundo do Ø75P7 em relação à face 2000

Na Fig. 4.29 é representado o resultado das medições do paralelismo do fundo do Ø75P7 (apoio do rolamento) em relação à face 2000, como podemos observar a correlação e o desvio de IT são muito baixos.

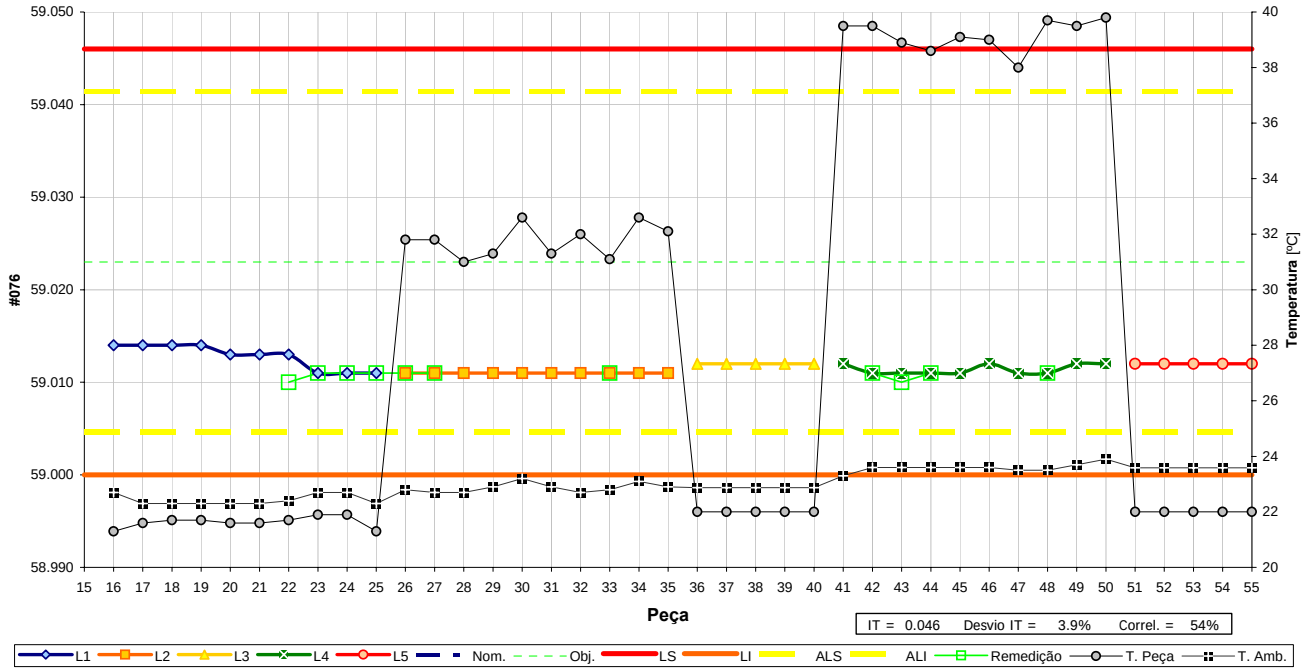

Fig. 4. 30 – Gráfico com a característica #076, Ø59H8 (alojamento da junta de estanqueidade)

Na Fig. 4.30 é representado o resultado das medições no Ø59H8, como se pode constatar a correlação é de 54% um valor relativamente elevado mas o desvio de IT de 3,9 ou seja um valor muito baixo e com valores muito próximos do Ø75P7.

Na Fig. 4.31 é representado o resultado das medições da posição do fundo do Ø75P7 (apoio do rolamento) relativamente à face 2000, como podemos observar temos um desvio de IT muito alto 26,2% e uma correlação de 34%, no entanto se introduzirmos no cálculo os valores da remedição obtemos um desvio de IT de 13,7% e uma correlação mais elevada de 61%. Como podemos constatar estes valores já são relativamente mais elevados do que os fundos dos diâmetros do 2002 e 2001 isto porque o IT é metade dos outros dois.

Na Fig. 4.32 é representado o resultado das medições na concentricidade do Ø59H8 em relação ao Ø75P7, em que o desvio de IT é de 9,4% e a correlação é de 17%. Como para a característica #061 no 2001 a concentricidade depende somente da ferramenta, já que os dois diâmetros são feitos com a mesma ferramenta.

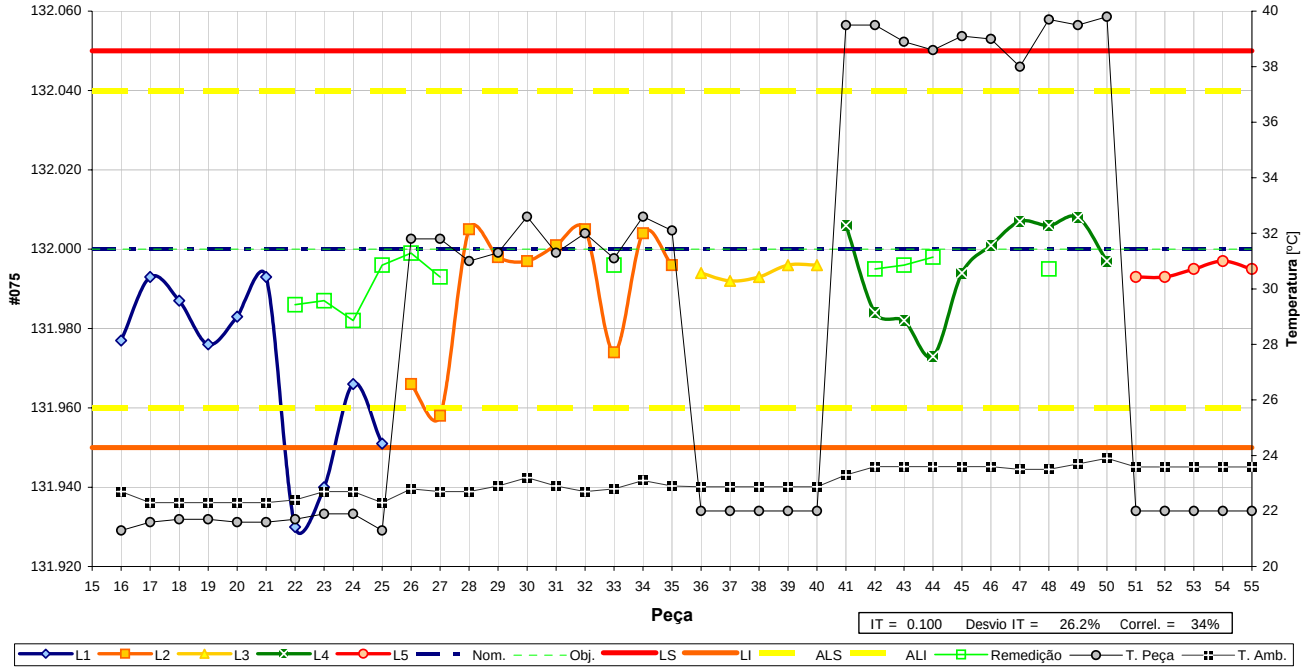

Fig. 4. 31 – Gráfico com a característica #75, posição do fundo do Ø75P7 relativamente à face 2000

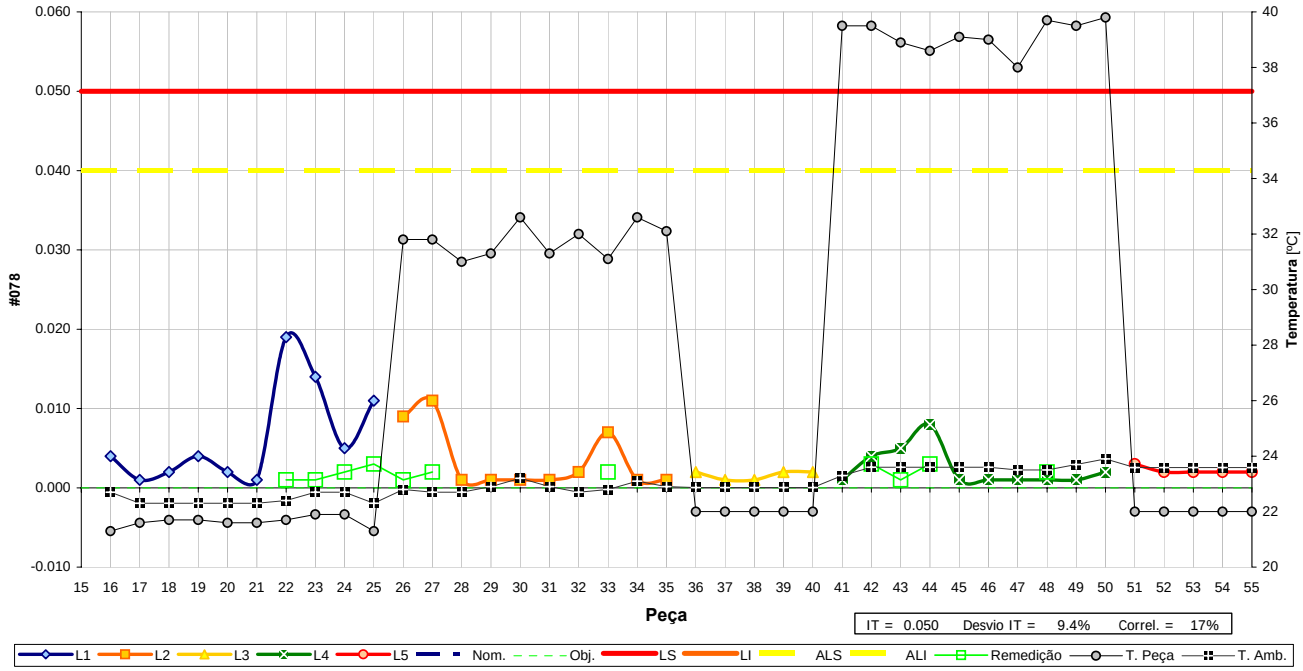

Fig. 4. 32 – Gráfico com a característica #078, concentricidade do Ø59H8 em relação ao Ø75P7

Na fig. 4.33 é representado o resultado das medições da distância entre o 2002 e 2003, no qual podemos constatar que correlação com a temperatura é baixa 18%, este valor vem demonstrar que a refrigeração da peça é homogénea, já que as únicas medidas que influenciam esta distancia é a localização dos dois furos. Se a localização dos furos variasse em sentido oposto um ao outro teríamos uma grande variação desta cota.

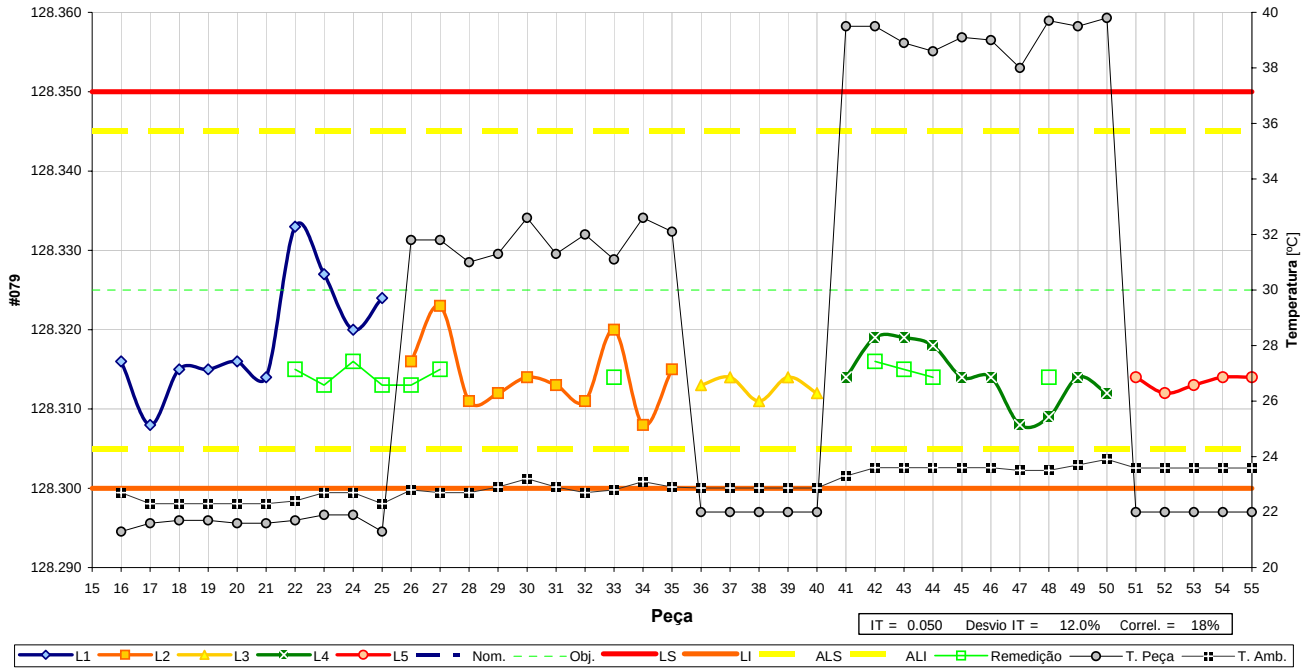

Fig. 4. 33 – Gráfico com a característica #079, distancia entre 2002 (árvore secundaria) e 2003 (diferencial)

4.3.4 – Característica 2004 – Eixo de marcha-atrás

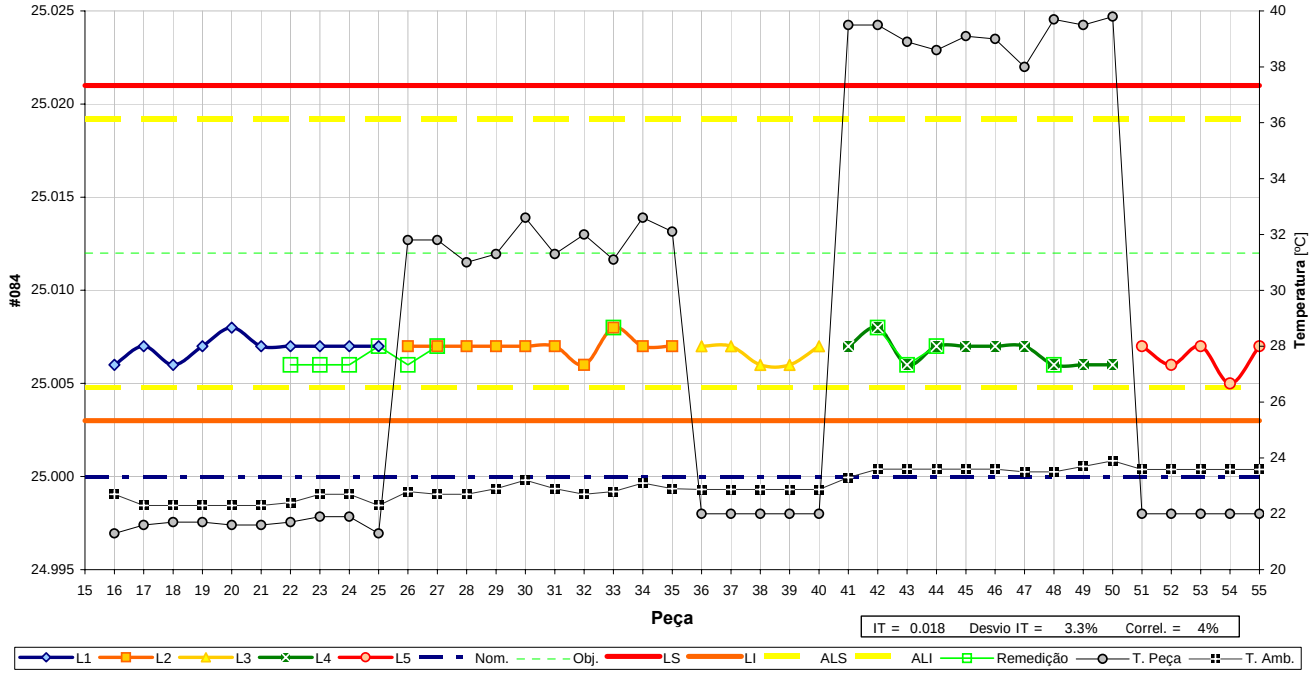

Fig. 4. 34 – Gráfico com a característica #084, Ø25+0,003/+0,021 do 2004 (eixo marcha atrás)

Na Fig. 4.34 - é representado o resultado das medições do Ø25+0,003/+0,021 do 2004, como podemos observar desvio de IT e a correlação são extremamente baixos.

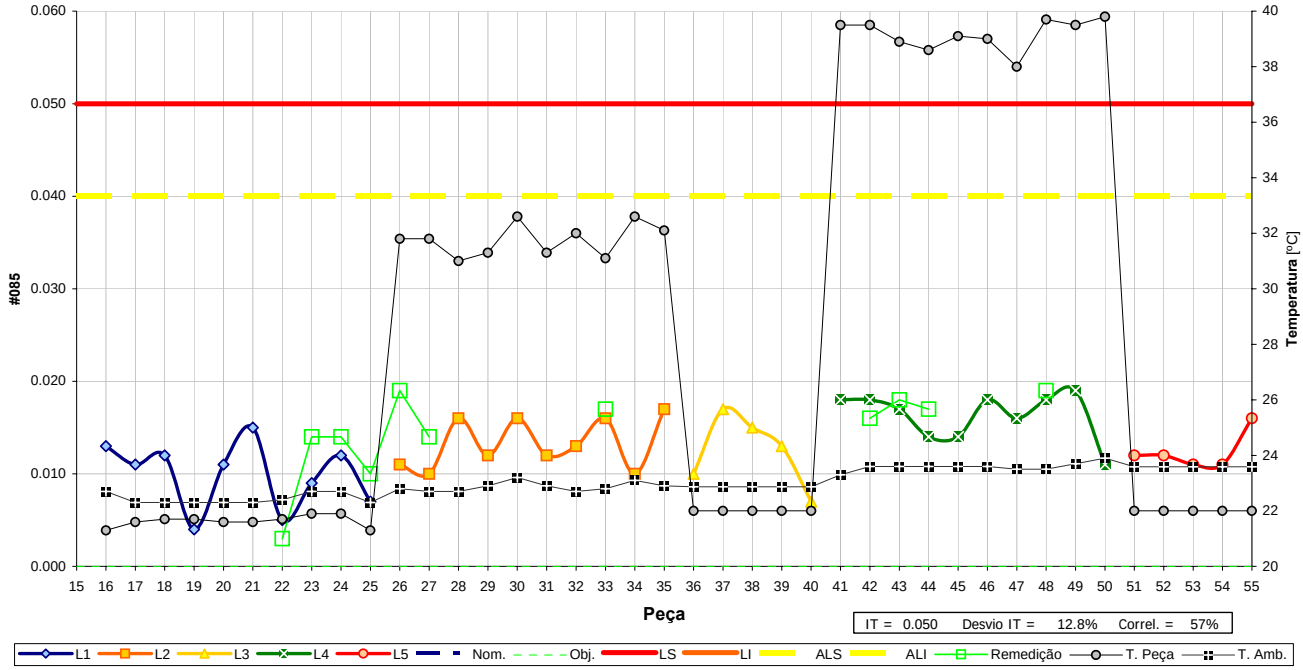

Fig. 4. 35 – Gráfico com a característica #085, localização do Ø25+0,004/+0,021

Na Fig. 4.35 é representado o resultado das medições na localização do Ø25+0,004/+0,021, em que temos um desvio de IT relativamente importante 12,8% e uma correlação também importante de 57% mas como se pode analisar pelo gráfico o desvio de IT não está só associado aos cárteres em que houve aumento de temperatura mas também nos de produção em condições normais.

Na Fig.4.36 é representado o resultado das medições do paralelismo da face de apoio do eixo de marcha-atrás em relação à face 2000, aqui a correlação é de 32% e o desvio do IT é somente de 3%, portanto desprezável.

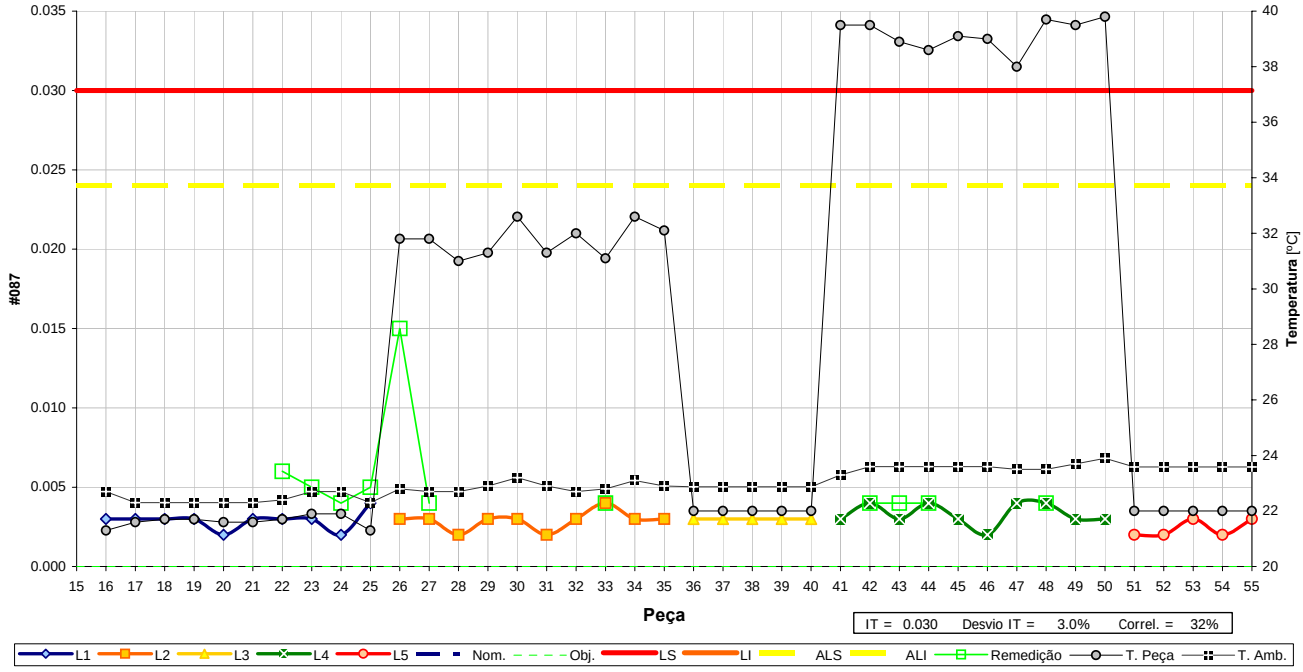

Fig. 4. 36 – Gráfico com a característica #087, paralelismo da face de apoio do eixo de marcha-atrás

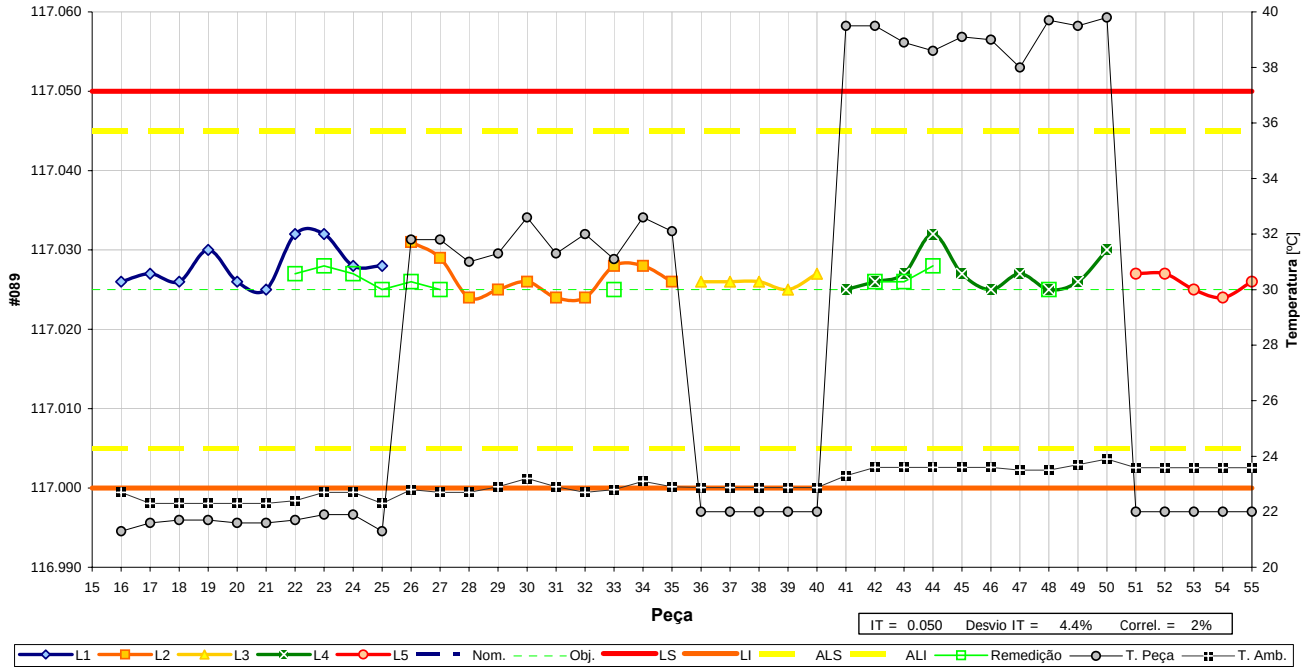

Fig. 4. 37 – Gráfico com a característica #089, distância entre o 2002 (árvore secundaria) e 2004 (eixo marcha atrás)

Na fig. 4.37 é representado o resultado das medições da distancia entre o 2002 e 2004, como podemos constatar o desvio de IT e a correlação são extremamente baixos, podemos tirar as mesmas conclusões que para a Fig. 4.33.

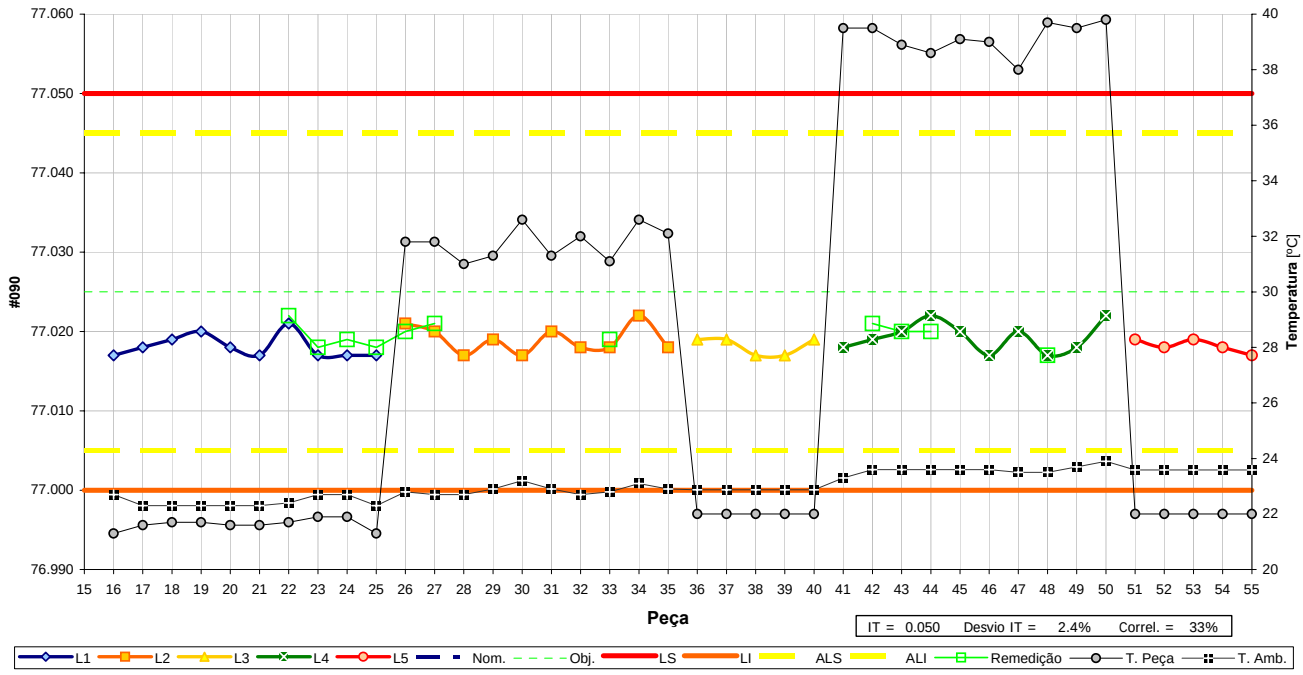

Fig. 4. 38 – Gráfico com a característica #090, distância entre o 2001 (árvore primaria) e 2004 (eixo marcha atrás)

Na Fig. 4.38 é representado o resultados das medições da distancia entre o 2001 e 2004, aqui são validos os mesmos comentaria que para a Fig. 4.33

4.3.5 – Característica 2106 – Centragem caixa

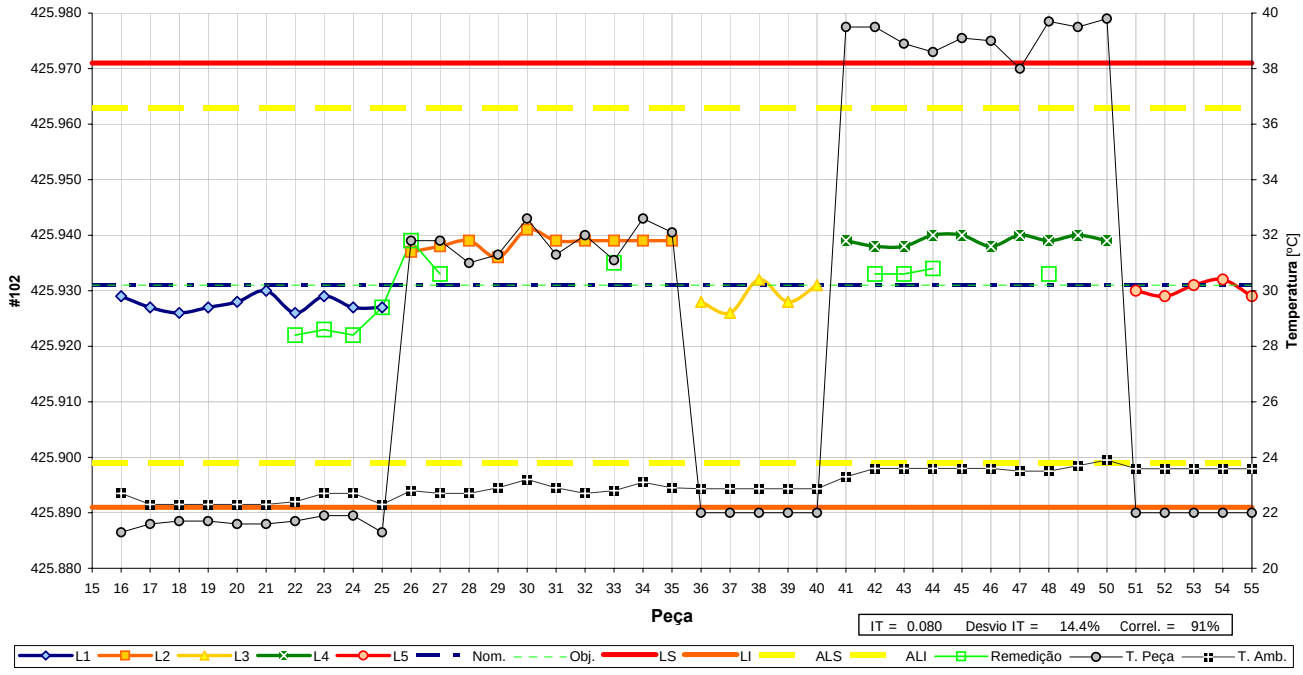

Fig. 4. 39 – Gráfico com a característica #102, distancia de entre os dois furos de centragem, 2105/2106

Na Fig. 4.39 é representado o resultado das medições da distancia de 425,931±0,04 entre os dois furos de centragem caixa, que também servem para definir o referencial peça, esta foi umas das características pela qual o fabricante dos centros de maquinação exigiu que as peças tinham que entrar com a temperatura estabilizada para dentro do centro de maquinação. Como se pode observar existe de facto nesta característica uma forte dependência com a temperatura, correlação de 91%, sendo o desvio de IT de 14,4%.

4.3.6 – Característica 1101/1102 – Centragem motor

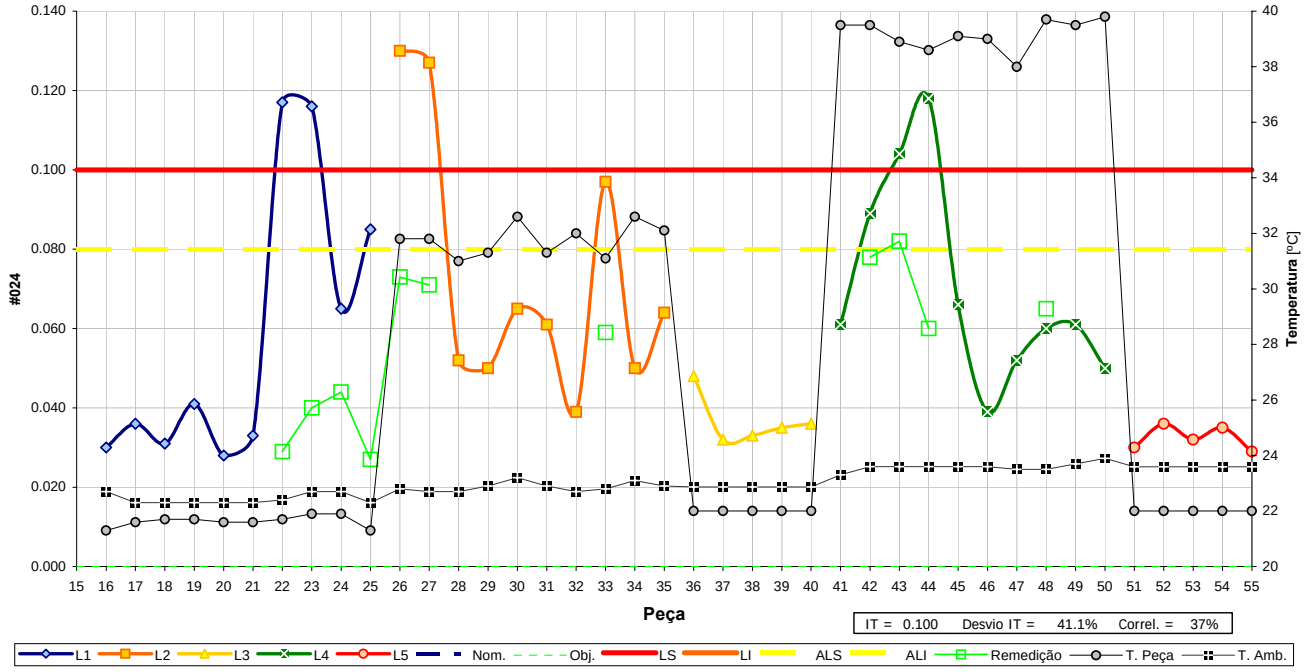

Fig. 4. 40 – Gráfico com a característica #024, localização do furo centragem motor 1101

Na Fig. 4.40 é representado o resultado das medições da localização de 0,1 de um dos furos de centragem motor (1101), como podemos ver no gráfico existe um grande desvio de IT, 41,1%, o que nos levou a remedir algumas peças depois de lavadas novamente, com esta remedição obtemos um desvio de IT de 29%, mas consequentemente a correlação passa de 37% para 80% logo uma correlação elevada. Como veremos mais à frente esta é uma característica a ter cuidados especiais.

Na Fig. 4.41 é representado o resultado das medições da localização de 0,08 do outro furo de centragem motor, o 1102, e neste caso depois da remedição das peças o desvio de IT passa de 22,4% para 11,5 e a correlação de 13% para 14%, portanto, embora o desvio seja significativo a correlação é baixa.

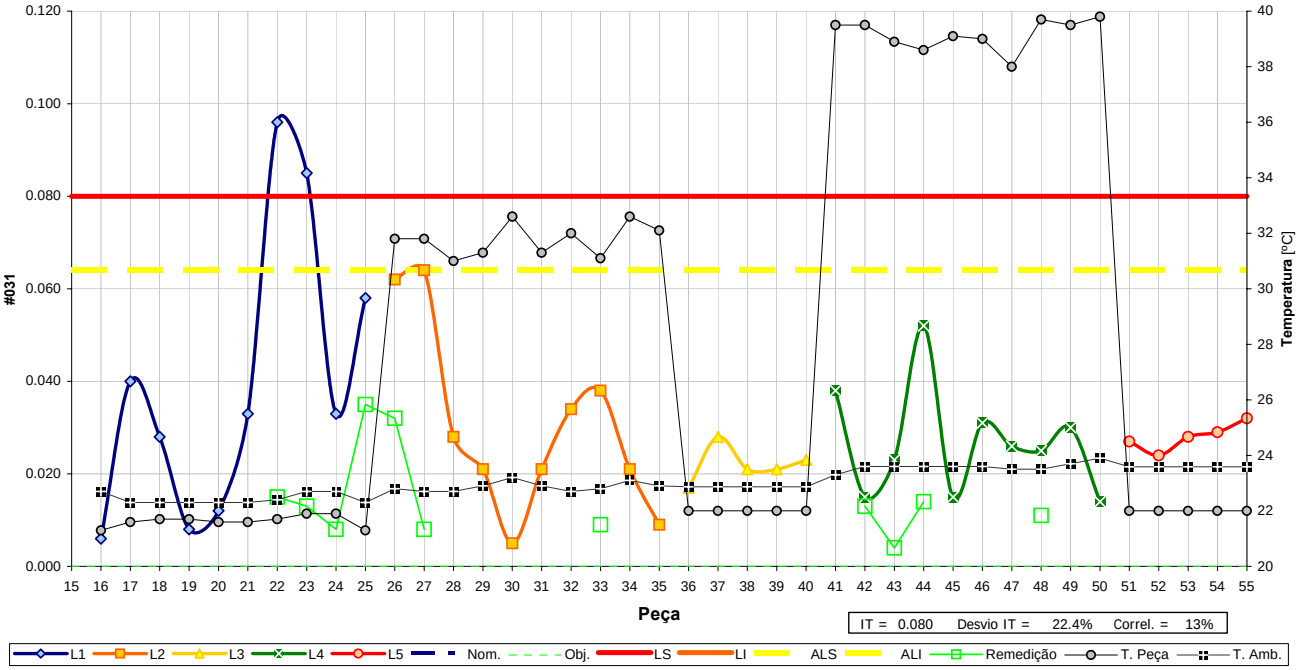

Fig. 4. 41 – Gráfico com a característica #031, localização do furo de centragem motor o 1102

4.3.7 – Característica 1000 – Face Motor

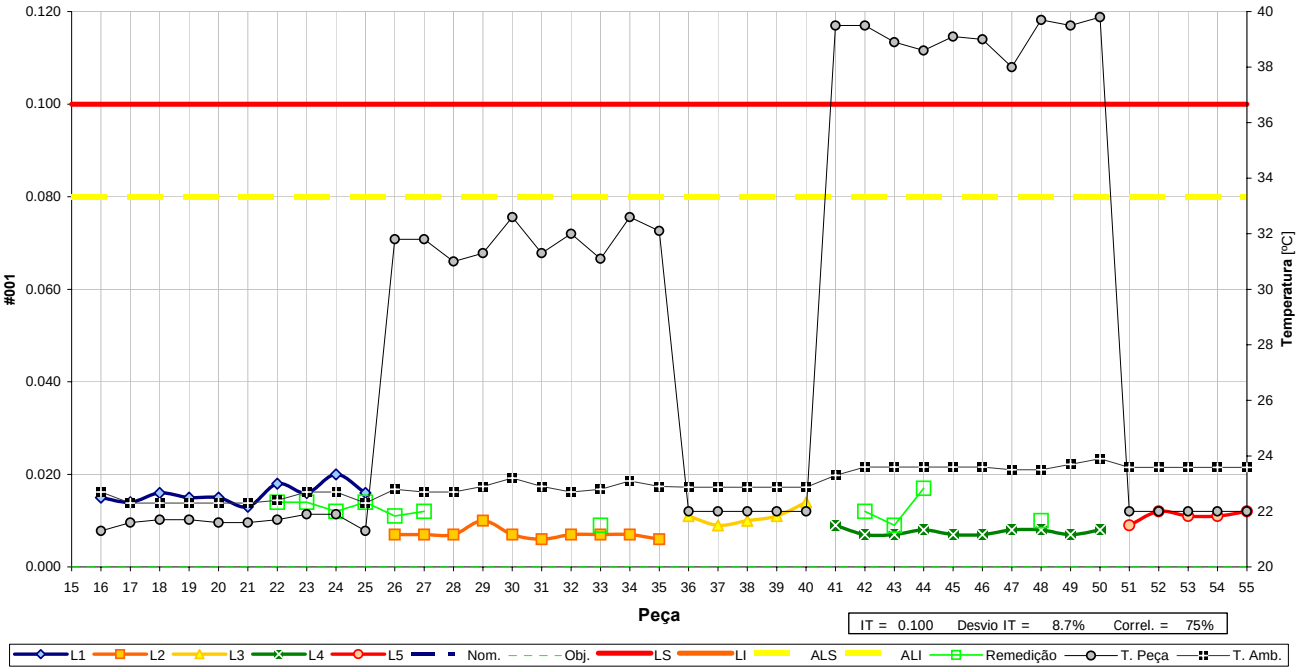

Fig. 4. 42 – Gráfico com a característica #001, planicidade da face 1000 (face motor)

Na Fig. 4.42 é representado o resultado das medições da planicidade da face 1000 (face motor), como podemos observar temos uma correlação elevada de 75% mas um desvio de IT baixo, 8,7%.

4.3.8 – Característica 2000 – Face mecanismo

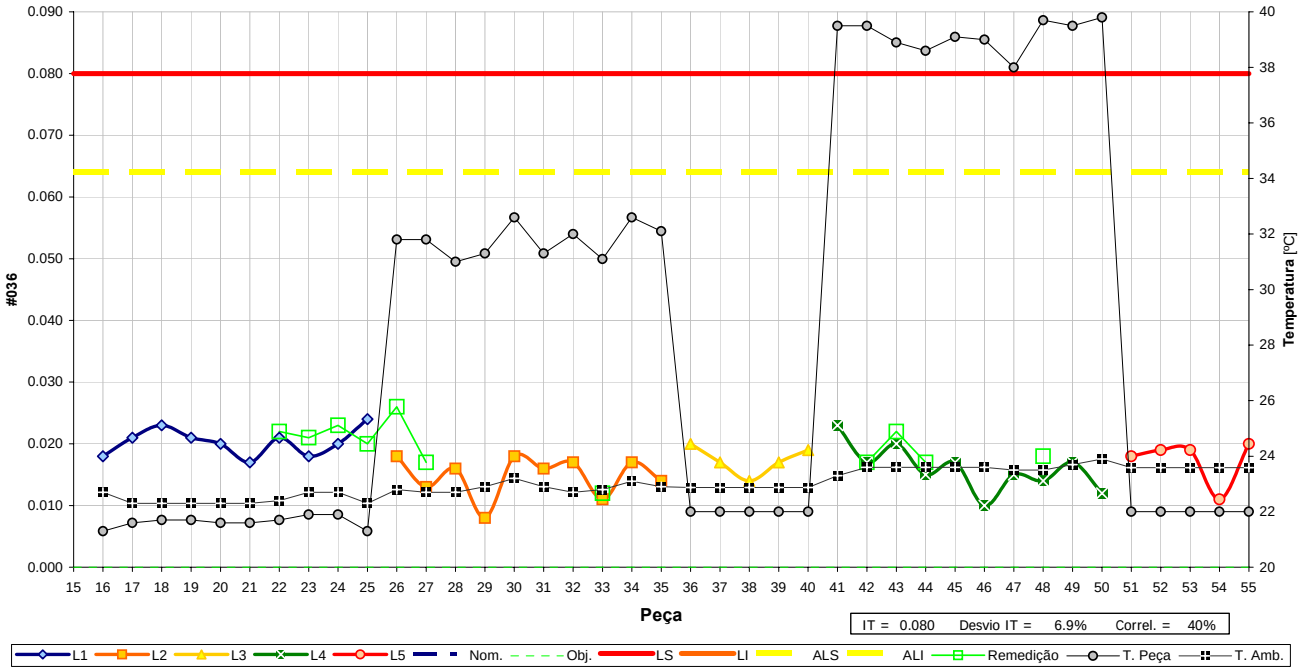

Fig. 4. 43 – Gráfico com a característica #036, planicidade da face 2000 (face mecanismo)

Na Fig. 4.43 é representado o resultado das medições da planicidade da face 2000 (face mecanismo) como podemos observar temos uma correlação de 40% mas um desvio de IT baixo: 6,9%.

4.3.9 – Característica 1000/2000 – Altura do cárter

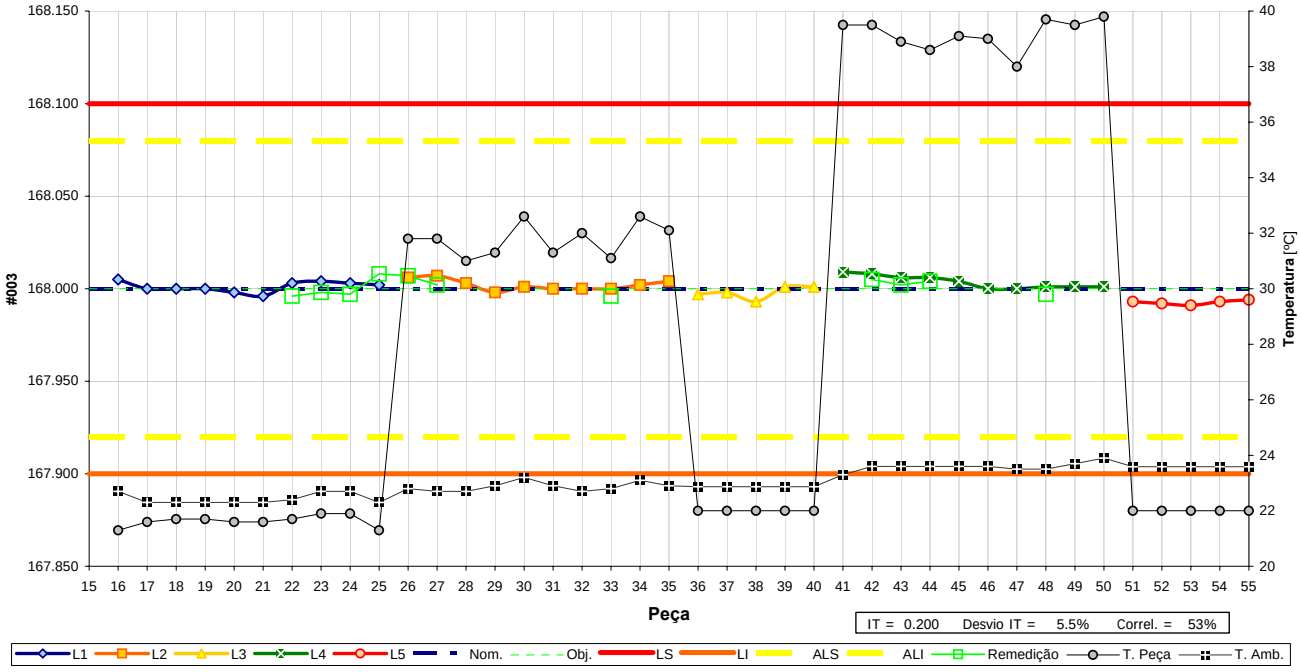

Fig. 4. 44 – Gráfico com a característica #003, distância entre a face 1000 e 2000

Na Fig. 4.44 é representado o resultado das medições da distância entre a face 1000 e 2000, como podemos constatar temos uma correlação relativamente elevada de 53% mas um desvio de IT baixo, 5,5%, à semelhança do que temos com as outras medições em profundidade.

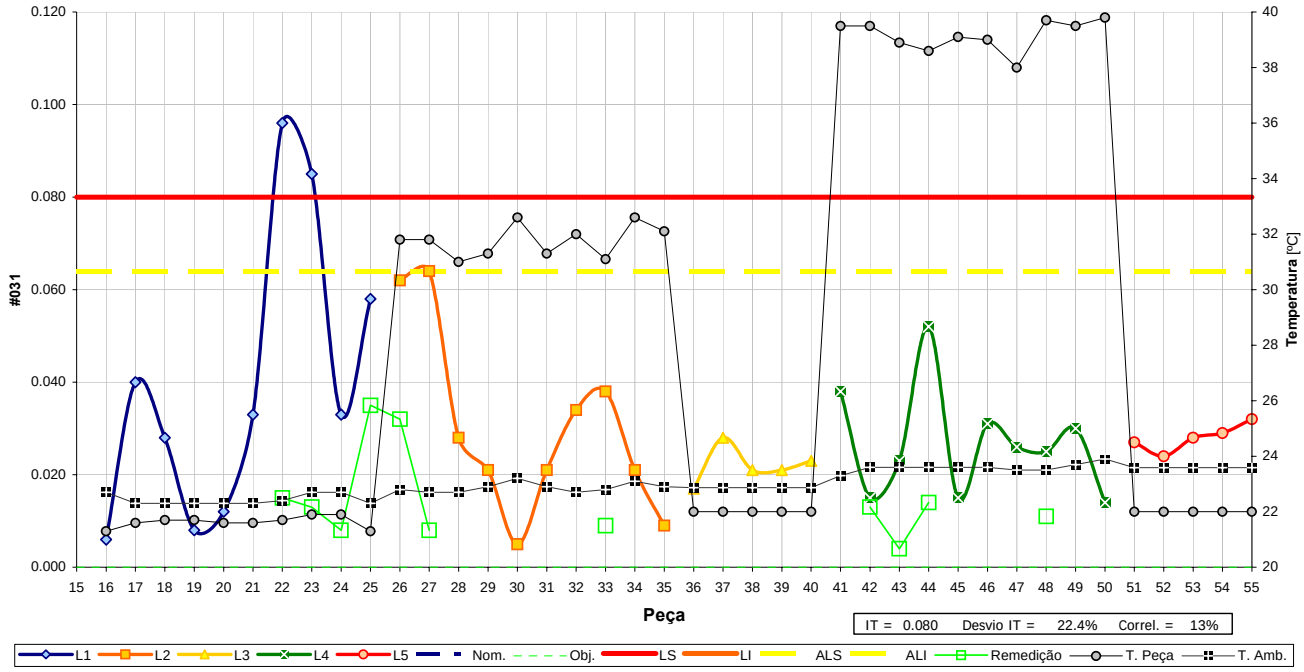

Fig. 4. 45 – Gráfico com a característica #031, paralelismo entre a face 1000 e 2000

Na Fig. 4.45 é representado o resultado das medições do paralelismo entre a face 1000 e 2000, depois da remedição das peças o desvio de IT passou de 22,4% para 7,8% portanto um valor baixo e a correlação passou de 13% para 22%, também um valor baixo.

4.3.10 – Gráfico Correlação vs Desvio de IT

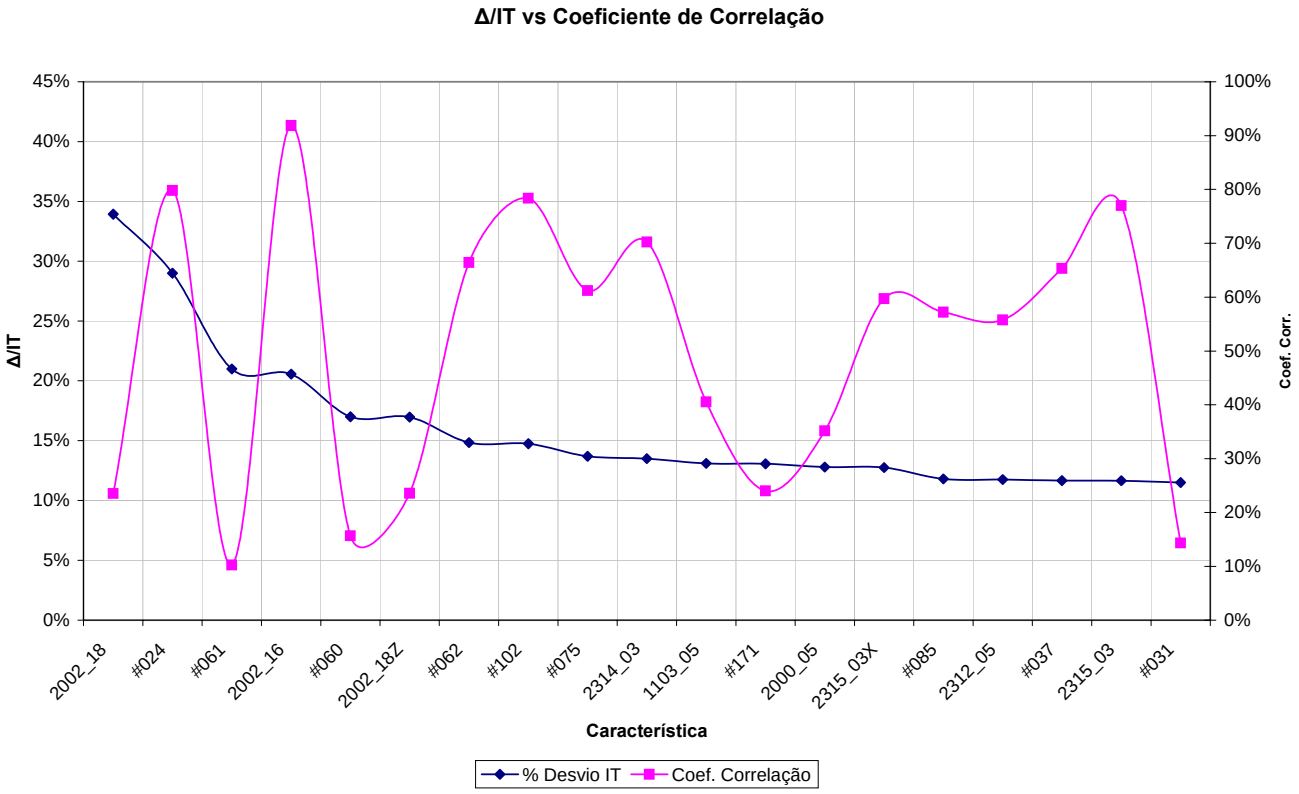

Fig. 4. 46 – Gráfico correlação/desvio de IT

Na Fig. 4.46 é representado o resultado da variação do IT, em forma decrescente, e a respectivo coeficiente de correlação associado. Este gráfico é muito importante porque assim podemos observar quais as características que se devem ter em consideração para uma melhor análise posterior, isto porque só nos vão interessar aquelas que tiverem um variação superior a 15% e que tenham simultaneamente uma correspondência elevada com a temperatura. Estes 15% são o valor escolhido porque como dissemos no ponto 4.3 na produção todas as cotas que estejam acima do 80% do IT são recentradas, assim sendo com esta variação de 15% possível devido à temperatura fica-nos ainda 5% de margem.

Usando o critério em cima descrito podemos observar no gráfico que existem duas cotas nestas circunstâncias a cota #024 e a 2002_16, a cota #024 já foi analisada no ponto 4.3.6, a cota 2002_16 é uma cota de processo, logo é uma cota que não consta nas exigências do plano peça, esta dá-nos a distância entre o centrador bruto para a OP110 e o referencial peça, ou seja dá o balanceamento do bruto em relação ao maquinado.

A explicação da excepção destas duas características dependerem tanto da temperatura irá ser referida em pormenor no capítulo das conclusões.

5 – Conclusão

5.1 – Interpretação dos resultados

No capítulo anterior descreveu-se os resultados obtidos característica a característica quais as suas variações, isto para as características com IT mais apertado. Mas observando o gráfico 5.1 onde se representam os desvios das 19 características em que a correlação com a temperatura é mais importante, podemos concluir que as características em que este factor têm mais influência são as cotas em profundidade e as cotas que se afastam da referência (origem das cotas). Ex. 2001_13 Apoio do rolamento da árvore primaria (Cota para a referência A); 2317_05 localização do furo de centragem caixa (furo da periferia)

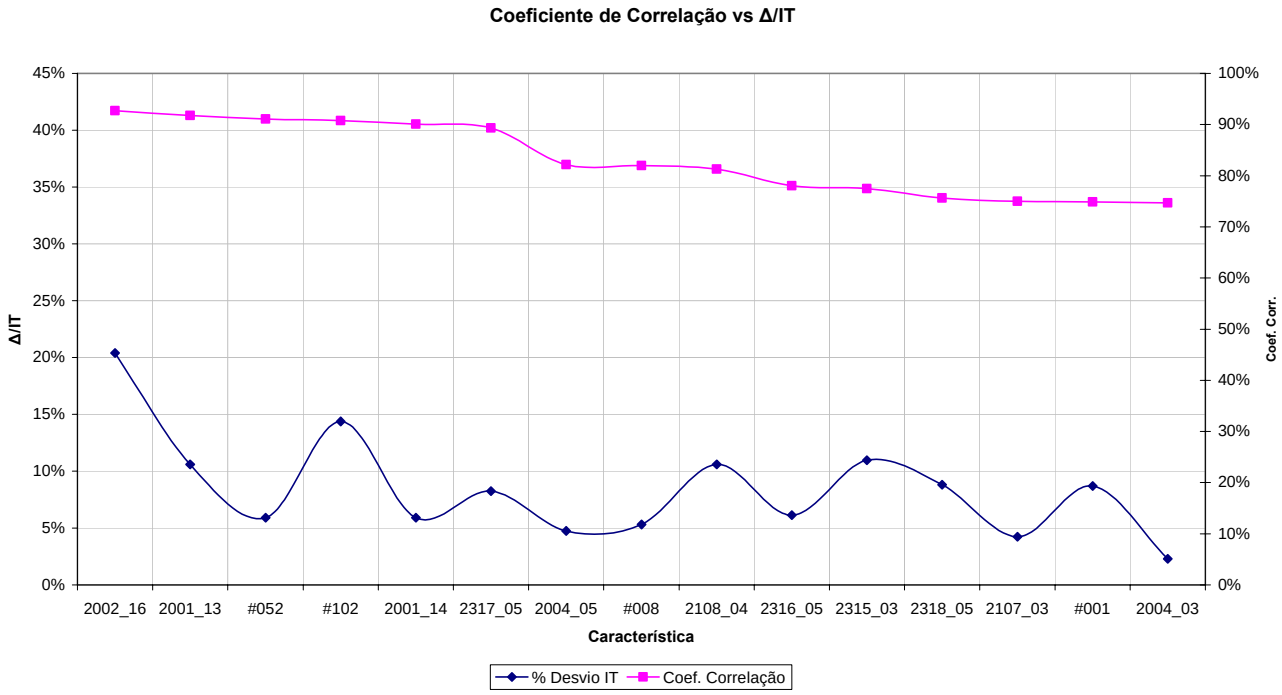

Fig. 5. 1 – Gráfico com o desvio IT/correlação

No entanto à excepção da característica 2002_16 distância entre o 2002 (origem das coordenadas peça) e o centrador (origem bruto) bruto, que é uma cota processo, e a cota #024 que é a localização de 1102 que é um furo de centragem motor, as outras têm uma variação de cota em percentagem relativamente baixa, ou seja, abaixo dos 15% que não põe em causa a qualidade do produto final, como já foi explicado no ponto 4.3.10.

Em relação ao 2002_16, verifica-se que o cárter continua a retrair mesmo depois de maquinada a referência da peça, se se observar a fig. 5.2 vemos que a cota quando a peça entra dentro do centro de maquinação com a temperatura estabilizada é sempre maior do que quando entra com a temperatura mais elevada.

Com este fenómeno a acontecer a solução é ter de observar mais de perto esta cota, ou seja, esta cota tem de ser regulada mais vezes para que a cota medida na peça seja o mais próximo da cota nominal. No entanto como já foi dito, esta cota é uma cota processo com o objectivo de monitorizar a centragem do bruto em relação ao maquinado de forma a não se correr o risco de não haver sobre-espessura suficiente nos furos para maquinar.

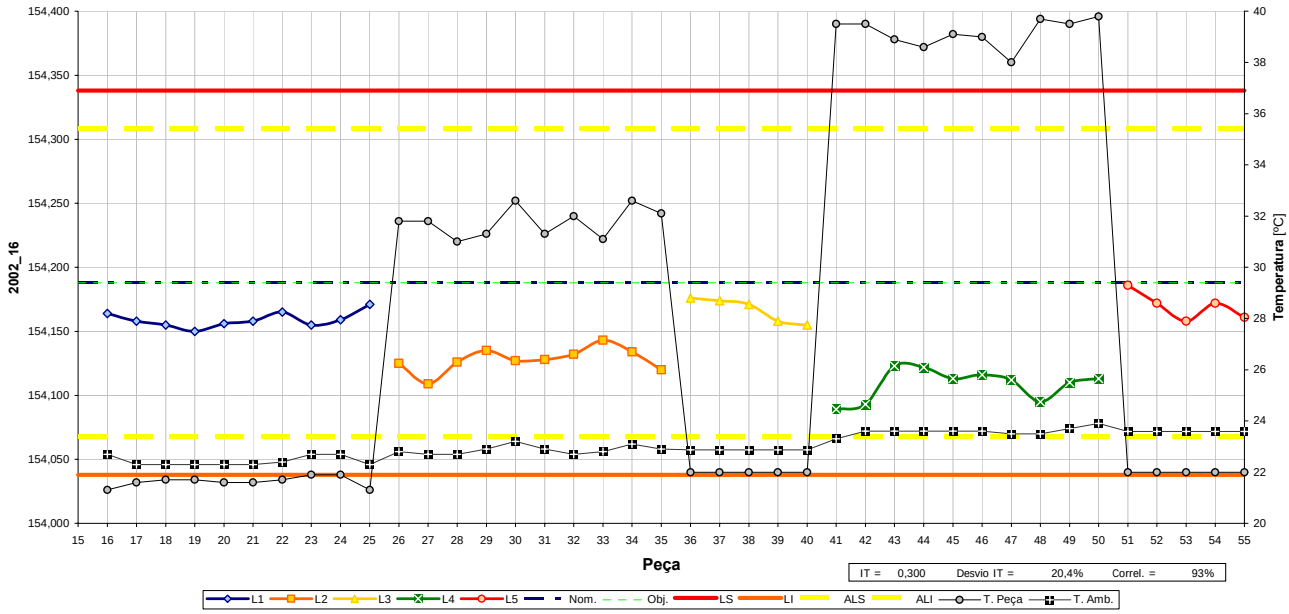

Fig. 5. 2 – Gráfico com a característica 2002_16, distância entre o 2002 e locating bruto

Relativamente à característica #024, localização do furo 1101 centrador motor, o qual já foi visto na fig. 4.40 no ponto 4.3.6, esta tem uma correlação elevada com a temperatura assim como um desvio de IT importante de 26%, numa primeira análise podemos dizer que este furo como é feito antes do furo de referência continua a variar a sua cota até ao seu acabamento, ou então, como existe menos matéria (volume) nesta zona o arrefecimento é mais rápido, logo a sua posição relativa em relação ao furo de referência vai variar com a evolução deste último depois de ser maquinado, já que se encontra numa zona mais massiva da peça. No entanto uma destas hipóteses só se poderia comprovar utilizando um o método de elementos finitos, vendo a variação de posição de cada um dos furos ao longo do tempo e comparando com o programa de maquinação.

5.2 – Aplicação do estudo

Depois da análise dos resultados das vantagens inerentes e dos custos optou-se por aplicar esta modificação a todo o parque de centros de maquinação que maquinam o cárter de embraiagem como o cárter de mecanismo da mesma família

5.2.1 – Vantagens e custos

Para a aplicação da aspersão dentro da máquina, com o óleo de corte a cair de forma homogénea em cima do cárter de forma a podê-lo refrigerar, foi necessário meter os outros centros de maquinação com as condições em que foram realizados os ensaios, assim foi necessário:

- Caudalímetros para manter o fluxo constante e controlar o consumo de óleo de corte;
- Sistema de aspersão de forma a irrigar o cárter de forma homogénea;
- Monitorização do sistema e alerta caso a irrigação não esteja a ser feita;
- Implementação no programa de controlo do tempo mínimo de irrigação, que, sem o qual, o centro de maquinação não arranca.

As vantagens da aplicação são bastante elevadas, sendo as principais:

- Eliminação do consumo das estufas;
- Eliminação das paragens da linha devido às estufas;
- Eliminação dos gastos com a manutenção das estufas.

Os custos anuais com as estufas são cerca de 9 k€ em electricidade e mais cerca de 9 k€ em manutenção.

5.2.2 – Desvantagens

Como vimos no ponto 5.1, temos duas características em que a correlação com a temperatura e a variação com o IT estão acima dos 15% estipulados (explicação no ponto 4.3.10). Portanto, há necessidade de fazer uma monitorização mais apertada de modo a manter estas cotas mais próximas da cota nominal de cada umas delas.

Na fig. 5.3 e 5.4 podemos ver a evolução da variação destas cotas, desde Fevereiro a Junho de 08 em todas as máquinas. Cada uma das cores representa um centro de maquinação, e as medidas efectuadas nas peças saídas desse centro, sendo a frequência, como já foi dito, um cárter por dia e por centro. Como podemos constatar até agora não existem variações abruptas, no entanto, as temperaturas altas para as quais nós fizemos os testes, ainda não se registaram dentro da fábrica.

No Fig. 5.4, correspondente à característica #024, vemos que a dispersão de produção é relativamente elevada e em que as linhas a tracejado representam medições que foram retiradas depois de remedição da peça ou verificação de que o furo em questão têm poros, não só pela analise visual como também pelo defeito de forma apresentado no relatório de medição. Também podemos observar, por exemplo no centro de maquinação 2579 (com a cor verde) que a certa altura foi feita

uma recentragem do furo de modo a que esta característica tivesse valores de localização mais baixos.

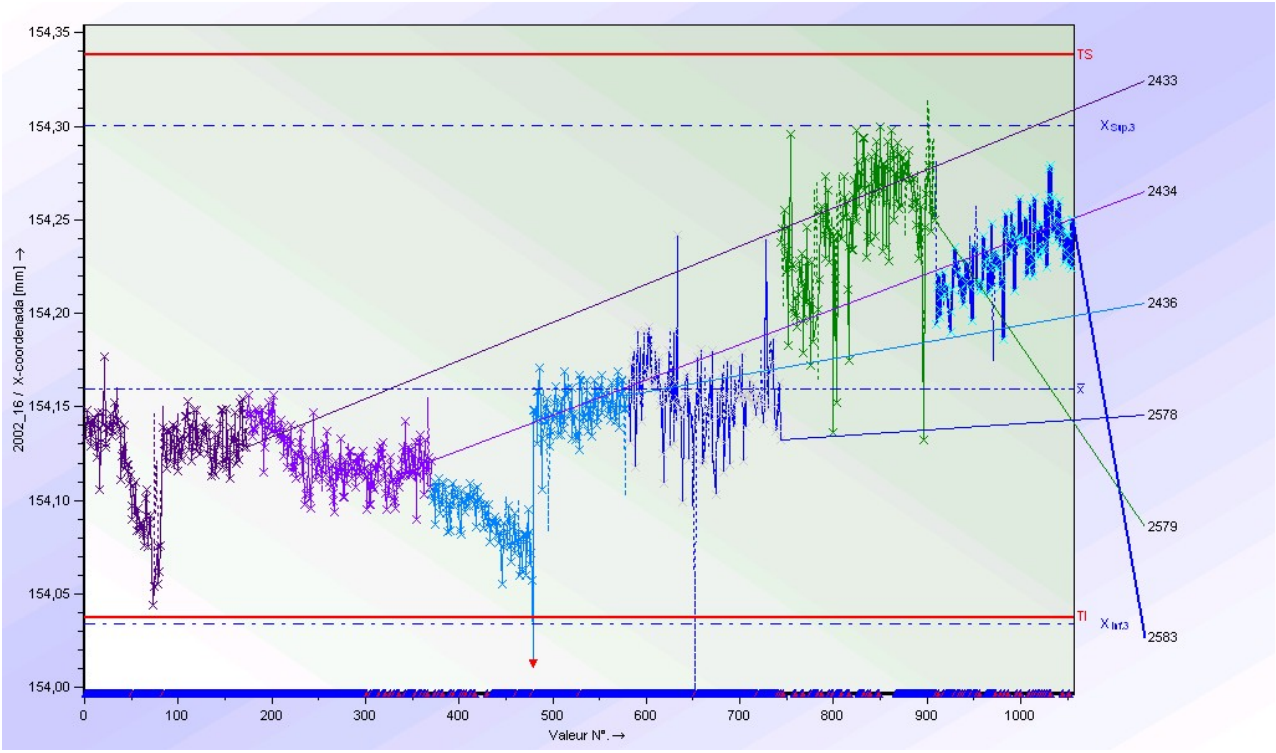

Fig. 5. 3 – Medições efectuadas na característica 2002_16 desde inicio de Fevereiro a Junho de 08 em cada centro de maquinação

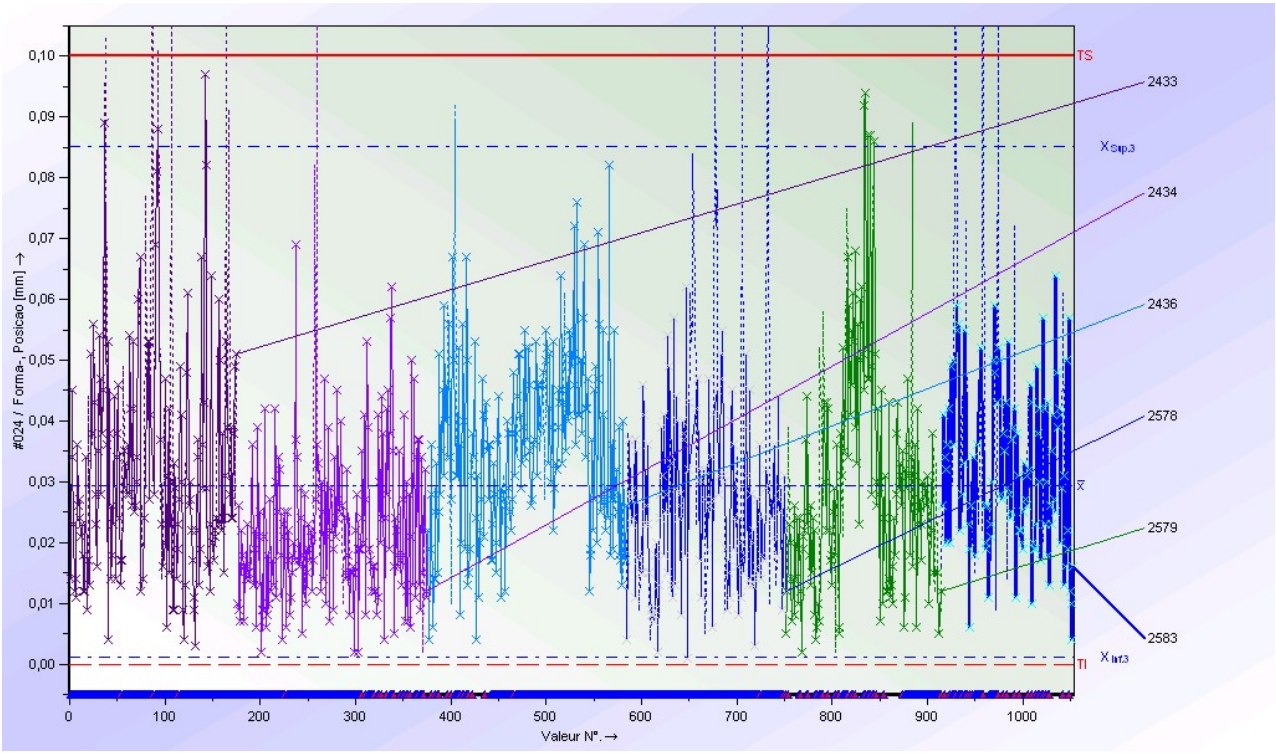

Fig. 5. 4 – Medições efectuadas na característica 2002_16 desde inicio de Fevereiro a Junho de 08 em cada centro de maquinação

5.3 – Proposição de investigações

Como já foi dito atrás, depois deste estudo decidiu-se fazer a aplicação do principio para esta família de cárteres, no entanto, a extrapolação deste principio para outro tipo de peça ou mesmo para famílias diferentes de cárteres não foi possível provar, já que como se viu o cárter continua a variar a temperatura mesmo depois do tempo de estabilização que foi definido.

Pela razão atrás exposta e como validação do estudo existem dois tipos de análise que podem ser feitas como complemento a este trabalho, que são:

- Analisar utilizando um programa de elementos finitos a dilatação do cárter ao longo do tempo e comparar os resultados das simulações com aqueles que foram obtidos neste trabalho;
- Analisar utilizando o programa acima referido qual a influência do aperto do cárter durante a refrigeração.
- Com os resultados da simulação referida verificar quais as alterações do programa de maquinação são necessárias fazer para que as duas características criticam não o fossem.
- Utilizar o mesmo princípio, abordado neste estudo, na maquinação de outras peças.

Bibliografia

- SAE International, “Advanced in Lightweight Automotive Casting and Wrought Aluminium Alloys”
- Peter D. Hilton, Paul F. Jacobs, “Rapid tooling – Technologies and Industrial Applications”, Marcel Dekker, Inc.
- Transport and Aluminium, The Aluminium association
- Hart Coat – Industrial Coating for Aluminium Aloys, Alberts Industries Material Technologies
- Norme Renault 02 – 40 -110 / --E
- The European Standart EN 1676 : 1996
- IAI – Intenational Aluminiun Institute, www.world-aluminium.org
- Improving Sustainability in the Transport Sector Through Weight Reduction and the Application of Aluminium - Short Report, in IAI
- www.toyoda.com
- www.sam.davyson.com
- www.hydro.com
- www.a-m.de
- www.matweb.com
- www.grobgroup.com
- www.gildemeister.com