UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ALEXANDRE BERTHO ZOPPELLARI

Modelamento e compensação de erros térmicos para um centro de torneamento.

São Carlos
2014

ALEXANDRE BERTHO ZOPPELLARI

Modelamento e compensação de erros térmicos para um centro de torneamento.

Dissertação submetida ao Programa de Mestrado em Engenharia de Produção como parte dos requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr.
Eraldo Jannone da Silva

São Carlos
2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Z88m

Zoppellari, Alexandre Bertho
Modelamento e compensação de erros térmicos para um centro de torneamento / Alexandre Bertho Zoppellari; orientador Eraldo Jannone da Silva. São Carlos, 2014.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Área de Concentração em Processos e Gestão de Operações -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Compensação térmica. 2. Modelamento. 3. Erro térmico. 4. Centro de torneamento. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **ALEXANDRE BERTHO ZOPPELLARI.**

Título da dissertação: "Modelagem e compensação de erros térmicos para um centro de torneamento".

Data da defesa: 12/09/2014

Comissão Julgadora:	**Resultado:**
Prof. Dr. **Eraldo Jannone da Silva (Orientador)** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Titular **Reginaldo Teixeira Coelho** (Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)	APROVADO
Prof. Dr. **Elesandro Antonio Baptista** (Universidade Nove de Julho)	APROVADO

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção:
Prof. Titular **Luiz Cesar Ribeiro Carpinetti**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Associado **Paulo César Lima Segantine**

A toda minha família, em especial a minha esposa Tamara, a minha filha Elena, meu irmão Fernando e aos meus pais Rubens e Vera, exemplos de trabalho e caráter.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar forças no trabalho, estudos, e na criação da minha filha.

Ao Professor Eraldo Jannone da Silva, pela orientação, confiança e paciência.

Ao Professor Reginaldo Teixeira Coelho, pela participação e conselhos.

As Indústrias Romi, por oferecer esta oportunidade e apoio.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia de Produção (EESC/USP - 2014)

A maior necessidade do mundo é a de homens – homens que se não comprem nem se vendam; homens que no íntimo da alma sejam verdadeiros e honestos; homens que não temam chamar o pecado pelo seu nome exato; homens, cuja consciência seja tão fiel ao dever como a bússola o é ao polo; homens que permaneçam firmes pelo que é reto, ainda que caiam os céus." – Ellen G. White,

Resumo

Zoppellari, A. B. Modelamento e compensação de erros térmicos para um centro de torneamento. 2014. 83p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

A maior parte dos produtos industrializados, principalmente na indústria metal mecânica, sofre algum tipo de processo de usinagem em alguma de suas etapas de produção. A máquina-ferramenta CNC, se destaca atualmente nessa indústria devido sua alta produtividade e precisão. Contudo, erros geométricos em peças usinadas podem prejudicar o desempenho da indústria causando perda de lotes, insatisfação do cliente e mal funcionamento do produto final. Entre as causas de erros geométricos em peças usinadas, erros térmicos da máquina-ferramenta correspondem a 70% do total. Esses podem ser reduzidos com a aplicação de uma estratégia de compensação térmica, a qual pode se basear em um modelo empírico, atuando em conjunto com a correção do sistema de coordenadas em máquinas CNC. Este trabalho obteve modelos de deformação térmica por meio de medições de posição e temperatura durante ciclos de aquecimento e ensaios de usinagem. Visando um modelo robusto com baixo número de sensores, os modelos foram classificados estatisticamente. Além disso seus comportamentos foram analisados segundo os modos de erro térmico de cada componente principal da máquina ferramenta. O sistema de compensação foi desenvolvido, implementado e testado utilizando-se um centro de torneamento.

Palavras-chave: Compensação térmica, Erro térmico, Centro de torneamento.

ABSTRACT

Zoppellari, A. B. Modeling and thermal error compensation for a turning center. 2014. 83p. Master Degree – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

Most manufactured products, mainly in metalworking industry, have some kind of machining process included in their processing stages. The CNC machine tool plays an important role in the industry due to its high productivity and precision. However, geometrical errors in machined parts can decrease the performance of the industry, causing rejected batches, customer dissatisfaction and malfunction of the final product. Among the causes of geometric errors on machined parts, thermal errors of machine tool corresponding to 70% of the total. For CNC machines, these errors can be reduced by implementing a strategy of thermal compensation, which may be based on an empirical model, working in parallel with the correction of the coordinate system. This research work led to the development of thermal deformation models obtained by measurements of position and temperature cycles for heating and machining tests. Targeting a robust design with a low number of sensors, the statistical models were ranked. In addition, the behavior of the models was analyzed according to the thermal error modes of each main component of the machine tool. The compensation system was developed, implemented and tested in a CNC turning center.

Keywords: Thermal compensation, Thermal error, Turning center.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Expansão e flexão térmica YANG (1999).....10
FIGURA 2 - Modos de erro térmico em cento de torneamento YANG (1999).....11
FIGURA 3 - Nomenclatura dos eixos….....19
FIGURA 4 - Localização dos sensores de temperatura 1, 2, 3 e 4.....20
FIGURA 5 - Localização dos sensores de temperatura 5, 6 e 7 do eixo x.....21
FIGURA 6 - Localização dos sensores de temperatura 8 e 9 do eixo z.....22
FIGURA 7 - Sensores externos.....23
FIGURA 8 – Corpo-de-prova.....24
FIGURA 9 - Corpo de prova da validação.....26
FIGURA 10 - vista lateral direita.....32
FIGURA 11 - Esquema eixo inclinado X ….....33
FIGURA 12 - Vista lateral direita e conjunto do eixo X.....36
FIGURA 13 - Vista lateral direita e conjunto do eixo Z ….....39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Teste1, variação das temperaturas, 500 rpm, diâmetro 300 mm.....28
Gráfico 2 - Teste1, erro diametral, 500 rpm, diâmetro 300 mm.....28
Gráfico 3 - Teste2, variação das temperaturas, 2000 rpm, diâmetro 220 mm …....29
Gráfico 4 - Teste2, erro diametral, 2000 rpm, diâmetro 220 mm.....29
Gráfico 5 - Teste3, variação das temperaturas, 3500 rpm, diâmetro 140 mm.....30
Gráfico 6 - Teste3, Erro diametral, 3500 rpm, diâmetro 140 mm.....30
Gráfico 7 - Teste4, variação das temperaturas, 5000 rpm, diâmetro 60 mm.....31
Gráfico 8 - Teste4, erro diametral, eixo-árvore 5000 rpm, diâmetro torneado 60mm.....31
Gráfico 9 - Teste5, variação das temperaturas, eixo x a 30m/min.....34
Gráfico 10 - Teste5, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo x a 30m/min.....35
Gráfico 11 - Teste6, variação das temperaturas, eixo x a 15m/min.....35
Gráfico 12 - Teste6, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo x a 15m/min.....35
Gráfico 13 - Teste7, Variação das temperaturas, eixo z a 30m/min, a seco …....37
Gráfico 14 - Teste7, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 30m/min,..... 37
Gráfico 15 - Teste8, variação das temperaturas, eixo z a 15m/min.....38
Gráfico 16 - Teste8, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 15m/min.....38
Gráfico 17 - Teste9, variação das temperaturas, 500 rpm, com fluido, diâmetro 300mm.....40
Gráfico 18 - Teste9, erro diametral, 500 rpm, com fluido, diâmetro torneado 300 mm. …....40
Gráfico 19 - Teste10, variação das temperaturas, 2000 rpm, com fluido, diâmetro 220 mm.....41
Gráfico 20 - Teste10, erro diametral, 2000 rpm, com fluido, diâmetro torneado 220 mm.....41
Gráfico 21 - TTeste11, variação das temperaturas, 3500 rpm, com fluido, diâmetro 140 mm.....42
Gráfico 22 - Teste11, erro diametral, 3500 rpm, com fluido, diâmetro torneado 140 mm.....42
Gráfico 23 - Teste12, variação das temperaturas, 5000 rpm, com fluido, diâmetro 60 mm.....43
Gráfico 24 - Teste12, erro diametral, 5000 rpm, com fluido,

diâmetro torneado 60 mm.....43
Gráfico 25 - Teste13, variação das temperaturas, eixo x a 30m/min, uso de fluido refrigerante 45
Gráfico 26 - Teste13, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo X a 30m/min, uso de fluido refrigerante.....45
Gráfico 27 - Teste14, variação das temperaturas, eixo x a 15m/min, uso de fluido refrigerante.....46
Gráfico 28 - Teste14, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo X a 15m/min, uso de fluido refrigerante 46
Gráfico 29 - Teste15, variação das temperaturas, eixo z a 30m/min, uso de fluido refrigerante 48
Gráfico 30 - Teste15, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 30m/min, uso de fluido refrigerante.....48
Gráfico 31 - Teste16, variação das temperaturas, eixo z a 15m/min, uso de fluido refrigerante.....49
Gráfico 32 - Teste16, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 15m/min, uso de fluido refrigerante.....49
Gráfico 33 - Desvio vs temperatura do rolamento traseiro.....51
Gráfico 34 - Desvio vs temperatura do rolamento dianteiro.....51
Gráfico 35 - Desvio vs temperatura da estrutura fundida do eixo-árvore.....52
Gráfico 36 - Desvio vs temperatura da porca de x 52
Gráfico 37 - Desvio vs temperatura do mancal superior de X.....53
Gráfico 38 - Desvio vs temperatura do mancal inf. de x.....53
Gráfico 39 - Desvio vs temperatura da porca de z.....54
Gráfico 40 - Desvio vs temperatura do mancal de z.....54
Gráfico 41 - Desvio padrão vs n° de variáveis 57
Gráfico 42 - Previsão dos modelos 1 e 2 para os testes do eixo-árvore.....59
Gráfico 43 - Previsão dos modelos 1 e 2 para os testes dos eixos.....60
Gráfico 44 - Previsão do modelo 17 para os testes do eixo-árvore.....62
Gráfico 45 - Previsão do modelo 17 para os testes x e z.....63
Gráfico 46 - Residual vs fator de aquecimento do eixo-árvore.....65
Gráfico 47 - Desvios com e sem compensação no cenário 1.....67
Gráfico 48 - Desvios com e sem compensação no cenário 2.....68
Gráfico 49 - Desvios com e sem compensação no cenário 3.....69

Gráfico 50 - Gráfico das médias, cenário 1 sem compensação.....72
Gráfico 51 - Gráfico das médias, cenário 1 compensado.....72
Gráfico 52 - Gráfico das amplitudes, cenário 1 sem compensação.....73
Gráfico 53 - Gráfico das amplitudes, cenário 1 compensado.....73
Gráfico 54 - Gráfico das médias, cenário 2 sem compensação.....75
Gráfico 55 - Gráfico das médias, cenário 2 compensado.....75
Gráfico 56 - Gráficos das amplitudes, cenário 2 sem compensação.....76
Gráfico 57 - Gráfico das amplitudes, cenário 2 compensado.....76
Gráfico 58 - Gráfico das médias, cenário 3 sem compensação.....78
Gráfico 59 - Gráfico das médias, cenário 3 compensado.....78
Gráfico 60 - Gráfico das amplitudes, cenário 3 sem compensação.....79
Gráfico 61 - Gráfico das amplitudes, cenário 3 compensado.....79

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Variação dos testes de aquecimento.....25
TABELA 2 - Melhores modelos por n° de variável.....56
TABELA 3 - Modelos para cada modo de erro.....58
TABELA 4 - Modelos considerando os testes do eixo-árvore.....61
TABELA 5 - Desvio padrão de cada modelo por teste.....64
TABELA 6 - Desvio padrão de cada modelo individual.....70
TABELA 7 - Desvios do cenário 1 sem compensação ….....71
TABELA 8 - Pré-cálculo cenário 1 s/comp.....71
TABELA 9 - Índices Cp cenário 1 s/comp.....71
TABELA 10 - Desvios do cenário 1 compensado.....71
TABELA 11 - Pré-cálculo cenário 1 compensado.....71
TABELA 12 - Índices Cp cenário 1 compensado.....71
TABELA 13 - Desvios do cenário 2 sem compensação ….....74
TABELA 14 - Pré-calculo cenário 2 s/comp.....74
TABELA 15- Índices Cp cenári 2 s/comp.....74
TABELA 16 - Desvios do cenário 2 compensado.....74
TABELA 17 - Pré-cálculo cenário 2 compensado.....74
TABELA 18 - Índices Cp cenário 2 compensado.....77
TABELA 19 - Desvios do cenário 3 sem compensação ….....77
TABELA 20 - Pré-calculo cenário 3 s/comp.....77
TABELA 21- Índices Cp cenário 3 s/comp.....77
TABELA 22 - Desvios do cenário 3 compensado.....77
TABELA 23 - Pré-cálculo cenário 3 compensado.....77
TABELA 24 - Índices Cp cenário 3 compensado.....77

LISTA DE ABREVIATURAS

AMB EX - Ambiente externo

AMB INT - ambiente interno/área de usinagem

BASE B - base estrutural do torno

BASE CAB - base estrutural do eixo árvore

BN - *Bayesian Network*

BPN - *back propagation neural network*

GA - *genetic algorithm*

GA-BPN - *genetic algorithm-based back propagation neural network*

GM - *grey model*

GNM - *grey neural network*

MANCAL X - mancal superior do fuso de x

MANCAL X INF - mancal inferior do fuso de x

MANCAL Z - mancal superior do fuso de z

PORCA X - porca do fuso de x

PORCA Z - porca do fuso de z

PP - p*rojection pursuit*

PPR - *projection pursuit regression*

ROL D - rolamento dianteiro do eixo árvore

ROL T - rolamento traseiro do eixo árvore

SVM - *Support Vector Machines*

TANQUE - tanque de fluido refrigerante

LISTA DE SÍMBOLOS

- *°C – graus Celsius*
- C_b - coeficiente das temperaturas da base
- C_C - coeficiente da temperatura do refrigerante
- C_n - coeficiente da temperatura da porca do fuso de X
- C_S - coeficiente da temperatura do eixo-árvore
- K - constante,
- *S - desvio-padrão*
- *T_b. - temperatura da base*
- T_C, - temperatura do refrigerante
- T_n, - temperatura da porca do fuso de X
- T_S - temperatura do eixo-árvore e
- Δr - erro radial da peça,

SUMÁRIO

1. Introdução.....1
1.1. Objetivos.....2
2. Revisão Bibliográfica.....3
2.1. Modelos analíticos.....4
2.2. Modelos numéricos.....4
2.3. Métodos empíricos.....5
2.4. Métodos de aquecimento.....6
2.5. Localização dos sensores.....9
2.6. Métodos de modelamentos dos erros térmicos.....13
3. Descrição do Método Experimental.....18
3.1. Equipamentos.....19
3.2. Testes de aquecimento.....24
3.3. Validação.....26
4. Resultados iniciais.....27
5. Modelamento.....55
6. Resultados dos testes de validação.....66
7. Conclusões.....80
8. Propostas para trabalhos futuros.....81
Apêndice A.....82
REFERÊNCIAS.....83

1. Introdução

Com a crescente demanda produtiva na indústria metal mecânica e contínuo aprimoramento da precisão e rigidez das máquinas-ferramenta nos últimos anos, problemas relacionados com deformações térmicas tem-se tornado cada vez mais notórios no produto usinado. A redução de erros causados por essas deformações é benéfico para a indústria que precisa trabalhar com peças de precisão, por economizar o tempo de produção gasto com medição entre lotes e de *warm-up*, além de ser um ponto chave para o aumento da competitividade não apenas do usuário final, mas do próprio fabricante de máquinas-ferramenta.

Segundo Bryan (1990), do total de erros que podem ter uma peça usinada cerca de 40 a 70% deles são erros causados por dilatação térmica da máquina. Bryan ainda diz que erros causados por deformações térmicas nas máquinas-ferramenta tem seis principais causas: (1)O calor produzido pelo processo de corte, (2)a energia perdida nos sistemas mecânicos da máquina-ferramenta, (3)o sistema de refrigeração, (4)mudanças na temperatura ambiente, (5)tipo de operação da máquina e (6)a memória térmica de ambientes anteriores.

De maneira geral as soluções para esses erros têm se concentrado na redução das fontes de calor, controle da direção da transmissão de calor e o desenvolvimento de estruturas termicamente estáveis (TSENG; HO, 2002). Contudo os custos associados a essas técnicas serão muito elevados dependendo do nível de precisão requerido na peça final. Além disso nem sempre é intuitivo o conhecimento de todas as fontes de calor e de todos os tipos de distorções estruturais que podem causar erro efetivo entre a aresta de corte e a peça usinada.

Nos últimos anos, porém, surgem modelos computacionais de compensação térmica, dentre eles modelos analíticos (KOMANDURI; HOU, 2001), numéricos (ZHAO; YANG ; SHEN, 2007) e empíricos (VYROUBAL, 2012).

Usualmente o modelo matemático de compensação térmica é obtido por meio de uma abordagem empírica. A maior parte dos trabalhos é baseada na medição da temperatura em alguns pontos da máquina e a obtenção de relações entre temperatura e o erro de posicionamento. A compensação é realizada pela correção do sistema de coordenadas de acordo com o valor predito pelo modelo. (VYROUBAL, 2012; QIANJIAN; YANG; HAO, 2010;. LI, et al., 2008; DU et al., 2002; YANG, YUAN e NI, 1999).

A aplicação de compensação térmica mostra-se uma alternativa mais econômica e

atrativa ao mercado consumidor de máquinas ferramenta, porém tal aplicação ainda é pouco usada na indústria nacional, sendo assim uma tecnologia chave para o aumento competitividade das máquinas nacionais .

As principais dificuldades no desenvolvimento e aplicação prática da compensação térmica via CNC em centros de torneamento podem ser enumeradas:

1. Distribuição dos sensores de temperatura que podem, de maneira geral, indicar o campo térmico da máquina que causa erro efetivo no produto final. Caso um grande número de sensores sejam usados o campo térmico da máquina pode ser melhor descrito, porém geraria um custo maior, além de uma lentidão no processamento dos dados;
2. Carência de trabalhos envolvendo centros de torneamento, com uma proposta de metodologia na aquisição dos dados e medições;
3. Tipo de ciclo de aquecimento aplicado para a coleta de dados, uma vez que o campo térmico de uma máquina em usinagem em vazio, embora de mais fácil obtenção, pode ser diferente de uma máquina em usinagem real, podendo causar diferenças no modelo. O tipo de ciclo também está limitado à metodologia de medição uma vez que para se registrar o erro ao longo dos eixos, um interferômetro laser é necessário e este não pode ser usado em um ambiente agressivo de usinagem real.
4. A escolha de um modelo. Os modelos utilizados variam desde lineares até diversos tipos de redes neurais. O número de variáveis desses modelos podem conter desde temperaturas, velocidade do eixo-árvore, velocidade dos eixos coordenados e até mesmo tempo dessas condições, o que deixaria o modelo mais complexo ainda. Assim um estudo mais detalhado do problema de compensação em máquinas-ferramentas deve ser realizado para que se conheçam as principais dificuldades e soluções disponíveis.

1.1 Objetivo

O presente trabalho objetiva:

1. Desenvolver uma metodologia para melhorar a precisão de posicionamento de um centro de torneamento sem alterar o projeto da máquina, propondo-se um modelo matemático para correção do erro causado pelas deformações térmicas. Neste trabalho o eixo X será o principal objeto de estudo;

2. Implementar e testar o modelo obtido em um centro de torneamento.
3. Avaliar o resultado

2. Revisão Bibliográfica

Os erros causados devido à deformação térmica em máquinas ferramentas vêm sendo estudados por décadas. Já nos anos de 1960 a importância do erro térmico e suas soluções são apontadas em algumas literaturas (BRYAN, 1990). Ao estudar um grande número de dados o referido autor notou que erros térmicos podem comprometer de 40 a 70% a precisão da peça final em uma máquina-ferramenta. Assim, aumentar a precisão de uma máquina-ferramenta não se trata apenas de se desenvolver máquinas mais precisas, mas também fazer com que essa precisão seja mantida sobre uma variada gama de condições e temperaturas que variam no tempo. Por isso erros térmicos são também conhecidos como erros variantes no tempo, envolvendo assim uma maior complexidade em sua correção do que o erro geométrico, dependente apenas da posição.

Seis fontes de erro em máquinas-ferramentas foram classificadas (BRYAN, 1990), (CHEN, et al., 1993) e (TSENG; HO, 2002): (1) O calor produzido pelo processo de corte, (2) a energia perdida nos sistemas mecânicos da máquina-ferramenta, (3) o sistema de refrigeração, (4) mudanças na temperatura ambiente, (5) tipo de operação da máquina e (6) a memória térmica de ambientes anteriores.

As soluções para a redução dos erros térmicos seguiram duas linhas: desenvolvimento de técnicas de compensação e melhorias de projeto. Entre as melhorias de projeto pode-se citar: redução das fontes de calor, controle da direção da transmissão de calor e o desenvolvimento de estruturas termicamente estáveis. Tais melhorias de projeto envolvem custos elevados (TSENG; HO, 2002).

As técnicas de compensação começaram a ser efetivamente utilizadas modificando-se o programa de comando numérico da peça, acrescentando-se informações de inspeção de pós-processamento (KOLISKOR et al., 1971). Essa técnica é bem estabelecida e comercializada atualmente, por exemplo, pelo uso de *probes* de medição e inspeção de peças em máquina. Porém, além do custo do equipamento de medição, uma fase de medição deve ser introduzida no programa durante a fabricação das peças do lote.

Nos últimos anos, porém, tem crescido a utilização de modelos para a resolução do campo térmico e previsão do erro. Dentre eles podem-se citar: os modelos analíticos,

numéricos e modelos empíricos.

2.1 Modelos analíticos

Modelos baseados na solução analítica do fluxo de calor foram usados nos últimos anos para estabelecer a relação entre a fonte de calor e o campo térmico. Os últimos trabalhos envolvendo esse tipo de abordagem modelam situações bem específicas, por exemplo, a distribuição de temperatura na interface entre a aresta de corte e a peça usinada gerada pelo atrito durante usinagem (KOMANDURI; HOU, 2001). Kuo e Lin (2006), propuseram um modelo para calcular o aumento de temperatura numa superfície em processo de retificação.

Para uma compensação efetiva dos erros na máquina-ferramenta como um todo modelos analíticos apresentariam alto grau de complexidade. O campo térmico da máquina muda constantemente dependendo do tipo de operação. Além disso, erros térmicos de uma máquina-ferramenta apresentam interações não-lineares. Assim, quando os modelos analíticos são impraticáveis, os modelos numéricos são usados para prever erros térmicos.

2.2 Modelos numéricos

Técnicas como dos elementos finitos e diferenças finitas tem sido usadas por décadas para se encontrar as soluções do campo de temperaturas e a deformação térmica da máquina-ferramenta (MORIWAKI, 1988). Porém, não tinham uma boa precisão, devido ao conhecimento incompleto das condições de contorno e diferentes taxas de geração de calor causadas pelas diferentes condições de usinagem. Só mais recentemente, Sukaylo, et al. (2004), empregou o método dos elementos finitos (FEM) para simular deformações térmicas em usinagem pesada. Seus resultados experimentais mostraram um desvio de 10% entre seu modelo e os valores experimentais. Zhao, Yang e Shen (2007) usaram um modelo (FEM) para simular a deformação térmica de um cabeçote de um centro de torneamento e calcular o seu erro. Seus resultados mostraram que o modelo obteve uma boa previsão dos resultados experimentais.

Naturalmente, soluções numéricas para deformações térmicas tendem a consumir muito tempo devido ao grande número de cálculos. Modelos de elementos finitos requerem malhas com milhares de nós e tempos que variam de alguns minutos a horas

de cálculos, mesmo com computadores de grande capacidade. Contudo em muitos casos, onde o gerenciamento dos erros térmicos não requere correção em tempo real (como nos casos do projeto inicial da máquina), os métodos numéricos mencionados são aceitáveis.

Ao se fazer um apanhado dos últimos trabalhos envolvendo o comportamento térmico de máquinas-ferramenta, Li et al. (2008) notou que modelos analíticos e numéricos em sua maior parte envolviam modelamento de estruturas simples ao relacionar temperatura e deformação ou partes específicas como rolamentos, engrenagens, arestas cortantes, etc. ao relacionar atrito e temperatura. Trabalhos mais efetivos envolvendo a relação entre temperatura e deformação da máquina como um todo usam métodos empíricos(HAO et al., 2008).

2.3 Métodos empíricos

Recentemente trabalhos envolvendo compensação térmica em máquinas-ferramenta CNC se baseiam em modelos empíricos. Kim e Song (2013) usam regressão linear e redes neurais no desenvolvimento de um dispositivo de compensação térmica.

Os modelos empíricos se baseiam no pressuposto de que os erros térmicos podem ser considerados como funções da temperatura de alguns pontos críticos da máquina. Duas teorias podem ser citadas para confirmar essa suposição: (1) a deformação térmica está correlacionada com o campo de térmico da máquina-ferramenta e (2) alguns pontos críticos de temperatura podem ser usados para prever o campo térmico da máquina (LI et al., 2008).

O procedimento de medição em uma máquina ferramenta para obtenção de um modelo empírico pode ser descrito da seguinte forma: inicialmente, a posição da ferramenta e certas temperaturas ao longo da máquina são medidas como referência do funcionamento inicial a frio, com sensores de deslocamento e temperatura, respectivamente. A máquina, então, funciona usinando em vazio ou em usinagem real para que o aquecimento ocorra e então o seu campo térmico mude. Medições regulares são feitas, registrando-se a posição dos eixos e a temperatura dos pontos. Então, correlações podem ser obtidas entre o erro de posição e as temperaturas, usando-se o método apropriado.

Diversos pesquisadores trabalharam, de forma geral, com o procedimento mencionado para a obtenção da função de compensação térmica. A diferença entre os

trabalhos consiste apenas no método para a escolha da quantidade de sensores e a localização dos mesmos, no tipo de ciclo de aquecimento/resfriamento e no tipo de modelamento, que varia desde uma regressão linear até redes neurais otimizadas de diversas formas, como será adiante exemplificado.

2.4 Método de aquecimento

Para a obtenção de um modelo robusto, que possa de maneira geral prever o comportamento térmico da máquina-ferramenta, torna-se necessária a obtenção de dados de erros térmicos que condizem com o uso geral da máquina e com o objetivo do modelo, isto é, tipo de ciclo e erro térmico a ser corrigido. Assim, pode-se admitir que o grau de precisão está relacionado, entre outras variáveis, ao tipo de ciclo usado na aquisição dos dados.

Chen et al. (1993) efetuou um ciclo de aquecimento em um centro de usinagem, com aquisição de dados de temperatura e erros de forma simultânea sem necessidade de se parar o teste para efetuar a medição. O aquecimento foi realizado em vazio, com o eixo-árvore girando a 500 rpm, juntamente com a movimentação do eixo y a 500 mm/min por seis horas. Após o resfriamento da máquina, um novo ciclo foi realizado com o eixo-árvore a 2600 rpm, simultaneamente com o eixo y a 2000 mm/min, por mais seis horas.

Admitindo-se que um uso geral de uma máquina-ferramenta pode envolver paradas seria interessante que o modelo conseguisse prever a localização da aresta de corte após um período de parada.

Chen, Yuan, e Ni (1996) efetuaram o aquecimento de um centro de usinagem variando-se a velocidade do eixo-árvore de 600, 1000, 1500, 2000 e 2600 rpm. Cada velocidade foi mantida por 6 horas e, posteriormente a máquina foi deixada em repouso, para resfriamento, por 10 horas. As medições foram feitas tanto em aquecimento quanto em resfriamento. Também foram realizadas medições do erro ao longo dos eixos X e Y, em cada faixa de aquecimento, ou hora de teste para se registrar os erros térmicos dependentes da posição, obtendo-se boa previsibilidade.

Yang, Yuan e Ni (1999) fizeram uso de usinagem em vazio como ciclo de aquecimento em um centro de torneamento. Um dos testes, é denominado simulação de usinagem, que foi efetuada com os eixos coordenados e o eixo-árvore se movendo, simultaneamente, e com o refrigerante fluindo. A máquina foi deixada nessa condição por

3,25 horas. Permaneceu em resfriamento por uma hora visando simular uma parada para almoço. Retomou-se ao mesmo ciclo por 3,5 horas e, mais uma vez, foi deixada resfriar por mais uma hora. As medições foram realizadas tanto em aquecimento quanto resfriamento.

Qianjian e Jianguo (2011), adotaram um ciclo de aquecimento de usinagem em vazio muito similar ao descrito acima, também em um centro de torneamento. Primeiramente o eixo-árvore foi mantido em rotação de 3500 rpm, com os eixos se movimentando a 2,5 m/min e o refrigerante fluindo simultaneamente por 3 horas. Efetivou-se resfriamento de 1 hora, com máquina parada e mais 3 horas do mesmo ciclo, seguido novamente de mais uma hora de máquina parada.

De forma similar, Hao et al. (2008), utilizou um programa de usinagem em um centro de torneamento, com o fluido refrigerante fluindo, sem efetuar usinagem real. Porém, a máquina foi mantida nessa situação por 50 min, permanecendo parada por 10 min. Depois disto, a máquina voltou a usinar em vazio por mais 1 hora e parou por 20 min. O eixo-árvore manteve-se em velocidade máxima de 4500 rpm.

Os três testes acima citados, produziram um efeito interessante, aparentemente comum em centros de torneamento. Em cada fase de resfriamento, o erro radial continuou aumentando, com taxa semelhante àquela da fase de aquecimento, como se a máquina estivesse ainda em operação. Em todos os casos o erro radial foi medido pelo uso de sensores indutivos instalados na torre porta-ferramentas da máquina-ferramenta.

Para explicar tal fenômeno, Yang, Yuan e Ni (1999), realizaram testes de separação de variáveis que constitui-se em medir separadamente o efeito de cada fonte de calor no erro de X e Z. Assim, mais três testes foram realizados, medindo-se os erros e aquecendo-se a máquina, nas seguintes condições: (1) apenas com o refrigerante fluindo; (2) apenas com o eixo-árvore rodando, 600 rpm por 2 h seguido de 1800 RPM por mais 2 h; (3) apenas movimentando-se os eixos X e Z a 3 m/min. Segundo o autor, por meio da separação de variáveis foi possível visualizar que o aumento da temperatura do fuso do eixo X gera um aumento radial na dimensão da peça usinada, enquanto o aumento da temperatura do tanque de fluido refrigerante gera uma diminuição. Num primeiro momento esses erros se cancelam. Contudo, após o fuso atingir o equilíbrio térmico, os efeitos do fluido refrigerante e do eixo-árvore fazem o diâmetro da peça diminuir. Durante a fase de resfriamento, o fuso se retrai novamente, o que faz o diâmetro da peça diminuir. Porém, as temperaturas do cabeçote e do fluido refrigerante não mudam muito devido à grande capacidade térmica de ambos. Assim o erro continua se movendo na direção negativa,

mesmo ao iniciar-se a fase de resfriamento.

Os ciclos de aquecimento realizados por Yang, Yuan, Ni (1999), Qianjian, e Jianguo (2011) e Hao et al. (2008), descritos anteriormente, parecem generalizar bem o ciclo de trabalho usado no dia a dia de um centro de torneamento. Comprovam a influência do aumento da temperatura do fluido refrigerante no posicionamento da máquina. Porém, uma comparação entre os registros térmicos dos ciclos com e sem fluido refrigerante parece necessária, uma vez que o uso de fluido nem sempre é prerrogativa do processo de usinagem, ficando a critério do usuário.

O uso de usinagem em vazio apesar de prático para a obtenção de um registro térmico da máquina-ferramenta levanta a suspeita do quão fidedigno seria esse registro. Em uma comparação entre ciclos de aquecimentos em vazio e em usinagem real, Tseng (2002), verificou que o relacionamento entre temperatura e erro apresentam diferenças dependentes do tipo de aquecimento.

Ramesh, Mannan e Poo (2003), argumentam que a usinagem em vazio não é eficaz para modelamento. É mostrado que, mesmo com um histórico de variações de temperatura iguais, dois testes produzem erros diferentes, devido às condições de usinagem diferentes. O referido trabalho também indica que as condições de usinagem anteriores afetam o comportamento do erro na usinagem atual. Diferentes testes de usinagem acompanhados de operações em vazio foram usados para obter o modelo em um centro de usinagem.

Embora os ciclos de aquecimento com usinagem real se assemelhem mais ao uso da máquina-ferramenta no cenário fabril, um grande número de corpos de prova seriam necessários para o mapeamento térmico. Neste tralho foi usado ciclos em vazio concomitantemente com usinagens reais periódicas.

2.5 Localização e quantidade de sensores

A localização e a quantidade dos sensores de temperatura têm grande importância para o modelamento térmico. De forma geral, um grande número de sensores de temperatura pode descrever mais minuciosamente o campo térmico da máquina-ferramenta e assim favorecer um modelo mais preciso e robusto. Contudo, o tempo de cálculo e o custo real aumentam com o maior número de sensores. Por outro lado, um baixo número de sensores de temperatura pode deixar o modelo irreal. Assim, é sempre uma preocupação de engenharia encontrar a quantidade adequada de sensores e sua localização.

Na maior parte dos trabalhos, conforme mencionado adiante, a regra básica para se selecionar a localização e o número de sensores de temperatura envolvem o bom senso em engenharia e o correlacionamento estatístico ou regressão.

Chen, Yuan e Ni (1996), por exemplo, usaram, inicialmente, 20 sensores de temperatura alocados próximos à fontes de calor que poderiam causar erros de usinagem, visando monitorar um centro de torneamento. Posteriormente, objetivando encontrar variáveis de temperatura independentes, fez-se uma triagem baseada em bom senso e em análise estatística de correlação. Eliminando-se as variáveis interdependentes, e reduzindo assim o número de sensores para 8.

Tseng e Ho (2002), distribuíram oito sensores de temperatura para estudo do comportamento térmico de um centro de torneamento. Os sensores foram localizados nas principais fontes de calor da máquina: eixo-árvore, fuso de esferas, torre e área de trabalho. Outro foi usado para medir a temperatura ambiente. Segundo o autor, cada rolamento do eixo-árvore é uma fonte de calor. A temperatura do fuso afeta o posicionamento e precisão, e a temperatura da torre teria um impacto na temperatura da ferramenta durante a usinagem. É notado que nem todas as temperaturas têm influência direta no erro térmico. Assim, foi usada uma correlação estatística para se identificar as variáveis de temperatura que mais influenciam no erro.

Outro método usualmente utilizado para se encontrar a localização e a quantidade otimizada de sensores de temperatura é a análise modal térmica.

Basicamente, existem dois modos de erros térmicos: (1) expansão térmica e (2) flexão térmica. A expansão térmica pode ser exemplificada na dilatação de uma barra unidimensional ao longo de seu comprimento devido à distribuição de temperatura ao

longo deste. (Figura 1 A) Já a flexão térmica pode ser exemplificada no empenamento de uma barra bidimensional devido à diferença de temperatura acima e abaixo da linha média (Figura 1 B)

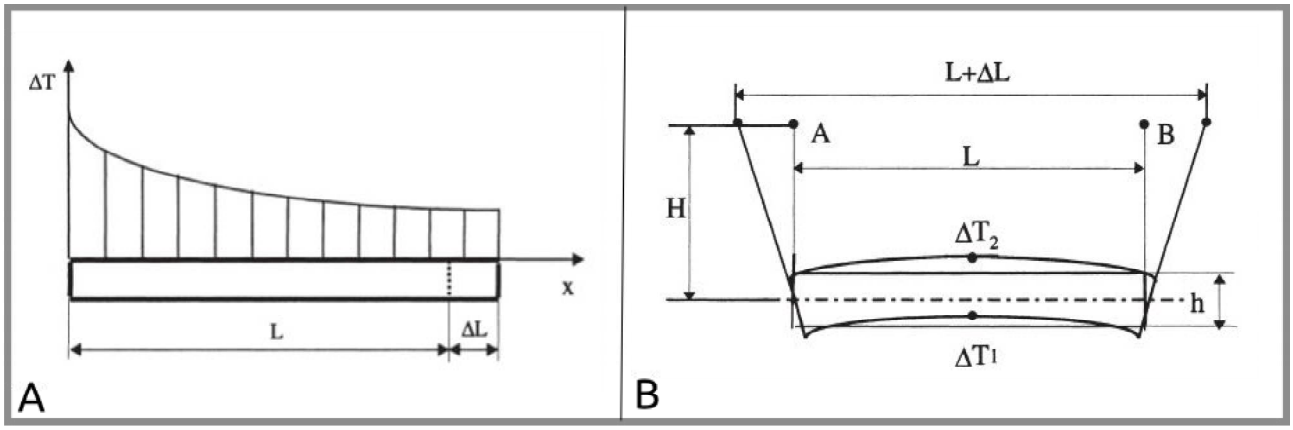

Figura. 1 - A) Expnasão térmica, B) Flexão térmica; (YANG; YUAN; NI, 1999).

Embora existam apenas dois modos de erros térmicos básicos, uma máquina-ferramenta possui uma estrutura complexa que gera várias superposições desses dois modos básicos, de forma similar a modos de vibração.

Yang, Yuan e Ni (1999), usaram análise modal térmica para encontrar o correto posicionamento e a quantidade dos sensores. Usando um centro de torneamento, inicialmente fez-se uso de 16 sensores de temperatura alocados próximos à fontes de calor que poderiam causar erro efetivo na peça usinada. Então, por análise modal do erro térmico, que se trata segundo o autor de uma análise das fontes de calor, bom senso em engenharia e o uso de dados experimentais, pôde-se identificar quatro modos de erros térmicos principais da máquina-ferramenta que afetam o eixo X, reduzindo o número de sensores de 16 para 4.

Os modos de erro térmico encontrados por Yang, Yuan e Ni no centro de torneamento são:

1. Modo de flexão da base. Esse modo é causado pela diferença de temperatura entre as partes superior e inferior da base do centro de torneamento. Conforme a parte inferior da base aquece, devido ao aquecimento do fluido refrigerante dentro do tanque localizado nessa parte da máquina, a distância entre a ferramenta e a peça usinada diminui. Esse modo pode ser estimado pelo uso de dois sensores de temperatura: um na parte superior da base e outro dentro do tanque de fluido refrigerante (pontos 15 e 6 da Figura 2a).

2. Modo de expansão da base. Devido ao efeito da transmissão de calor, a temperatura da parte superior da base irá gradualmente se igualar a temperatura da parte inferior. Isso tenderá a expandir a base, aumentando a distância entre a ferramenta e a peça usinada. Esse modo pode ser estimado usando-se a temperatura média dos dois sensores usados para a flexão da base (Figura 2b).
3. Modo de expansão do fuso de esferas do eixo X. Por causa de seu movimento, a temperatura do fuso do eixo X aumentará. Essa expansão ocorre na direção de X+ devido ao rolamento axial. Para estimar essa temperatura, um sensor localizado na porca do fuso foi usado (ponto 4 da Figura 2c).
4. Modo de expansão da coluna do eixo-árvore. O calor gerado pelo eixo-árvore causará a expansão da coluna na direção vertical. Um sensor alocado na coluna do eixo-árvore foi usado para estimar esse modo (ponto 1 da Figura 2d).

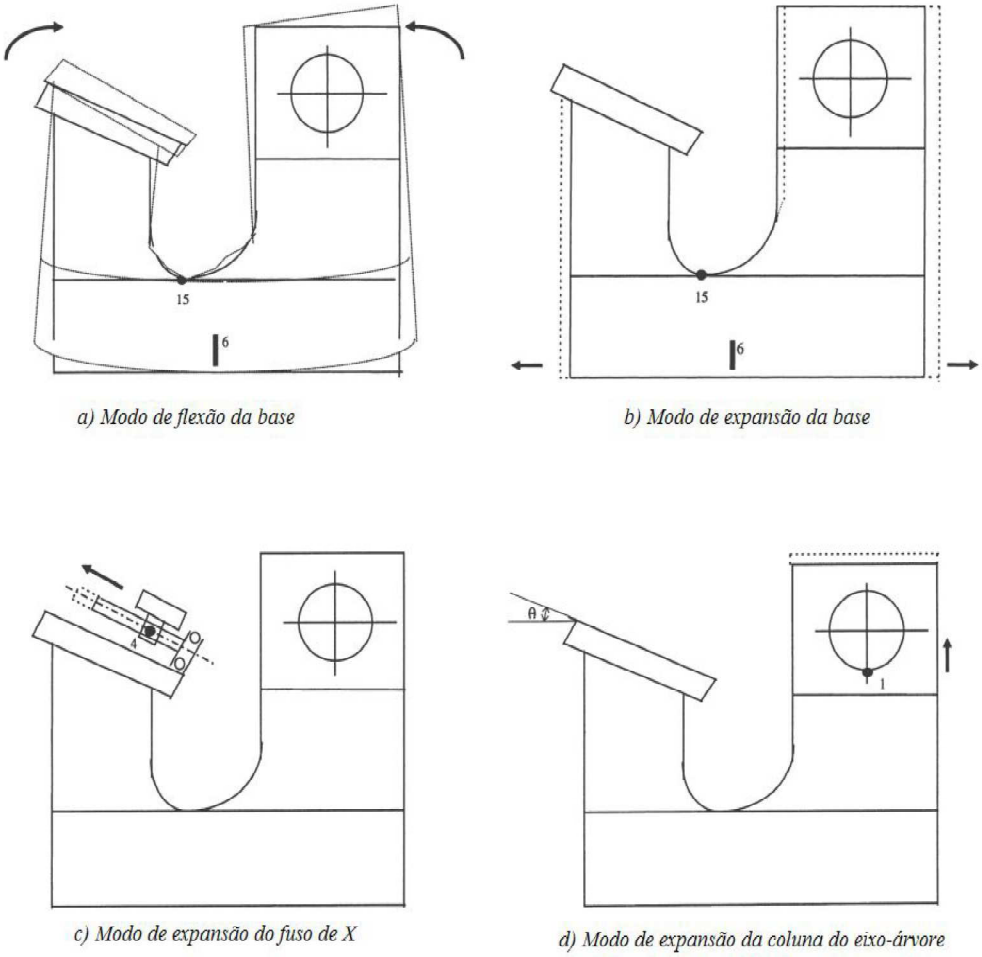

Figura 2 - Modos de erro térmico em centro de torneamento; (Yang; Yuan; Ni, 1999)

Assim, por esta análise modal o número de sensores foi reduzido de 16 para 4. Outros trabalhos usaram análise modal para a escolha de variáveis de temperatura

como Zhu, Ni e Shih (2008) que aplicaram esta técnica em um centro de usinagem e Hao et al. (2008) em um centro de torneamento. Este por sua vez usou um total de 16 sensores, distribuídos por seis locais: (1) parte frontal do cabeçote, (2) parte posterior do cabeçote, (3) contraponto, (4) fuso de esferas do eixo X, (5) base e (6) temperatura ambiente.

Após a análise modal são encontrados os mesmos modos de erro mencionados por Yang, Yuan e Ni (1999). Porém, é acrescentado o modo de expansão do eixo árvore que, segundo Zhu, Ni e Shih (2008), causa erros na direção radial. Após a análise cinco sensores foram usados, um a mais que Yang, Yuan e Ni (1999), pois para se medir o modo de expansão da coluna do eixo-árvore foram usados dois sensores, um na parte frontal do eixo-árvore e outro na parte posterior, enquanto Yang, Yuan e Ni. (1999) usaram apenas um na parte frontal.

Outro método significativo para a redução do número de variáveis de temperatura é o método de agrupamento. Nesse método as variáveis de temperatura são correlacionadas entre si, agrupando-se aquelas que possuem índices de correlação maiores que um certo valor de corte. A que possui maior correlação do grupo é usada no modelo como representante do grupo de variáveis.

Desta forma, Qianjian e Jianguo (2011), ao analisarem um centro de torneamento distribuíram 12 sensores de temperatura em 6 grupos: (1) um sensor para medir a temperatura ambiente; (2) um sensor para medir a temperatura da guia de Z; (3) três para medir a temperatura dos fusos de X e Z; (4) três para medir a temperatura da parte frontal do eixo-árvore; (5) três para medir a temperatura da parte posterior do eixo-árvore e (6) um para medir a temperatura do tanque de refrigeração. Para se reduzir o número de variáveis foi usado o método de agrupamento. Assim, o número de sensores de temperatura foi reduzido de 12 para 4 nos seguintes locais: parte frontal e posterior do eixo-árvore, fuso do eixo Z e tanque de refrigerante.

Pode-se observar pela análise realizada nos trabalhos citados que independente do método de escolhas de variáveis, os locais mais usados para o modelamento, ou que mais representam o campo térmico do centro de torneamento são: o eixo-árvore, os fusos, o tanque de refrigerante e algumas partes estruturais como base ou coluna, ficando a quantidade de sensores e localização mais específica sujeita a cada caso ou tipo de máquina.

2.6 Métodos de modelamento dos erros térmicos

Erros térmicos de máquinas-ferramenta podem ainda ser divididos em duas categorias: (1) erros dependentes da posição e (2) erros independentes da posição. Aqueles independentes da posição são erros que são função apenas da temperatura, por exemplo, da expansão resultante do eixo-árvore. Erros dependentes da posição são funções tanto da temperatura quanto da posição do eixo.

Nos últimos anos, vários tipos de modelamentos foram empregados em métodos empíricos. Esses variam desde simples regressões lineares até combinações de redes neurais com outros métodos.

Chen, Yuan e Ni (1996) desenvolveram dois modelos para previsão do erro térmico em um centro de torneamento de 3 eixos, um com regressão linear múltipla e outro utilizando redes neurais. Comparações entre os dois métodos mostraram que a precisão para novas observações de ambos os modelos são boas, inclusive quando um ruído de medição foi propositalmente inserido no sistema de medição de temperatura. A única diferença de precisão entre os dois modelos ocorreu quando um dos sensores de temperatura foi propositalmente cortado do sistema medição, fazendo com que o modelo de redes neurais mostrasse uma maior precisão nesse caso.

Yang, Yuan e Ni. (1999) usaram uma equação linear simples e o método dos mínimos quadrados para achar os valores dos seus coeficientes. O erro radial da peça (Δr) é definido pela Equação 1

$$\Delta r = K + C_c T_c + C_n T_n + C_s T_s + C_b T_b, \qquad (1)$$

onde:

•K é uma constante;

•C_C é o coeficiente da temperatura do refrigerante;

•T_C, é a temperatura do refrigerante;

•C_n é o coeficiente da temperatura da porca do fuso de X;

•T_n, é a temperatura da porca do fuso de X;

•C_S é o coeficiente da temperatura do eixo-árvore;

•T_S é a temperatura do eixo-árvore;

•C_b é o coeficiente das temperaturas da base;

T_b. é a temperatura da base.

No equacionamento foram incluídos termos para minimizar o ruído do sistema de medição de temperatura, que é proporcional ao valor absoluto de cada coeficiente da equação, conforme Equação 2.

$$\min \sum_{i=1}^{m} C_i^2, \qquad (2)$$

onde C_i é o coeficiente do i-ésimo sensor e *m* é o número de sensores.

Também foi minimizado o efeito das mudanças de temperatura ambiente, pois tanto as estruturas da máquina quanto a peça de trabalho tem coeficientes de expansão similares. Se a máquina toda se expandir devido a uma mudança na temperatura ambiente, o erro entre a peça e a ponta da ferramenta poderá ser desprezível. Assim, a soma dos coeficientes do modelo deverá ser zero. Desta forma, o segundo critério adotado é que a soma dos coeficientes deve ter o menor valor possível, isto é,

$$\min \sum_{i=1}^{m} C_i. \qquad (3)$$

O modelo estatístico tradicional minimiza o quadrado do erro residual entre os dados experimentais e o valor estimado pelo modelo, minimizando a seguinte função objetiva:

$$\mathrm{Obj} = \min \sum_{j=1}^{n} e_j^2/n, \qquad (4)$$

onde e_j é o erro residual de cada valor predito de cada ponto *j* e *n* é o número total de pontos.

Considerando o critério mencionado a seguinte função objetiva foi proposta:

$$\mathrm{Obj} = \min[\sum_{i=1}^{n} e_j^2/n + \lambda_1 \sum_{i=1}^{m} C_i^2 + \lambda_2(\sum_{i=1}^{m} C_i)^2], \qquad (5)$$

onde λ_1 e λ_2 são coeficientes de peso que podem ser determinados, considerando-se a precisão do sistema de medição, temperatura ambiente entre as trocas de ferramenta etc.

O modelo com esses termos minimizados sacrificou um pouco a precisão em

comparação com o modelo normal que minimiza apenas os mínimos quadrados do erro residual. Porém, mostrou-se mais robusto com relação às mudanças de temperaturas ao longo do dia e manteve seu desempenho no decorrer de um ano numa máquina em produção. Conservando uma precisão de ±6 μm, enquanto o modelo convencional manteve ±10 μm.

Lee e Yang (2001), admitiram que o modelo com regressão linear foi mais robusto que um modelo de ordem superior. Também foi utilizado o que o autor chama de função de julgamento que para minimizar o residual RMS.

Em uma comparação de desempenho entre modelos lineares de múltiplas variáveis e modelos de ordem superior, Tseng e Ho (2002) notam que o modelo obtido por meio de regressão linear reduziu o erro térmico em 60%, enquanto o modelo de ordem superior reduziu o erro térmico em 40%.

Du, Yang e Yao (2002), utilizaram a mesma distribuição de sensores que Yang, Yuan e Ni (1999) e a mesma fórmula linear de erro radial. Porém, foi usada regressão a ortogonal para a obtenção dos coeficientes da equação de erro. O mesmo modelo foi aplicado em 100 máquinas do mesmo tipo, sendo que os erros foram reduzidos de 30 para menos de 12 μm.

Ramesh, et al. (2003), por notarem que para um mesmo histórico de temperaturas diferentes condições de usinagem causam diferentes erros térmicos, utilizaram um modelo *Bayesian Network* (BN), que se trata de uma representação gráfica probabilística de causas e efeitos. O modelo BN desenvolvido classifica as condições de usinagem, tendo como entradas temperaturas, velocidade do eixo-árvore e velocidade dos eixos. Depois que a condição de trabalho é classificada, um modelo *Support Vector Machines* (SVM) é escolhido para aquela condição. O SVM é um sistema de aprendizado de máquina que tenta minimizar o erro estrutural, ou seja, o erro do modelo e a complexidade da própria função. Em sendo muito complexa pode prever respostas muito particulares, mas não seria tão precisa para respostas mais gerais de novos dados. Implementando esse sistema em um centro de usinagem foi conseguido uma precisão de menos de 10 μm em alguns casos.

Hao et al. (2007) usou um modelamento de redes neurais chamado *back propagation neural network* (BPN) ou algoritmo de retropropagação. O BPN é um modelo de redes neurais multicamada, em que cada camada encontra padrões vindos da camada anterior. Este método cria representações internas independentes do *input* externo. O modelo de Hao et al. (2007), possui, além das camadas de *input e output* uma terceira

camada. Porém, os pesos e valores limites desse modelo foram optimizados por um Algoritmo Genético (AG), que é baseado nos mecanismos da evolução natural e genética. No caso da junção dos dois modelos, o GA codifica os pesos e valores limites iniciais do BPN e produz uma população desses valores. Cada valor dessa população é avaliado por uma função que qualifica o quão adequado são esses valores para o modelo, levando em consideração o erro. Os valores mais adequados são selecionados. Depois um operador produz uma nova geração de valores, porém, com alguma característica dos valores anteriormente selecionados, que são novamente avaliados pela função de adequação. O sistema é deixado evoluir desta maneira até que erro atinja o valor desejado. A junção desses métodos foi chamada de *genetic algorithm-based back propagation neural network* (GA-BPN). Esse modelo foi aplicado a um centro de torneamento que, em testes posteriores, atingiu precisão de até 10 µm. A vantagem desse método foi a redução do tempo computacional comparado com outros modelos de redes neurais.

Zhu, Ni e Shih (2008), realizaram um modelamento de erros dependentes e independentes da posição em um centro de usinagem. Fizeram uso de regressão linear para modelamento de ambos os erros atingindo precisão durante testes de +0,5 a -0,5 µm para os erros dependentes da posição.

Qianjian, Yang e Hao (2010), utilizaram regressão por busca de projeção *(projection pursuit regression* PPR), que é uma regressão utilizando o método *Projection pursuit* (PP). O PP é uma ferramenta estatística que procura determinadas projeções em dados multidimensionais. O modelamento foi feito em vazio e 15 temperaturas foram identificadas como tendo importância no erro radial. Porém, nenhuma tentativa de minimizar o número de sensores foi feita. Após implementação do modelo em máquina, um lote de 40 peças foi usinado mostrando uma redução do erro radial de 34 para 5 µm.

Zhang, Yang, e Jiang (2011), propuseram uma nova forma de modelamento. Segundo os autores, com as técnicas usadas em anos anteriores, como mínimos quadrados, redes neurais artificiais, e G*rey Model* (GM), seria difícil construir um modelo exato e robusto. O método GM fornece uma equação diferencial de primeira ordem sobre o relacionamento entre temperatura e o erro térmico. Porém, esse método não tem a habilidade de *feedback*, auto-aprendizado e auto-adaptação. Por sua vez, o método de redes neurais artificiais possui características de auto-adaptação e aprendizado. Porém, é necessária uma longa fase de treinamento do modelo, com muitas experiências, e grande probabilidade de ruído durante essa aquisição de dados. Assim, Zhang, Yang, e Jiang (2011) unem as vantagens dos dois modelos para correção em um centro de usinagem

por meio de G*rey Neural Network* (GNM), conseguindo como resultado um erro máximo de 3,65 µm. Porém, tanto o ciclo de aquecimento quanto a validação do modelo é feito em vazio.

Han et al. (2012), utilizaram o método *Fuzzy c-means clustering* para a seleção e agrupamento de variáveis. A análise de agrupamento difuso (*Fuzzy clustering*) é uma espécie de análise sistêmica que aplica teoria matemática de acordo com a comparabilidade entre séries de parâmetros. Após a seleção e o agrupamento de variáveis, um modelamento de redes neurais chamado *minimal-resource allocating networks* foi utilizado. Os resultados em um centro de usinagem com testes em vazio mostraram erros de posicionamento menores que 2 µm.

Pôde-se verificar que nos últimos anos, grandes esforços foram realizados com diferentes métodos de modelamento e que a precisão da máquina-ferramenta foi aumentada, principalmente nas condições de testes em vazio. Do ponto de vista de custo industrial, uma máquina-ferramenta pode operar com um modelo de regressão linear simples programado diretamente no CNC, sem a necessidade de um computador externo à máquina.

3. Descrição do Método Experimental

Para modelamento e correção do desvio dimensional do diâmetro dos componentes torneados num centro de torneamento, propõe-se, neste trabalho, o aquecimento da máquina-ferramenta pela movimentação de todos os seus eixos, e uso de fluido refrigerante sem usinagem real, para aquisição de dados de temperatura. Porém, para a obtenção de registros de desvio diametral, um corpo de prova foi torneado periodicamente, conforme será a frente detalhado.

A medição da temperatura em alguns pontos da máquina ocorreu durante todo o tempo do teste. O erro diametral foi medido diretamente no diâmetro da peça usinada. Tratando-se portanto do erro térmico do eixo x, presumidamente mais influenciado pela dilatação da estrutura do eixo-árvore.

Após a análise dos registros de desvios e temperaturas, um modelo foi elaborado por regressão linear de múltiplas variáveis fazendo-se uso do método dos mínimos quadrados. Posteriormente o modelo foi implementado no NC do mesmo centro de torneamento testado, o qual recalculará as coordenadas do eixo X, baseado nas entradas de temperatura dos sensores instalados máquina-ferramenta. Testes de usinagem foram feitos com esse sistema operando para a validação do mesmo, conforme será a frente detalhado.

3.1 Equipamentos

A máquina utilizada para o estudo aqui descrito será um Centro de Torneamento, com velocidade máxima de 5000 RPM no eixo-árvore e velocidades de avanço de 30m/min nos eixos coordenados.

Para medição e aquisição da temperatura serão usados sensores PT100 TF101U2, que são sensores de platina encapsulados em uma proteção de aço inox, ideais para medir temperaturas em fluidos e em superfícies.

Na Figura 3 é definida a nomenclatura dos eixos do referido centro de torneamento.

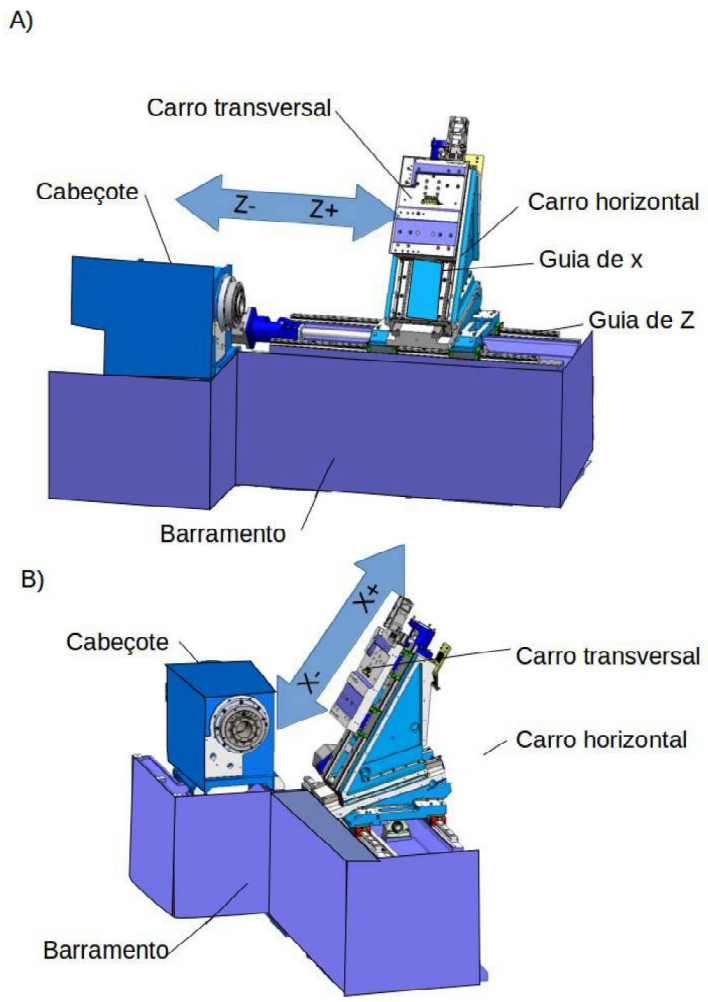

Figura 3 - Nomenclatura dos eixos. A) Eixo Z, B) Eixo X

O Eixo Z movimenta a aresta de corte na direção axial ao eixo árvore e o eixo X na direção radial. Movimentos em direção ao eixo-árvore tem sentido negativo, enquanto movimentos para fora do eixo-árvore tem sentido positivo.

Pôde-se observar no item 2.5, que nos trabalhos envolvendo centros de torneamento, independentemente do método de escolhas de variáveis, os locais mais usados para o modelamento, ou que mais representam o campo térmico de um centro de torneamento são: o eixo-árvore, os fusos, o tanque de fluido refrigerante e algumas partes estruturais como barramento e coluna do spindle, ficando a quantidade de sensores e sua localização mais específica, sujeitas a cada caso ou tipo de máquina; (Zhang; Yang; Jiang, 2011) e (Qianjian; Yang; Hao, 2010).

Para este trabalho, serão usados esses mesmos pontos chaves. Assim, os sensores de temperatura para medição nas proximidades do eixo-árvore e do barramento fundido serão localizados conforme a Figura 4.

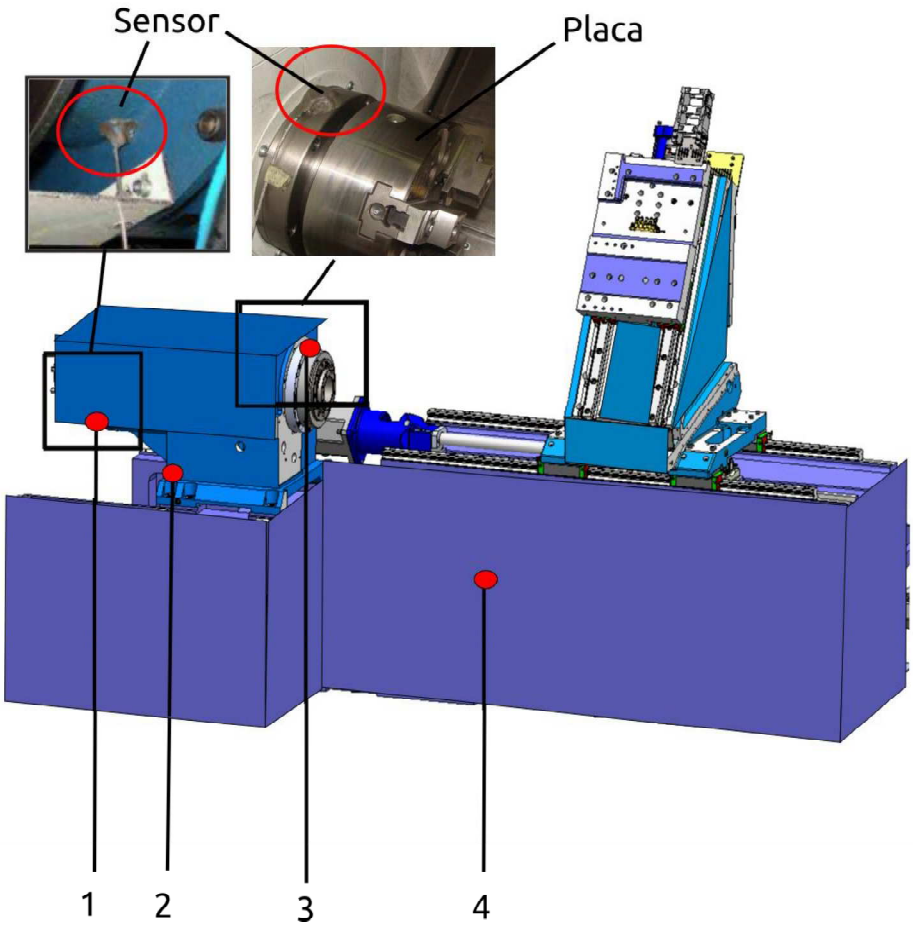

Figura 4 - Localização dos sensores de temperatura 1, 2, 3 e 4

Localização dos sensores de temperatura:

1. Rolamento traseiro do eixo-árvore (abreviado por ROLT nos gráficos);
2. Base da estrutura do cabeçote (BASE CAB);
3. Rolamento dianteiro (ROLD);
4. Base da máquina (BASE B).

Na Figura 5, são mostradas as localizações dos sensores dos componentes do fuso eixo x, instalado no carro horizontal do centro de torneamento. Os sensores estão posicionados nos mancais e porca do fuso de x.

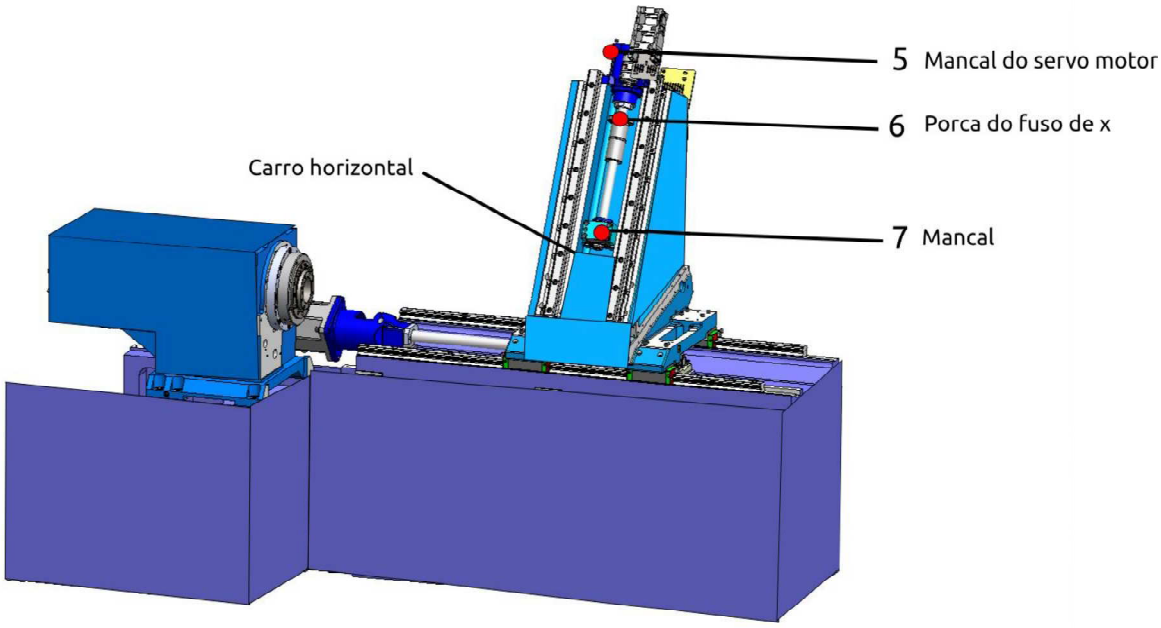

Figura 5 - Localização dos sensores de temperatura 5, 6 e 7 do eixo x

5. Mancal superior ou mancal do servo motor (abreviado por MANCAL X nos gráficos);
6. Porca do fuso do eixo x (PORCA X);
7. Mancal inferior de x (MANCAL X INF).

Na Figura 6, são mostradas as localizações dos sensores dos componentes do do fuso eixo z, instalado no barramento do centro de torneamento. Os sensores estão posicionados nos mancais e porca do fuso de Z.

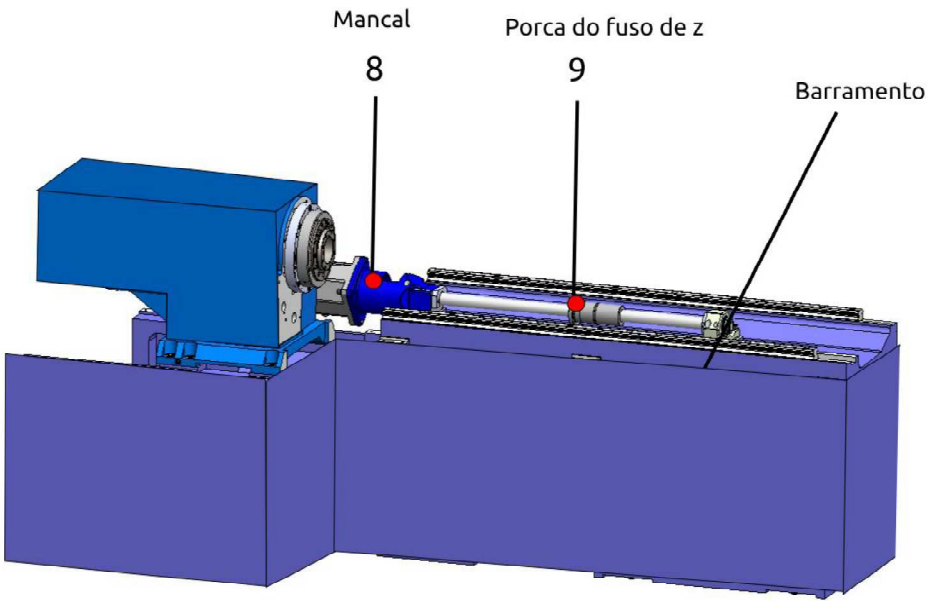

Figura 6 - Localização dos sensores de temperatura 8 e 9 do eixo z

8. Mancal do servo motor do eixo z (abreviado nos gráficos por MANCAL Z);
9. Porca do fuso do eixo z (PORCA Z);

Também foram alocados sensores externos. Para a medição da temperatura da área de usinagem, ou seja, próximo ao local onde o inserto corta o corpo-de-prova, um sensor PT 100, (sensor número 10) do tipo haste foi colocado acima da placa (Figura 7a). Para a medição da temperatura ambiente, um sensor PT 100 do tipo haste, foi fixado na parte superior esquerda da chaparia da máquina (Figura 7b). Para medição de temperatura do fluido refrigerante, um sensor foi mergulhado dentro do tanque de fluido refrigerante (Figura 7c). O tanque foi preenchido com 65 litros de fluido refrigerante.

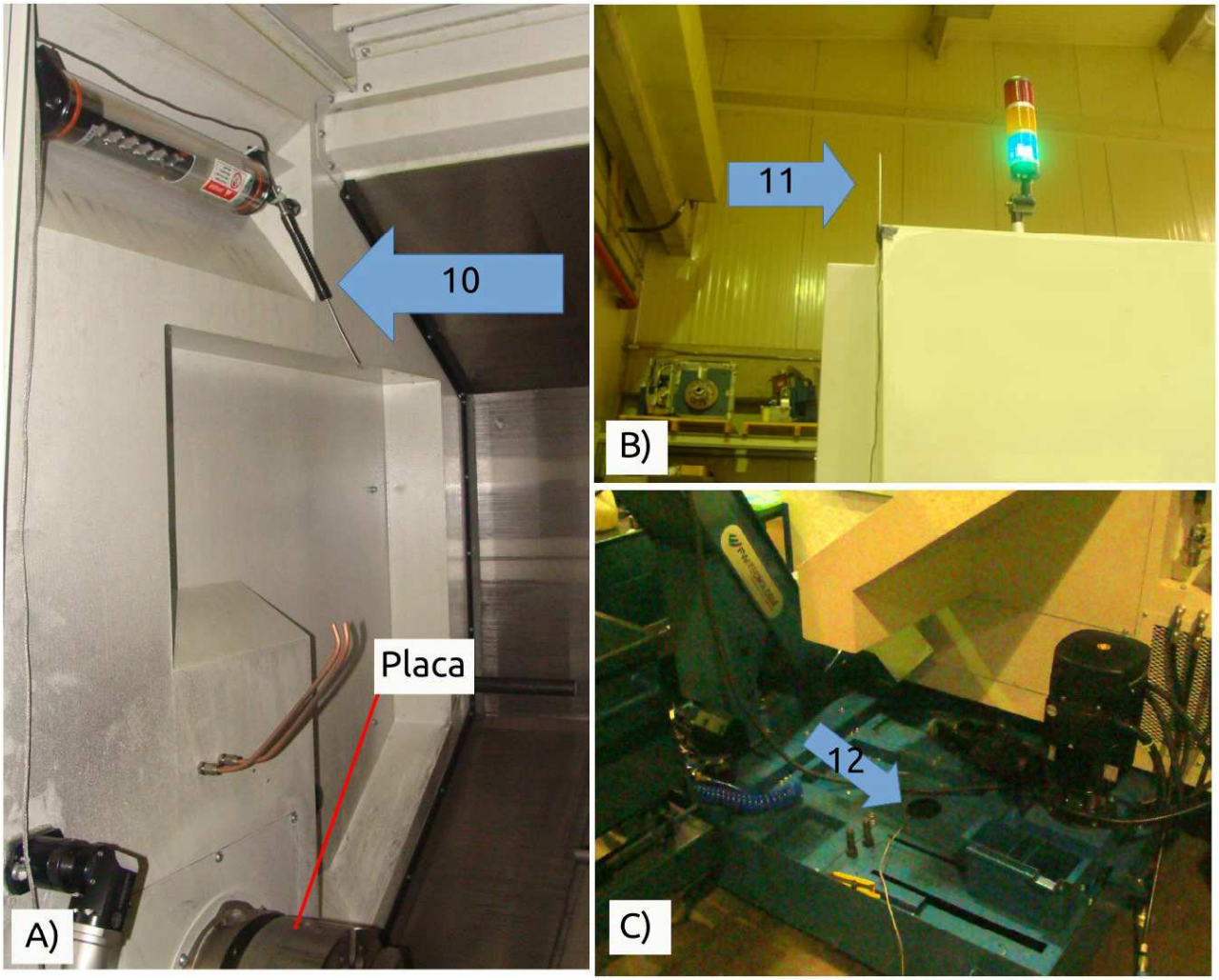

Figura 7 - Sensores externos. A) Área de usinagem, B) Ambiente. C) Tanque.

10. Ambiente interno ou área de usinagem (abreviado nos gráficos por AMB INT);
11. Ambiente externo (AMB EX);
12. Fluido refrigerante contido no tanque (TANQUE).

Um registrador YOKOGAWA MV100 configurado para adquirir os dados de temperatura recebidos de até 12 sensores PT100, registrou a temperatura a cada 10 segundos. A precisão do aparelho com sensores PT100 é de ± 0,15% reading +0,3°C.

3.2 Testes de aquecimento

Para aquecimento do centro de torneamento, foi usada a técnica de separação de variáveis (Yang, Yuan e Ni, 1999). Assim, os testes a seguir tem o objetivo de se verificar o comportamento do erro térmico no eixo x devido ao funcionamento isolado do eixo-árvore, do eixo x e do eixo z. Essas partes estavam em funcionamento durante 3:45h (195 min) para aquecimento, o que foi suficiente para estabilização da temperatura. Posteriormente entram em resfriamento por mais 3:45h, que foi o suficiente para que a máquina voltasse a sua temperatura inicial. Durante este período de 7:30h (435 min), um corpo-de-prova, cujas dimensões são apresentadas na Figura 8, foi torneado a cada 15 minutos, totalizando 30 corpos-de-prova por teste. O registro de temperatura é a medida instantânea no momento da usinagem do corpo-de-prova.

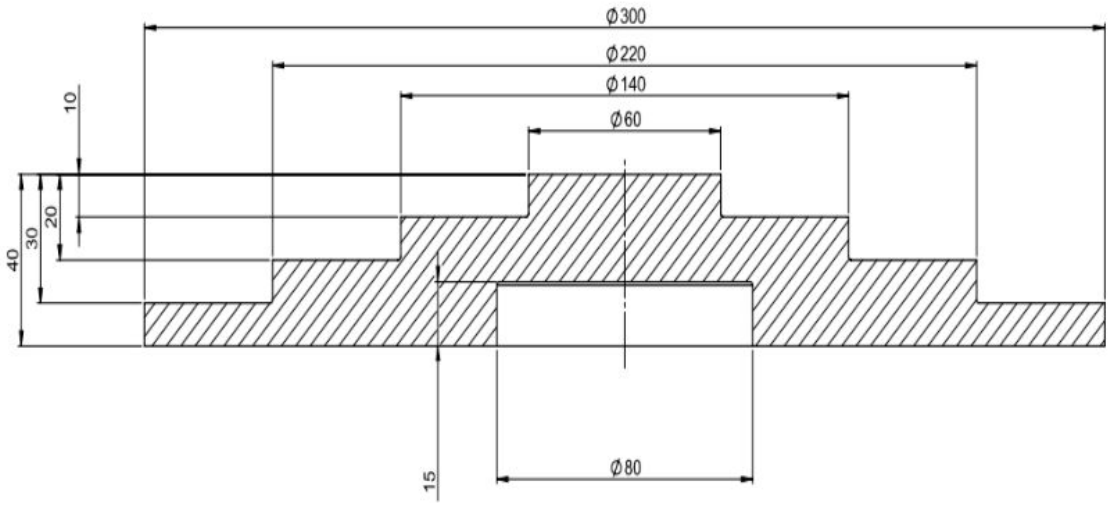

Figura 8 - Corpo-de-prova (Dimensões em mm)

Neste corpo-de-prova, os diâmetros de 60, 140, 220 e 300 mm foram torneados durante os testes, enquanto o diâmetro interno de 80 foi fixado na placa do centro de torneamento. Desprezou-se o erro ao longo dos 40 mm do eixo z, usados para tornear o corpo de prova.

O aquecimento do centro de torneamento sempre ocorrerá em vazio, ou sem usinagem do referido corpo de prova. Porém, no momento da usinagem para registro do desvio, seguiu-se as seguintes condições de usinagem: profundidade de corte (ap) de 0,3 mm, avanço (f) de 0,1 mm/rot e velocidade de corte (vc) de 300 m/min. O inserto DNMG 150608-RP KC9125 foi adotado, sendo que a cada teste de 7:30h, uma nova aresta de

corte foi utilizada.

Para o referenciamento da máquina-ferramenta, o primeiro corpo-de-prova torneado em cada teste, é feito com a máquina a frio, ou seja, antes do aquecimento. A medida diametral deste primeiro corpo de prova é tomada como referência, ou definida como desvio zero. Assim, o erro diametral de cada peça é a diferença entre os diâmetros dos corpos-de-prova em relação ao primeiro torneado em cada teste.

Para o aquecimento do eixo-árvore admitiu-se que, em uso geral, para maiores diâmetros a rotação usada tende a ser menor. Assim, para aquecimento do eixo-árvore, decidiu-se usar as maiores rotações para registrar o desvio diametral dos menores diâmetros, e as menores rotações para os menores diâmetros, como pode ser observado na Tabela 1 a seguir. Foram distribuídas as rotações de aquecimento para cada diâmetro do corpo-de-prova de forma a utilizar a rotação máxima da máquina-ferramenta no menor diâmetro.

Tabela 1 - Variação dos testes de aquecimento

Teste	Rpm	Eixo X(m/min)	Eixo Z(m/min)	Diâmetro (mm)	Fluido Refr
1	500	0	0	300	Não
2	2000	0	0	220	Não
3	3500	0	0	140	Não
4	5000	0	0	60	Não
5	0	30	0	Todos	Não
6	0	15	0	Todos	Não
7	0	0	30	Todos	Não
8	0	0	15	Todos	Não
9	500	0	0	300	Sim
10	2000	0	0	220	Sim
11	3500	0	0	140	Sim
12	5000	0	0	60	Sim
13	0	30	0	Todos	Sim
14	0	15	0	Todos	Sim
15	0	0	30	Todos	Sim
16	0	0	15	Todos	Sim

Nos teses de movimentação isolada dos eixos coordenados, o eixo-árvore foi mantido parado. Porém, no momento da usinagem do corpo-de-prova, seguiu-se as condições de usinagem já mencionadas.

Também verificou-se a influência do uso de fluido refrigerante pela repetição dos testes com seu uso.

Após torneamento, o corpo-de-prova foi deixado em repouso, em uma sala de

ambiente controlado, para estabilização da temperatura. No dia seguinte ao teste, o corpo-de-prova foi medido, com uma máquina de medição tridimensional, tipo portal da Zeiss, para registro do desvio diametral.

3.3 Validação.

Para teste do modelo na previsão de novos dados e análise de capabilidade do centro de torneamento, um programa de usinagem será executado em vazio; porém, a cada 10 minutos, um corpo-de-prova de aço SAE 1045 (Figura 9), confeccionado conforme a norma de medição estatística de capabilidade em tornos VDI/DGQ 3442, foi usinado com o mesmo programa. Isto significa que todos os eixos estão em movimento durante essas simulações, diferentemente dos testes de aquecimento anteriores. A peça será medida com um micrômetro digital para registro do desvio diametral. Profundidade de corte (ap) de 0,3 mm e avanço (f) de 0,1 mm/rot. Velocidade de corte (vc) de 300 m/min. Portanto, o tempo de usinagem de cada corpo-de-prova é de aproximadamente, 5,5 s. Inserto utilizado DNMG 150608-RP KC9125.

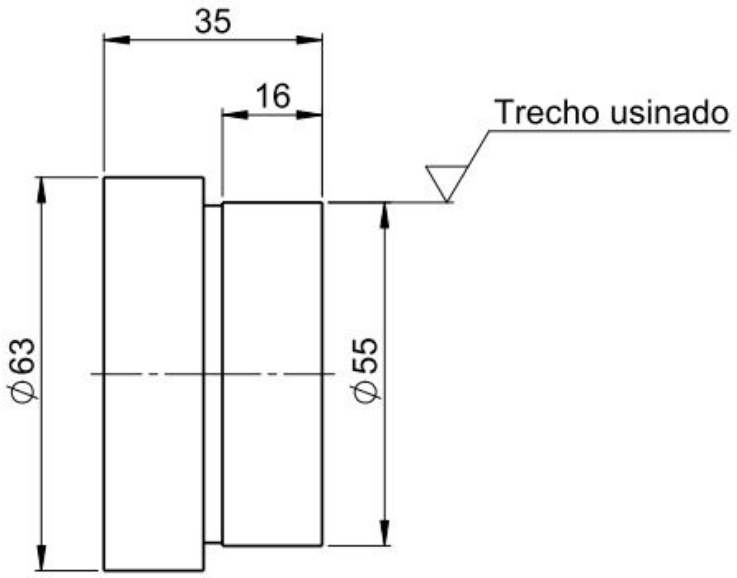

Figura 9 - Corpo de prova da validação

Programa utilizado para o teste de capabilidade se encontro a Apêndice A:

4. Resultados iniciais.

A seguir serão mostrados os resultados das medições de temperatura e erro diametral obtidos junto ao centro de torneamento durante a realização dos ciclos referidos na Tabela1.

Para cada experimento, mostram-se os gráficos da evolução das temperaturas de cada sensor e o erro diametral obtido medindo-se as peças ao fim de cada teste. As temperaturas dos sensores foram registradas a cada 15 minutos, totalizando 30 registros, feitos no momento da usinagem. Em seguida é mostrado o registro dos desvios diametrais dos corpos-de-prova, relativos ao primeiro corpo de prova usinado, tomado como referência.

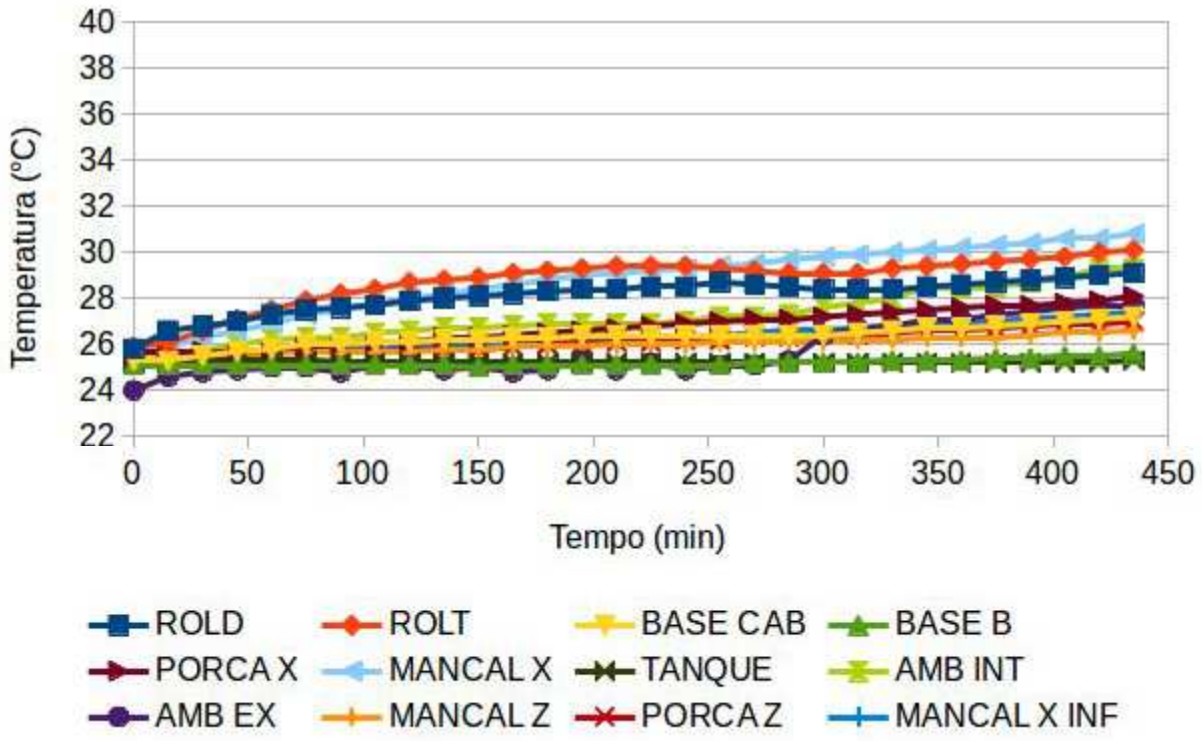

Gráfico 1 - Teste1, variação das temperaturas, 500 rpm, diâmetro 300 mm

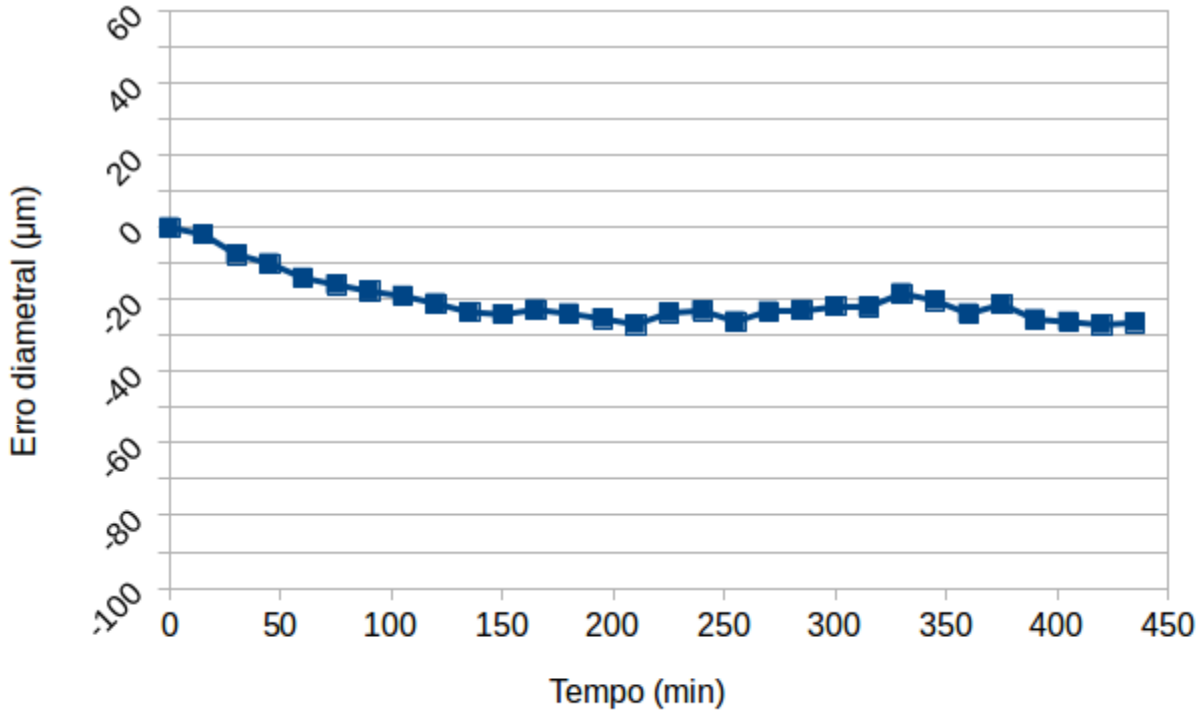

Gráfico 2 - Teste1, erro diametral, 500 rpm, diâmetro 300 mm.

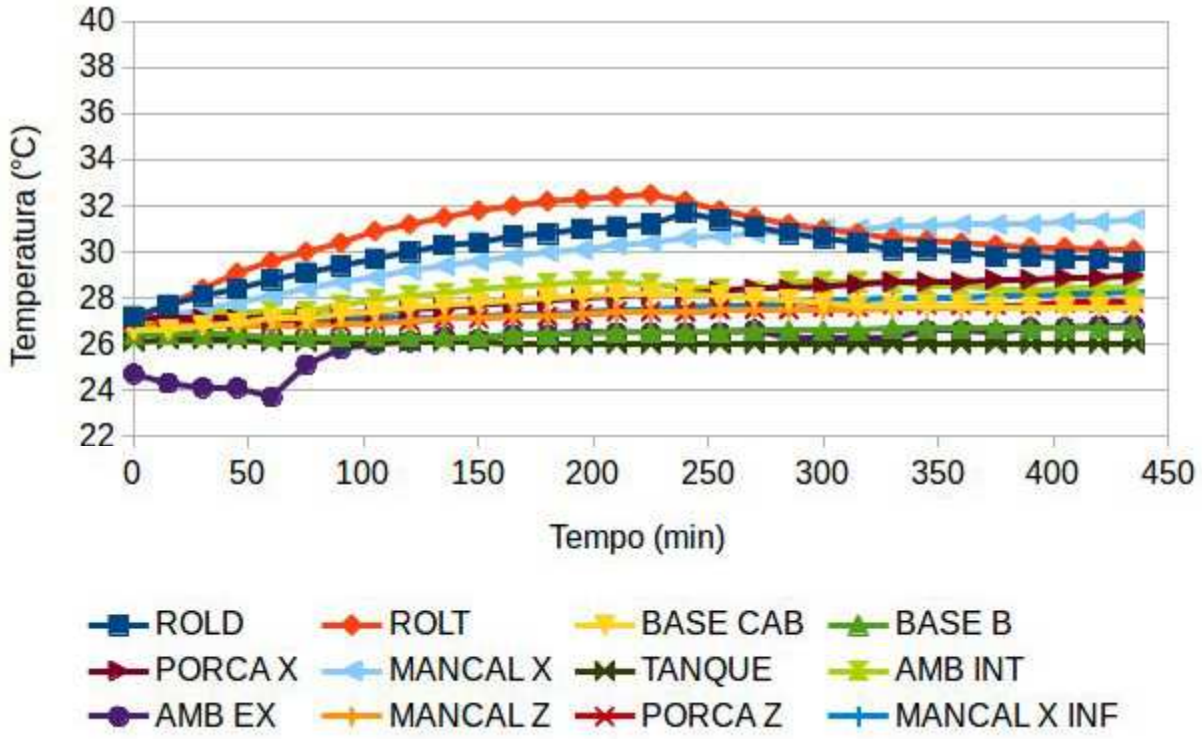

Gráfico 3- Teste2, variação das temperaturas, 2000 rpm, diâmetro 220 mm.

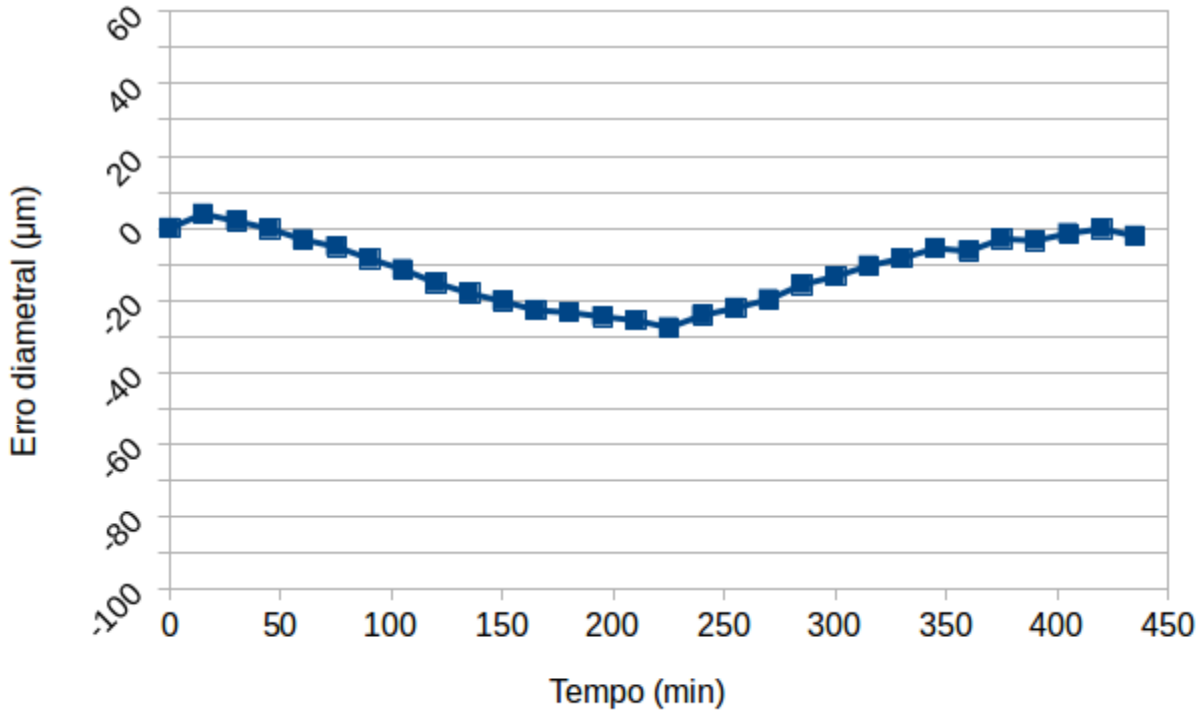

Gráfico 4 - Teste2, erro diametral, 2000 rpm, diâmetro 220 mm.

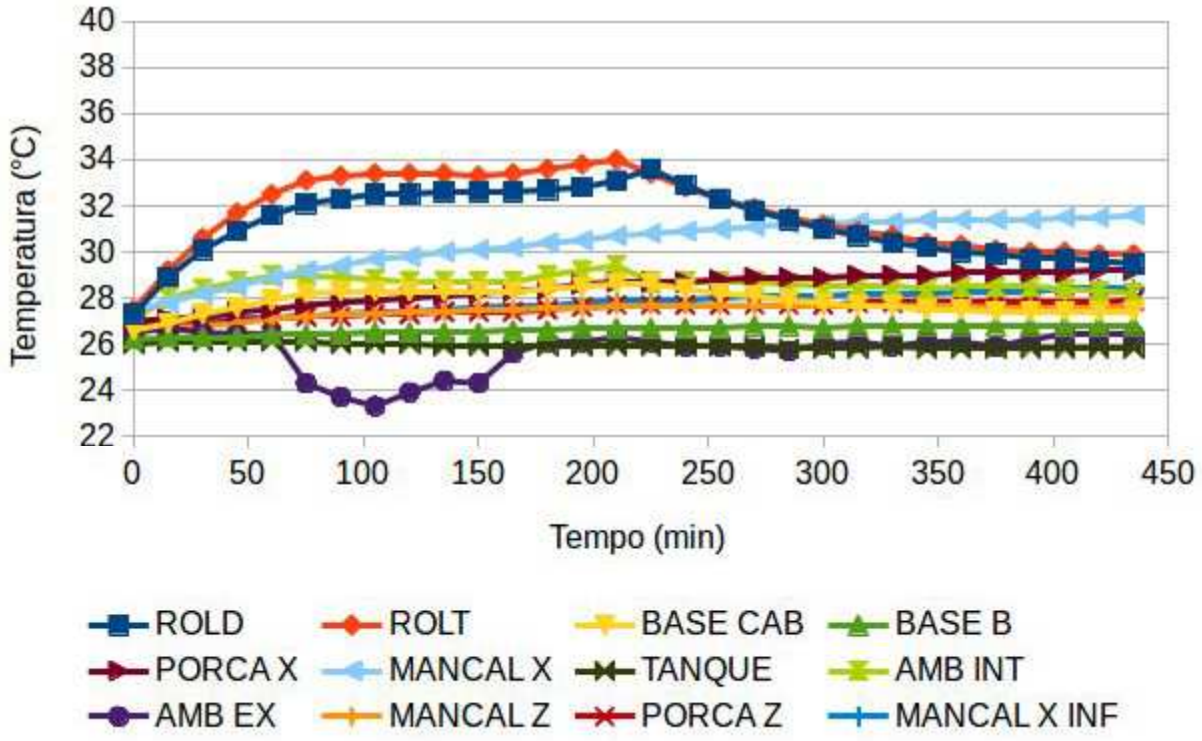

Gráfico 5 - Teste3, variação das temperaturas, 3500 rpm, diâmetro 140 mm.

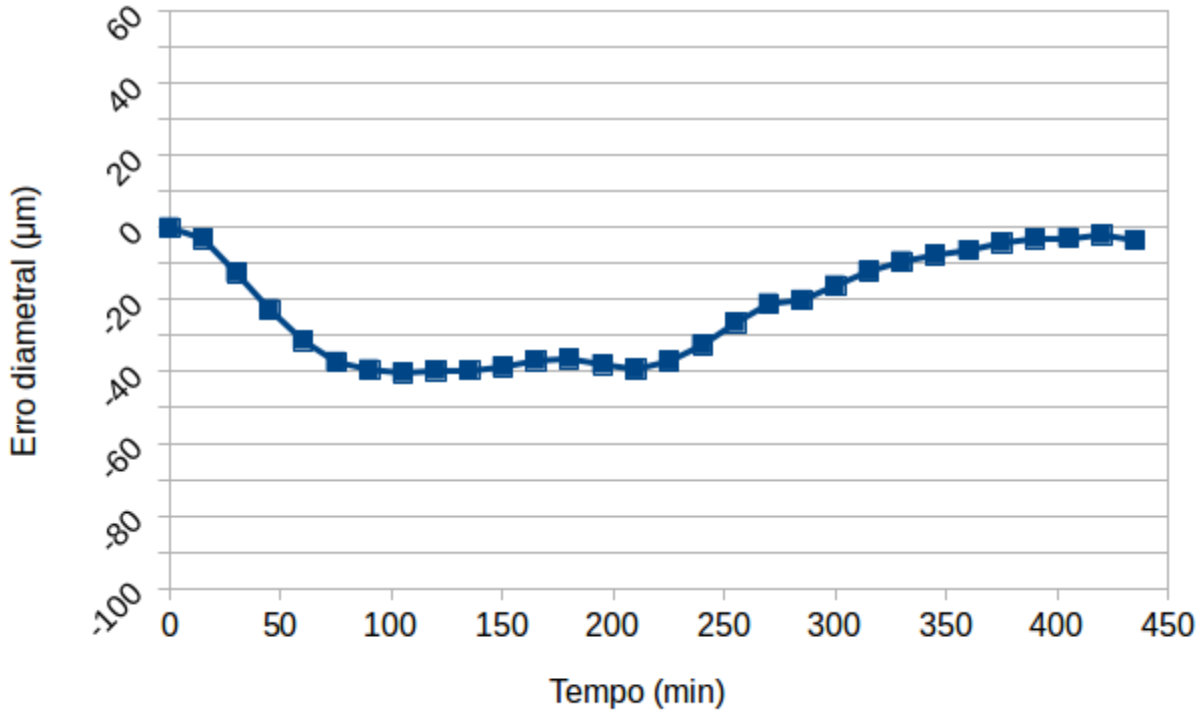

Gráfico 6 - Teste3, Erro diametral, 3500 rpm, diâmetro 140 mm.

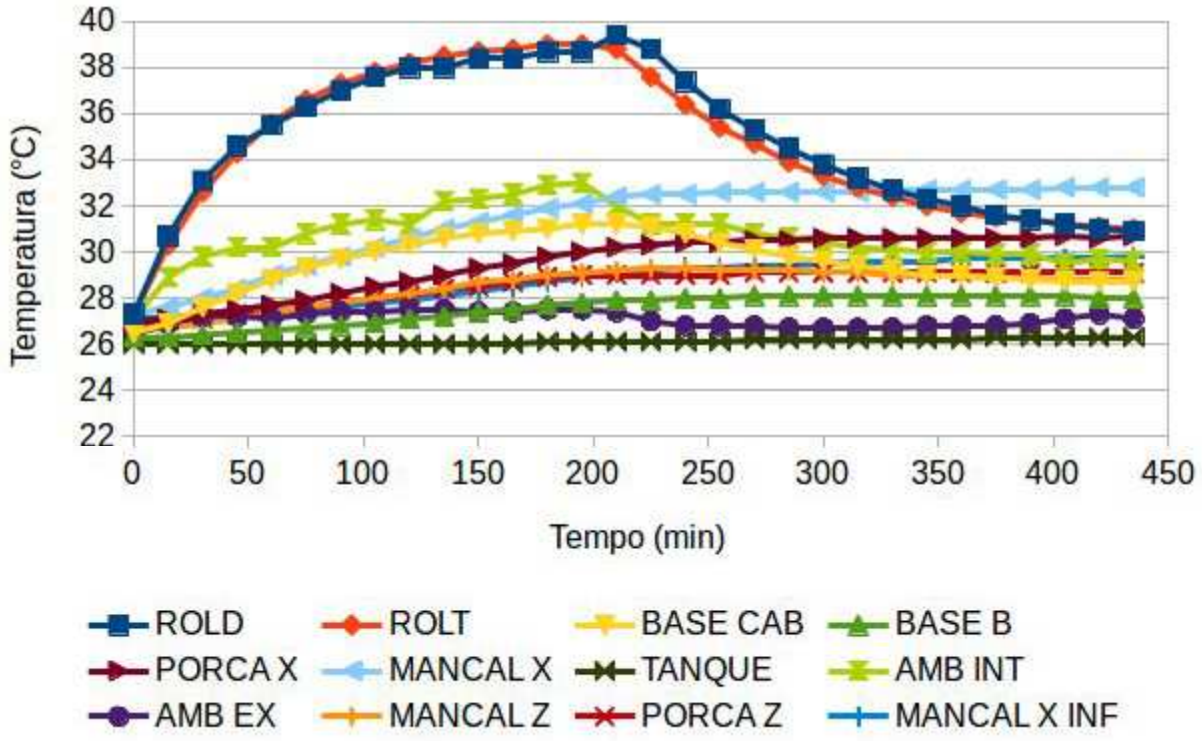

Gráfico 7 - Teste4, variação das temperaturas, 5000 rpm, diâmetro 60 mm.

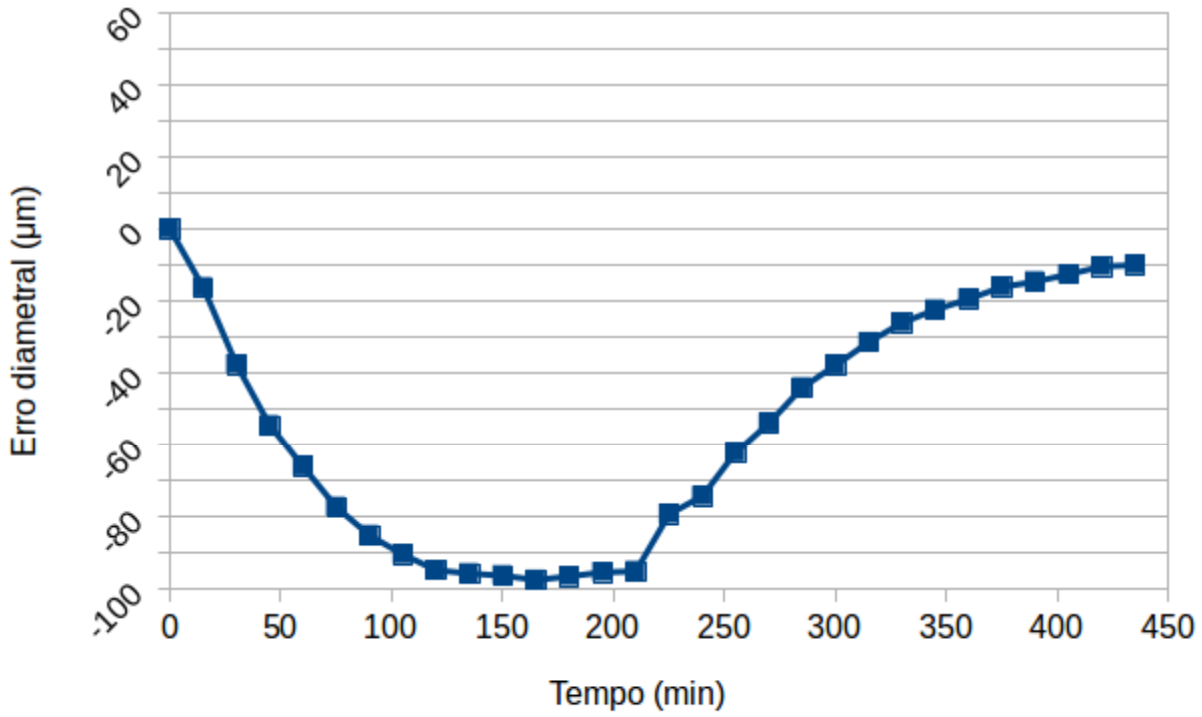

Gráfico 8 - Teste4, erro diametral, eixo-árvore 5000 rpm, diâmetro torneado 60 mm.

O que se pode perceber dos primeiros 4 testes com aquecimento do eixo-árvore sem o uso de fluido refrigerante é que o erro térmico causado por esse componente tende a deixar o diâmetro torneado menor, de -30 até -100 µm, dependendo da temperatura atingida. Isto pode ser explicado pela dilatação no sentido vertical da estrutura fundida do eixo árvore, o que aumentaria a profundidade de corte devido a inclinação do eixo x (Figura 10). Percebe-se claramente no teste 4 que as temperaturas dos rolamentos dianteiro, traseiro têm uma relação direta com o erro, sendo que a curva de temperatura desses componentes tem praticamente a mesma forma que a curva de erro. O comportamento de aquecimento dos rolamentos e o erro diametral também pode ser observado nos testes 2 e 3. Já no teste 1 com rotação de 500 rpm, a correlação não parece ser tão direta, possivelmente pela baixa rotação do teste e consequente baixa temperatura verificada nos itens.

Pode-se perceber também que o aquecimento do eixo-árvore influencia no aquecimento de outros componentes, tornando difícil um estudo isolado do erro de cada componente da máquina.

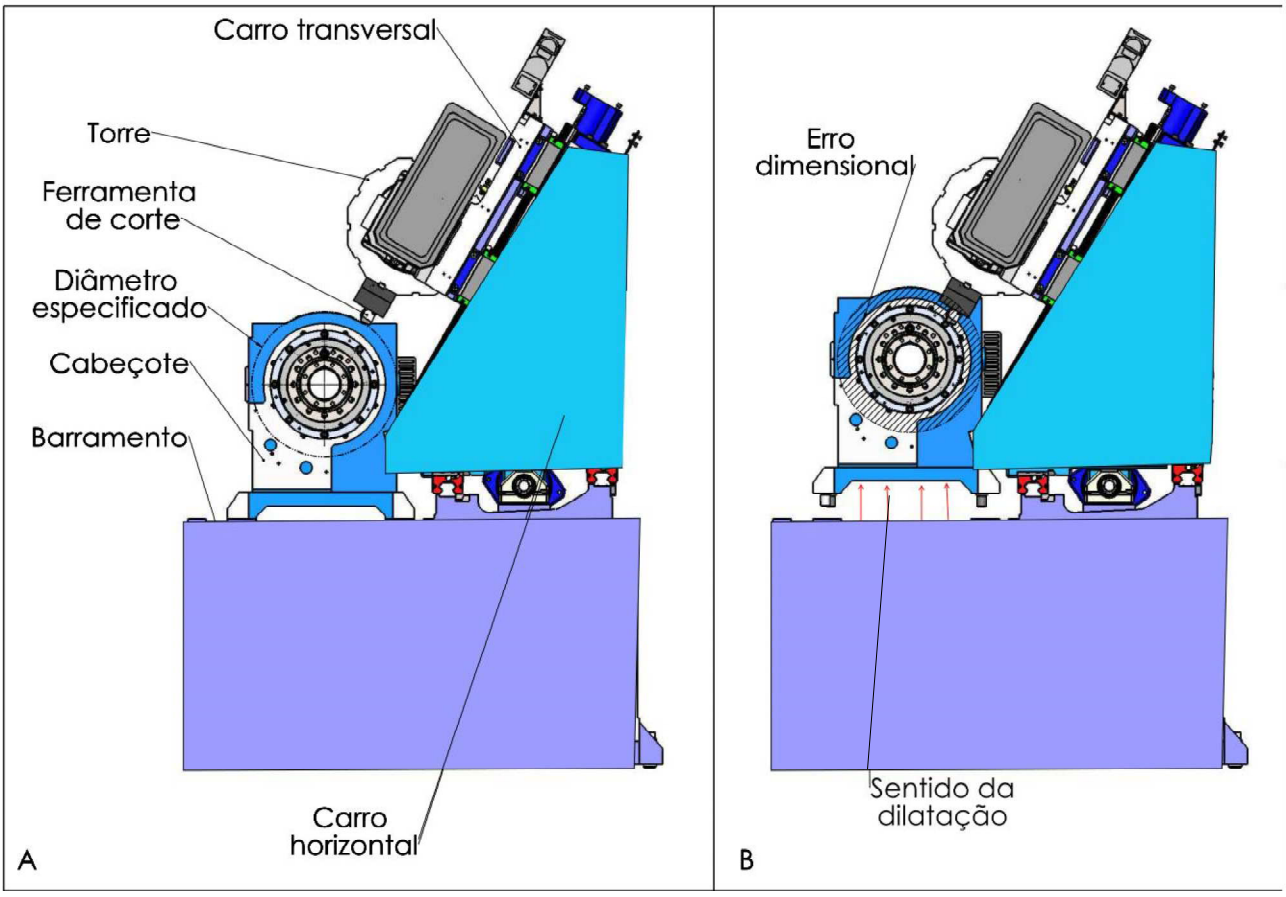

Figura 10 - A) vista lateral direita, B) Dilatação vertical da estrutura e consequente diminuição do diâmetro.

Com relação às temperaturas dos componentes do eixo x (MANCAL X, PORCA X e MANCAL X INF), pôde-se ver que ambos seguem o mesmo padrão de aquecimento e aparente estabilização durante a fase de resfriamento do eixo-árvore, a partir do tempo 195 min.. Isto pode ser explicado pela elevada temperatura do mancal do servo motor (MANCAL X), que, aparentemente, transfere calor para o resto dos componentes do fuso. Mesmo não estando em movimento, o servo motor está ativo, sustentando o peso do carro da torre contra a ação da gravidade e produzindo calor, pois trata-se de um eixo inclinado (Figura 11).

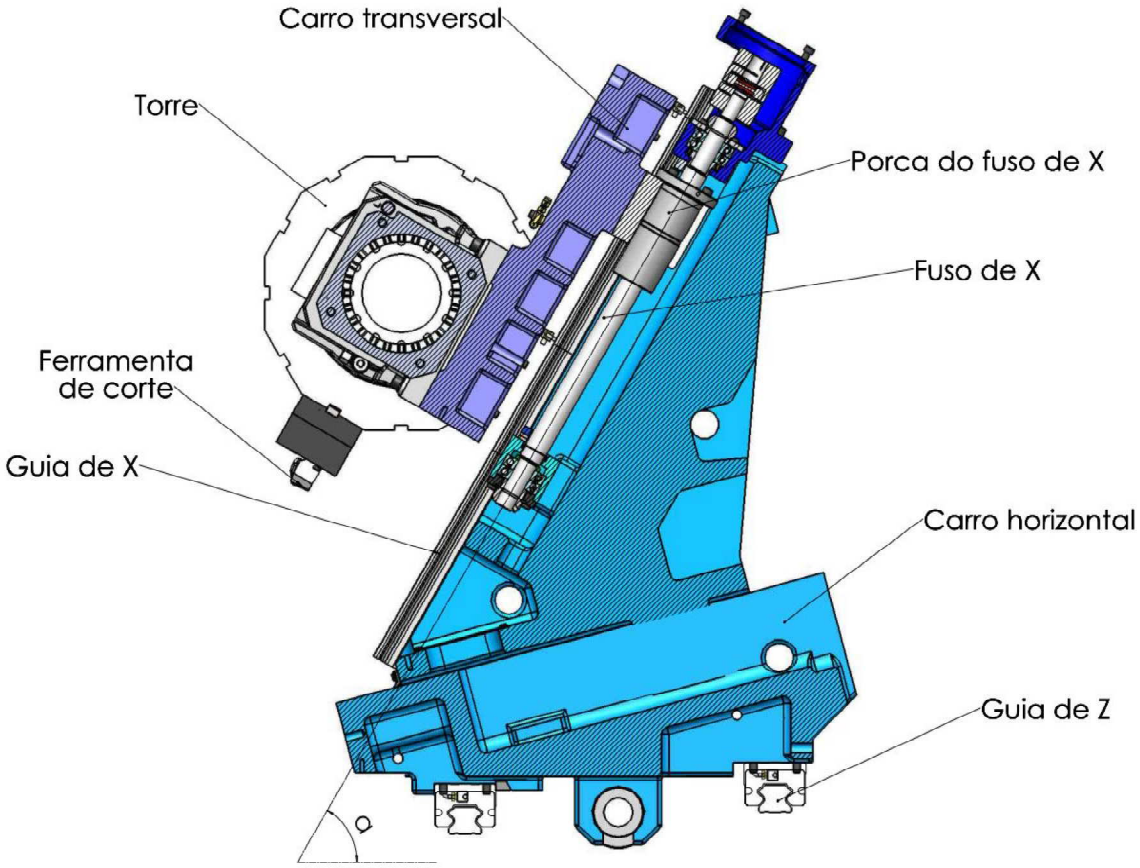

Figura 11 - Esquema eixo inclinado X

A seguir seguem os resultados dos testes envolvendo o funcionamento do eixo X sem o uso de fluido refrigerante, com diferentes velocidades de avanço.

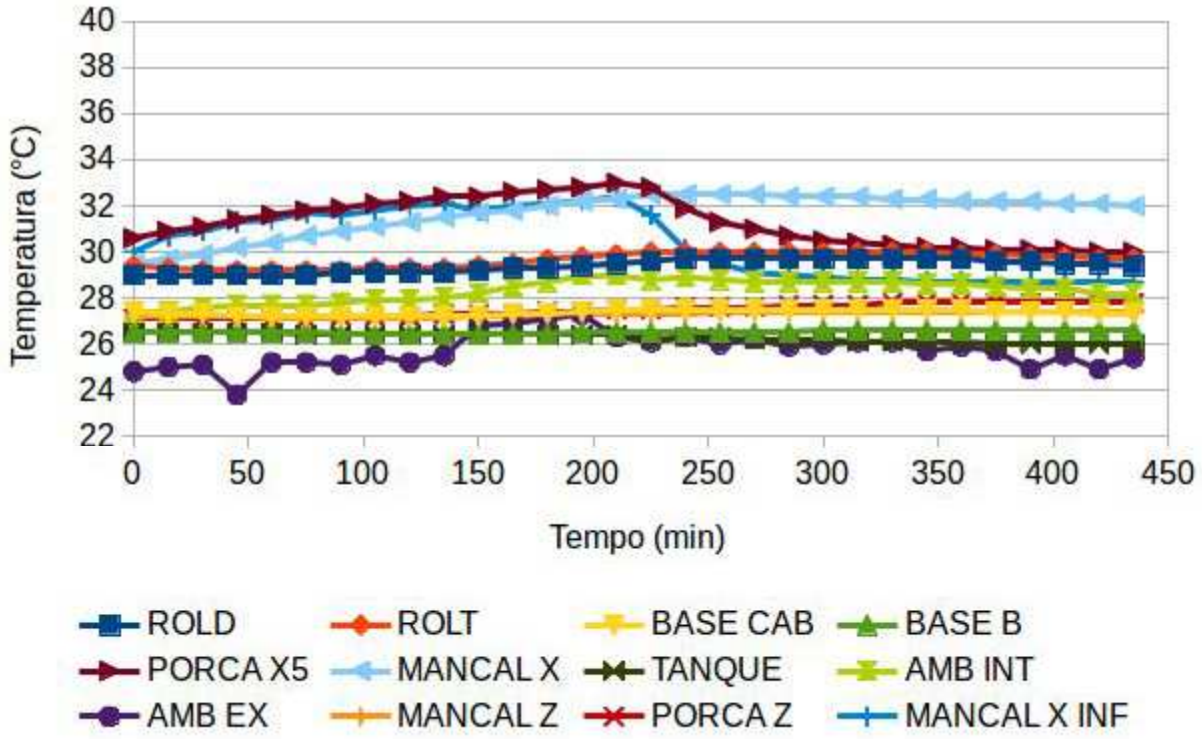

Gráfico 9 - Teste5, variação das temperaturas, eixo x a 30m/min

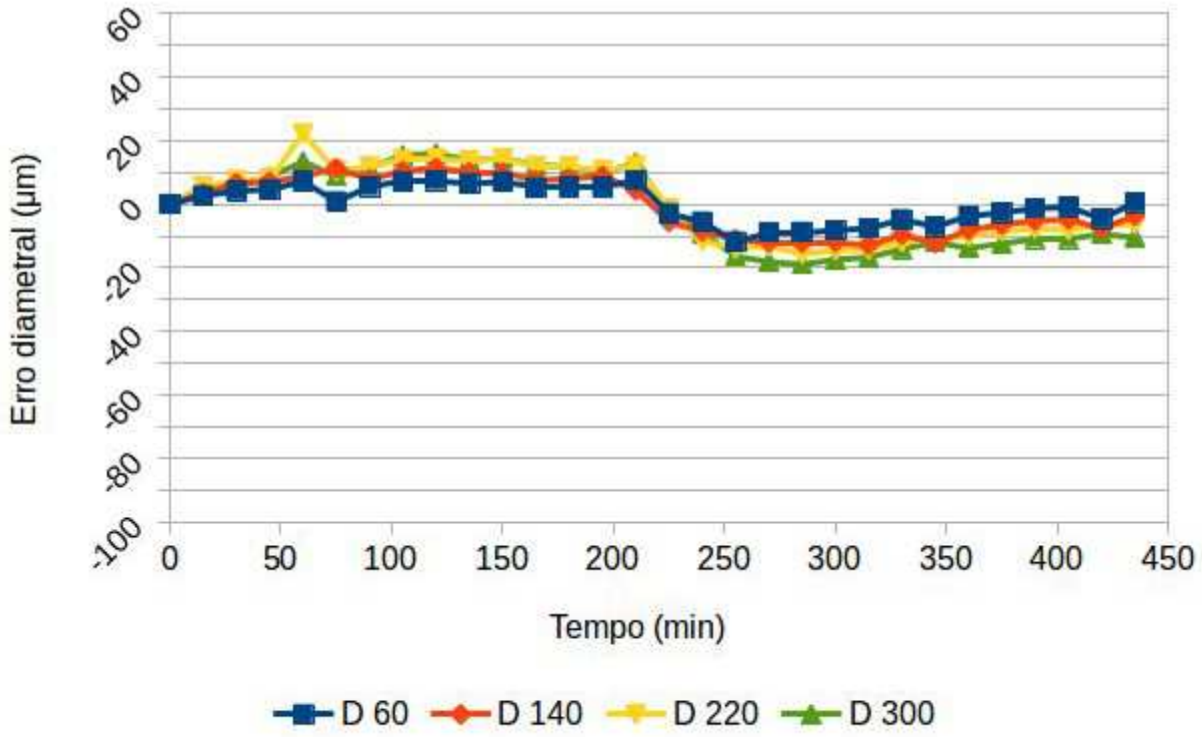

Gráfico 10 - Teste5, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo x a 30m/min

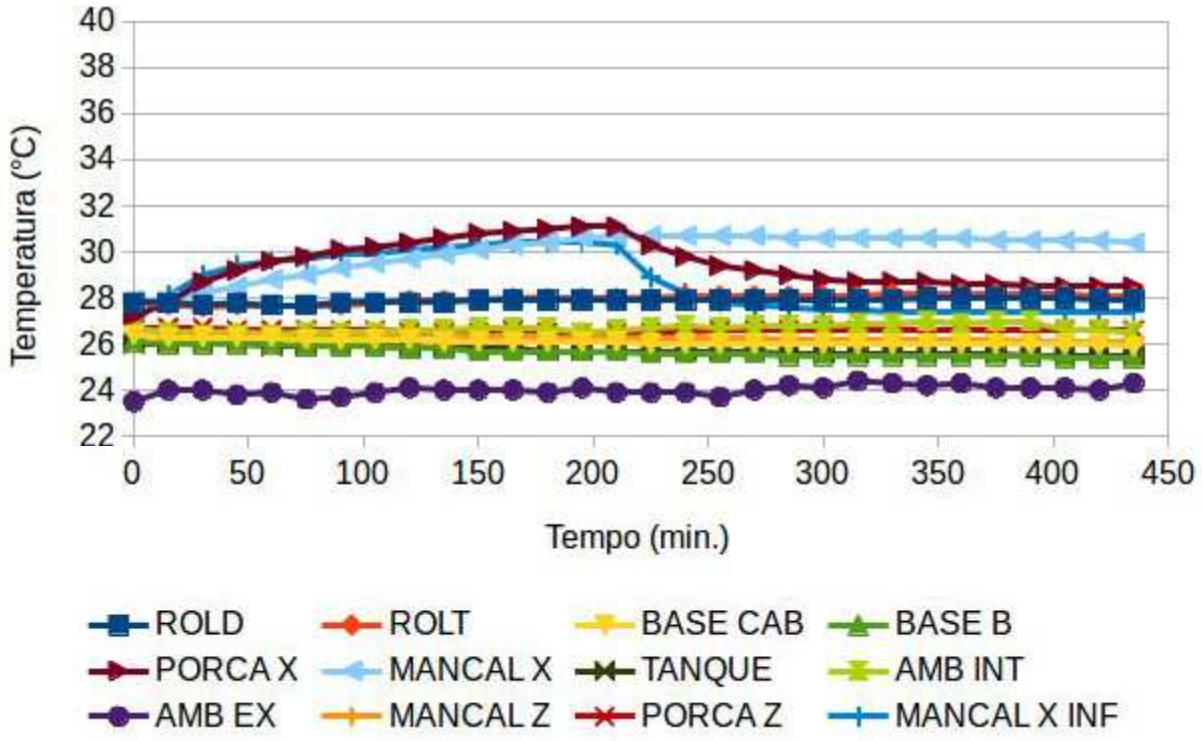

Gráfico 11 - Teste6, variação das temperaturas, eixo x a 15m/min

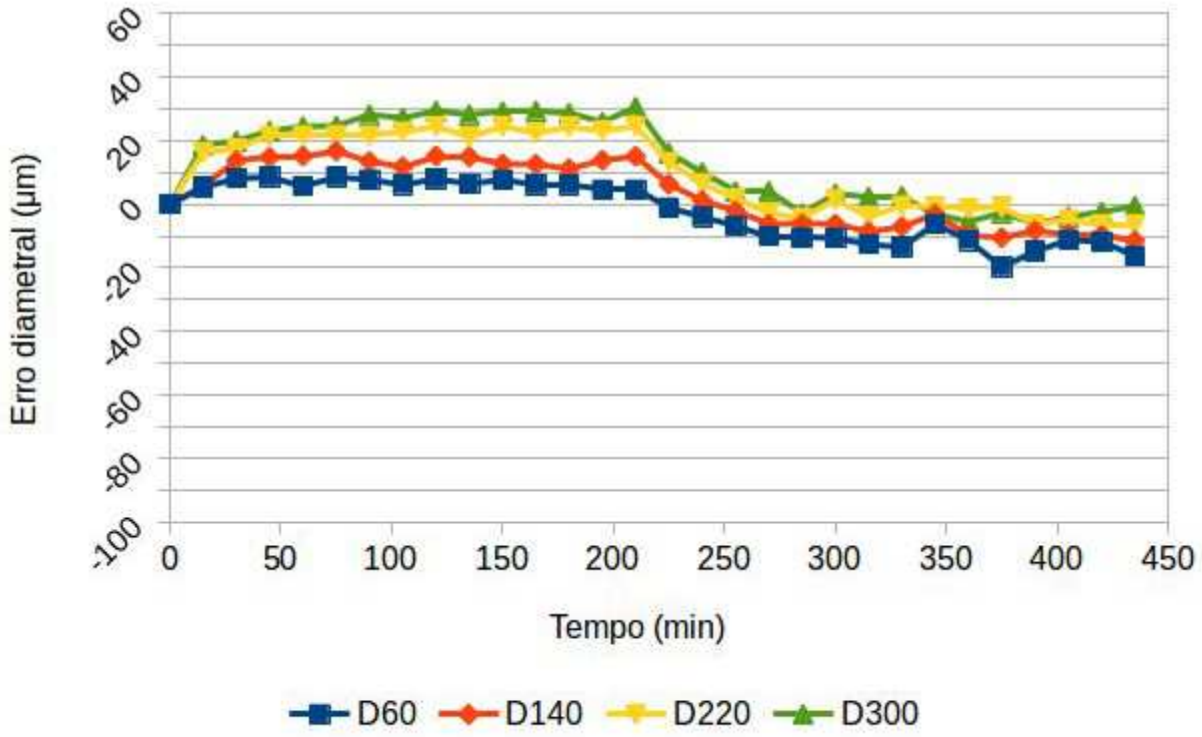

Gráfico 12 - Teste6, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo x a 15m/min.

Pode-se observar que o aquecimento do fuso do eixo x move o erro térmico na direção x+, isto é, faz com que o diâmetro da peça torneada fique maior do que deveria. Isto pode ser explicado, principalmente, pela dilatação do fuso do eixo x e, provavelmente, também pela dilatação vertical da estrutura fundida e das guias onde o fuso se encontra instalado (Figura 12).

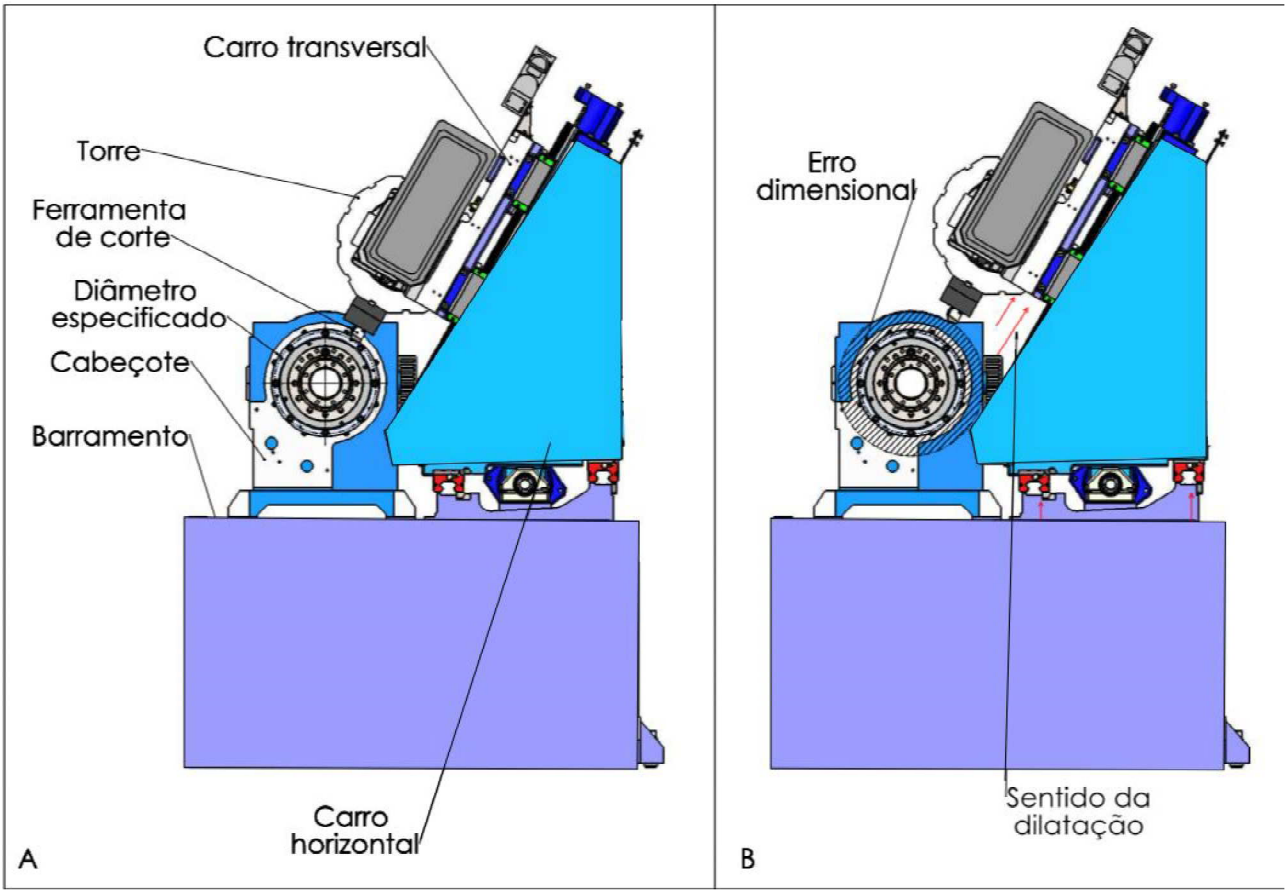

Figura 12 - A)Vista lateral direita e conjunto do eixo X B)Direção da dilatação do fuso com consequente aumento do diâmetro torneado.

Nota-se também que o erro possui um comportamento similar às temperaturas da porca do fuso de x (PORCA X) e mancal inferior (MANCAL X INF). Supõem-se que a temperatura do mancal superior (MANCAL X) possa influenciar, pois sofre um aumento não só devido ao atrito dos rolamentos, mas principalmente pela atividade do servo motor em sustentar a posição do eixo contra a gravidade, visto que durante a fase de resfriamento este não diminuí significativamente sua temperatura. Porém, esta relação não é óbvia ao se analisar os gráficos.

No Teste 5, não parece haver diferença significativa de erros ao se tornear os diferentes diâmetros. Já no teste 6, observa-se um aumento no desvio diametral ao se tornear os maiores diâmetros.

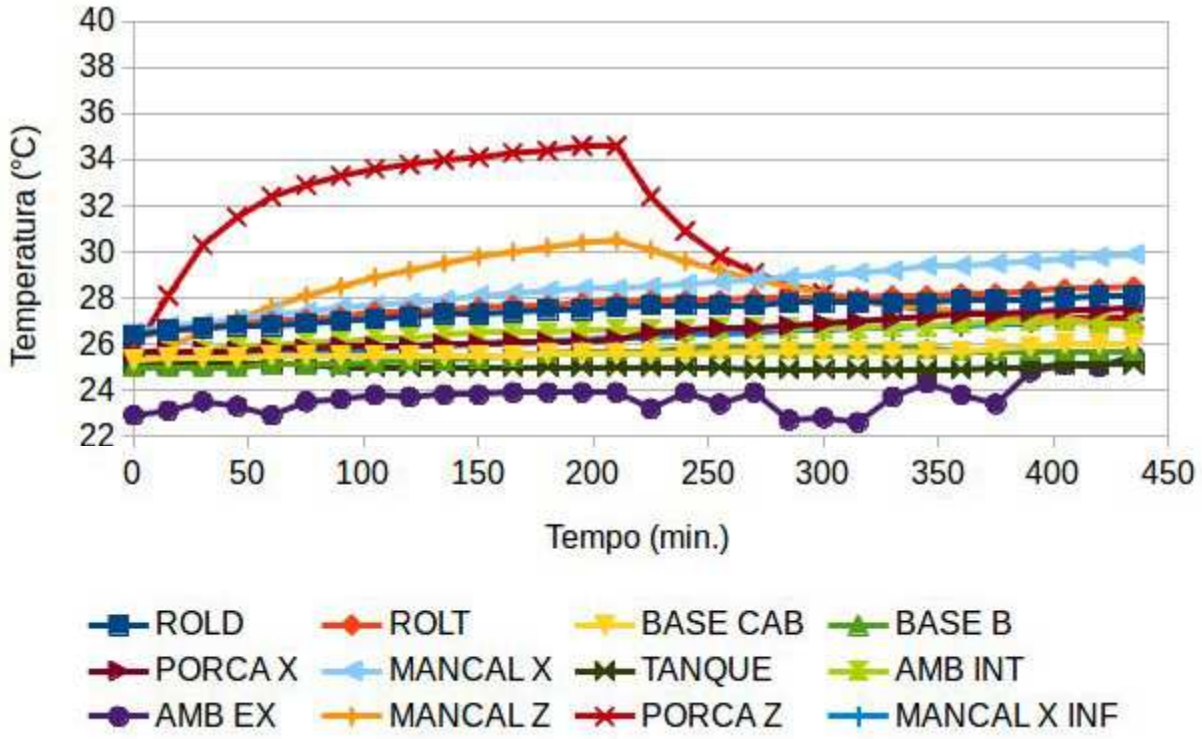

Gráfico 13 - Teste7, Variação das temperaturas, eixo z a 30m/min, a seco

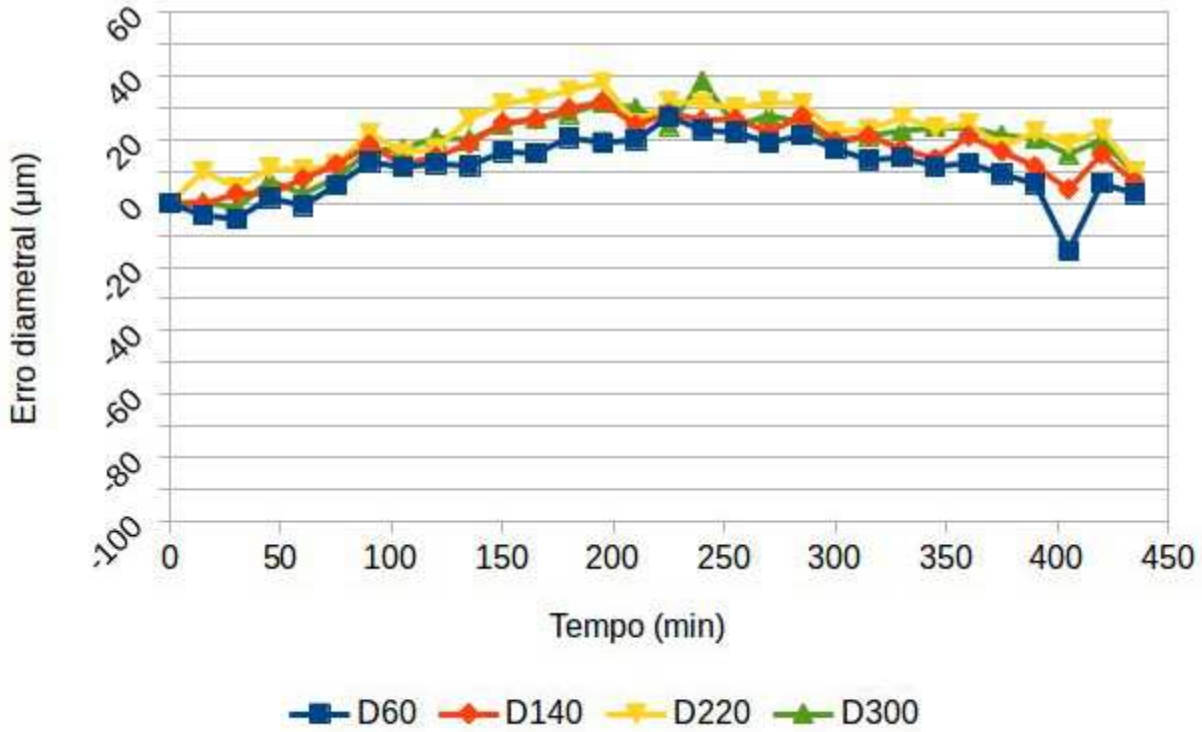

Gráfico 14 - Teste7, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 30m/min, a seco

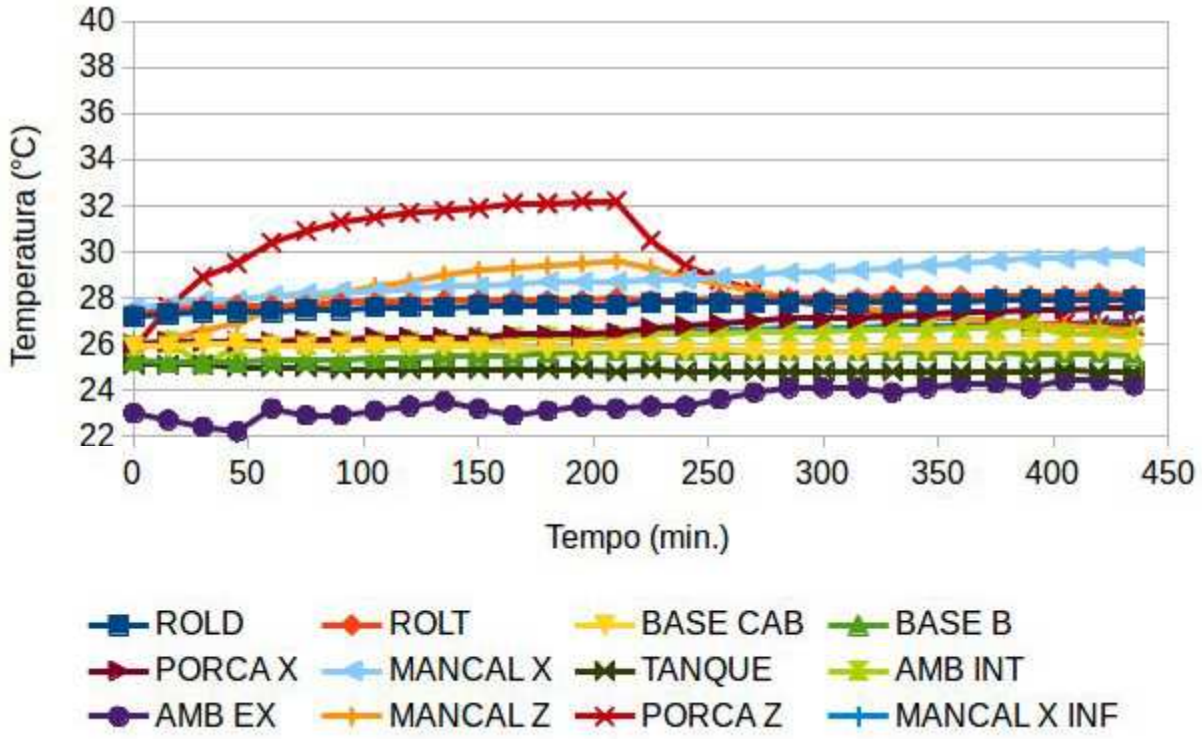

Gráfico 15 - Teste8, variação das temperaturas, eixo z a 15m/min, a seco.

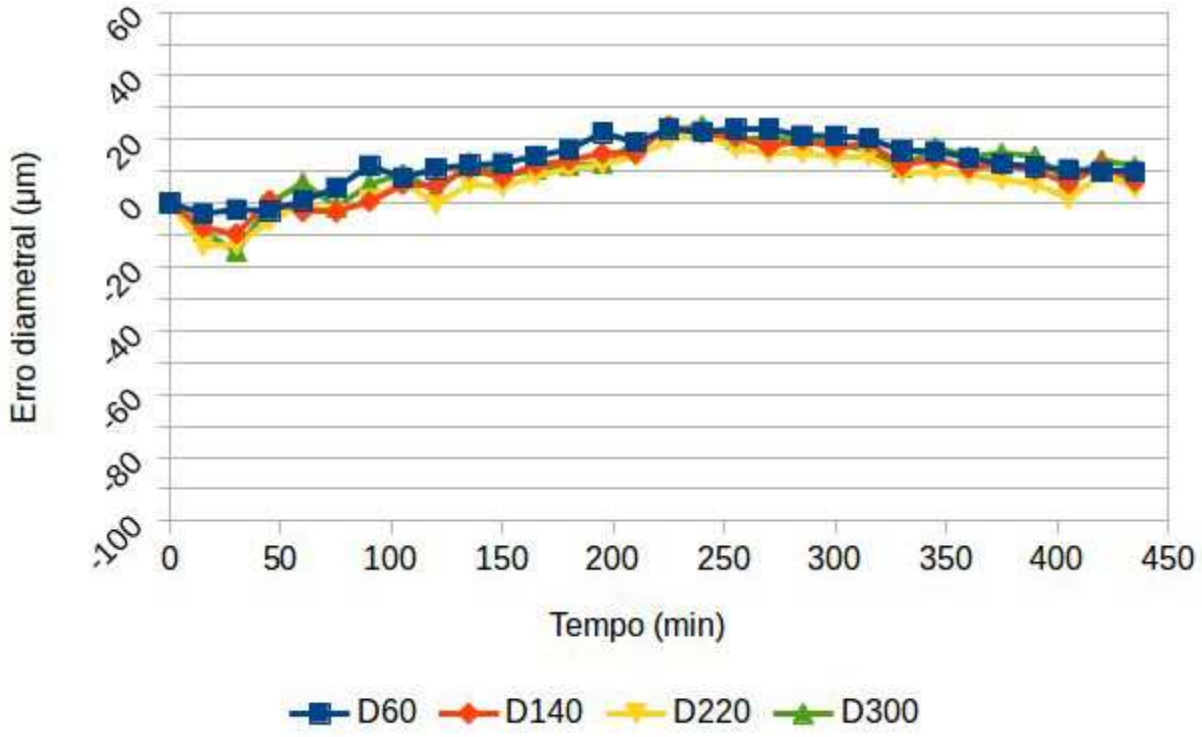

Gráfico 16 - Teste8, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 15m/min, a seco.

Pode-se observar que o aquecimento do fuso do eixo z move o erro térmico na direção x+, isto é, faz com que o diâmetro da peça torneada fique maior do que deveria. Também, não há variação efetiva de erro entre os diâmetros torneados. Isto pode ser explicado pela variação de temperatura de itens como a porca do fuso do eixo z (PORCA Z) e o mancal do servo motor do eixo z (MANCAL Z). Na coordenada Z torneada, estes dois itens se encontram simultaneamente abaixo do carro transversal de Z (vide Figura 6), e o aquecimento destes pode dilatar verticalmente a estrutura na qual o carro de z corre. Este fato faz com que o diâmetro torneado fique maior, igualmente ao longo de todo eixo x (Figura 13).

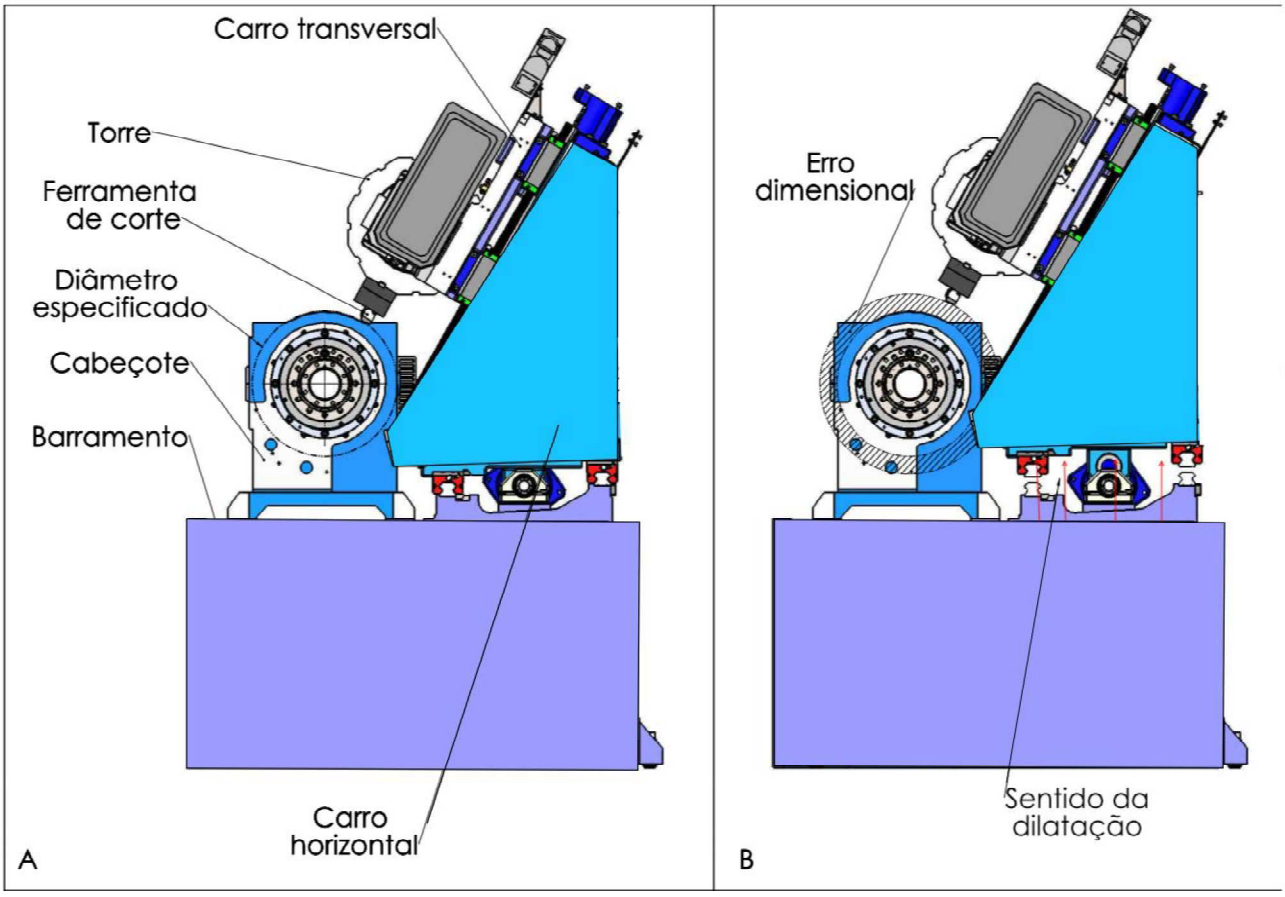

Figura 13 - A)Vista lateral direita e conjunto do eixo Z B)Direção da dilatação da estrutura com consequente aumento do diâmetro torneado.

A seguir serão exibidos os resultados da repetição dos testes já realizados, porém com o uso de fluido refrigerante durante a fase de aquecimento, a começar pelo aquecimento do eixo-árvore, e, posteriormente, eixos x e z.

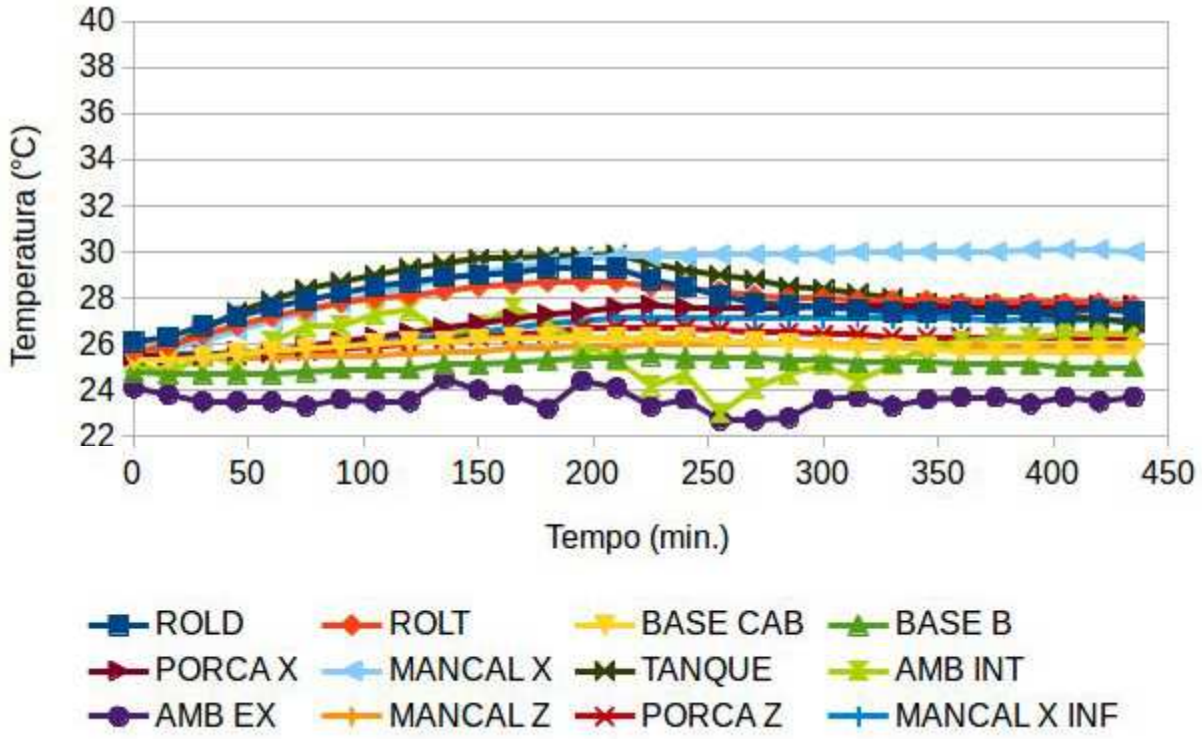

Gráfico 17 - Teste9, variação das temperaturas, 500 rpm, com fluido, diâmetro 300 mm

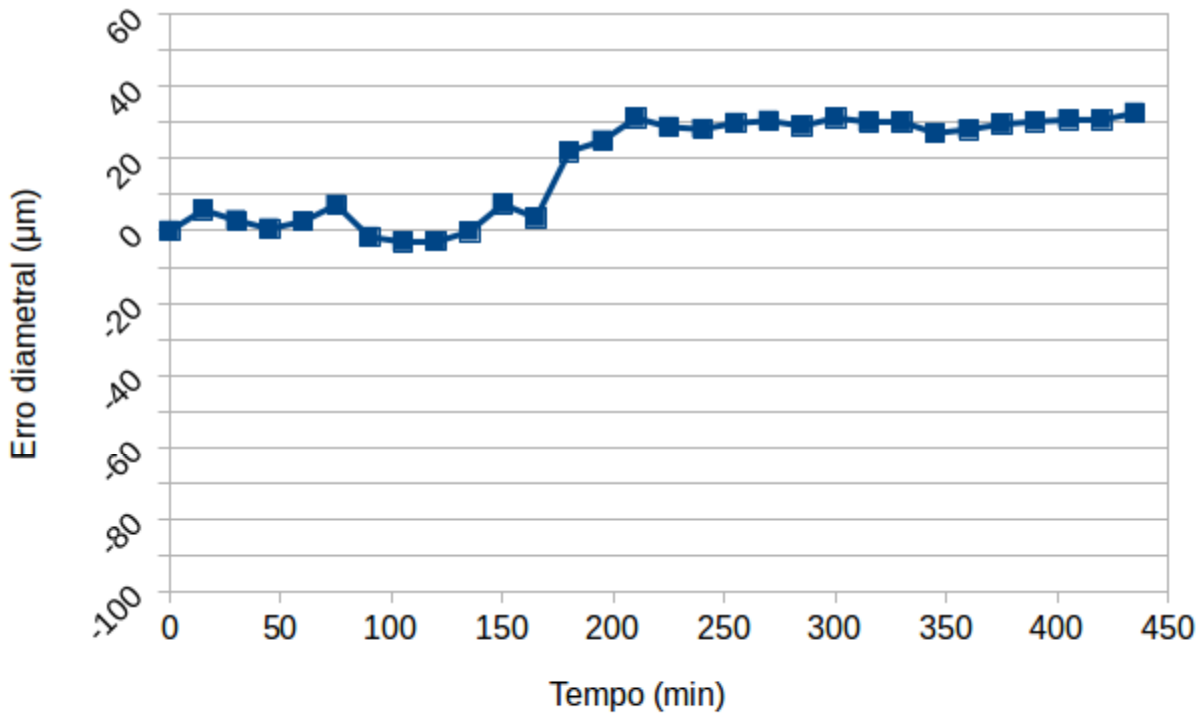

Gráfico 18 - Teste9, erro diametral, 500 rpm, com fluido, diâmetro torneado 300 mm.

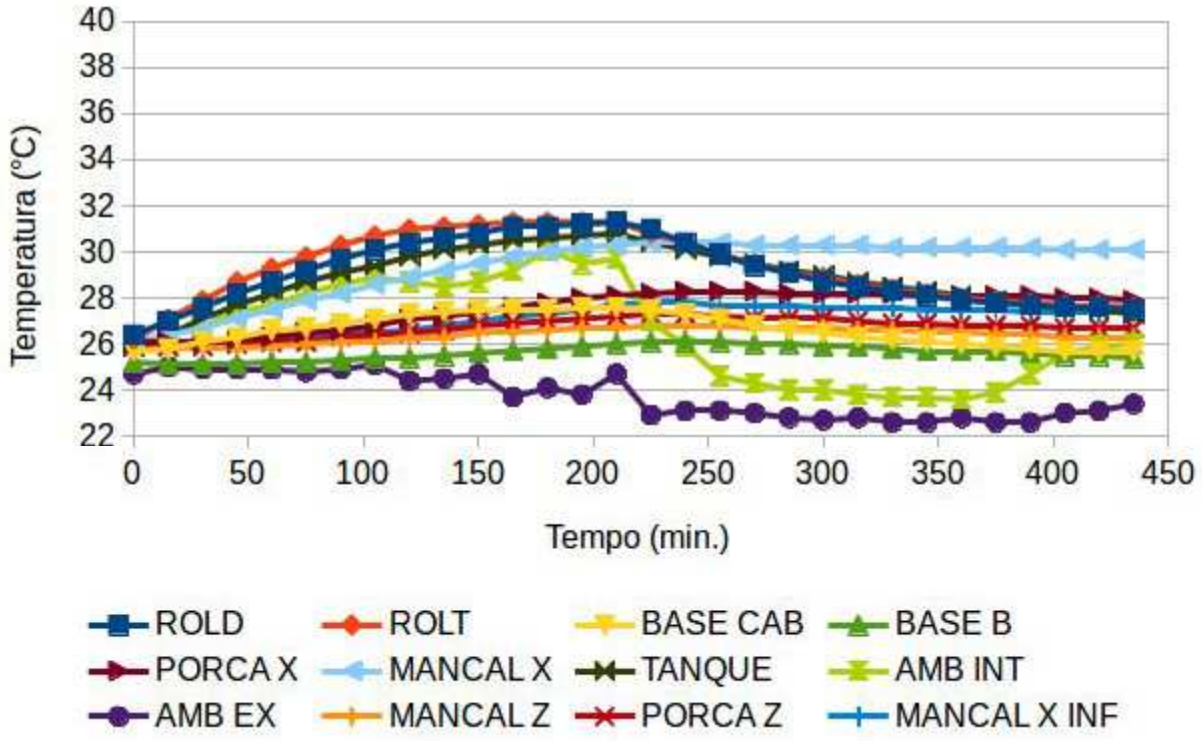

Gráfico 19 - Teste10, variação das temperaturas, 2000 rpm, com fluido, diâmetro 220 mm

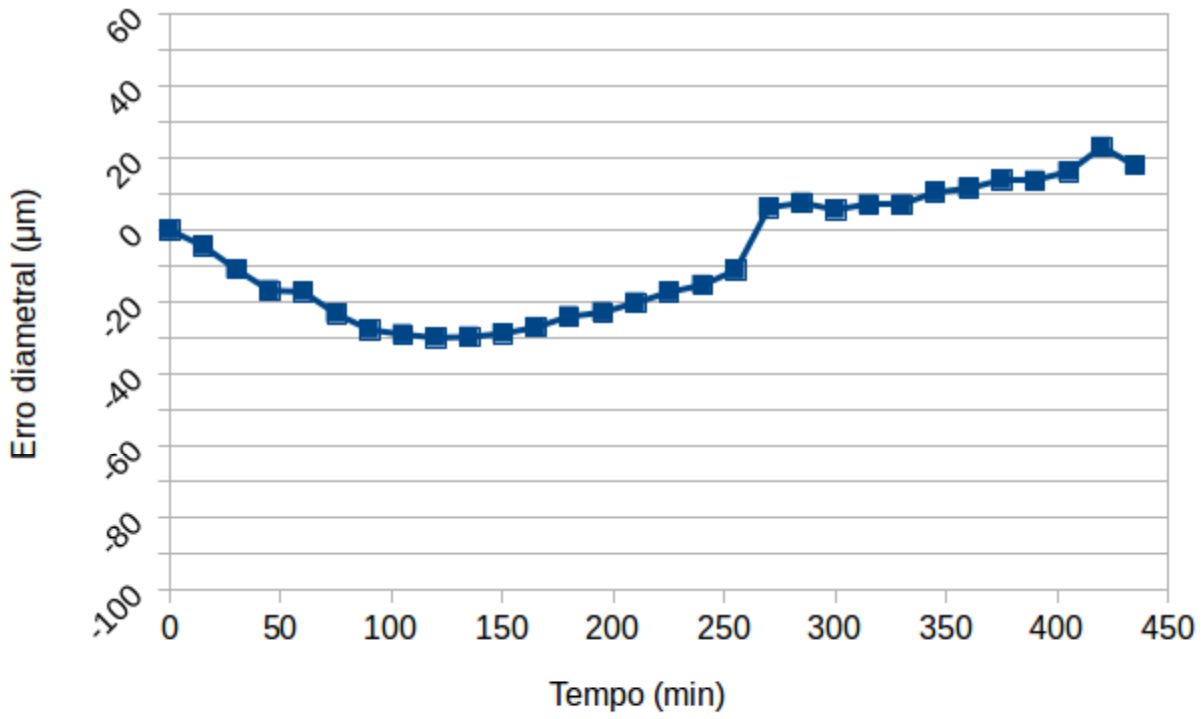

Gráfico 20 - Teste10, erro diametral, 2000 rpm, com fluido, diâmetro torneado 220 mm

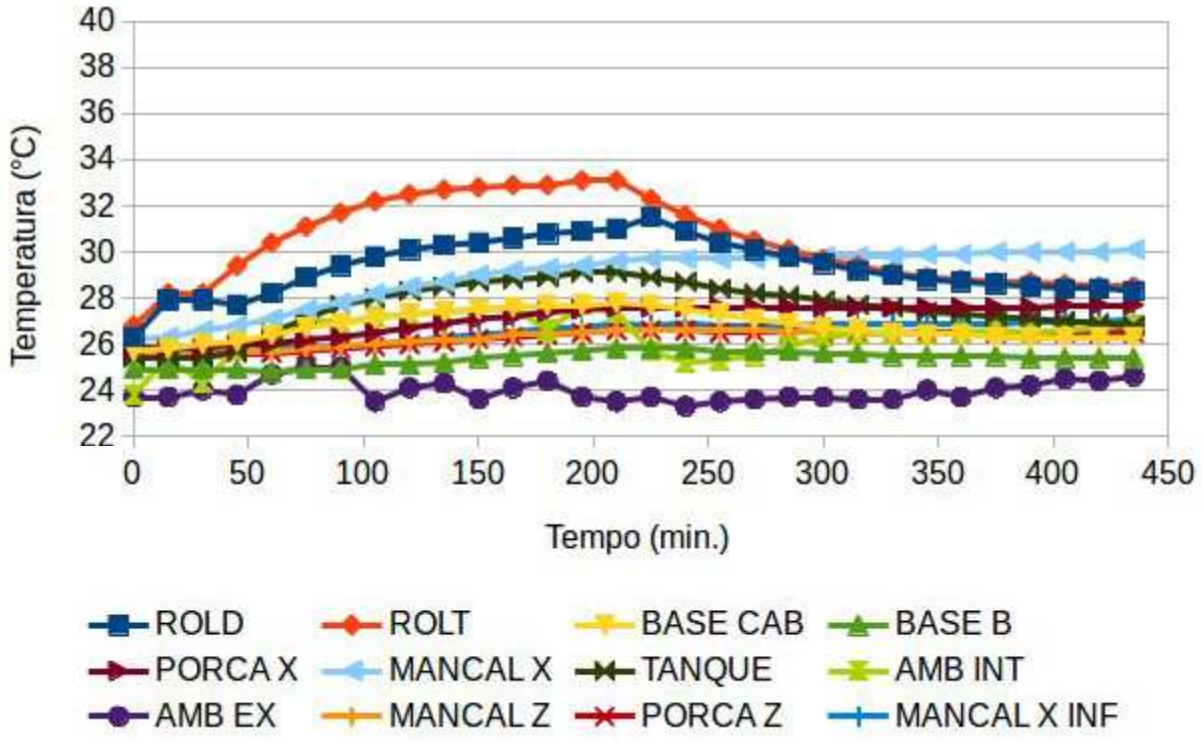

Gráfico 21 - Teste11, variação das temperaturas, 3500 rpm, com fluido, diâmetro 140 mm

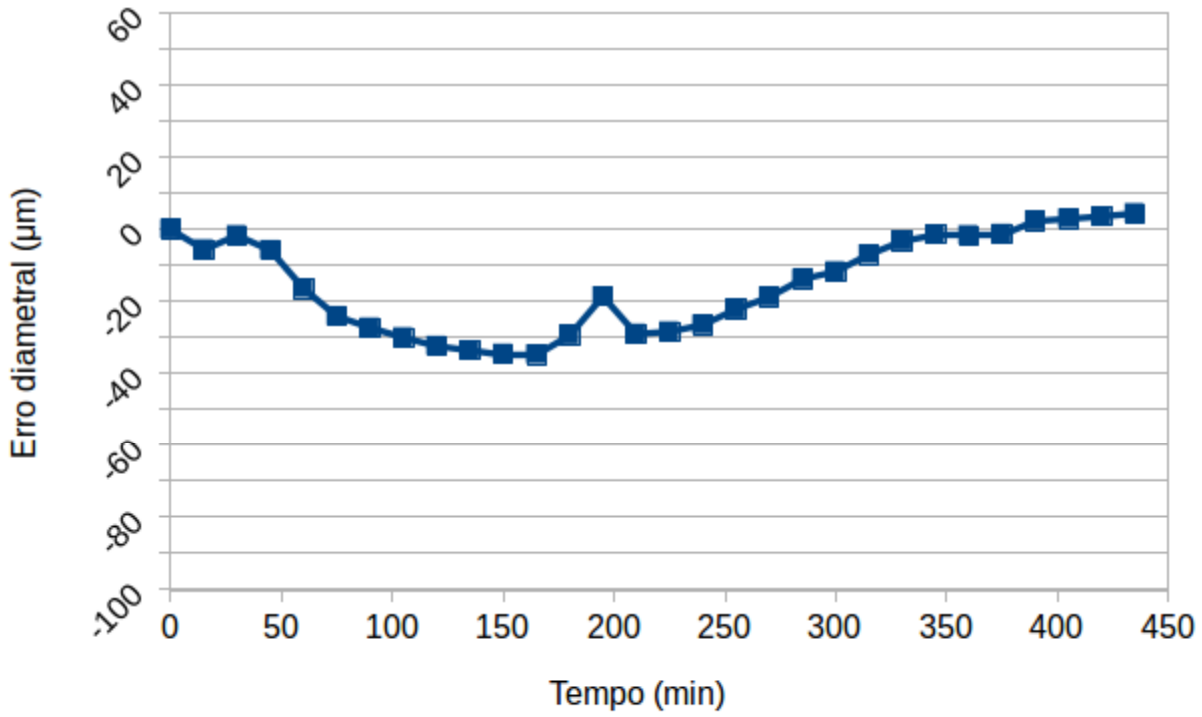

Gráfico 22 - Teste11, erro diametral, 3500 rpm, com fluido, diâmetro torneado 140 mm.

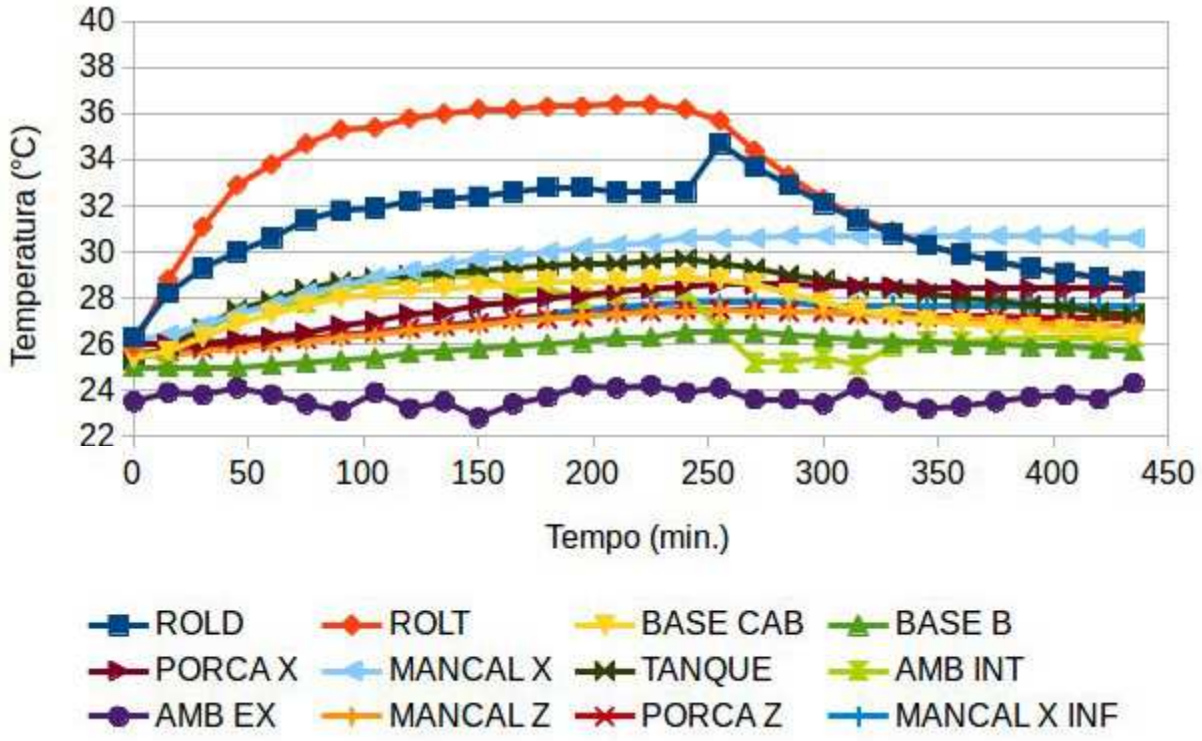

Gráfico 23 - Teste12, variação das temperaturas, 5000 rpm, com fluido, diâmetro 60 mm

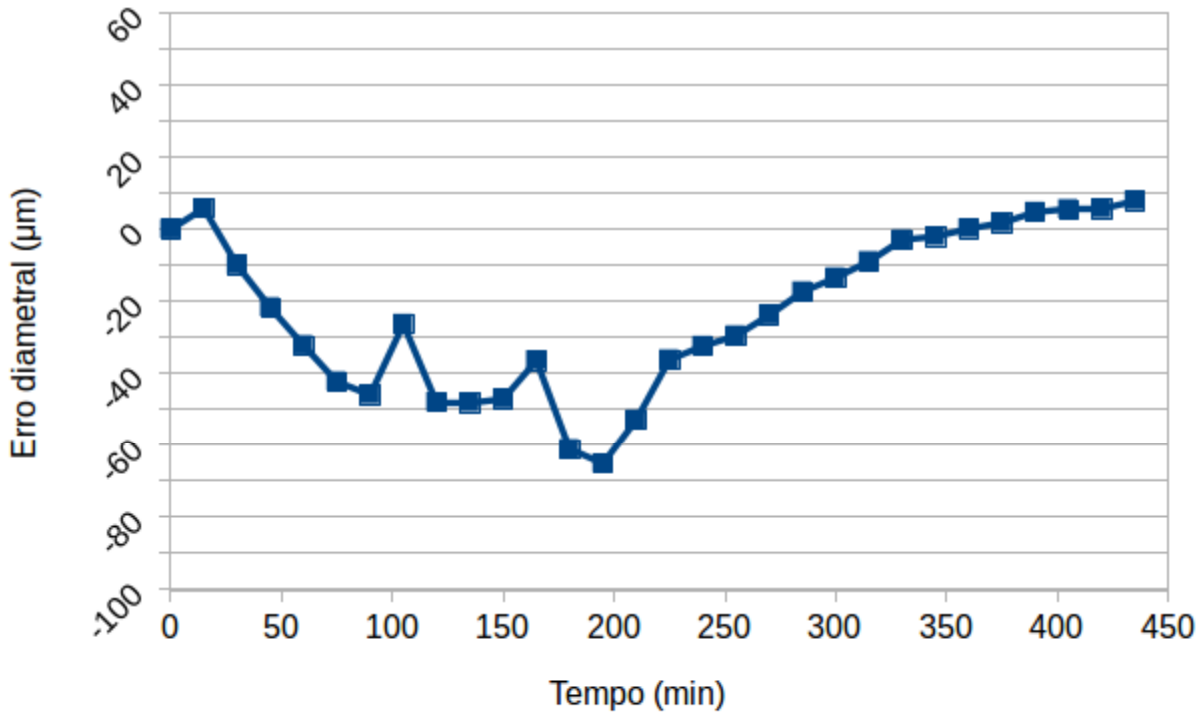

Gráfico 24 - Teste12, erro diametral, 5000 rpm, com fluido, diâmetro torneado 60 mm.

Nota-se que os componentes do eixo árvore atingem temperaturas um pouco menores nos testes com o uso de fluido refrigerante em comparação com os testes em que o fluido refrigerante não é usado. O desvio diametral também se torna um pouco menor neste caso (-30 a -70, versus -30 a -100 µm no caso a seco).

Observou-se o mesmo comportamento dos testes a seco, com grande influência das temperaturas dos rolamentos traseiro e dianteiro no comportamento do erro.

Observa-se também que a temperatura do fluido do tanque segue quase o mesmo padrão de aquecimento e resfriamento que os rolamentos. O aquecimento do fluido deve-se praticamente ao calor produzido na bomba do tanque. O calor trocado entre o fluido e o corpo-de-prova, durante usinagem, poderia ter influência na temperatura do fluido. Porém, esta parece ser mínima, já que o torneamento dura pouco mais de 4 s por peça.

A temperatura do ambiente interno também parece sofrer mudanças repentinas entre as fases de aquecimento e resfriamento (após 195 min). Isso pode ser explicado pelo fluido refrigerante que está dissipado no ambiente interno durante o aquecimento e ausente durante o resfriamento. Isto é, a refrigeração não é utilizada na fase de resfriamento, assim como os demais eixos.

No teste 9 o erro parece ter sofrido influência das temperaturas dos componentes do eixo X e fizeram com que o desvio diametral se tornasse positivo durante a fase de resfriamento, também devido as baixas temperaturas dos componentes do eixo árvore. Porém, esse desvio positivo não tendeu a zero ao final da fase de resfriamento. Mais testes seriam necessários para se averiguar esse comportamento.

A seguir serão exibidos os resultados dos testes de movimentação dos eixos com o uso de fluido refrigerante.

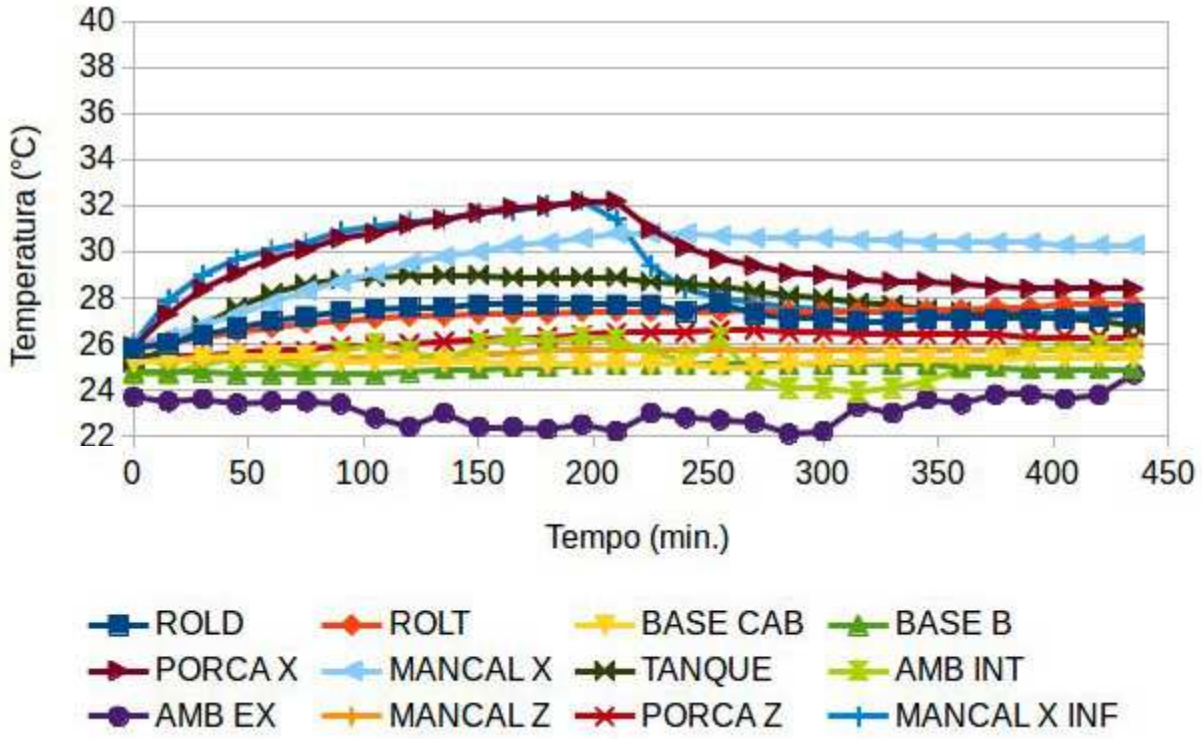

Gráfico 25 - Teste 13, variação das temperaturas, eixo x a 30 m/min

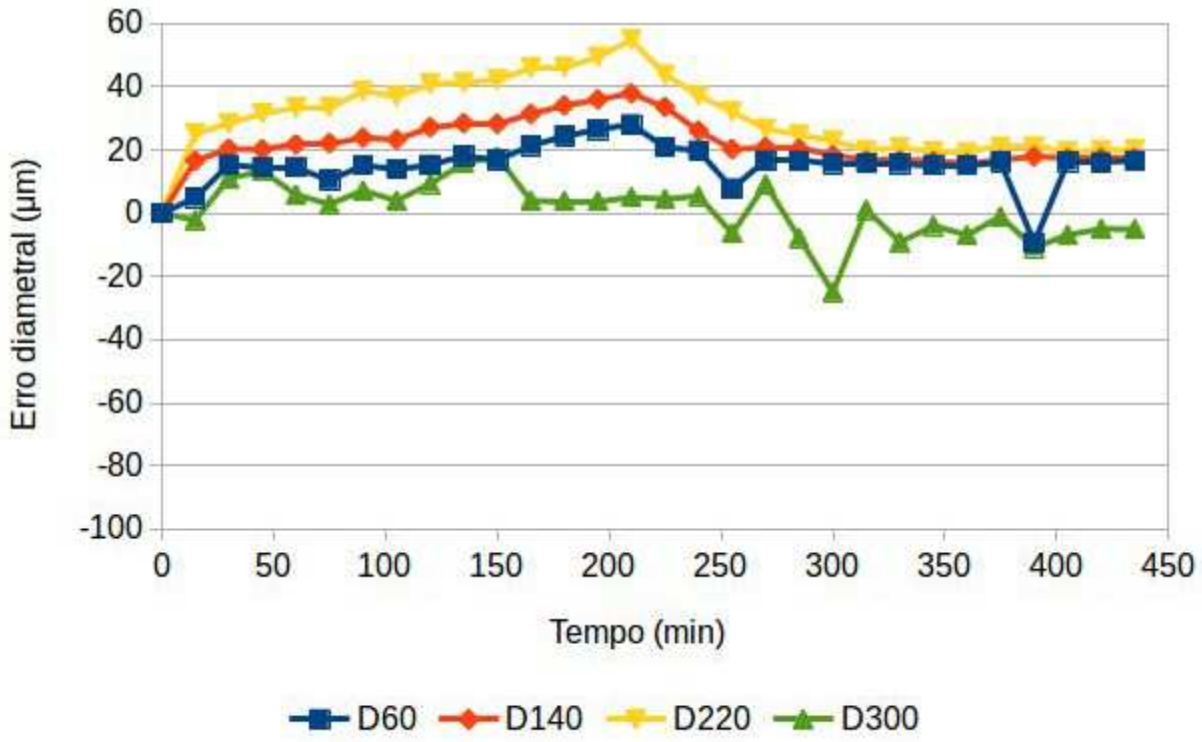

Gráfico 26 - Teste13, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo X a 30m/min, uso de fluido refrigerante

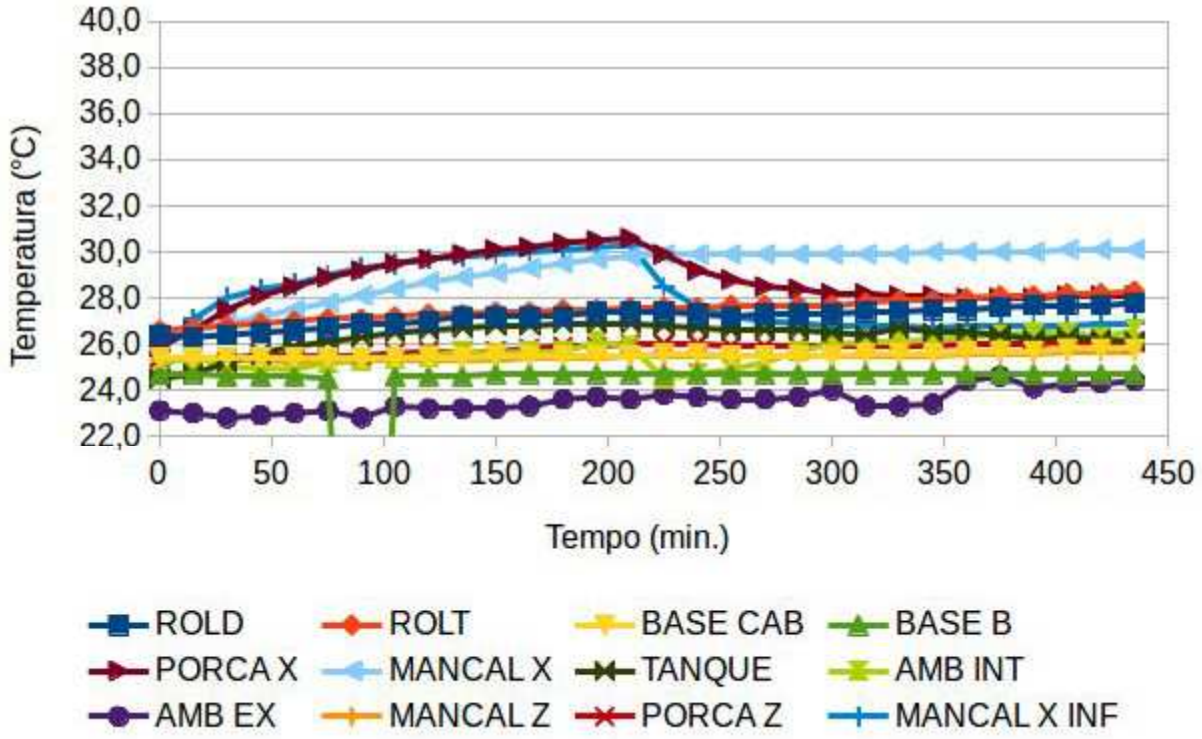

Gráfico 27 - Teste14, variação das temperaturas, eixo x a 15m/min, uso de fluido refrigerante.

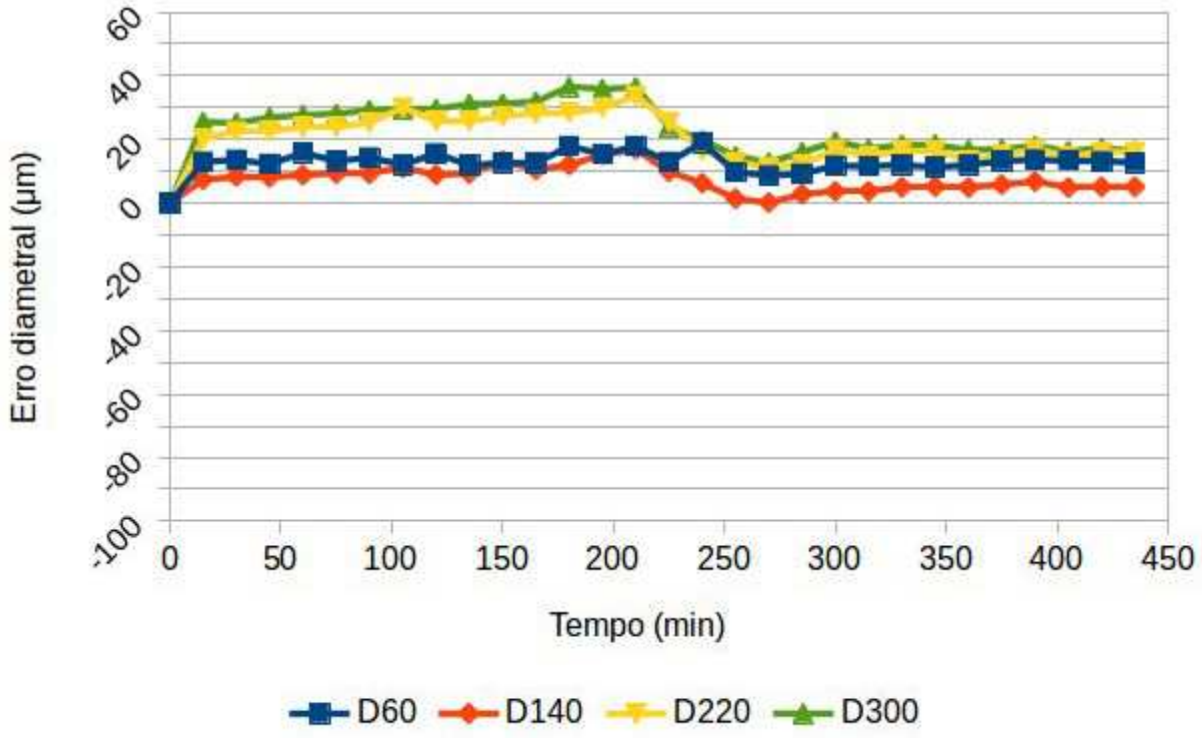

Gráfico 28 - Teste14, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo X a 15m/min, uso de fluido refrigerante

Nota-se que o desvio diametral se torna um pouco maior, no efeito de deixar o diâmetro torneado maior do que deveria (média entre os diâmetros de +13 a +19 a seco versus +26 a +31 µm com fluido). Assim, a temperatura do fluido no tanque parece afetar o erro de forma a aumentar o diâmetro torneado. Isto pode explicar também o porquê do desvio diametral nos testes com aquecimento do eixo-árvore ter sido menor com o uso do fluido. O aquecimento do eixo árvore move o erro para um diâmetro menor (negativo) e o uso do fluido move o erro para um diâmetro maior(positivo). Isso pode ser em parte explicado pela baixa temperatura dos componentes do eixo-árvore quando fluido é usado. Este parece resfriar o eixo-árvore, fazendo com que o erro negativo fique mais próximo de zero. Outra possibilidade é que a alta temperatura do tanque de fluido refrigerante aqueça a base da estrutura da máquina-ferramenta, onde a maior parte do carro transversal se movimenta, provocando uma dilatação vertical de toda essa estrutura.

Um fenômeno interessante ocorreu com o diâmetro de 300 mm, entre os testes 13 e 14 (movimentação dos eixos, velocidades de 30 e 15 m/min e uso de fluido). No teste 13 o diâmetro de 300 mm é o que apresenta menor desvio, enquanto no 14 apresenta o maior. Este fato parece ocorrer também nos testes 5 e 6 (movimentação dos eixos, velocidades de 30 e 15 m/min e sem o uso de fluido), com a ressalva que, no teste 5, não há uma diferença tão efetiva entre os desvios dos diâmetros. Isto pode ter relação com as temperaturas entre os componentes de x, em diferentes velocidades. Porém mais testes com mais variações de velocidade seriam necessários para se averiguar esse fenômeno.

A seguir são exibidos os resultados do aquecimento com movimentação apenas do eixo Z com o uso de fluido refrigerante (testes 15 e 16).

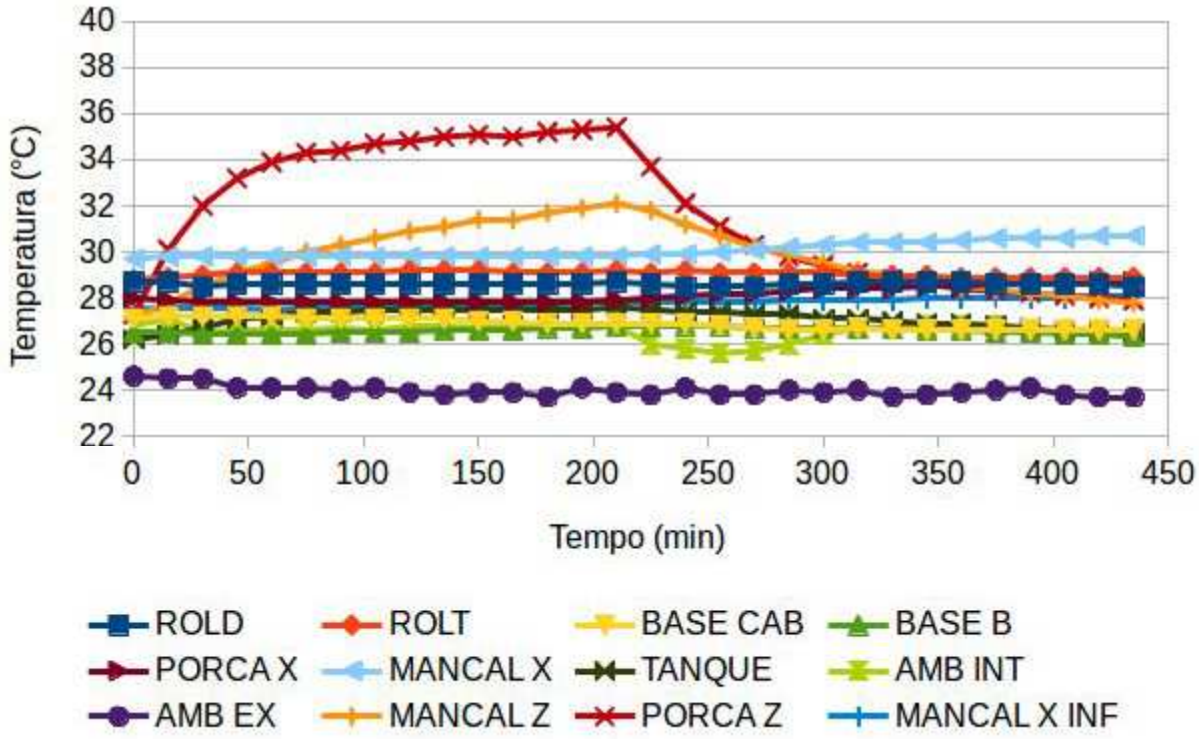

Gráfico 29 - Teste15, variação das temperaturas, eixo z a 30m/min, uso de fluido refrigerante

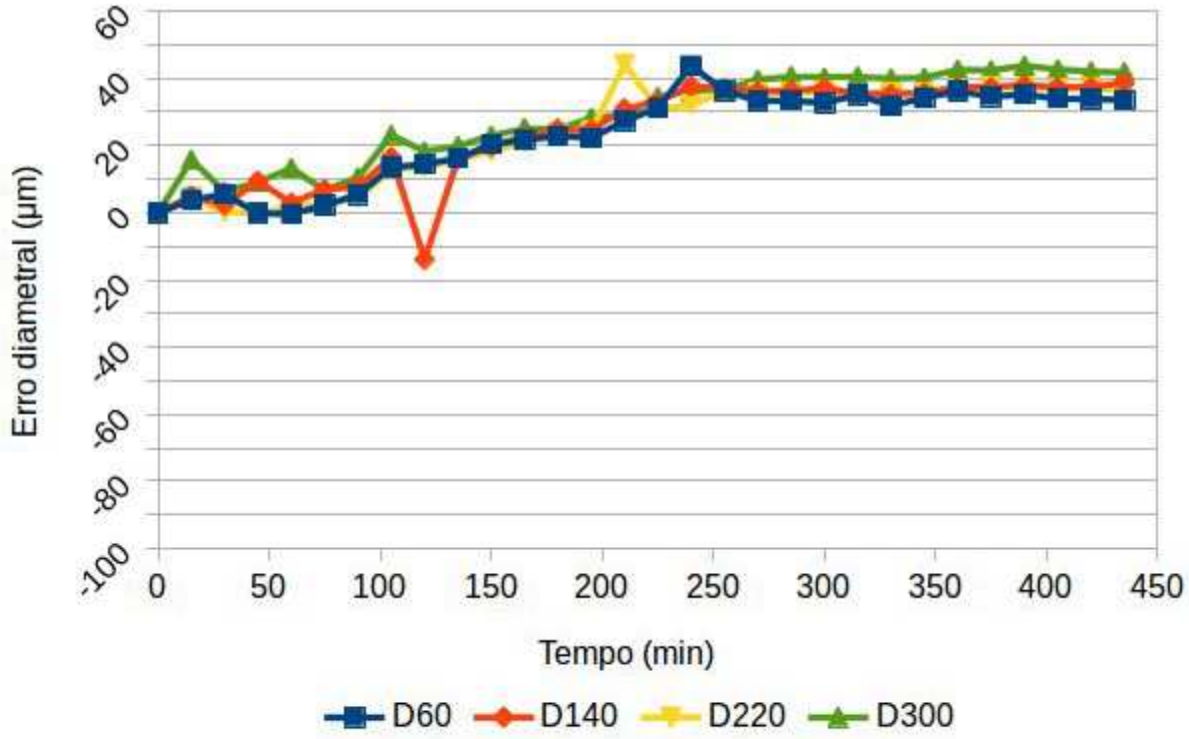

Gráfico 30 - Teste15, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 30m/min, uso de fluido refrigerante

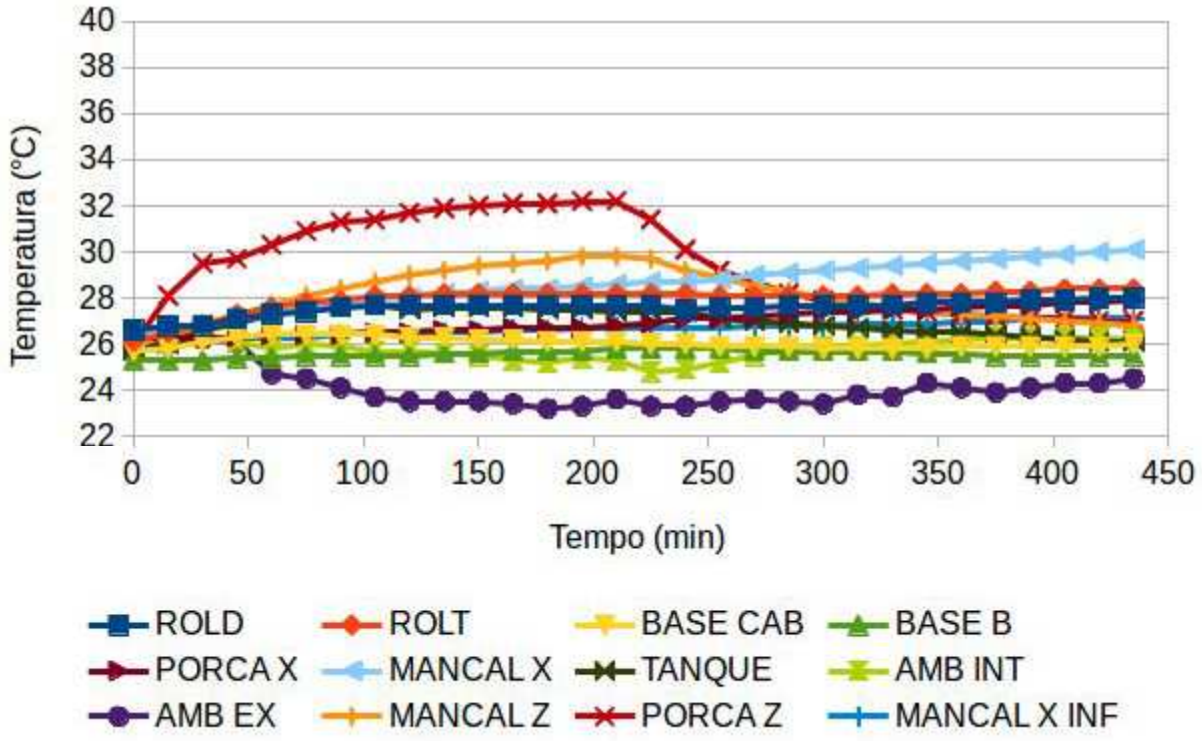

Gráfico 31 - Teste16, variação das temperaturas, eixo z a 15m/min, uso de fluido refrigerante.

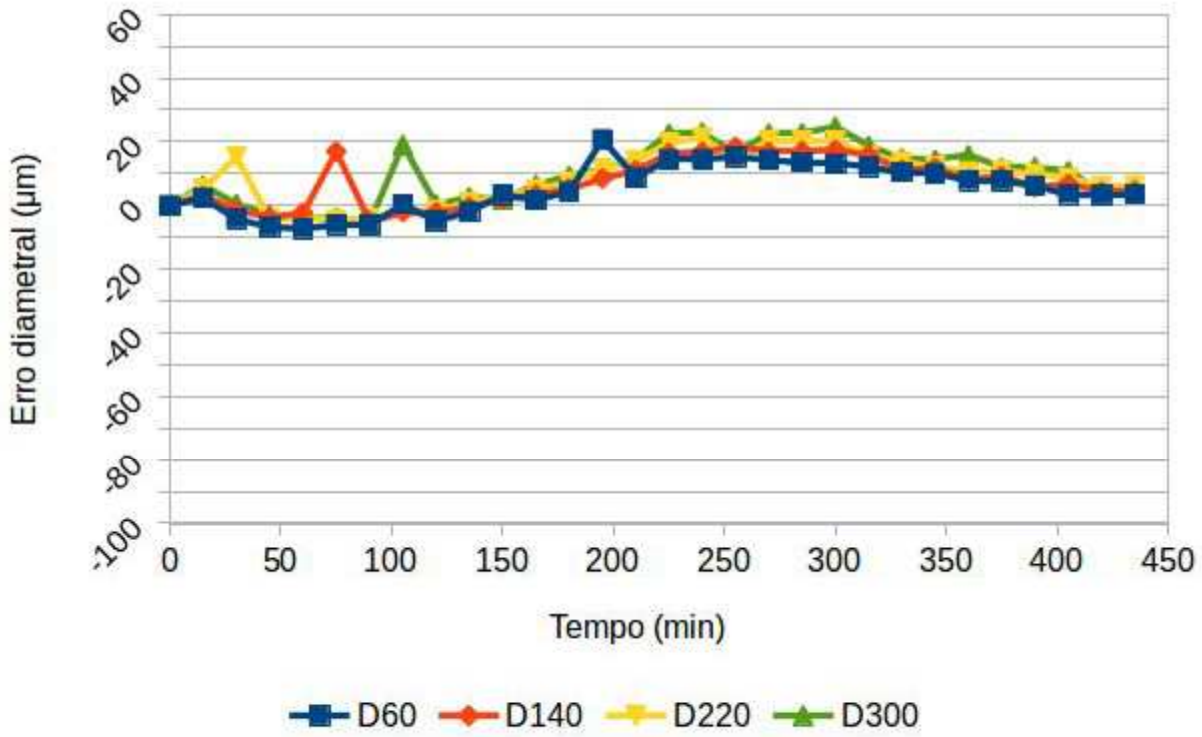

Gráfico 32 - Teste16, erro dos diâmetros 60 a 300 mm, eixo Z a 15m/min, uso de fluido

Nota-se que o uso do fluido refrigerante tem pouca influência na temperatura dos componentes do eixo z. Os desvios diametrais também não são fortemente afetados, ao se comparar com os mesmos testes sem o uso do fluido. A exceção é o teste 15, onde houve uma estabilização do erro, mesmo na fase de resfriamento.

Observou-se o mesmo comportamento do teste a seco, com forte influência do MANCAL Z e PORCA Z.

Pode-se perceber nos testes 1 a 16, que há uma grande contribuição das temperaturas dos componentes do eixo-árvore para aumento do desvio diametral, tornando o diâmetro menor. Verificou-se certa contribuição das temperaturas dos componentes dos eixos, como as porcas dos fusos x e z, para aumento do desvio diametral, tornando o diâmetro maior.

Também não se observou uma relação clara do erro ao longo do eixo x, sendo necessários mais testes para se entender a dinâmica térmica deste componente. Como o erro causado pelo aquecimento do eixo árvore é o mais significativo, os erros ao longo do eixo x e z serão tratados como o valor médio do desvio entre os diâmetros.

Em testes de movimentação, verificou-se que as temperaturas dos itens do eixo x não atingem valores muito superiores às do teste com movimentação do eixo-árvore em 5000 rpm. Atingiu-se uma temperatura máxima de 30,7°C no teste 4 e 33°C no teste 5, enquanto os outros testes de movimentação dos eixos ficaram abaixo dessa máxima. Desta forma, mesmo com o eixo x parado, a influência de seu aquecimento nos testes do cabeçote pode ter sido alta.

Outro fato interessante é que nos testes de alta velocidade, as temperaturas do rolamento traseiro (ROLT) e da estrutura fundida do eixo-árvore (BASE CAB) são praticamente idênticas nos testes com e sem fluido refrigerante. Porém, o desvio diametral do teste sem fluido é bem maior (-97 a seco versus – 65 µm com fluido). Contudo, as temperaturas do rolamento dianteiro são bem maiores no teste sem fluido refrigerante (máxima de 39,4 com fluido versus 34,7 °C a seco). Este componente parece influenciar significativamente o desvio em altas velocidades.

A seguir, são apresentados os gráficos do desvio diametral em função da temperatura para os principais componentes.

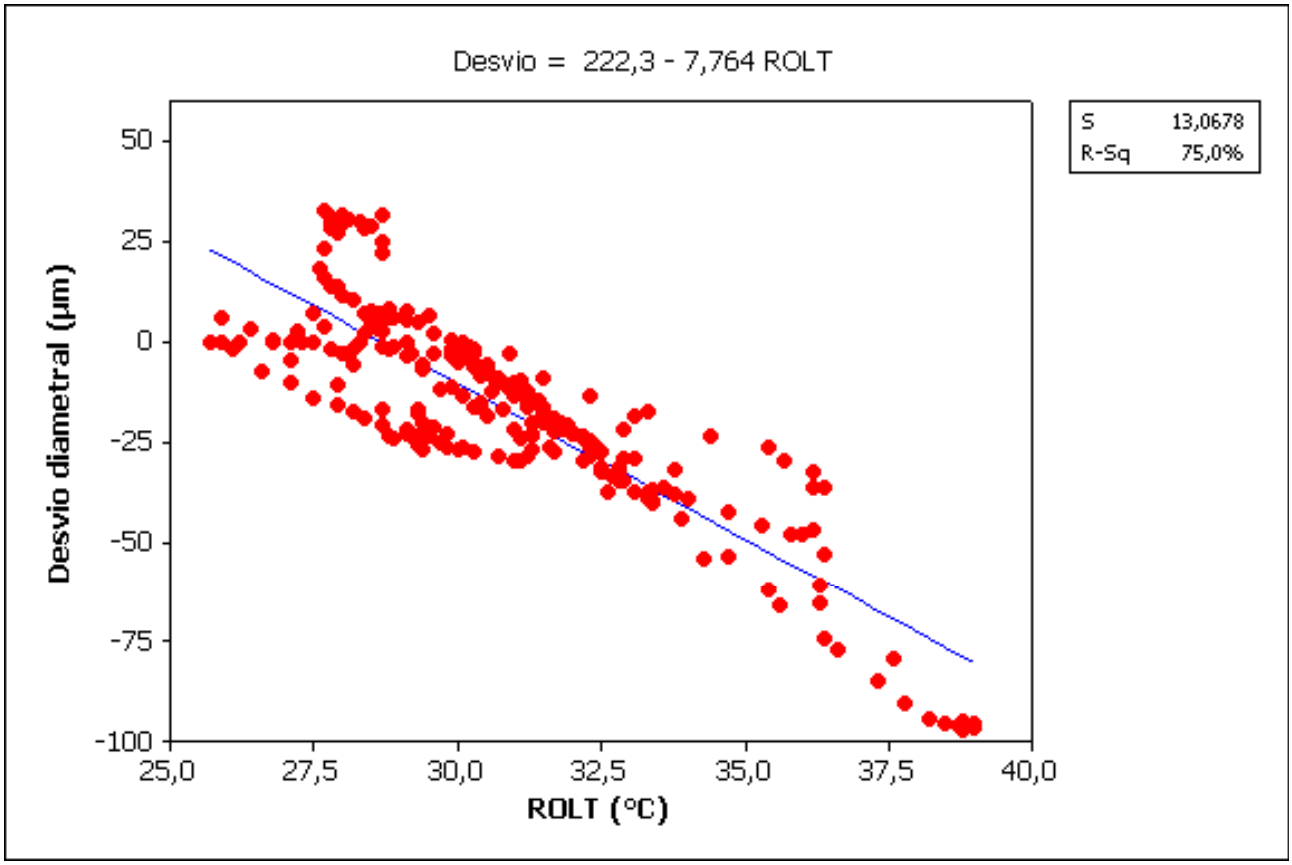

Gráfico 33 - Desvio vs temperatura do rolamento traseiro

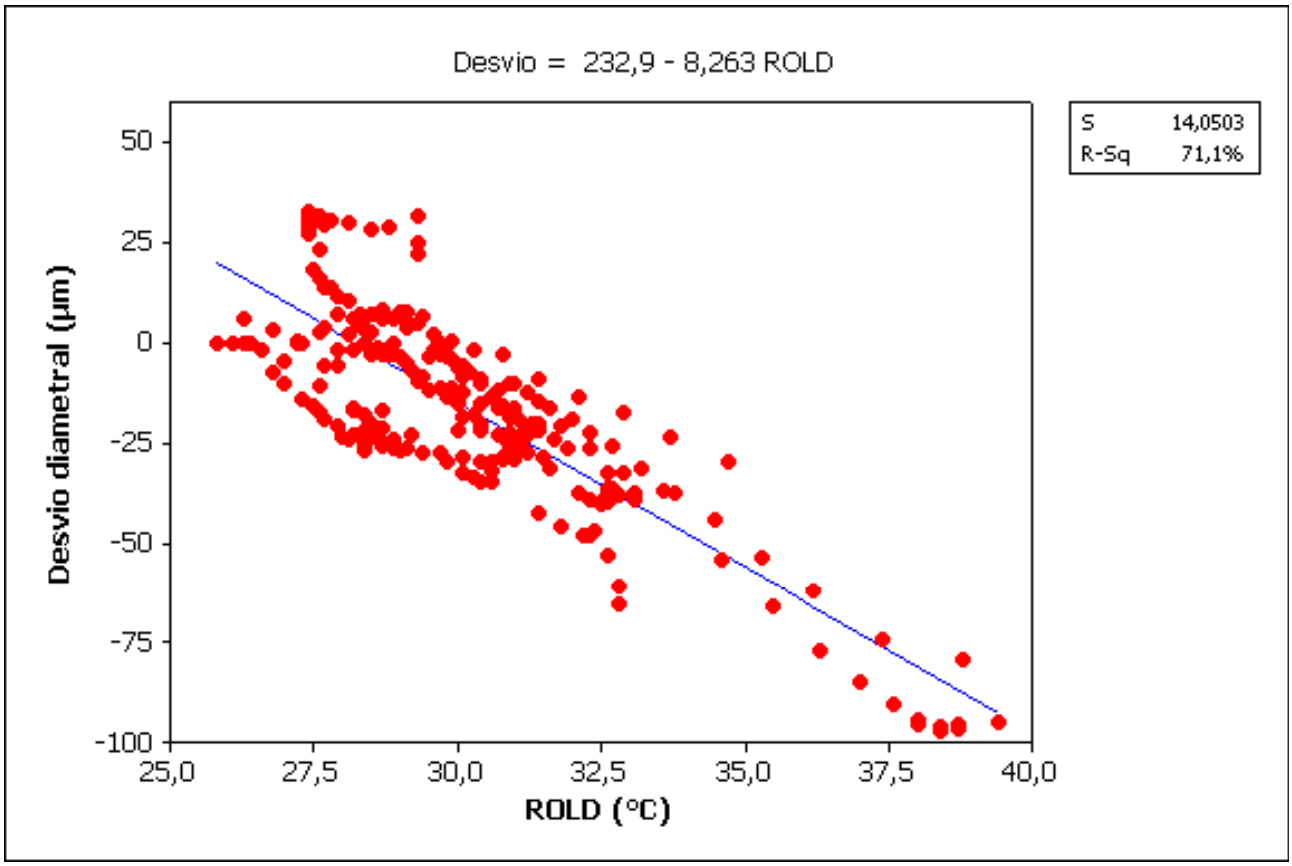

Gráfico 34 - Desvio vs temperatura do rolamento dianteiro

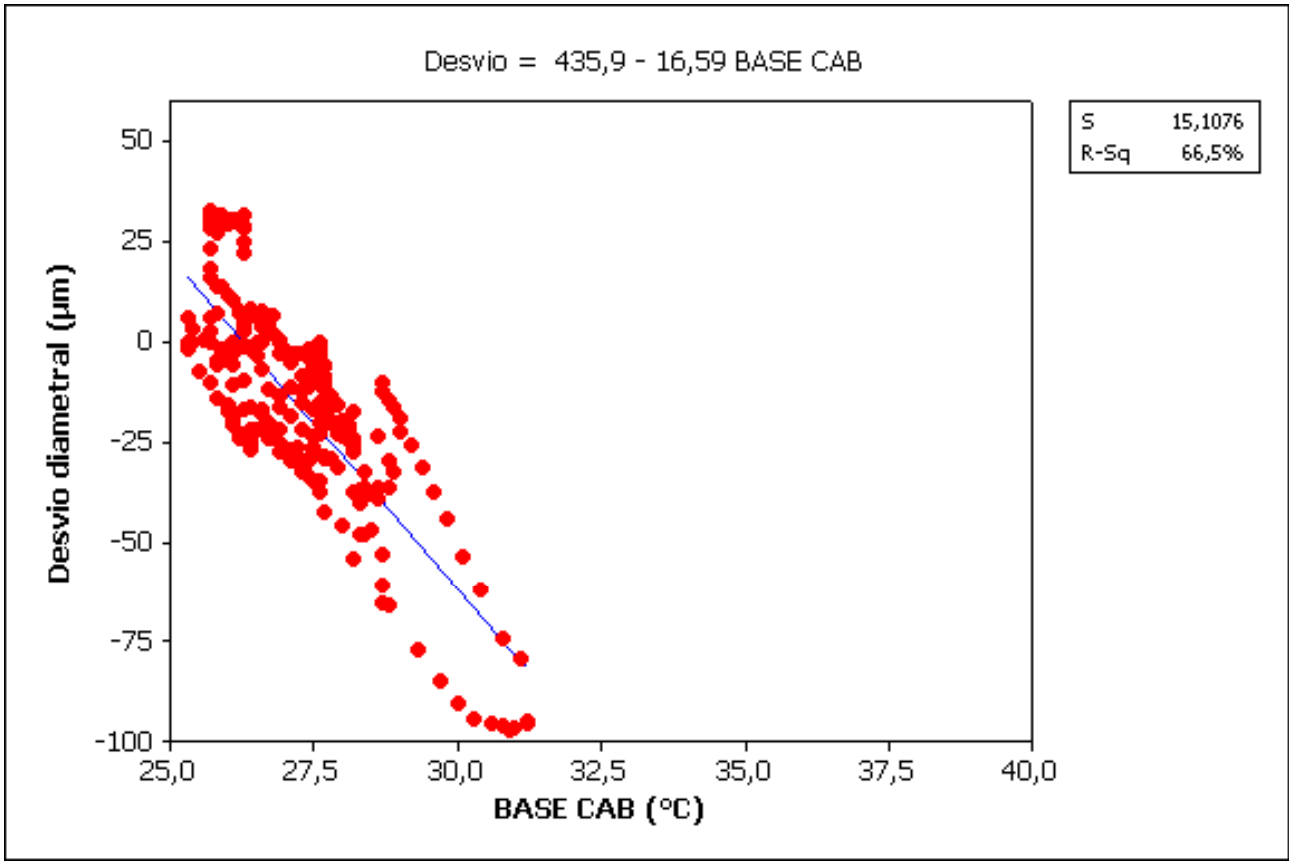

Gráfico 35 - Desvio vs temperatura da estrutura fundida do eixo-árvore

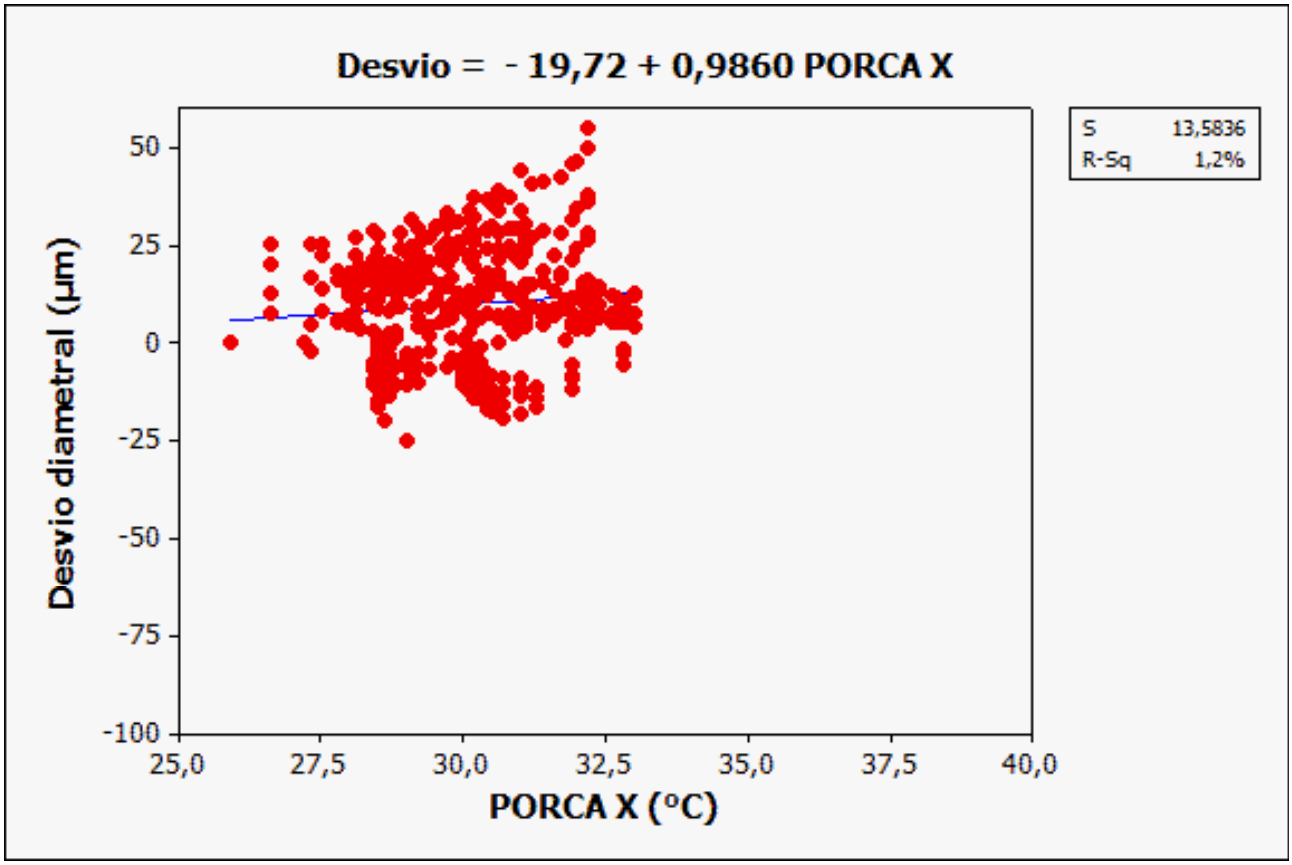

Gráfico 36 - Desvio vs temperatura da porca de X

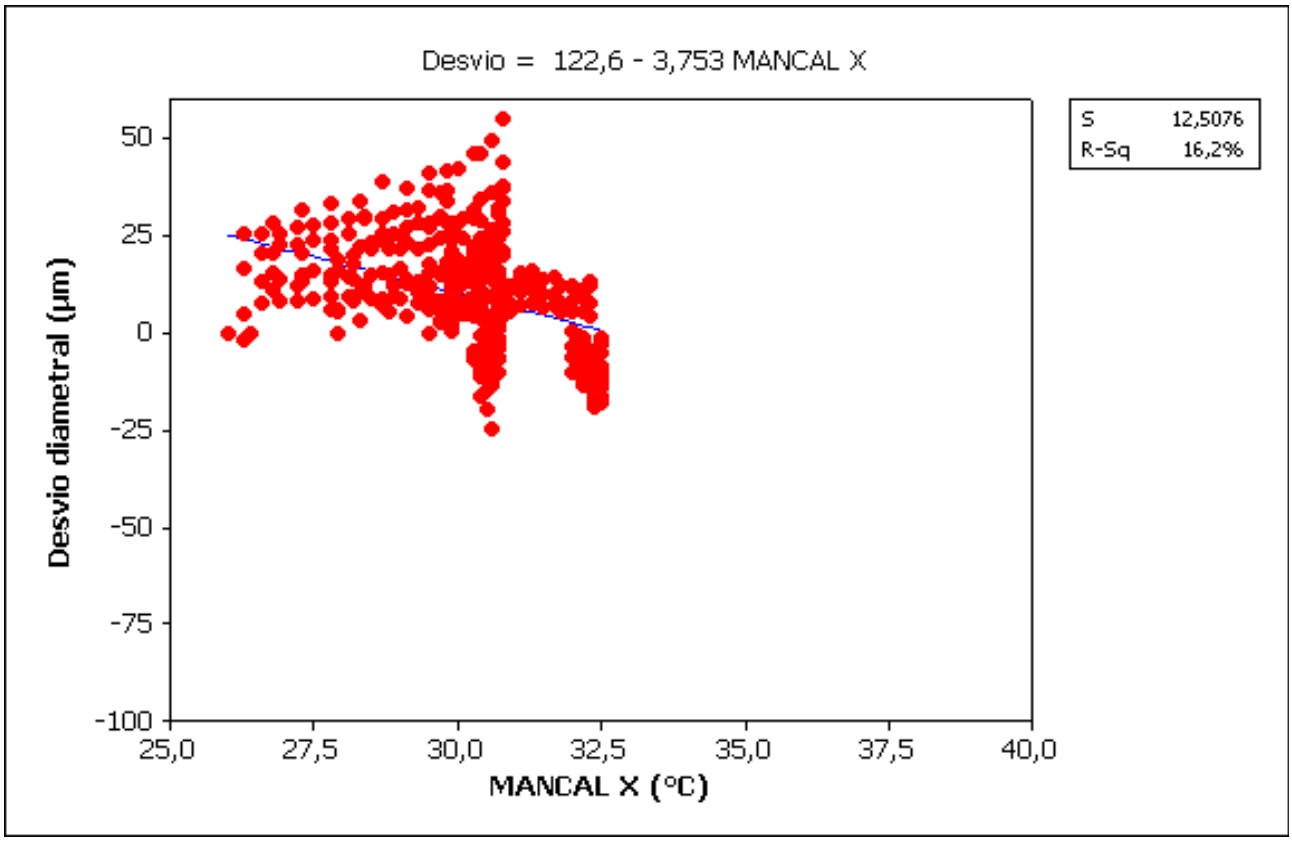

Gráfico 37 - Desvio vs temperatura do mancal superior de X

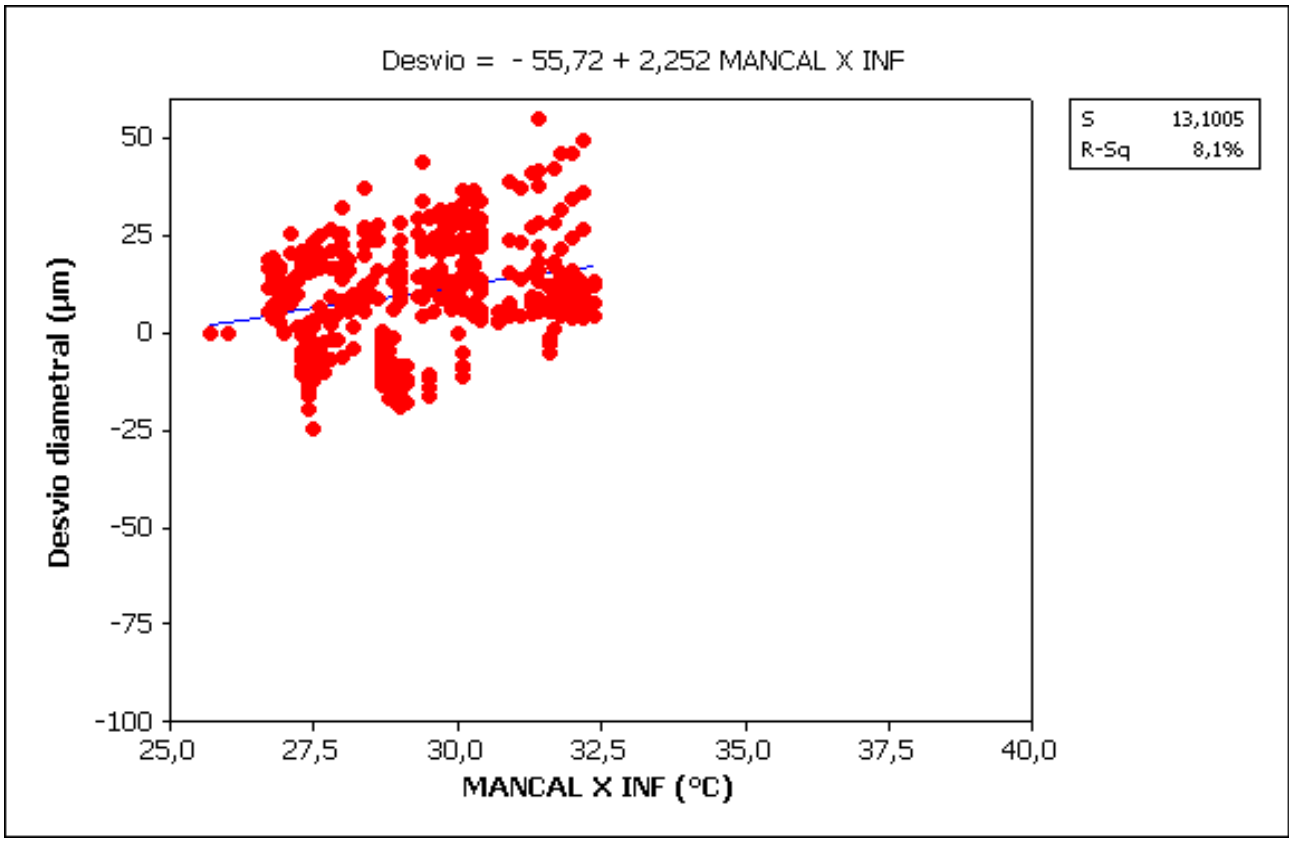

Gráfico 38 - Desvio vs temperatura do mancal inf de X

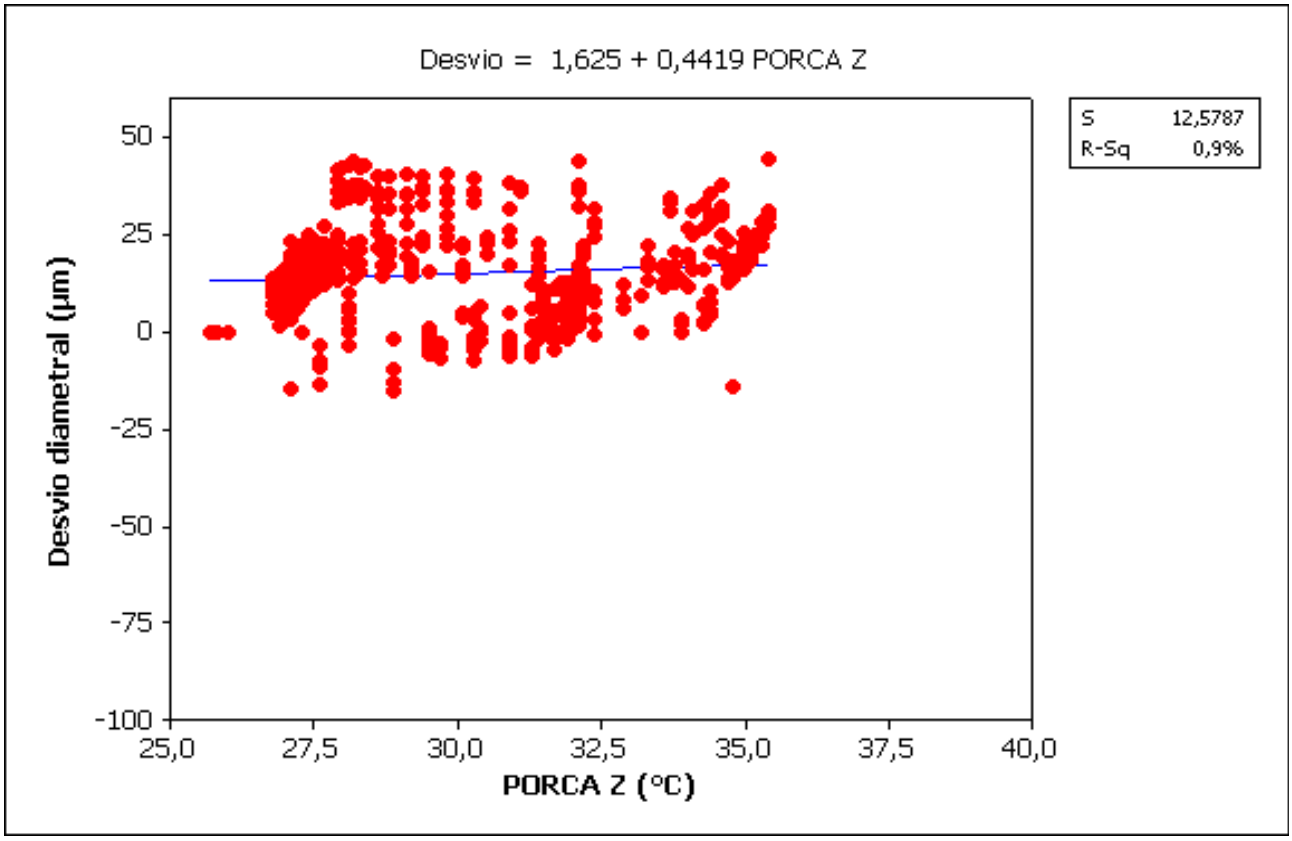

Gráfico 39 - Desvio vs temperatura da porca de Z

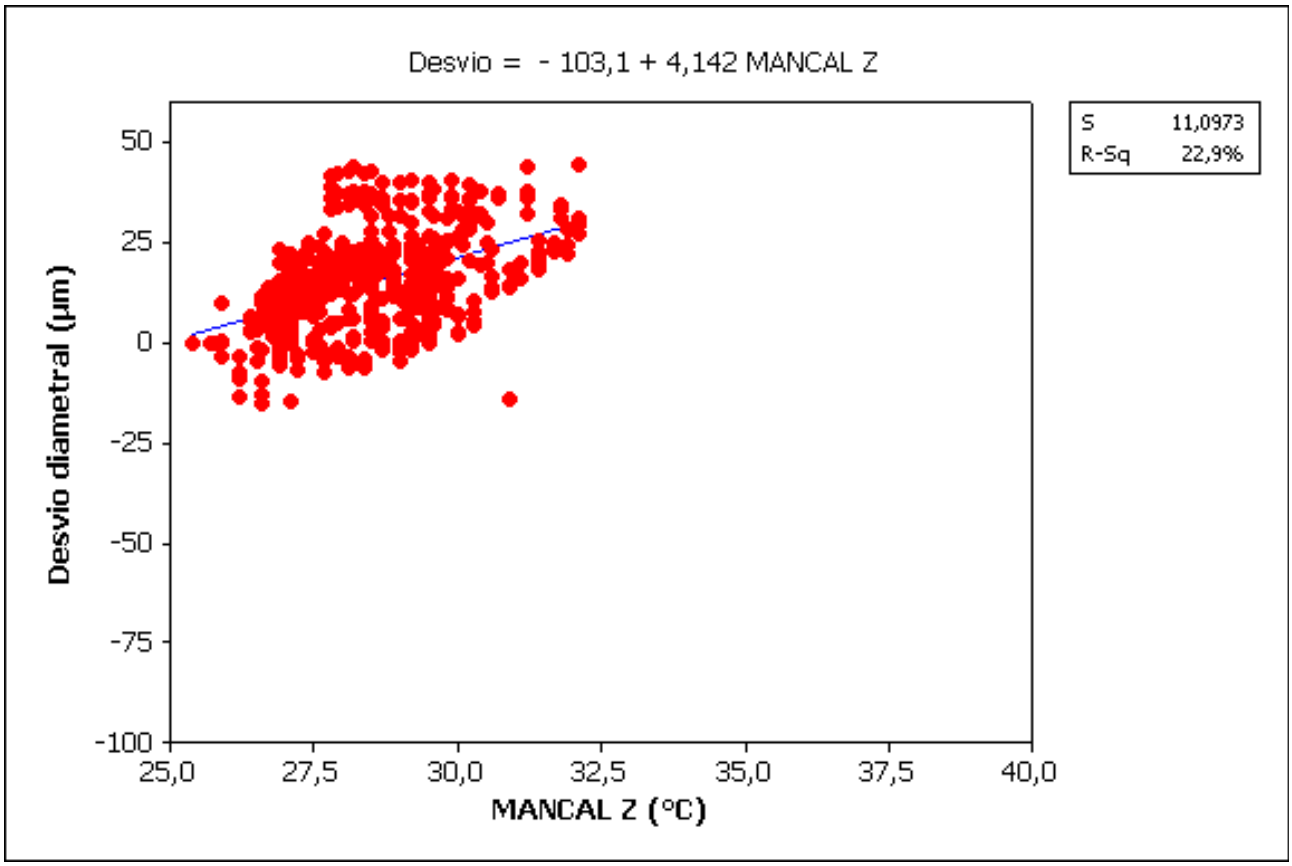

Gráfico 40 - Desvio vs temperatura do mancal de Z

Para os Gráficos 33 e 34 observou-se uma tendência de linearidade entre a temperatura e o erro diametral, mesmo havendo um aumento de temperatura de outros itens durante o ensaio. Todavia o coeficiente de correlação é baixo (muito menor que 95%). No caso dos componentes dos eixos x e z, há apenas uma nuvem de pontos não existindo uma função definida para o erro. Mesmo se cada diâmetro torneado for exibido separadamente a nuvem de pontos continua dispersa. Supõe-se que o erro é causado pela variação simultânea de temperatura de vários componentes. Nestes casos pode-se usar regressão de múltipla variáveis.

5. Modelamento

De posse de todos os dados dos testes 1 a 16 foram realizadas regressões lineares para cada variável de temperatura. Os modelos foram agrupados de acordo com o menor desvio padrão (s), calculado conforme a Equação 6.

$$S=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Desvio\,real-Desvio\,modelado\right)^2}{N-1}} \qquad (6)$$

A Tabela 2 classifica os modelos obtidos por meio de regressão linear, utilizando o método dos mínimos quadrados, de acordo o desvio padrão e número de variáveis de temperatura. Esse resultado foi obtido utilizando a função *BestSubsets* do programa estatístico MiniTab 16. Os resultados de dois melhores modelos para cada número de variável são mostrados da seguinte forma na tabela 2: o modelo de uma variável com menor desvio padrão usa a leitura de temperatura do rolamento traseiro (ROLT). Já o modelo de duas variáveis com menor desvio padrão usa a leitura de temperatura da estrutura fundida do eixo-árvore (BASE CAB) e do barramento fundido (BASE B). Para os demais números de variáveis, estão indicadas as variáveis utilizadas para o modelo adotado.

Tabela 2 - Melhores modelos por n° de variável

N° de Variáveis	ROLD	ROLT	BASE CAB	BASE B	PORCA X	MANCAL X	TANQUE	AMB INT	AMB EX	MANCAL Z	PORCA Z	MANCAL X INF	DIÂMETRO	Desvio padrão
1		x												14,29
1	x													14,54
2			x	x										11,75
2		x									x			13
3			x							x		x		10,87
3			x	x								x		10,93
4			x	x						x		x		10,23
4			x							x	x	x		10,32
5	x		x							x	x	x		9,81
5			x	x				x		x		x		9,87
6	x		x				x			x	x	x		9,55
6	x		x					x		x	x	x		9,62
7	x		x	x			x			x	x	x		9,35
7	x		x				x			x	x	x	x	9,44
8	x		x	x			x			x	x	x	x	9,23
8	x		x		x	x		x		x	x	x		9,28
9	x		x	x	x	x	x			x	x	x		9,17
9	x		x	x			x	x		x	x	x	x	9,18
10	x		x	x	x	x	x			x	x	x	x	9,09
10	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x		9,1
11	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	9
11	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	9,03
12	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	8,99
12	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	9
13	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	8,99

Algumas observações importantes podem ser deduzidas das Tabela 2. Embora o rolamento traseiro seja, de certa forma, eficaz sozinho na previsão do erro, quando a regressão é feita com mais termos, este só se torna relevante em 3 modelos. Outra característica dos resultados é a baixa relevância da temperatura do ambiente externo na regressão linear. A variável DIÂMETRO se torna relevante a partir da sexta variável, e com uma baixa queda de desvio padrão.

O Gráfico 41 mostra o número de variáveis em função do menor desvio padrão obtido.

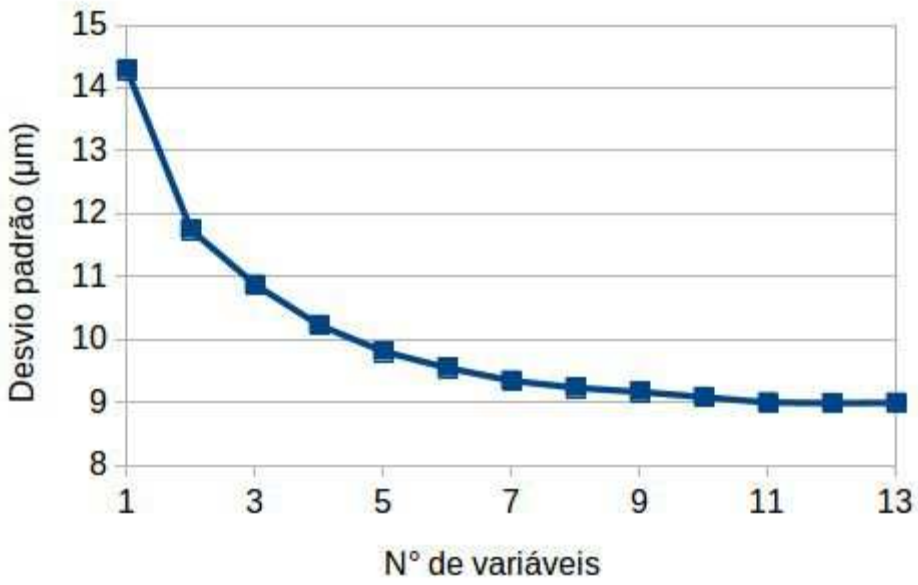

Gráfico 41 - Desvio padrão vs n° de variáveis

Observa-se ver que, a partir da sexta variável, não há uma redução significativa do desvio padrão, sendo que ao se adotar um modelo com 7 variáveis tem-se uma redução de 0,2 µm. Apenas como comparação para uma estratégia posterior, será escolhido o modelo de 6 variáveis. A Equação 7 traz o modelo obtido por meio de regressão linear com 6 variáveis.

DESVIO DIAMETRAL = 79,3-8,81*ROLD-2,72*BASE B-3,86*AMB INT+12,9*MANCAL Z-4,69*PORCA Z+ 4,65*MANCAL X INF. *(7)*

Esta primeira estratégia de modelamento, com o seu subsequente modelo de seis variáveis, foi usada durante a análise dos resultados da validação para comparação de uma segunda estratégia de modelamento, envolvendo um modelo com menor número de variáveis. O modelo será proposto com base nos modos de erros térmicos analisados, isto é, no erro que cada componente causa separadamente. Por exemplo, o aumento das temperaturas dos componentes do eixo-árvore diminuem o diâmetro torneado. O aumento das temperaturas dos componentes dos eixos x e z aumentam o diâmetro torneado. O desvio padrão do modelo em relação ao erro real também será considerado. Uma temperatura para cada modo de erro será considerada. A Tabela 3 mostra os modelos obtidos por meio de regressão linear, conforme a estratégia mencionada.

Tabela 3 - Modelos para cada modo de erro

MODELO	CONSTANTE	BASE CAB	ROLT	ROLD	PORCA X	MANCAL X INF	PORCA Z	MANCAL Z	Desvio padrão
1	186,11	-19,35				5,31		6,7	10,87
2	197,76	-19,96			4,96			7,12	11,09
3	41,25			-10,43		4,48		5,02	11,42
4	44,79			-10,84	4,31			5,39	11,45
5	40,12		-9,08			3,48		4,77	11,8
6	42,69		-9,37		3,34			5,07	11,81
7	218,61	-16,7				5,09	3,07		12,44
8	91,07			-9,41		4,34	2,2		12,53
9	97,27			-9,72	4,12		2,42		12,63
10	230,88	-17,13			4,72		3,32		12,68
11	88,54		-8,24			3,43	2,09		12,8
12	93,9		-8,47		3,24		2,27		12,86
			Eixo-árvore		Eixo X		Eixo Z		

A Tabela 3 mostra 12 modelos compostos por uma constante mais os termos que multiplicam cada temperatura. Por exemplo, o modelo 1, que possui o menor desvio padrão, e composto de 3 variáveis de temperatura, pode ser escrito conforme a Equação 8:

DESVIO DIAMETRAL = 186 - 19,35*BASE CAB + 5,31* MANCAL INF X + 6,7*MANCAL Z *(8)*

Verifica-se que todos os modelos obtidos dessa forma obedecem aos modos de erro analisados anteriormente. Assim, todos os termos que multiplicam as temperaturas dos componentes do eixo-árvore tornam o desvio negativo e todos os termos que multiplicam as temperaturas dos componentes dos eixos x e z tornam o desvio positivo.

Os Gráficos 42 e 43 apresentam os resultados dos desvios diametrais calculados utilizando-se os modelos 1 e 2 (Tabela 3), quando da tentativa de prever os resultados práticos obtidos nos testes 1 a 16.

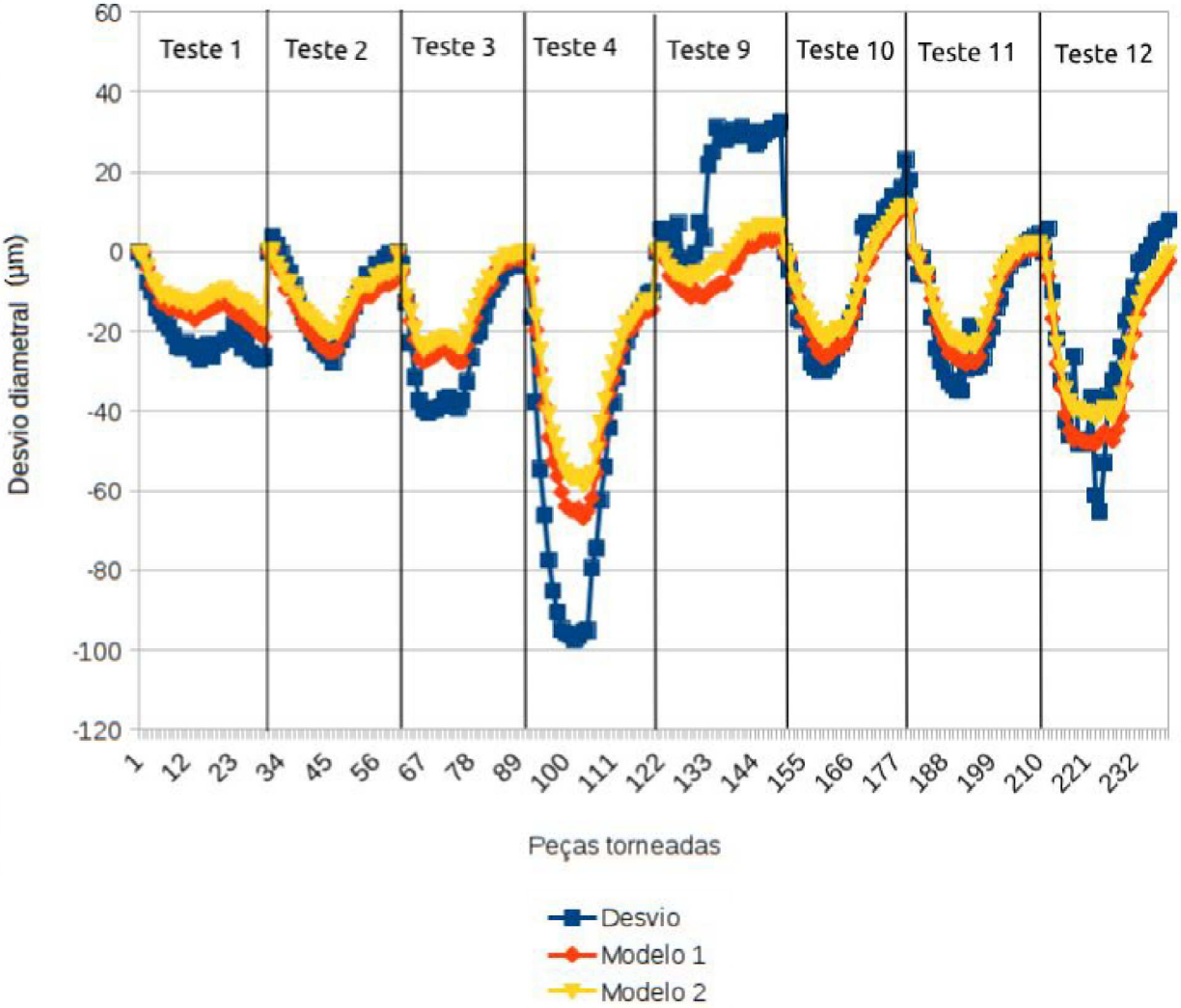

Gráfico 42 - Previsão dos modelos 1 e 2 para os testes do eixo-árvore

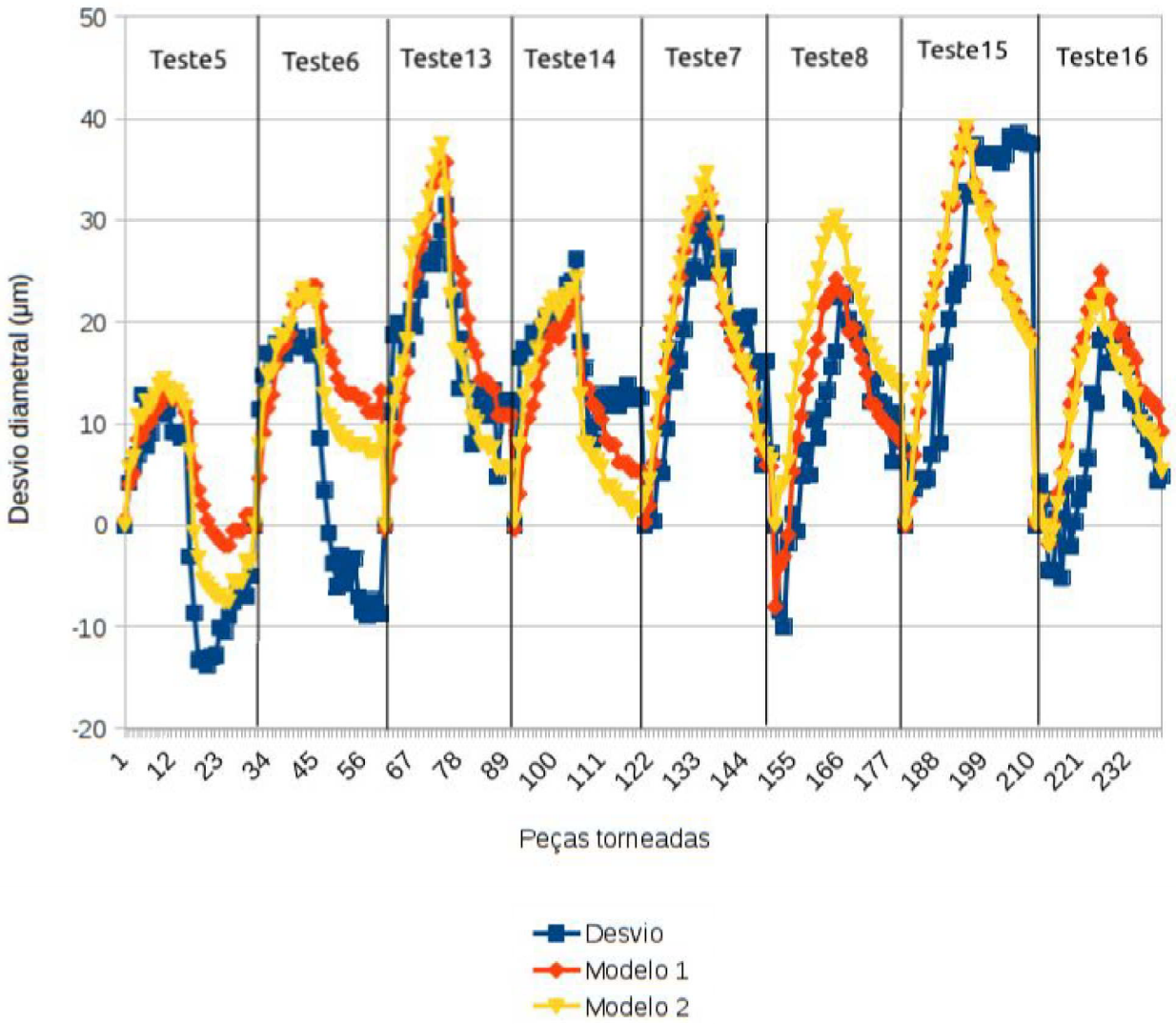

Gráfico 43 - Previsão dos modelos 1 e 2 para os testes dos eixos.

Da análise dos Gráficos 42 e 43, verifica-se que os dois modelos são bem similares na previsão do desvio diametral dos testes de aquecimento, tendo como entradas temperaturas. O erro entre os modelos e o desvio medido parece aumentar no teste 4, no qual a temperatura dos componentes do eixo-árvore se sobressaem às temperaturas dos componentes dos eixos x e z. A mesma discrepância foi observada no teste 9, na fase de resfriamento, sendo que o desvio medido sofre uma inversão brusca, do negativo para o positivo.

Como num processo de torneamento mais geral, onde o eixo-árvore sempre estará em movimento e sua contribuição para o erro é maior do que a dos eixos x e z, pode ser interessante obter um outro modelo que consiga um melhor desempenho em casos como o do teste 4. Dos testes anteriores, verificou-se que as temperaturas dos componentes dos eixos x e z aumentam bastante, só com o funcionamento do eixo-árvore. Então, a contribuição dos eixos x e z estaria implícita nos testes de movimento isolado do eixo-árvore. Assim, um outro modelo foi obtido, somente com os testes de aquecimento do eixo árvore. Visa-se atuar em conjunto com o modelo obtido anteriormente, para se obter uma melhora de desempenho, focada no funcionamento do eixo-árvore.

A Tabela 4 mostra os modelos obtidos por meio de regressão linear considerando-se apenas os testes de aquecimento do eixo-árvore (testes1 a 4 e 9 a 12).

Tabela 4 - Modelos considerando os testes do eixo-árvore

MODELO	CONSTANTE	BASE CAB	ROLT	ROLD	PORCA X	MANCAL X INF	PORCA Z	MANCAL Z	Desvio padrão
13	215,57	-22,72				23,9		-9,83	8,76
14	235,06	-22,7				30,16	-16,84		8,78
15	97,55			-7,11		30,66		-27,41	9,23
16	250,1	-28,11			9,15		9,13		9,28
17	295	-26,72			13,65			1,43	9,41
18	237,29		-5,21			51,14	-55,15		9,64
19	170,86		-5,35			29,83		-31,16	9,67
20	150,78			-7,03		46,94	-45,78		9,69
21	181,88			-8,65	18,79			-17,14	10,25
22	265,39		-6,62		18,58			-22,18	10,3
23	142,02			-9,95	16,12		-11,34		11,03
24	282,06		-7,53		19,98		-23,08		11,07
			Eixo-árvore		Eixo X		Eixo Z		

O modelo 16 é o primeiro na sequência de desvios-padrões, cujos termos obedecem aos modos de erros testados, isto é, o aumento da temperatura dos componentes dos eixos x e z tende a deixar o erro positivo, enquanto o aumento da temperatura dos componentes do eixo-árvore tendem a deixar o erro negativo. Seria importante os termos do modelo obedecerem aos modos de erros térmicos. Falsas correlações podem ocorrer, fazendo com que o modelo passa ter bom desempenho com os dados dos próprios testes de que foi obtido, mas não ser robusto para prever o erro em novas situações. O modelo 16, contudo, não tem as mesmas variáveis de temperatura

dos modelos 1 e 2 obtidos anteriormente, possuindo a variável PORCA Z . Assim, com o intuito de se otimizar o número de sensores de temperatura, o modelo 17 será usado em conjunto com o modelo 2, pois ambos possuem as mesmas variáveis e ainda obedecem aos modos de erros térmicos estudados. Posteriormente, o desempenho do modelo 13, cujos os termos não obedecem aos modos de erro térmico, será comparado ao desempenho do modelo 17 em diferentes situações.

A seguir serão mostradas as previsões do modelo 17 para os testes 1 a 16.

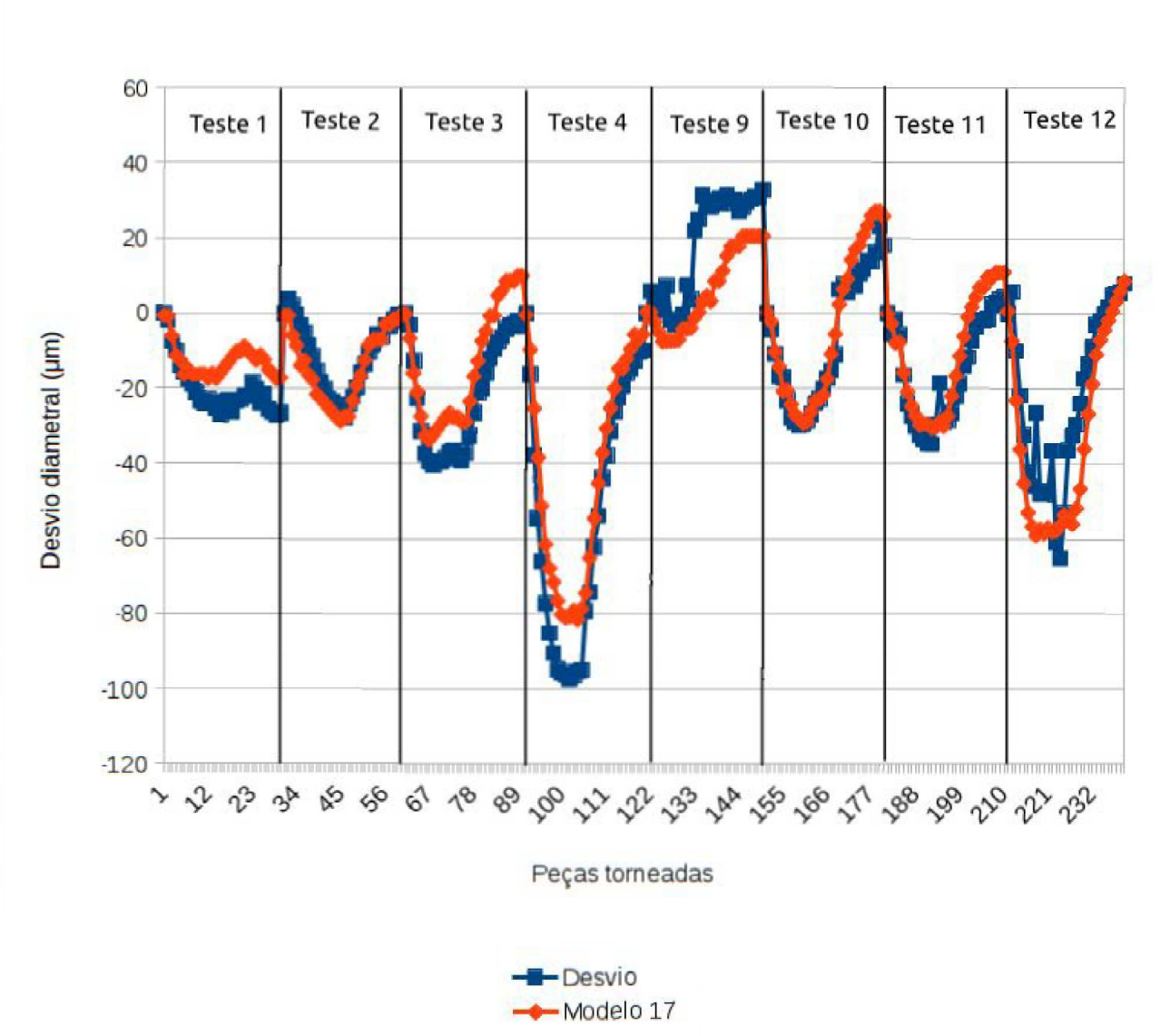

Gráfico 44 - Previsão do modelo 17 para os testes do eixo-árvore

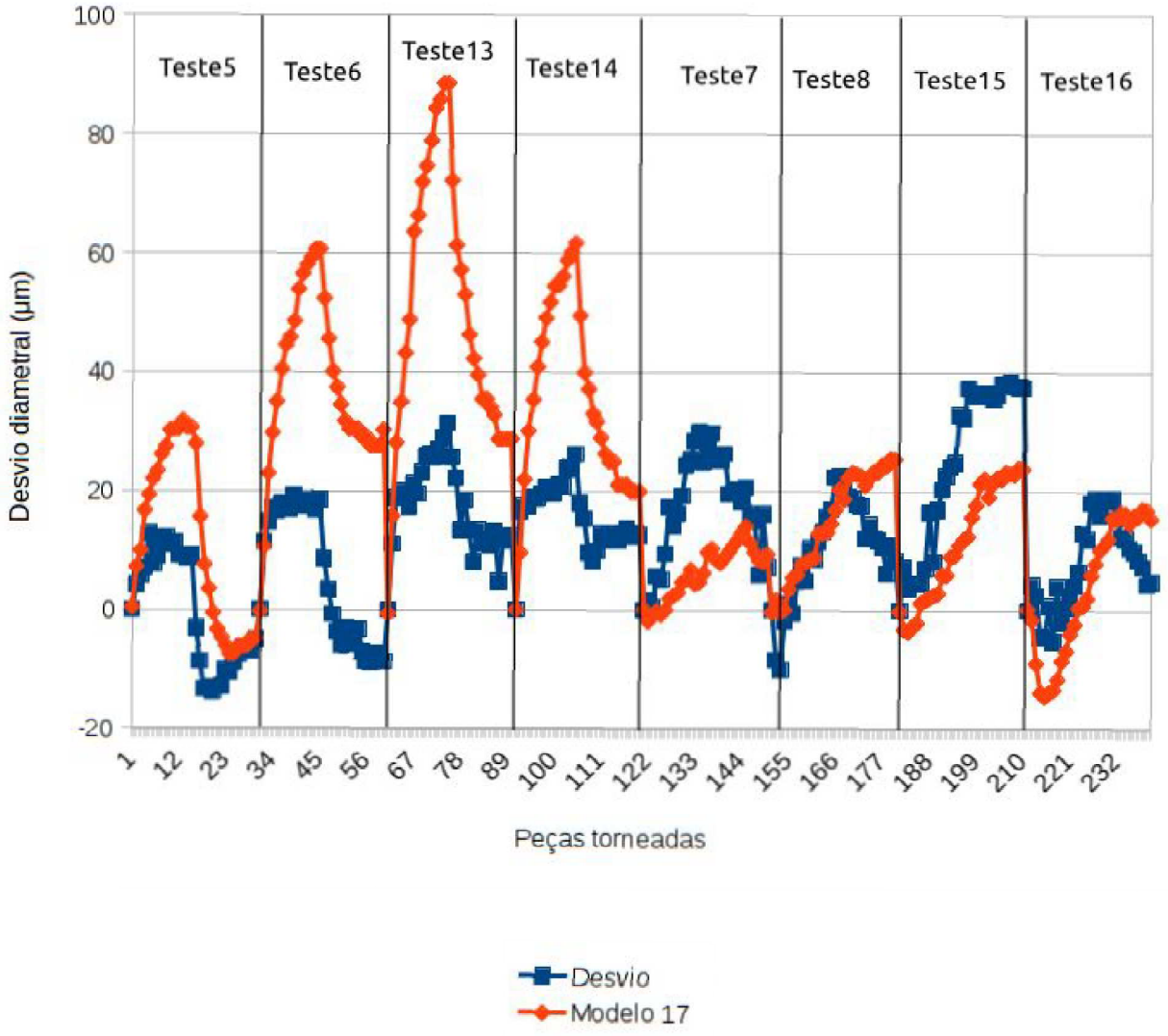

Gráfico 45 - Previsão do modelo 17 para os testes x e z

Da análise do Gráfico 45, verifica-se que o modelo 17 atribui mais erro positivo para o aumento de temperatura da porca de x do que realmente ocorre. Mas, curiosamente, o mesmo não ocorre para os testes do eixo z(testes 7, 8, 15 e 16). Provavelmente, isto é devido aos dados do teste 9, onde um erro positivo grande foi registrado para um baixo aumento de temperatura dos componentes do eixo x. O desvio do teste 9 pode ter sido originado por outros fatores não registrados. Nota-se também que a diferença entre o erro medido e o erro modelado pelo modelo 17 cai no teste 4 em comparação com o modelo 2. O teste 4 é um teste de alta velocidade, onde a temperatura dos itens do eixo árvore se sobressaem às temperaturas dos componentes do eixo x e z.

A tabela 5 mostra o valor do desvio padrão de cada modelo para cada tipo de teste.

Tabela 5 - Desvio padrão de cada modelo por teste

	Desvio padrão		
	Eixo-árvore	**eixo x**	**eixo z**
Modelo 1	13,11	6,87	8,94
Modelo 2	13,82	8,76	7,87
Modelo 17	9,41	28,58	11,51

Pode-se então fazer os modelos 17 e 2 trabalharem em conjunto para se ter uma redução do desvio-padrão, sem aumentar o número de sensores, uma vez que estes dois modelos usam as leituras de temperatura dos mesmos locais.

Como o modelo 2 tem um bom desempenho na maior parte dos pontos e modelo 17 foi feito somente a partir dos dados de aquecimento do eixo-árvore, este pode ser ativado somente quando a temperatura da estrutura fundida do eixo-árvore (BASE CAB) se eleva em certo valor acima da temperatura do porca do fuso de x e do mancal z. Para este estudo, foi estabelecido um fator de aquecimento da estrutura fundida do eixo-árvore sobre a porca x e mancal z, definido pela Equação 9. Este fator tem o objetivo de verificar a porcentagem de elevação da temperatura da variável BASE CAB, que faz com que a peça usinada tenha diâmetro menor do que deveria, em relação as variáveis PORCA X E MANCAL Z, que fazem com que a peça usinada tenha diâmetro maior do que deveria. Como há duas variáveis relacionadas com uma, a variável BASE CAB é elevada ao quadrado, enquanto as variáveis PORCA X e MANCAL Z, que apresentam temperaturas semelhantes em seus funcionamentos, serão multiplicadas entre si.

$$\frac{BASE\,CAB^2}{PORCA\,X * MANCAL\,Z} \qquad (9)$$

O Gráfico 46 mostra os valores absolutos dos residuais, isto é, o valor absoluto do desvio real menos o desvio modelado, em função do valor do fator de aquecimento do eixo-árvore estabelecido.

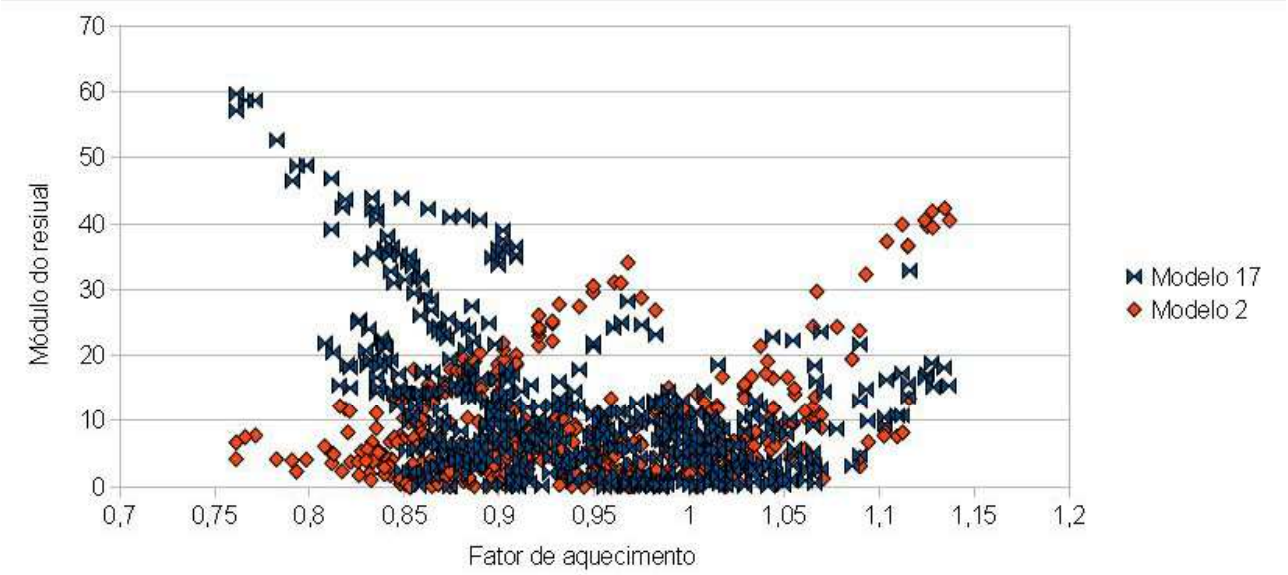

Gráfico 46 - Residual vs fator de aquecimento do eixo-árvore

Observa-se que o modelo 2 tem maior quantidade de pontos abaixo de 20 µm na maior parte do tempo. Porém, quando o fator de aquecimento passa de 1,06, este começa a apresentar residuais acima de 30 µm, como no caso do teste 4. Já o modelo 17 tem um bom comportamento a partir do fator de aquecimento de 0,92, onde a temperatura dos eixos x e z é relativamente baixa em relação ao eixo-árvore. Entre os valores do fator de 0,9 e 1, há alguns pontos de residual acima dos 20 µm, devido àquela inversão de desvio do teste 9.

O modelo 2 é mais geral, pois foi modelado com dados de aquecimento de todos os eixos e o 17 apenas com o aquecimento do eixo-árvore. Assim, o modelo 17 pode ser ativado em situações onde o fator de aquecimento do eixo-árvore passe de 1,06, com a programação da seguinte condição:

Se 'fator de aquecimento'≤ 1,06;
Então Modelo 2 ativo
Caso contrário Modelo 17 ativo.

Neste caso o valor do desvio dos dois modelos estão sendo calculados no CNC, porém, quando o programa de usinagem chama uma troca de ferramenta o valor de correção é escolhido de acordo com o valor do fator de aquecimento.

6 Resultados dos testes de validação

Conforme mencionado anteriormente, os testes de validação obedeceram à norma de medição estatística de capabilidade de tornos VDI/DGQ 3442. Segundo tal norma o corpo-de-prova deve ser conforme a Figura 9. O programa utilizado pode ser visto para aquecimento e usinagem pode ser visto no Apêndice A.

Os gŕaficos 47 a 49 mostram o comportamento do centro de torneamento com os modelos 2 e 17 operando em conjunto por meio da regra da equação 10, para os testes de validação em 3 cenários:

Cenário 1: Ciclo de aquecimento a 1740 rpm, sem uso de fluido refrigerante. Simulação de um processo produtivo de 8 horas. Peças torneadas a cada 10 minutos.

Cenário 2: Ciclo de aquecimento a 1740 rpm, uso de fluido refrigerante e 8 horas contínuas. Peças torneadas a cada 10 minutos.

Cenário 3: Ciclo de aquecimento a 5000 rpm, sem uso de fluido refrigerante e 8 horas contínuas. Peças torneadas a cada 10 minutos.

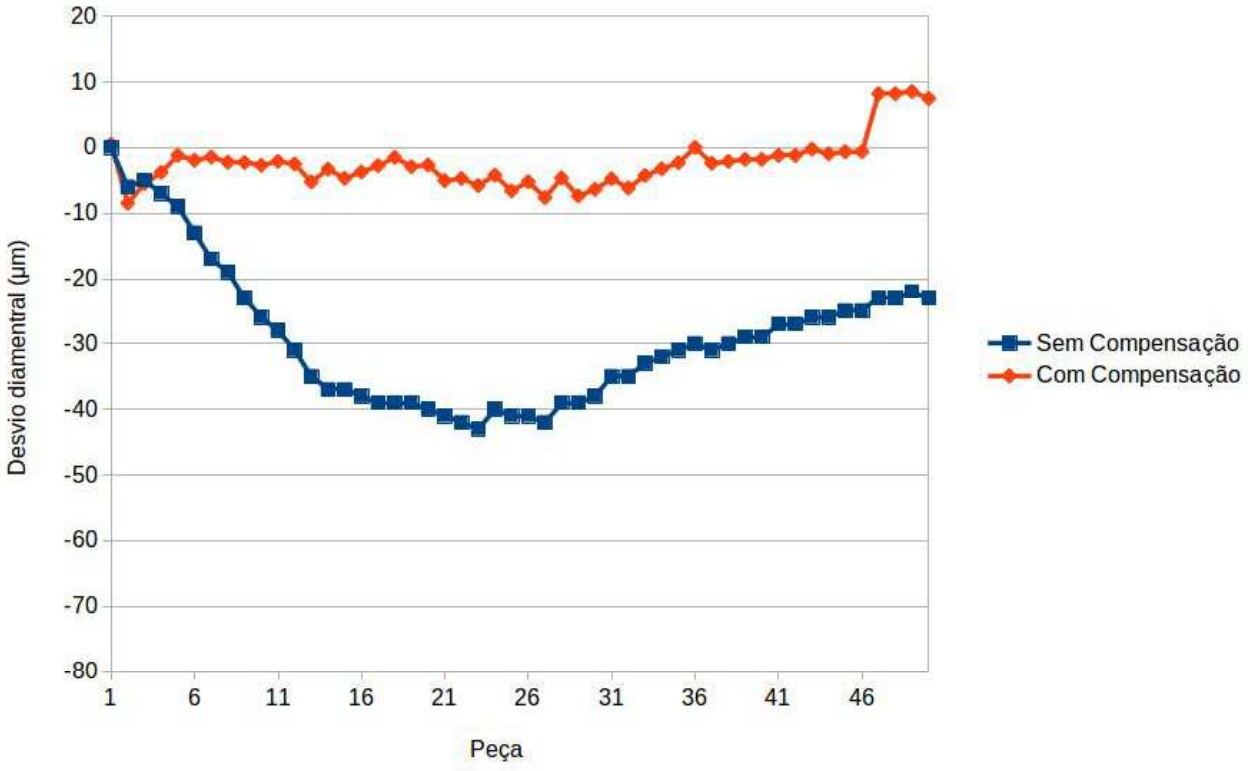

Gráfico 47 - Desvios com e sem compensação no cenário 1

No cenário 1, em resumo, pode-se verificar a seguinte contribuição dos dois modelos utilizados no lote de peças torneadas:

Modelo 2 ativo em 74% das peças (peças 1 a 6 e 47 a 50)

Modelo 17 ativo em 26% das peças (peças 7 a 46)

Desta forma, os modelos 2 e 17, atuando em conjunto, reduziram o desvio padrão médio das peças torneadas de 31,21 para 4,46 µm. Sendo que o desvio máximo foi reduzido de -43 para +9 µm.

O Gráfico 48 traz o resultado da execução do cenário 2.

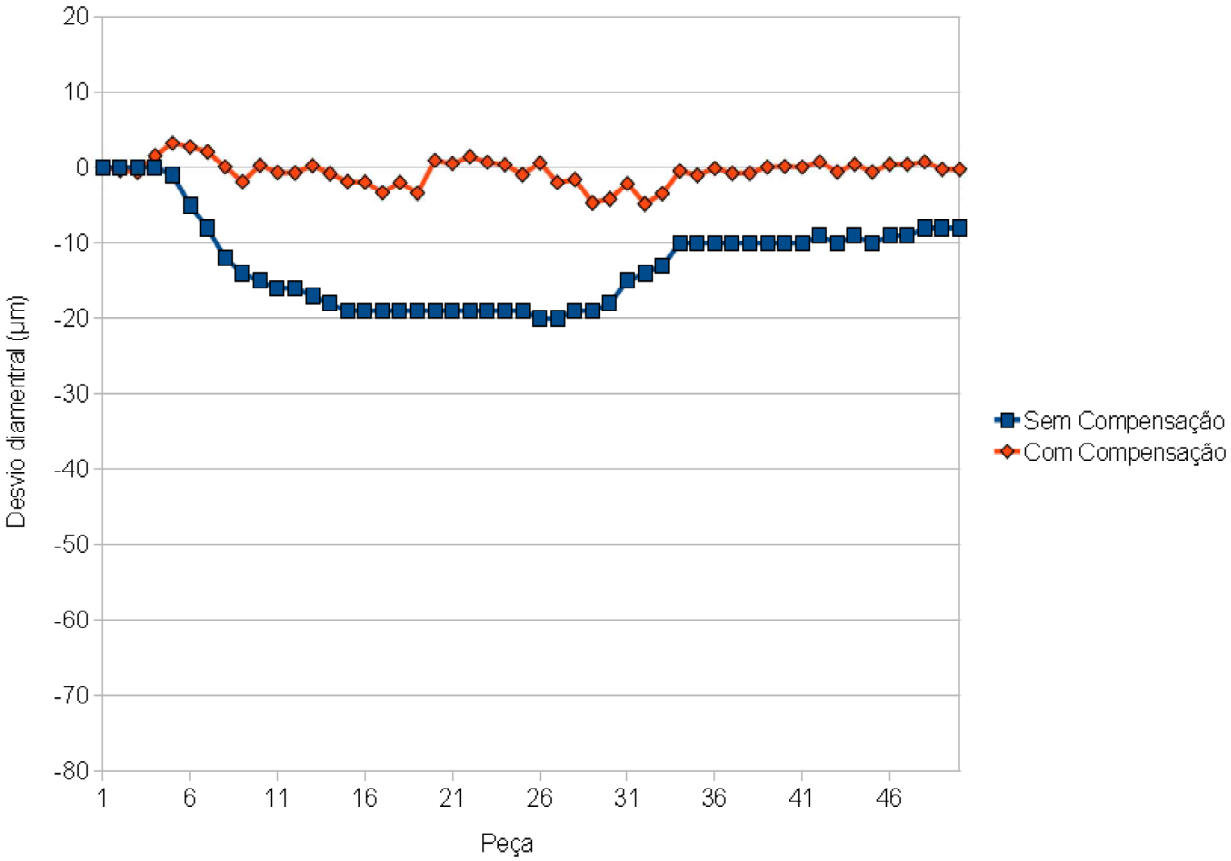

Gráfico 48 - Desvios com e sem compensação no cenário 2

No cenário 2, a contribuição dos modelos foi a seguinte:

Modelo 2 ativo em 86% das peças (peças 1 a 8, 10 e 20 a 50)

Modelo 17 ativo em 14% das peças (peças 9 e 11 a 19)

Nestas condições, os modelos 2 e 17, atuando em conjunto, reduziram o desvio-padrão médio das peças torneadas de 14,07 para 1,8 µm. Sendo que, o desvio máximo foi reduzido de -20 para -5 µm.

Os resultados do cenário 3 são apresentados no Gráfico 49.

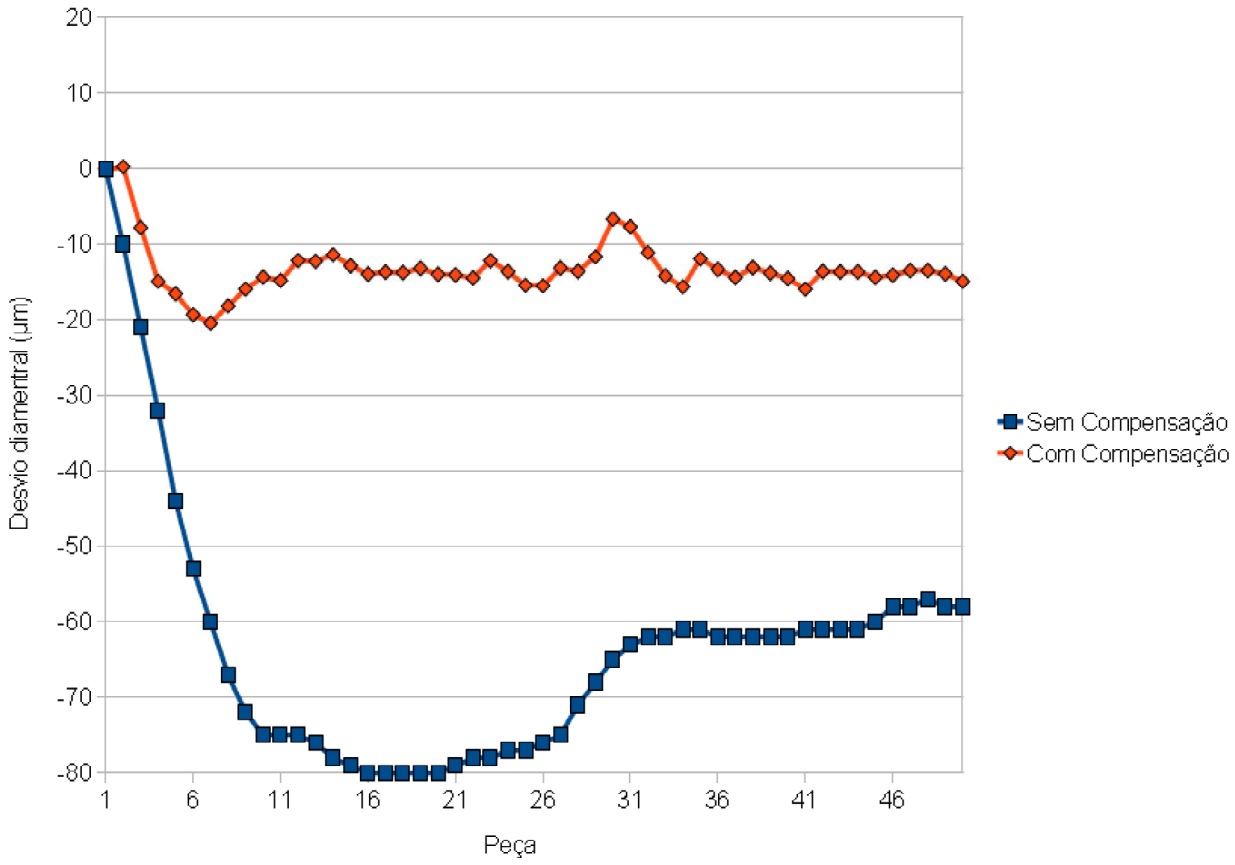

Gráfico 49 - Desvios com e sem compensação no cenário 3

No cenário 3, a contribuição dos modelos foi a seguinte:

Modelo 2 ativo em 6% das peças (peças 1 a 3)

Modelo 17 ativo em 94% das peças (peças 4 a 50)

Nestas condições, os modelos 2 e 17, atuando em conjunto, reduziram o desvio padrão médio das peças torneadas de 66,34 para 14,01 µm. Sendo que o desvio máximo foi reduzido de -80 para -20 µm.

Pelo registro de temperatura de cada cenário, também foi possível obter o desvio-padrão de cada modelo, individualmente, caso estes não estivessem agindo em conjunto. Os valores estão expostos na Tabela 6. Também, é exibido para comparação, o desvio padrão do modelo 13, da Tabela 3. Este possuí um baixo desvio padrão perante os testes de aquecimento do eixo-árvore. Porém, seus termos não seguem os modos de erros térmicos verificados. O comportamento do modelo de 6 variáveis (modelo 6var) anteriormente extraído dos testes 1 a 16 e com base no menor desvio padrão, também é exibido para comparação. Na tabela 6 a linha “compensado” refere-se aos modelos 2 e

17, atuando em conjunto.

Tabela 6 - Desvio-padrão de cada modelo individual

	Desvio padrão			
	Cenário 1	**Cenário 2**	**Cenário 3**	**Total**
Modelo 2	2,15	1,82	19,19	11,12
Modelo 17	5,28	9,29	13,99	10,09
Compensado	2,36	1,8	14,01	8,21
Modelo 13	60,3	52,04	94,27	70,78
Modelo 6var	7,16	5,16	14,43	9,78

Pode-se ver que a condição de ativação do modelo 17 escolhida faz com que os modelos operando em conjunto tenham nessas condições desvios-padrões próximos ao menor desvio de cada modelo individual. Observa-se também que mesmo um modelo com 6 variáveis não consegue ter um desvio padrão menor que o valor compensado dos modelos 2 e 17 com apenas 3 variáveis, atuando em conjunto, obtidos com base nos modos de erros térmicos. O modelo 13 da tabela 3 apresenta um péssimo desempenho para novos dados apesar de ter menor desvio padrão que o modelo 17 perante os dados de aquecimento dos testes do eixo-árvore.

A seguir, são exibidos os gráficos das médias e das amplitudes da análise de capabilidade de cada cenário, com e sem compensação. Também são mostradas tabelas com o registro dos desvios e os valores da análise de capabilidade. Para tanto, foi admitido como limite de tolerância o valor ±9,5 µm, o que equivale a um IT6 (19 µm) para uma peça de diâmetro 55 mm.

O índice Cpk de um processo pode ser entendido da seguinte forma:

- CPK menor que 1,0 = Processo totalmente incapaz (sem condições de manter especificações);
- CPK de 1,0 até 1,32 = Relativamente incapaz (pouco confiável);
- CPK de 1,33 até 1,99 = Capaz (relativamente confiável);
- CPK 2,0 ou maior = Excelente (altamente confiável).

Tabela 7 - Desvios do cenário 1 sem compensação (valores em μm)

	Amostra									
Nº da Peça/ Lote	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**
1	0	-13	-28	-38	-41	-41	-35	-30	-27	-25
2	-6	-17	-31	-39	-42	-42	-35	-31	-27	-23
3	-5	-19	-35	-39	-43	-39	-33	-30	-26	-23
4	-7	-23	-37	-39	-40	-39	-32	-29	-26	-22
5	-9	-26	-37	-40	-41	-38	-31	-29	-25	-23
Médias	**-5,4**	**-19,6**	**-33,6**	**-39**	**-41,4**	**-39,8**	**-33,2**	**-29,8**	**-26,2**	**-23,2**
Amplitude	**9**	**13**	**9**	**2**	**3**	**4**	**4**	**2**	**2**	**3**

Tabela 8 - Pré calculo cenário 1 s/comp. (μm)

Média das Amplitudes	5,1
Média das médias	-29,1
Tolerância em análise	19
Amplitude da Dispersão	13,2
Desvio padrão	2,2

Tabela 9 - Índices Cp cenári 1 s/comp

CP	1,4
CPI	-3,0
CPS	5,9
CPK	-3,0

Tabela 10 - Desvios do cenário 1 compensado (valores em μm)

	Amostra									
Nº da Peça/ Lote	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**
1	0	-2	-2	-4	-5	-5	-5	0	-1	-1
2	-8	-1	-3	-3	-5	-8	-6	-2	-1	8
3	-5	-2	-5	-2	-6	-5	-4	-2	0	8
4	-4	-2	-3	-3	-4	-7	-3	-2	-1	9
5	-1	-3	-5	-3	-7	-6	-2	-2	-1	7
Médias	**-3,6**	**-2**	**-3,6**	**-3**	**-5,4**	**-6,2**	**-4**	**-1,6**	**-0,8**	**6,2**
Amplitude	**8**	**2**	**3**	**2**	**3**	**3**	**4**	**2**	**1**	**10**

Tabela 11 - Pré cálculo cenário 1 compensado (μm)

Média das Amplitudes	3,8
Média das médias	-2,4
Tolerância em análise	19
Amplitude da Dispersão	9,8
Desvio-padrão	1,6

Tabela 12 - Índices Cp cenário 1 compensado

CP	1,9
CPI	1,4
CPS	2,4
CPK	1,4

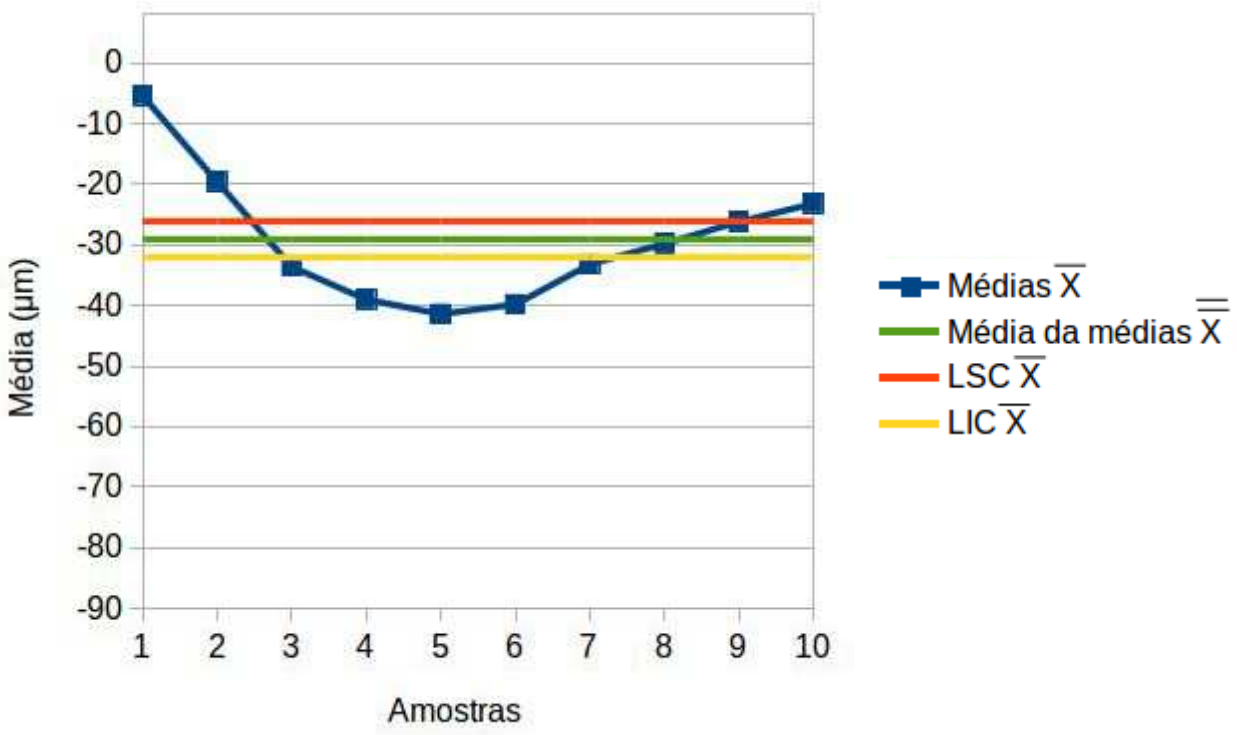

Gráfico 50 - Gráfico das médias, cenário 1 sem compensação

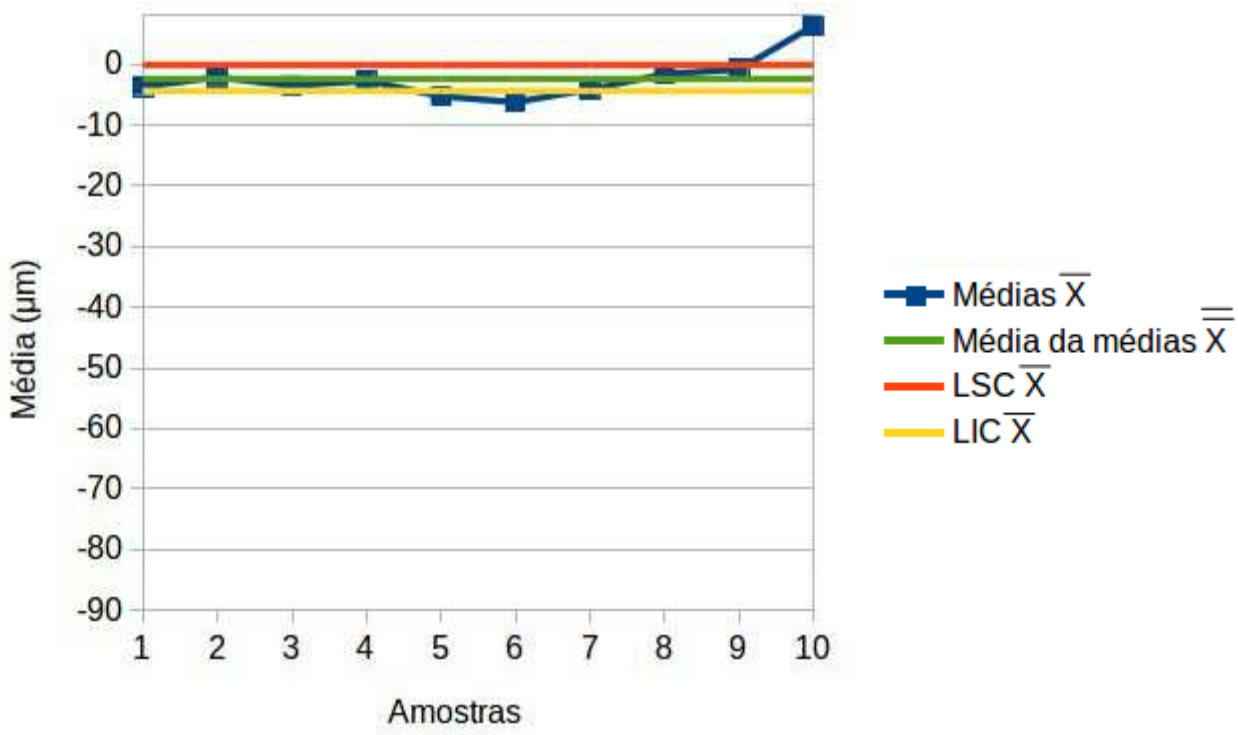

Gráfico 51 - Gráfico das médias, cenário 1 compensado

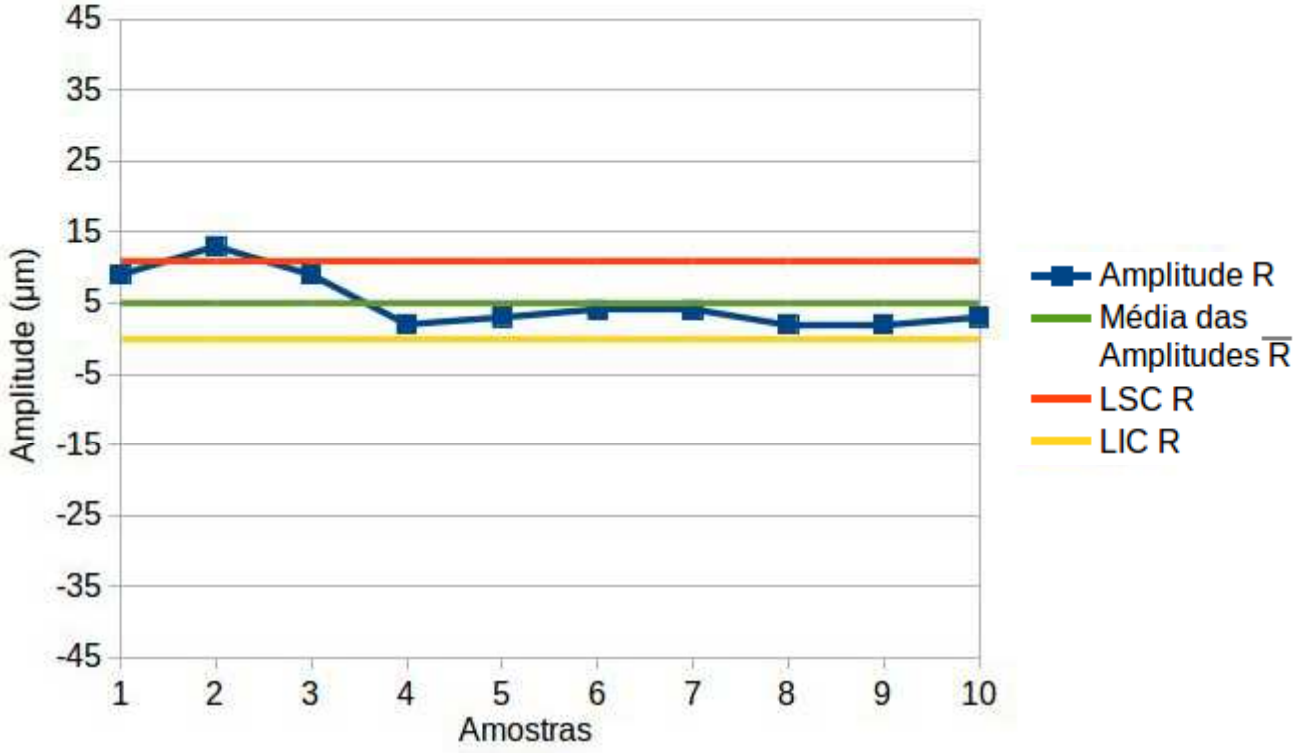

Gráfico 52 - Gráfico das amplitudes, cenário 1 sem compensação

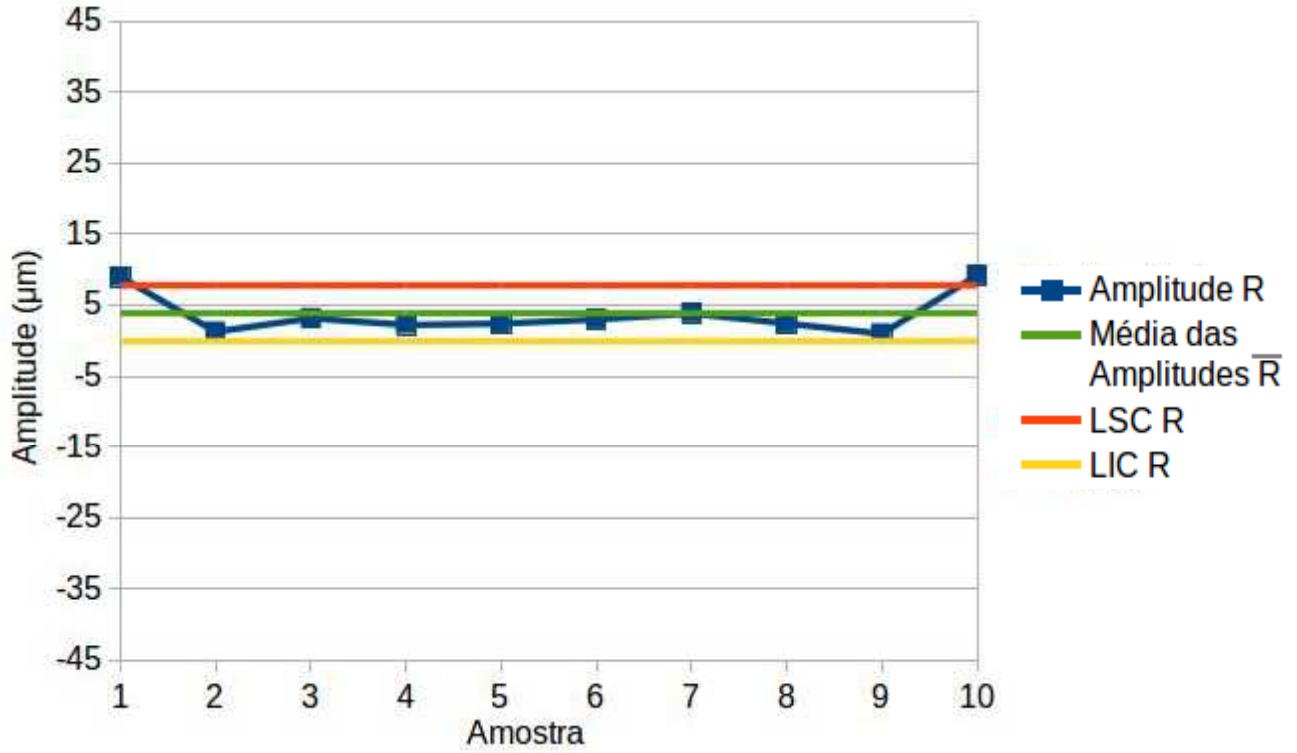

Gráfico 53 - Gráfico das amplitudes, cenário 1 compensado

Tabela 13 - Desvios do cenário 2 sem compensação (valores em µm)

	Amostra									
Nº da Peça/ Lote	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**
1	0	-5	-16	-19	-19	-20	-15	-10	-10	-9
2	0	-8	-16	-19	-19	-20	-14	-10	-9	-9
3	0	-12	-17	-19	-19	-19	-13	-10	-10	-8
4	0	-14	-18	-19	-19	-19	-10	-10	-9	-8
5	-1	-15	-19	-19	-19	-18	-10	-10	-10	-8
Médias	**-0,2**	**-10,8**	**-17,2**	**-19**	**-19**	**-19,2**	**-12,4**	**-10**	**-9,6**	**-8,4**
Amplitude	**1**	**10**	**3**	**0**	**0**	**2**	**5**	**0**	**1**	**1**

Tabela 14 - Pré cálculo cenário 2 s/comp (µm)

Média das Amplitudes	2,3
Média das médias	-12,6
Tolerância em análise	19
Amplitude da Dispersão	5,9
Desvio-padrão	1,0

Tabela 15 - Índices Cp cenário 2 s/comp

CP	3,2
CPI	-1,0
CPS	7,4
CPK	-1,0

Tabela 16 - Desvios do cenário 2 compensado (valores em µm)

	Amostra									
Nº da Peça/ Lote	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**
1	0	3	-1	-2	1	1	-2	0	0	0
2	0	2	-1	-3	1	-2	-5	-1	1	0
3	-1	0	0	-2	1	-2	-3	-1	-1	1
4	2	-2	-1	-3	0	-5	0	0	0	0
5	3	0	-2	1	-1	-4	-1	0	-1	0
Médias	**0,8**	**0,6**	**-1**	**-1,8**	**0,4**	**-2,4**	**-2,2**	**-0,4**	**-0,2**	**0,2**
Amplitude	**4**	**5**	**2**	**4**	**2**	**6**	**5**	**1**	**2**	**1**

Tabela 18 - Pré cálculo cenário 2 compensado (µm)

Média das Amplitudes	3,2
Média das médias	-0,6
Tolerância em análise	19
Amplitude da Dispersão	8,3
Desvio-padrão	1,4

Tabela 17 - Índices Cp compensado

CP	2,3
CPI	2,2
CPS	2,4
CPK	2,2

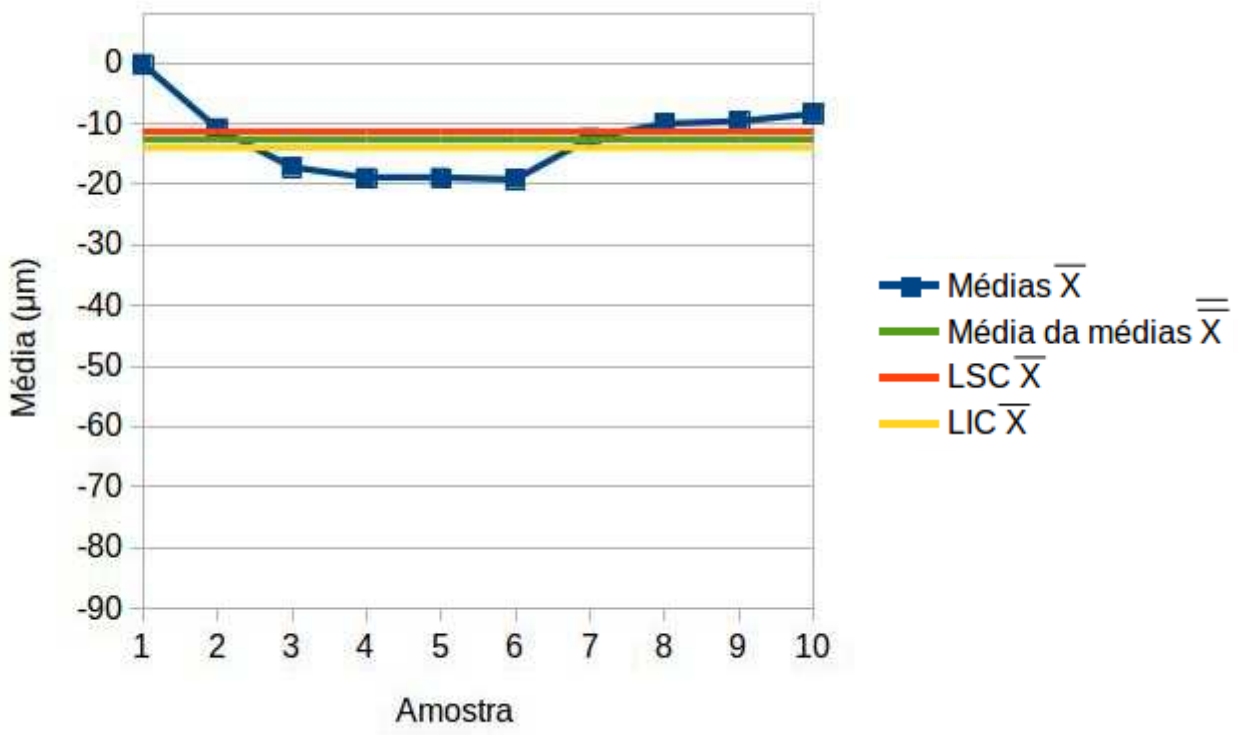

Gráfico 54 - Gráfico das médias, cenário 2 sem compensação

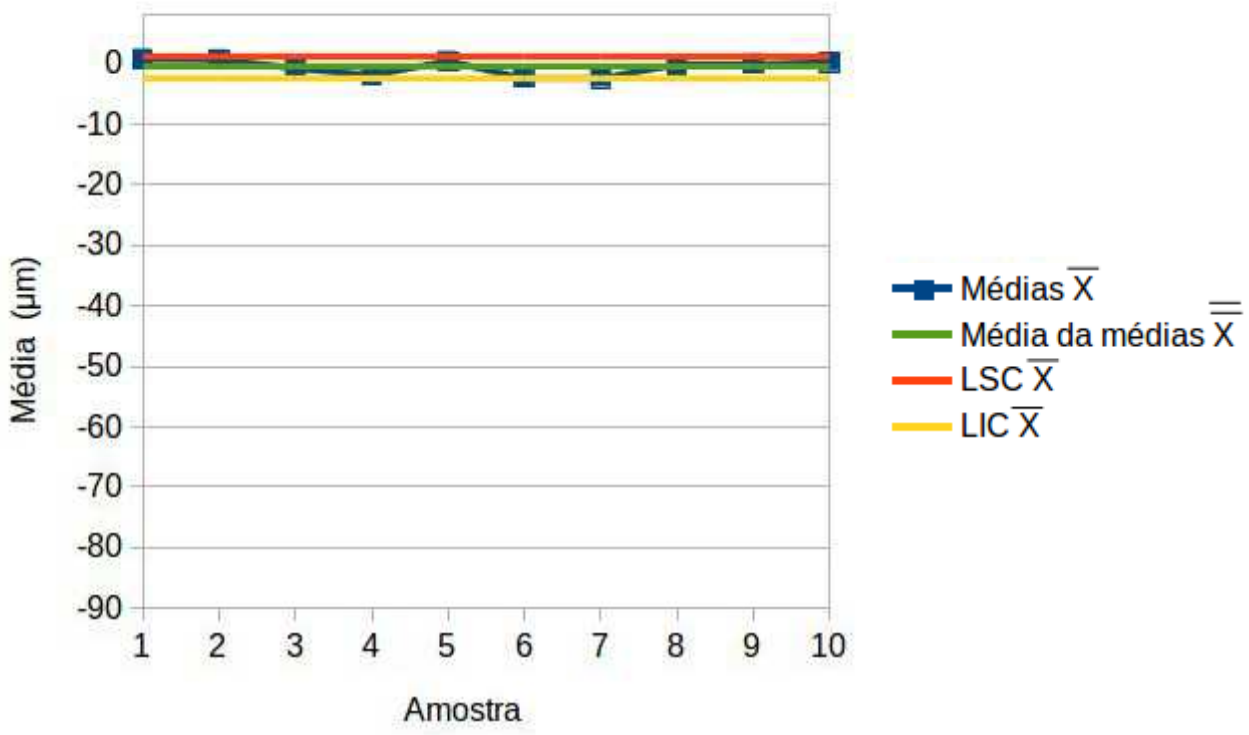

Gráfico 55 - Gráfico das médias, cenário 2 compensado

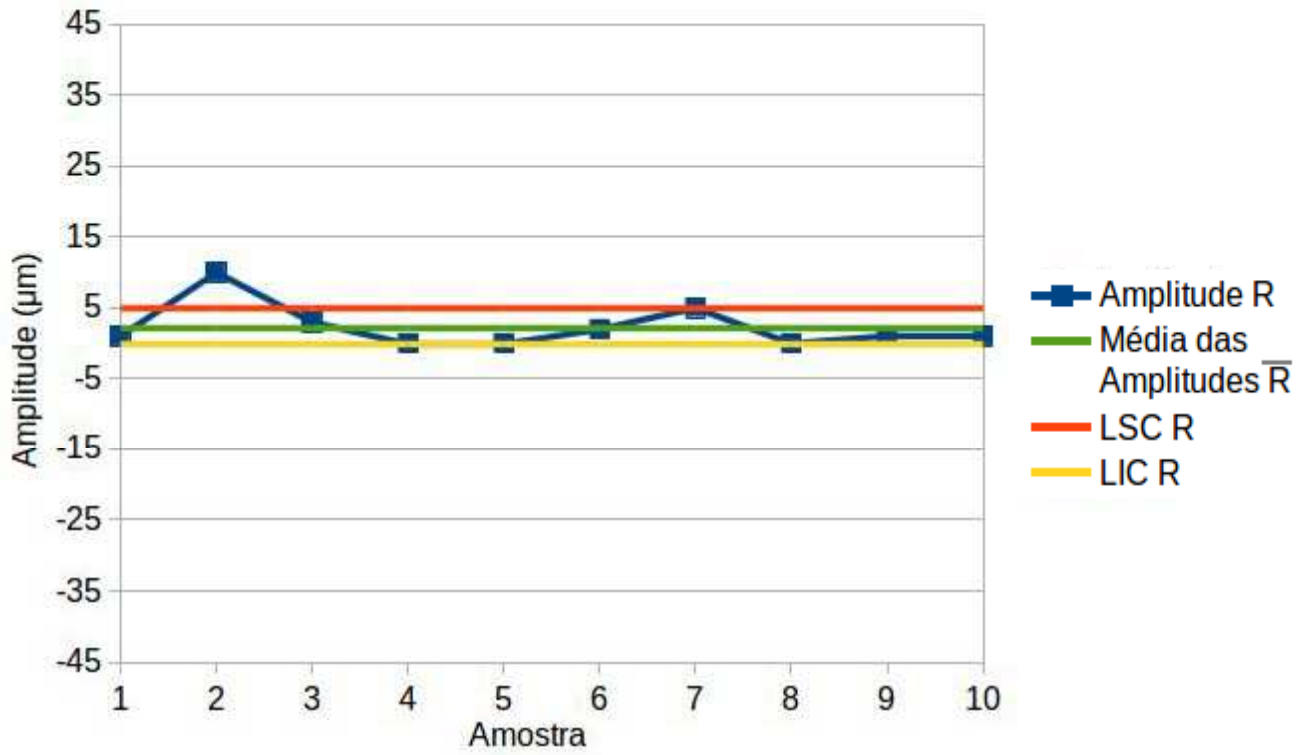

Gráfico 56 - Gráficos das amplitudes, cenário 2 sem compensação

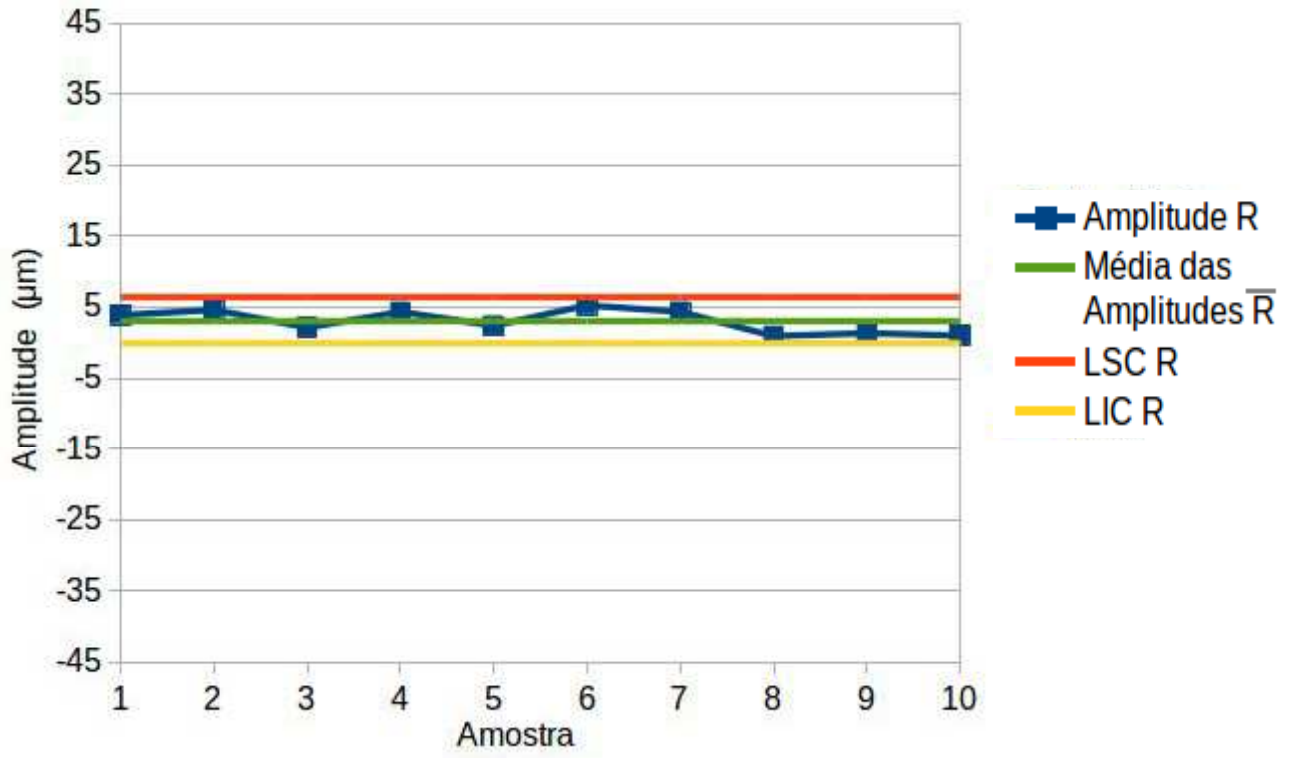

Gráfico 57 - Gráfico das amplitudes, cenário 2 compensado

Tabela 19 - Desvios do cenário 3 sem compensação (valores em µm)

	Amostra									
Nº da Peça/ Lote	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**
1	0	-53	-75	-80	-79	-76	-63	-62	-61	-58
2	-10	-60	-75	-80	-78	-75	-62	-62	-61	-58
3	-21	-67	-76	-80	-78	-71	-62	-62	-61	-57
4	-32	-72	-78	-80	-77	-68	-61	-62	-61	-58
5	-44	-75	-79	-80	-77	-65	-61	-62	-60	-58
Médias	**-21,4**	**-65,4**	**-76,6**	**-80**	**-77,8**	**-71**	**-61,8**	**-62**	**-60,8**	**-57,8**
Amplitude	**44**	**22**	**4**	**0**	**2**	**11**	**2**	**0**	**1**	**1**

Tabela 20 - Pré cálculo cenário 3 s/comp (µm)

Média das Amplitudes	8,7
Média das médias	-63,5
Tolerância em análise	19
Amplitude da Dispersão	22,4
Desvio-padrão	3,7

Tabela 21 - Índices Cp cenário 3 s/comp

CP	0,8
CPI	-4,8
CPS	6,5
CPK	-4,8

Tabela 22 - Desvios do cenário 3 compensado (valores em µm)

	Amostra									
Nº da Peça/ Lote	**I**	**II**	**III**	**IV**	**V**	**VI**	**VII**	**VIII**	**IX**	**X**
1	0	-20	-12	-14	-14	-13	-11	-14	-14	-13
2	-8	-18	-12	-14	-12	-14	-14	-13	-14	-13
3	-15	-16	-11	-13	-14	-12	-16	-14	-14	-14
4	-17	-14	-13	-14	-15	-7	-12	-15	-14	-15
5	-19	-15	-14	-14	-15	-8	-13	-16	-14	-16
Médias	**-11,8**	**-16,6**	**-12,4**	**-13,8**	**-14**	**-10,8**	**-13,2**	**-14,4**	**-14**	**-14,2**
Amplitude	**19**	**6**	**3**	**1**	**3**	**7**	**5**	**3**	**0**	**3**

Tabela 23 - Pré cálculo cenário 3 compensado (µm)

Média das Amplitudes	5
Média das médias	-13,5
Tolerância em análise	19
Amplitude da Dispersão	12,9
Desvio-padrão	2,1

Tabela 24 - Índices cenário 3 compensado

CP	1,5
CPI	-0,6
CPS	3,6
CPK	-0,6

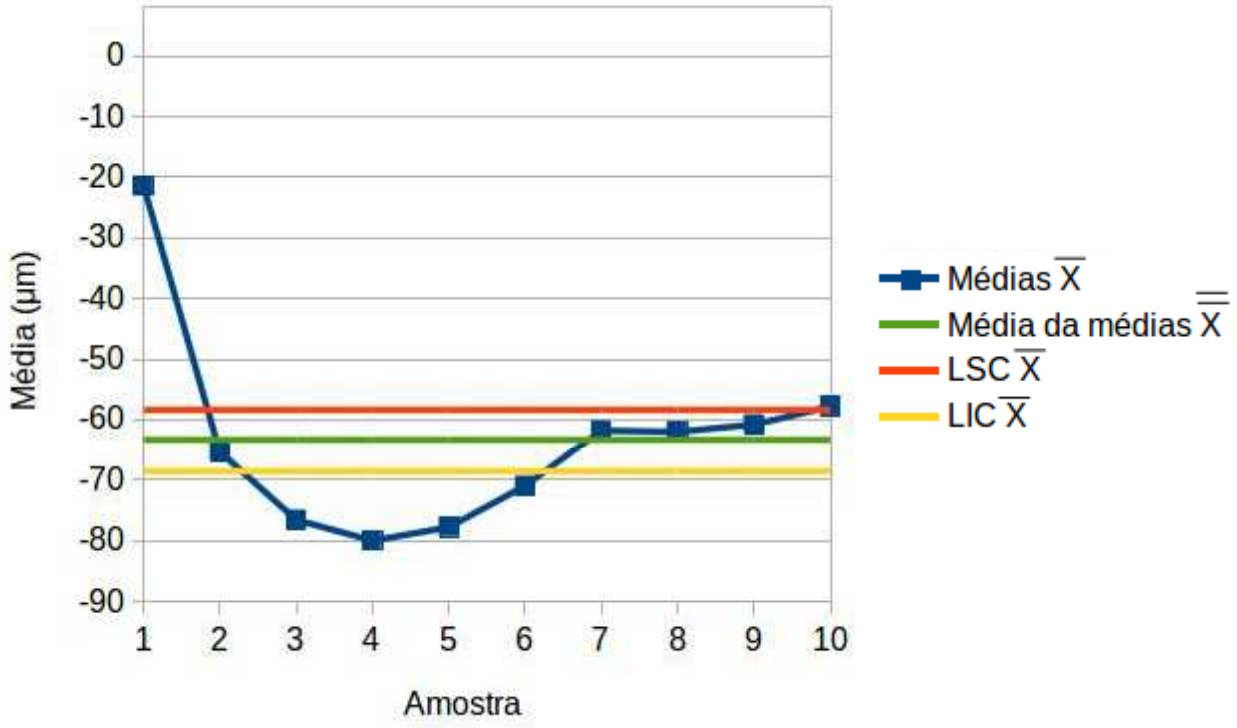

Gráfico 58 - Gráfico das médias, cenário 3 sem compensação

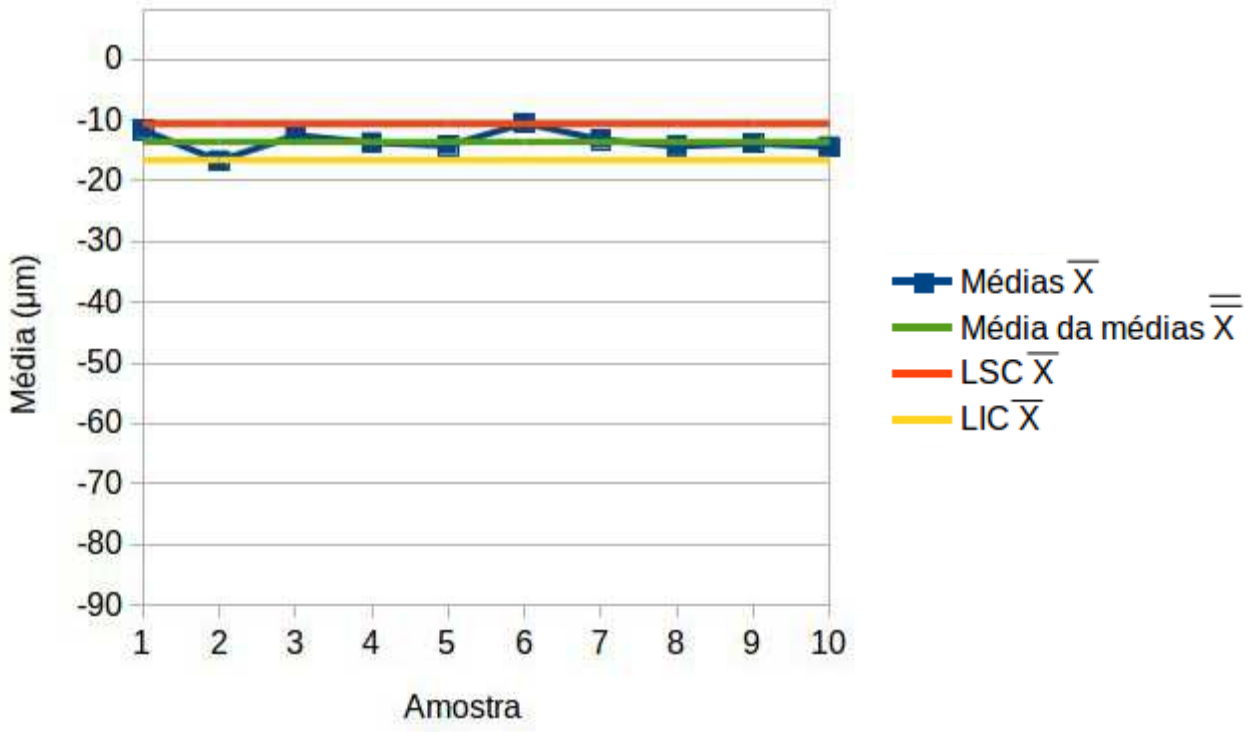

Gráfico 59 - Gráfico das médias, cenário 3 compensado

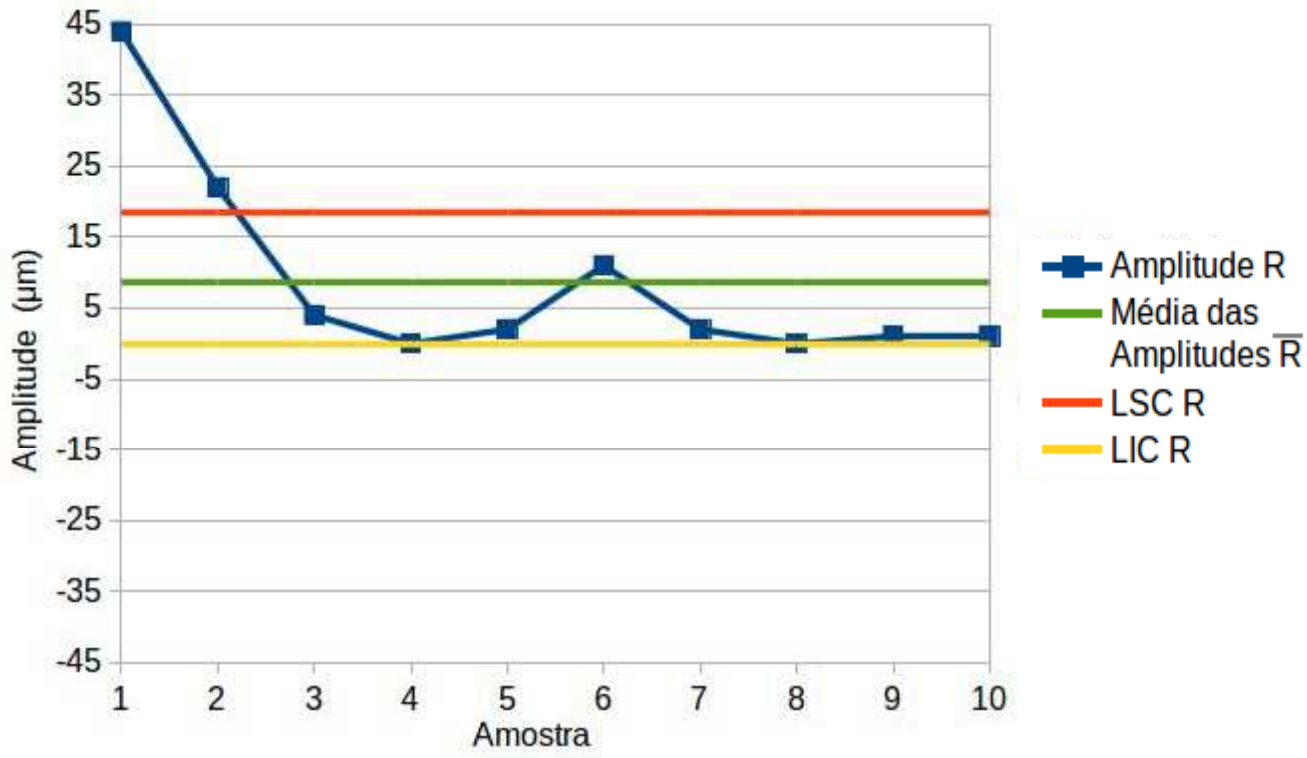

Gráfico 60 - Gráfico das amplitudes, cenário 3 sem compensação

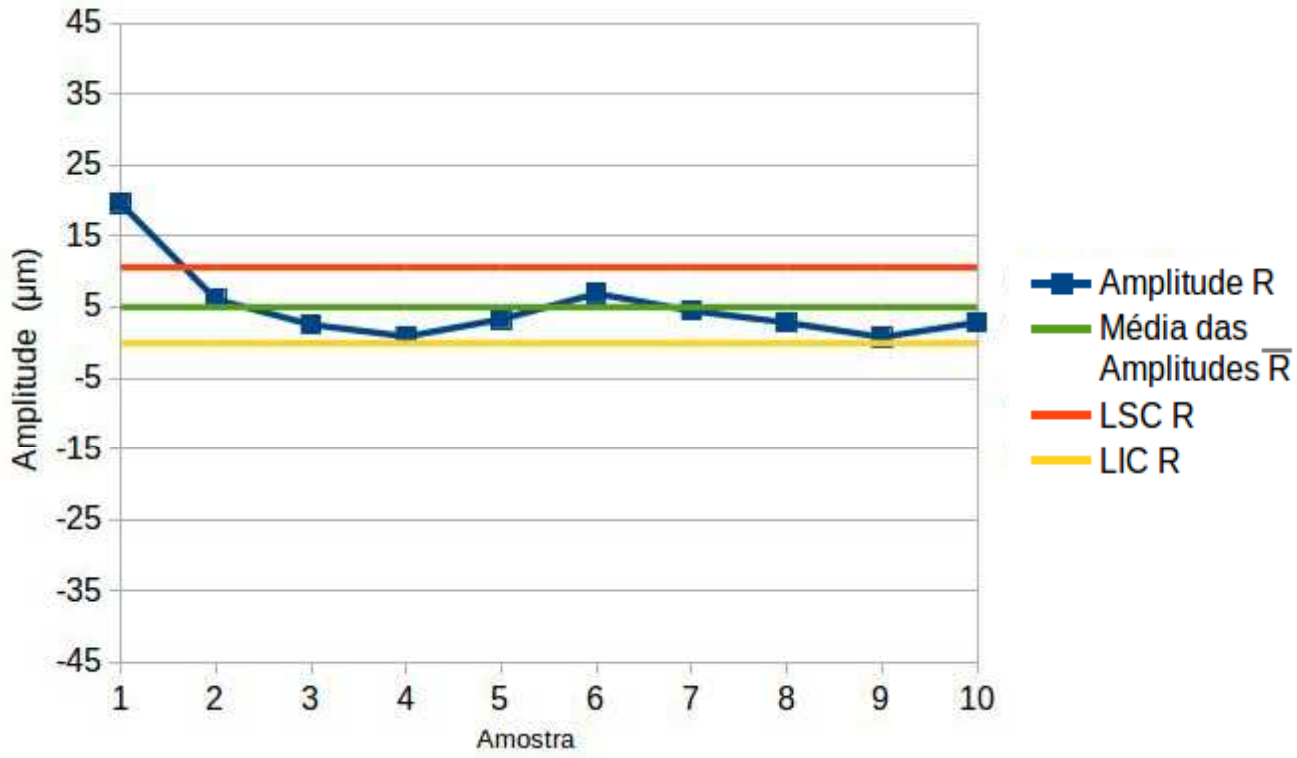

Gráfico 61 - Gráfico das amplitudes, cenário 3 compensado

Pode-se ver que, no cenário 1, o índice Cpk subiu de -3, sem compensação, para 1,5. Assim, o centro de torneamento sem compensação é considerado incapaz, para o limite de tolerância proposto (19 µm), com compensação pode ser considerado capaz para o mesmo limite. Com a compensação ativada, pode-se ver pelos gráficos das médias e das amplitudes, que estes valores se encontram dentro dos limites calculados.

Com relação ao cenário 2, observa-se que houve uma melhora muito significativa do índice Cpk (de -1 para 2,3). Este valor mostra que a curva normal dos desvios se encontra totalmente entre os limites superior e inferior estabelecidos. Esta melhora pode ser observada nos gráficos das médias e das amplitudes, tendo em vista seus valores limites e médios.

No cenário 3, houve, também, uma melhora significativa do índice Cpk de -4,8 para -0,6. Contudo, o processo ainda é classificado como incapaz, ou seja, a média dos desvios se encontra fora dos limites estabelecidos. Porém, para outros limites superior e inferior, dentro do mesmo IT6 (19 µm), de 0 e -19, (classe h6), o processo do cenário 3 teria um cpk de 2,08, sendo classificado como capaz.

7. Conclusões

Nota-se que a estratégia proposta para o modelamento teve bom desempenho na previsão do desvio em diferentes situações. Totalizando todos os cenários, os modelos operando em conjunto tiveram menor desvio-padrão médio do que qualquer um dos modelos propostos operando individualmente (tabela 6).

Modelos atuando em conjunto mostram-se uma boa forma de manter um número reduzindo de sensores atuando na compensação térmica sem comprometer a previsão.

Testes com as variáveis de erro sendo aquecidas separadamente mostram-se uma boa forma de se entender a dinâmica do erro térmico e úteis na identificação de um modelo com bom funcionamento, ou seja, um modelo que obedece aos modos de erros térmicos.

8. Propostas para trabalhos futuros

1. Verificar a influência no erro térmico em usinagem real com variações nas condições de corte em centros de torneamento. Um vez que o campo térmico de um centro de torneamento operando em vazio pode apresentar diferenças do campo térmico de uma operação de usinagem real
2. Modelar desvios térmicos do eixo x e z ao longo do eixo z, uma vez que foi verificado a influência do aquecimento dos componentes do eixo z no erro de x. Constatou-se ainda que na coordenada z torneada, estes componentes estão simultaneamente aquecendo a estruturas logo abaixo do carro transversal. Em coordenadas z+ maiores, pode haver um desvio maior.
3. Estudar o comportamento do erro térmico ao longo do eixo x em diversas condições. Uma vez que os testes anteriores mostraram que, com a variação de velocidade, o maior diâmetro torneado pode sofrer tanto o maior quanto o menor desvio.

.

Apêndice A

Programa de usinagem utilizado na validação

```
G90 G95 G40
G54 G00 X200 Z5
G4 X10 (Tempo de simulação de carga e descarga de peça)
T01
M5
G96 S300
G92 S1740 M3
G00 X55 Z2
G01 Z-20 F.1
G01 X90
G00 X200 Z5
M99
```

Referências[1]

Bryan (1990) International status of thermal error research. *Annals of CIRP,* v.39, p.645-656.

Chen et al. (1993). Real-time Compensation for Time-variant Volumetric Errors on a Machining Center. *Journal of Engineering for Industry* v.115, p.472-479.

Chen, Yuan, e Ni, (1996). Thermal Error Modelling for Real-Time Error Compensation. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology,* v.12, p.266-275.

Du et al. (2002). Modeling approach of regression orthogonal experiment design for the thermal error compensation of a CNC turning center. *Journal of Materials Processing Technology,* v.129, p.619-623.

Hao et al. (2008). Thermal error optimization modeling and real-time compensation on a CNC turning center. *Journal of materials processing technology,* v.207, p.172-179.

Kim e Song (2013). Development of thermal deformation compensation device and cnc based real-time compensation for advanced manufacturing. *International Journal of Automotive Technology* , V.14, p.423-428.

Koliskor, et al. (1971). Compensating for Automatic-Cycle Machining Error. *Machine and Tooling, v*.41 n.5.

Komanduri e Hou (2001). Thermal modeling of the metal cutting process- part II: temperature rise distribution due to frictional heat source at the tool–chip interface. *International Journal Of Mechanical Sciences,* v.43, p.57-88.

Kuo e Lin J.F. (2006). General temperature rise solution for a moving plane heat source problem in surface grinding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* v.31, p.268-277.

[1] De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023

Lee e Yang (2002). Statistical optimization and assessment of a thermal error model for CNC machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* v.42, p.147-155.

Li et al.(2008). Thermal-error modeling for complex physical systems the state of arts review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology,* v.42, p. 168-170.

Moriwaki (1988). Thermal Deformation and Its On-Line Compensation of Hydrostatically Supported Precision Spindle" *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, V.37, p.393-396.

Qianjian e Jianguo (2011). Application of projection pursuit regression to thermal error modeling of a CNC machine tool. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology,* v.55, p.623-629.

Qianjian; Yang e Hao (2010). Application of ACO-BPN to thermal error modeling of NC machine tool. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology,* v.50,p.667-675.

Ramesh, et al. (2003). Thermal error measurement and modelling in machine tools. Part II. Hybrid Bayesian Network—support vector machine model. *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* v.43, p.405-419.

Ramesh, Mannan e Poo (2003). Thermal error measurement and modelling in machine tools. Part I. Influence of varying operating conditions. *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* v.43, p.391-404.

Sukaylo et al. (2004). Development and verification of a computer model for thermal distortions in hard turning. *Journal Of Materials Processing Technology,* v.155, p.1821-1827.

Tseng e Ho (2002). A Study of High-Precision CNC Lathe Thermal Errors and Compensation" - *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology,* v.19, p.850-858.

Vyroubal (2012). Compensation of machine tool thermal deformation in spindle axis direction based on decomposition method. *Precision Engineering,* v.36, p.121-127.

Yang, Yuan, e Ni (1999). Thermal error mode analysis and robust modeling for error compensation on a CNC turning center. *International Journal of Machine Tools & Manufacture,* v.39, p.1367-1381.

Zhang, Yang e Jiang (2012). Machine tool thermal error modeling and prediction by grey neural network. *International Journal Of Advanced Manufacturing Technology,* v.59, p.1065-1072.

Zhao, Yang e Shen (2007). Simulation of thermal behavior of a CNC machine tool spindle. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V.47, p.1003-1010.

Zhu, Ni e Shih (2008). Robust Machine Tool Thermal Error Modeling Through Thermal Mode Concept. *Journal of Manufacturing Science and Engineering,* v. 130, p.061006.1-061006.9.