

# **DIFERENÇAS E SIMILARIDADES DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DE MÁQUINAS FERRAMENTAS E MÁQUINAS DE MEDIR**

## **Rosenda Valdés Arencibia**

Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 [arvaldes@sc.usp.br](mailto:arvaldes@sc.usp.br)

## **Benedito Di Giacomo**

Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 [bgiacomo@sc.usp.br](mailto:bgiacomo@sc.usp.br)

## **Denise Pizarro Vieira Sato**

Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros - UniFEI  
Av. Humberto de A. C. Branco, 3972 - São Bernardo do Campo - SP- CEP:  
09850-901 [denise@4all.com.br](mailto:denise@4all.com.br)

**Resumo.** Este trabalho apresenta causas e efeitos das variações de temperatura ambiente no comportamento de Máquinas Ferramentas e Máquinas de Medir. É feita uma comparação entre uma Retificadora Cilíndrica CNC, de estrutura tipo T e uma Máquina de Medir a Três Coordenadas, do tipo Ponte Móvel. Aqui estão reunidas as seguintes características: tempo de equilíbrio, fontes de calor, materiais, memória térmica, estrutura metrológica, distribuição de temperatura e de massa, entre outros. Da análise pode-se concluir que a Máquina de Medir se mostrou com um projeto muito mais eficiente e, consequentemente, com efeitos térmicos menores.

**Palavras chaves:** Erros térmicos, “drift” térmico, estrutura metrológica.

## **1. INTRODUÇÃO**

As Máquinas Ferramentas e as Máquinas de Medir são muito sensíveis às mudanças nas condições ambientais devido à complexidade estrutural das mesmas. De todas as condições, são as variações de temperatura que produzem os maiores efeitos sobre a acuracidade e a repetibilidade dessas Máquinas (Bryan, 1990), alterando a grandeza e o comportamento dos erros individuais e, consequentemente, o erro total. De acordo com normas internacionais, os processos de fabricação e/ou as medições devem ser efetuados a uma temperatura de 20°C, definida como a temperatura padrão. Quando a temperatura é alterada, acontecem variações na estrutura da máquina e na peça, devido ao fenômeno de dilatação e ao efeito dos gradientes térmicos. São induzidos, assim, os denominados erros térmicos.

Se analisados cronologicamente os trabalhos publicados sobre erros térmicos nota-se que estes têm sido estudados por mais de 40 anos. Apesar dos esforços dedicados, houve pouco progresso até meados da década de 80, onde houve um pequeno incremento no número de trabalhos publicados, especificamente, sobre compensação de erros térmicos. Porém, os avanços alcançados na área permanecem muito distantes dos desejados. Os erros térmicos, seus custos e fontes ficaram e continuam praticamente esquecidos. Por tal motivo, ainda hoje, presta-se a eles uma atenção especial por serem considerados uma das fontes de erros mais importantes em Máquinas Ferramentas e Máquinas de Medir (Bryan, 1995).

A maioria dos trabalhos já desenvolvidos trata do estudo, modelagem e compensação dos erros térmicos em Máquinas Ferramentas, sendo que para Máquinas de Medir os trabalhos publicados, assim como, os avanços alcançados são incipientes. Por tal motivo, e devido às similaridades entre Máquinas Ferramentas e Máquinas de Medir torna-se possível e talvez necessário aplicar os conhecimentos adquiridos em Máquinas Ferramentas às Máquinas de Medir. Porém, há também diferenças que exigem a aplicação adequada destes conhecimentos. Assim sendo, o presente trabalho apresenta uma comparação entre os comportamentos térmicos de uma Máquina Ferramenta (Retificadora Cilíndrica CNC) e de uma Máquina de Medir a Três Coordenadas, do tipo Ponte Móvel. Na comparação foram consideradas as seguintes características: fontes de calor, materiais, tempo de equilíbrio, estrutura metrológica, distribuição de temperatura e de massa, entre outras.

## 2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DAS MÁQUINAS AVALIADAS

A Retificadora avaliada é do tipo cilíndrica, de fabricação da ZEMA Szelics, modelo G800, e foi desenvolvida para atender as mais diversas exigências de peças de alta precisão, produzidas em ciclo de mergulho, em pequenas, médias e grandes séries. Dentre as principais características desta máquina tem-se: estrutura em forma de T, fabricada de ferro fundido, guias e mancais hidrostáticos que proporcionam alta sensibilidade e excelente rigidez; comprimento máximo retificável 800mm e altura dos centros 140mm; cabeçote porta rebolo com movimentos nos eixos X e Z; movimentos obtidos através de fusos de esferas recirculantes de alta precisão.

A Máquina de Medir a Três Coordenadas, do tipo Ponte Móvel, fabricada pela Brown & Sharpe, apresenta uma estrutura fabricada de alumínio fundido, em forma de ponte que se movimenta relativamente a um desempeno de granito, sobre o qual são posicionadas e fixadas as peças. O desempeno está montado sobre esferas em blocos em V na estrutura fixa da máquina. São parte integrante, ainda, três conjuntos de mancais aerostáticos que permitem o movimento dos eixos X, Y e Z sobre as guias. Estes mancais necessitam de ar comprimido, seco e limpo para criar o colchão de ar que sustenta a parte móvel da estrutura. Cada eixo coordenado consta de duas escala de vidro, uma fixa e outra móvel. Esta máquina é operada manualmente e de acordo com suas dimensões e peso pode ser considerada de pequeno porte.

## 3. TESTES EXPERIMENTAIS

Para as duas máquinas, foram levantados todos os erros geométricos, utilizando-se um procedimento direto de calibração, assim sendo, através do uso do interferômetro laser Hewlett Packard, modelo HP5528A, foram levantados os erros de posição, de retilineidade e os erros angulares “pitch” e “yaw” de todos os eixos. Na determinação dos erros de ortogonalidade foi utilizado um esquadro mecânico e um apalpador LVDT. Enquanto que na determinação do erro “roll” foi utilizado o nível eletrônico da Rank Taylor-Hobson, modelo Talyvel 3. Foram coletadas também as variações termicamente induzidas para cada um dos erros geométricos em quatro pontos, distribuídos ao longo do eixo avaliado utilizando-se de testes de “drift”. A temperatura em diferentes pontos da estrutura da máquina foi monitorada utilizando-se de termopares do tipo T cobre-constantan (Valdés, 2003; Vieira Sato, 1998), que foram colocados em lugares devidamente escolhidos. Desta forma, foram obtidos dois conjuntos de dados para cada erro geométrico. Um contendo informações do erro geométrico a 20°C e outro contendo informações sobre a variação do erro e da temperatura.

## 4. RESULTADOS DA COMPARAÇÃO

A seguir estão apresentadas e discutidas as diferentes características utilizadas para comparação do comportamento térmico entre as Máquinas de Medir e Ferramenta, avaliadas.

#### 4.1. Fontes de Calor

Na Retificadora Cilíndrica e na MM3C estão presentes diferentes fontes de calor, Fig. 1. Como pode ser observado nesta Fig. (1) o número de fontes de calor na MM3C é menor que na Retificadora Cilíndrica, além disso, o calor gerado internamente é mínimo. Porém, a necessidade de requisitos de precisão mais rigorosos na Máquina de Medir torna os efeitos térmicos presentes mais significativos (Valdés, 2003).

#### 4.2. Materiais

A Retificadora avaliada é fabricada em ferro fundido, com fusos e porcas de aço. A Máquina de Medir por sua vez é constituída, majoritariamente, de alumínio. O alumínio absorve e/ou libera calor de forma mais rápida que o ferro fundido, enquanto o vidro e o granito apresentam coeficientes de dilatação baixos e, portanto, são menos susceptíveis às variações de temperatura ambiente.

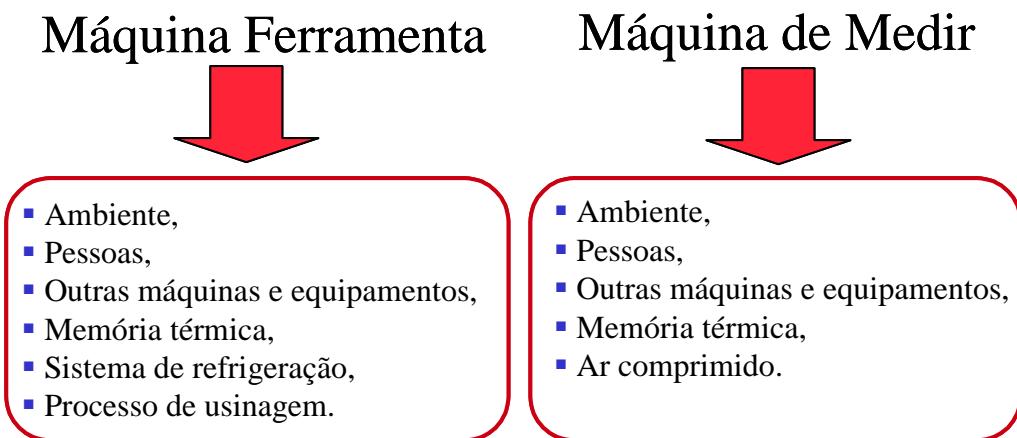


Figura 1- Fontes de calor.

#### 4.3. Memória Térmica. Tempo de Equilíbrio

Um aspecto muito importante, quando estudadas as influências térmicas, é a memória térmica. Todas as peças quando submetidas a variações de temperatura ambiente precisam de um certo tempo até alcançar o equilíbrio térmico com o novo ambiente. Durante este período as peças mudam de tamanho e podem sofrer distorções geométricas temporárias ou até permanentes (Bryan, 1995). O intervalo de tempo necessário para que as peças entrem em equilíbrio térmico com o novo ambiente é chamado tempo de equilíbrio. Somente depois de esquecido o ambiente anterior é que pode ser dito que a peça está em equilíbrio com o novo ambiente. Vale ressaltar que a memória térmica é característica de todos os objetos.

A Máquina de Medir a Três Coordenadas, avaliada, está composta por diversos componentes, a maioria deles fabricados em alumínio, outros de aço, granito e vidro. Durante o tempo de equilíbrio cada um destes materiais dilata-se em quantidades diferentes, gerando estados de deformação complexos.

Pode ser atribuído um caráter dinâmico às deformações termicamente induzidas em Máquinas Ferramentas e de Medir, uma vez que enquanto a temperatura ambiente varia a estrutura da máquina tenta acompanhar essa variação até alcançar o equilíbrio térmico. Durante esta fase a geometria dos componentes da máquina muda continuamente, assim como, as coordenadas dos pontos no volume de trabalho. Assim sendo, tanto a usinagem de peças quanto as medições

efetuadas durante o tempo de equilíbrio podem resultar erros sérios já que a resposta do sistema e as dimensões das peças são variáveis no tempo.

As características construtivas da Máquina de Medir, tais como, a utilização do alumínio para fabricar, aproximadamente, 80% de seus componentes, a fabricação das guias com secção transversal oca, com paredes finas e a utilização do granito para fabricação do componente de maior massa, permitem que ela atinja o equilíbrio térmico de forma rápida. Por sua vez, o ferro fundido utilizado na fabricação da Retificadora Cilíndrica absorve o calor menos rápido que o alumínio, isto unido à robustez da estrutura leva a que a referida máquina demore muito mais tempo que a MM3C para atingir o equilíbrio térmico (Di Giacomo e Valdés, 2002).

A fig. (2) mostra dois gráficos contendo as curvas que descrevem a variação termicamente induzida dos erros angulares “Yaw” do eixo X para ambas máquinas. Em todas a figuras incluindo a fig. (2), os dados da retificadora são dados à esquerda e os dados da Máquina de Medir à direita.

O comportamento do erro angular “Yaw” da retificadora mostra que o carro de movimentação X rotaciona em torno do eixo Y, inclinado-se no sentido positivo do eixo Z nas primeiras horas de ensaio, mas com o aquecimento da máquina um movimento inverso é observado fazendo com que o carro X retorne à posição original (Vieira Sato, 1998). Enquanto que, durante o aquecimento a Máquina de Medir rotaciona, aproximadamente, 20 arcoseg, em torno do eixo Y, no sentido positivo (Valdés, 2003).

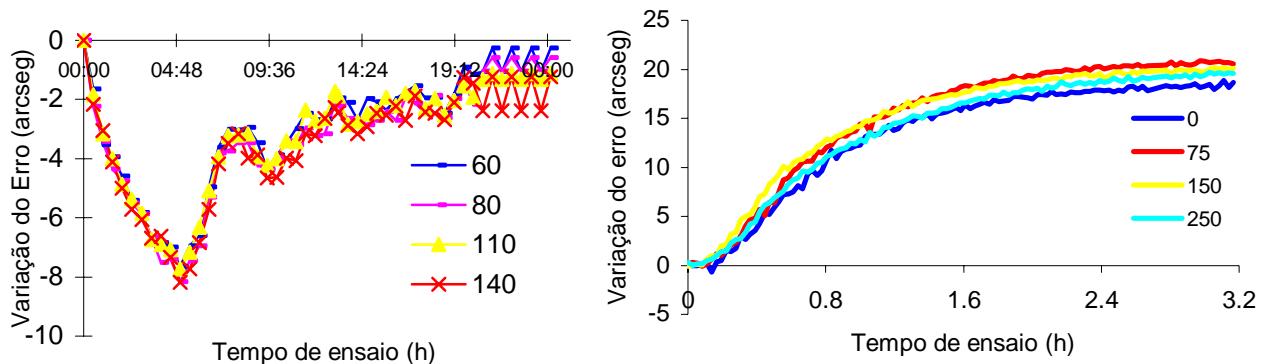


Figura 2 – Erro angular yawX para ambas máquinas.

Como pode ser observado a Máquina Ferramenta atinge o equilíbrio térmico, aproximadamente, após 22:00h de funcionamento (Vieira Sato, 1998). Enquanto que a MM3C responde de forma rápida às variações de temperatura ambiente, demorando, aproximadamente, 3:00h para entrar em regime estacionário (Valdés, 2003).

#### 4.4. Distribuição de Temperatura e de Massa

Em Máquinas Ferramentas e Máquinas de Medir a única fonte de calor que pode originar temperaturas uniformes diferentes de 20°C é o ambiente. Fontes de calor tais como pessoas, máquinas e sistemas eletrônicos originam temperaturas não uniformes.

As temperaturas não uniformes englobam gradientes e variações de temperatura (Bryan, 1995). Durante os testes desenvolvidos comprovou-se a existência de gradientes térmicos espaciais no local onde as máquinas, objetos de estudo, estavam instaladas. Observou-se, ainda, que apesar das máquinas atingirem o equilíbrio térmico nem todos os pontos da estrutura apresentavam os mesmos valores de temperatura. Isto devido à presença de fontes localizadas de calor.

A Fig. (3) mostra as curvas que descrevem a variação da temperatura de diferentes termopares localizados na estrutura da Máquina Ferramenta e da Máquina de Medir. Observa-se que as temperaturas permanecem quase estacionárias, porém com valores diferentes. Isto revela a

existência de uma distribuição não homogênea das temperaturas, a existência de gradientes de temperatura vertical e horizontal e a presença de deformação diferenciada.

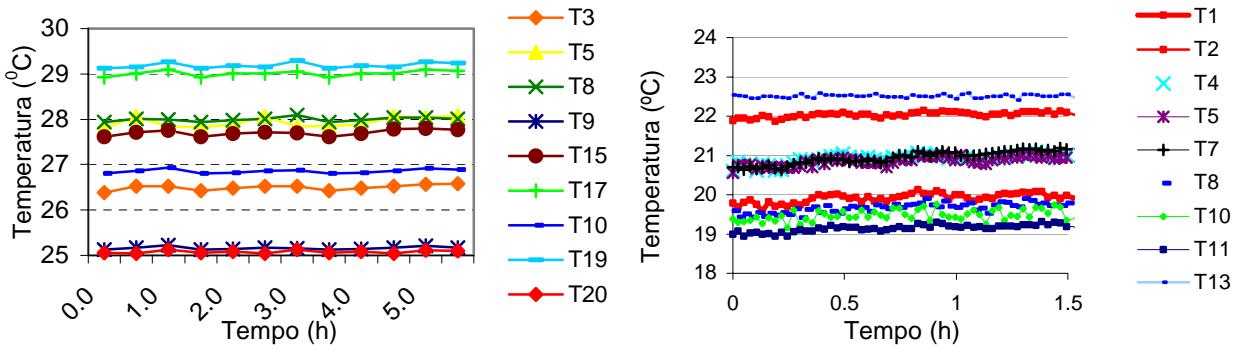


Figura 3. Distribuição de temperatura na estrutura das Máquinas Ferramenta e de Medir.

#### 4.5. Comportamento dos Erros Geométricos

A seguir são apresentados e discutidos diferentes erros geométricos pertencentes à Retificadora Cilíndrica.

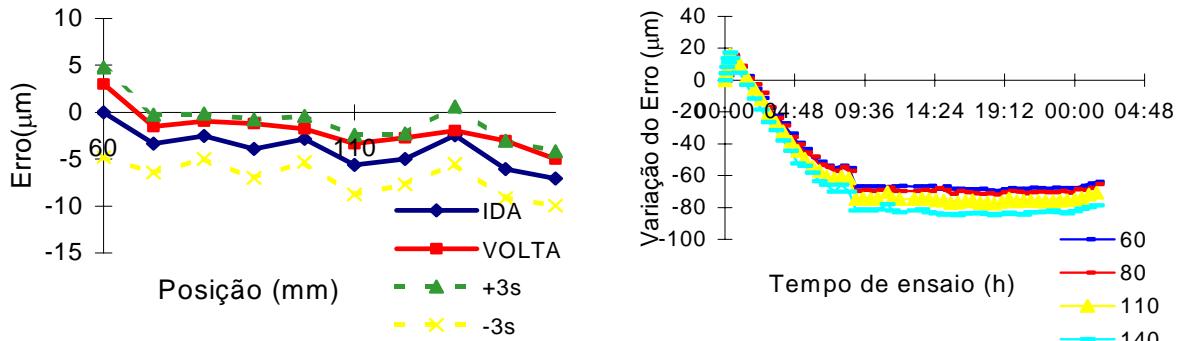


Figura 4. Erro de Posição no eixo X da retificadora e as curvas de “drift”.

O gráfico da Fig. (4) apresenta os resultados da medição do erro de Posição do eixo X no estado inicial de temperatura e os resultados das variações dos erros obtidos com os dados do arquivo “drift”.

Na Fig. (4), à esquerda, observa-se que o erro atinge o valor de  $-8\mu\text{m}$ , na posição 140mm, a diferença entre os dois sentidos de medição (ida e volta) é pequena e o desvio padrão está na faixa de  $\pm 3\mu\text{m}$  em torno do valor do erro. Na Fig. (4), à direita, pode ser observado que o comportamento do erro de posição do eixo X, durante os transientes térmicos difere em grandeza de uma posição de observação para outra, a maior diferença observada está entre as posições  $X=60\text{mm}$  e  $X=140\text{mm}$ , sendo de, aproximadamente,  $20\mu\text{m}$ .

As curvas descrevendo o erro de retilineidade do eixo Z na direção X estão mostradas no gráfico da Fig. (5). Pode-se observar que este erro é muito pequeno (praticamente zero) e o erro aleatório é relativamente grande quando comparado aos valores médios.

Na Fig. (5), à direita, pode ser visualizada a variação do erro durante todo o tempo de ensaio. Nota-se, neste gráfico, que o comportamento da variação do erro é bastante semelhante para todas as posições, apresentando uma diferença máxima de até  $15\mu\text{m}$ . O aumento do erro de retilineidade devido às influências térmicas indica um afastamento das guias do eixo Z com relação à peça. Dentre as possíveis causas deste comportamento pode-se citar a deformação, devido à temperatura,

da calha de fluído refrigerante. O tempo de estabilização da variação deste erro foi por volta de 10 horas de ensaio.

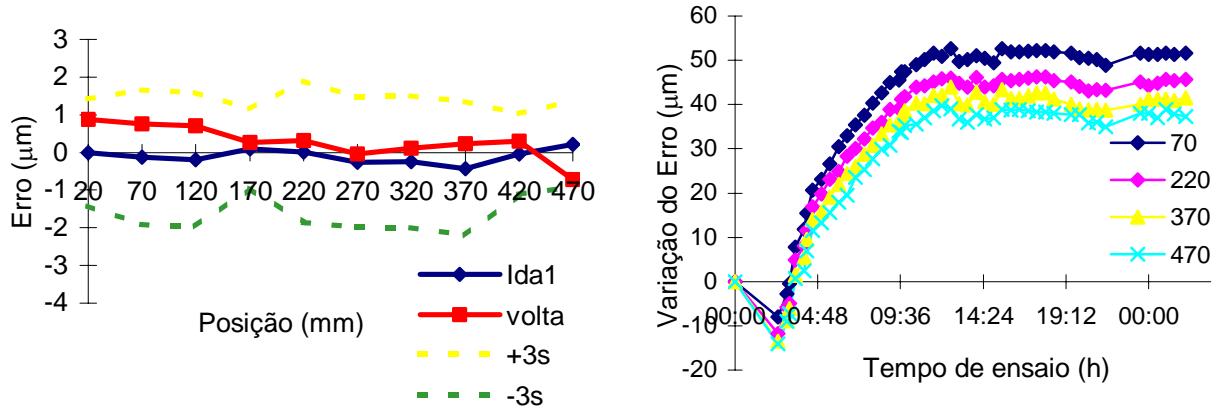


Figura 5. Erro de Retilineidade do eixo Z na direção X da Retificadora e as curvas de “drift”.

Alguns dos erros geométricos da MM3C são apresentados e discutidos a seguir.

Na Fig. (6), à esquerda, pode ser observado que o erro de posição do eixo Y para 20°C é positivo, com tendência crescente e histerese de 3.7µm, permanecendo quase constante ao longo do eixo Y. O intervalo ±3S também é bastante reduzido.

O gráfico da Fig. (6), à direita, apresenta as curvas que descrevem a variação termicamente induzida do erro de posição do eixo Y. Observe no gráfico que o erro avaliado tem um comportamento diferente em cada posição, apresentando uma maior variação nos extremos do eixo. Uma análise efetuada a partir das curvas de “drift” dos erros de posição revelou que as guias e as escalas da Máquina de Medir dilatam-se a partir de um local muito próximo de seus centros, provocando uma variação diferenciada ao longo do eixo. Esta variação do erro diminui a medida que os valores da coordenada Y aproximam-se da metade do percurso de medição nesta direção e apresenta um sinal que depende da posição de medição, isto é, do valor da coordenada Y.

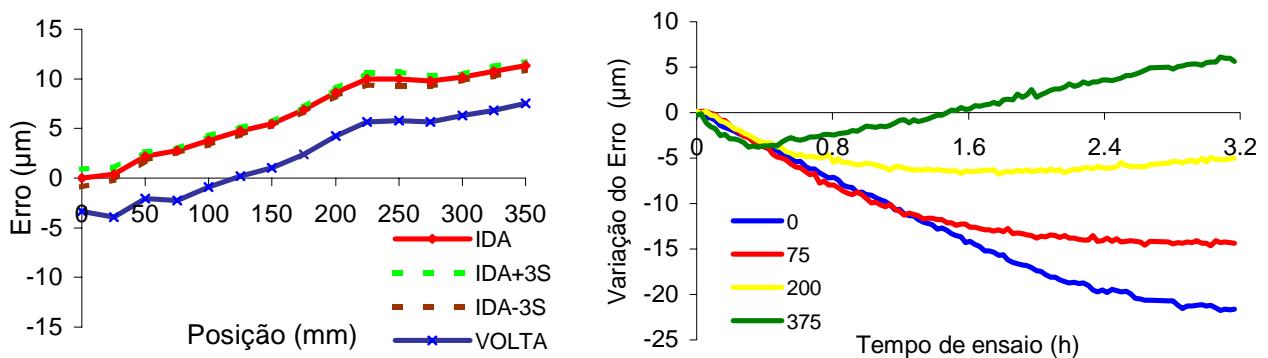


Figura 6. Erro de posição do eixo Y para 20°C e as curvas de “drift”

Uma análise efetuada com os dados dos erros de posição do eixo Y da Máquina de Medir revelou que a variação termicamente induzida dos erros de posição apresenta um comportamento diferenciado ao longo do eixo. A variação experimentada por estes erros depende da posição de observação, da temperatura, do material da guia e da escala e do princípio de montagem entre os dois últimos (Di Giacomo e Valdés, 2002).

Resultados similares foram observados para todos os eixos de movimentação. Assim sendo, recomenda-se que as peças a serem medidas durante os transientes térmicos sejam posicionadas no centro do desempeno onde a grandeza dos erros termicamente induzidos é menor.

O erro de retilineidade do eixo X, Fig. (7), à esquerda, apresenta valores pequenos, menores que  $2\mu\text{m}$ . A histerese é pequena e os erros aleatórios oscilam na faixa  $\pm 1.5\mu\text{m}$  em torno dos valores do erro do sentido de ida.

A Fig. (7), à direita, mostra as curvas de “drift” do erro de retilineidade do eixo X na direção Z. Observa-se neste gráfico que as curvas apresentam grandeza e comportamentos similares em toda as posições. As diferenças observadas podem ser atribuídas ao sistema de controle de temperatura do local onde a máquina se encontra localizada.

O comportamento térmico dos erros de retilineidade e angulares de todos os eixos, da MM3C, não depende da posição do carro de movimentação, correspondente, portanto, durante a coleta do “drift” térmico estes erros podem ser levantados em apenas um ponto. Com isto são reduzidos, consideravelmente, o tempo de calibração e o número de dados a serem manipulados.

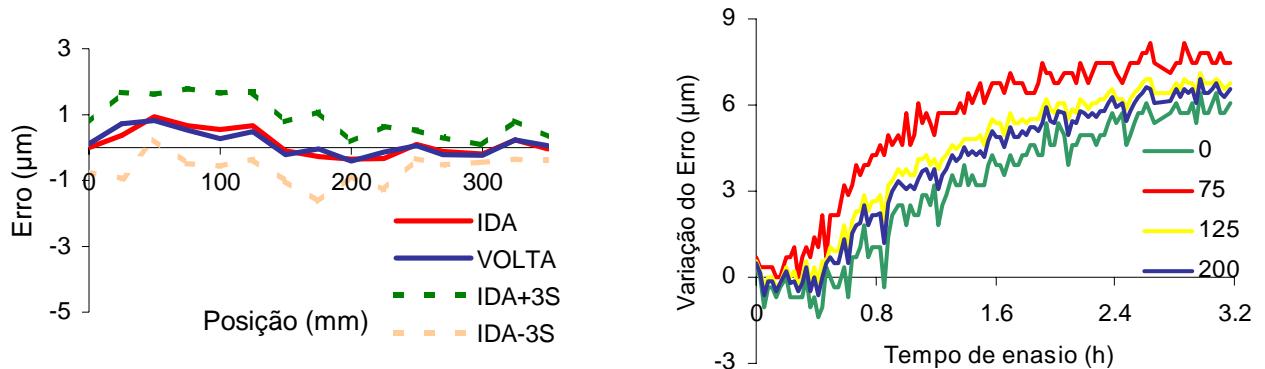


Figura 7. Erro de Retilineidade do eixo X na direção Z para  $20^\circ\text{C}$  e as curvas de “drif”

#### 4.6. Estrutura Metrológica

O estudo realizado mostrou que a Retificadora Cilíndrica, além da dilatação térmica de seus componentes, experimentou deformações termicamente induzidas. Enquanto que a MM3C dilatou-se e contraiu-se livremente, rodando em torno de um ponto.

A Máquina de Medir mostrou ter um projeto e uma montagem mais inteligentes que a retificadora, assim sendo, a referida máquina trabalha como uma estrutura metrológica, que não apresenta restrições à dilatação.

### 5. CONCLUSÕES

Ao finalizar este trabalho podem ser apresentadas as seguintes conclusões.

A comparação do comportamento térmico revelou que para a Retificadora Cilíndrica as alterações térmicas da estrutura têm forte influência no comportamento de todos os erros geométricos. Para a Máquina de Medir os transientes térmicos influenciam de forma significativa o comportamento dos erros de posição, enquanto que o comportamento dos erros de retilineidade e angulares de todos os eixos permaneceu constante em todas as posições de observação.

O número de fontes de calor na Máquina de Medir é menor que na Retificadora, assim como o calor gerado internamente.

O tempo de equilíbrio é de, aproximadamente, 3 e 22 horas para a Máquina de Medir e a Retificadora Cilíndrica, respectivamente.

A MM3C se mostrou com um projeto mais eficiente e, conseqüentemente, com efeitos térmicos menores.

A Retificadora Cilíndrica avaliada, cuja estrutura é em forma da “T”, apresentou deformações termicamente induzidas significativas.

A MM3C responde mais rapidamente às variações de temperatura ambiente do que a Retificadora, por apresentar uma melhor distribuição de massa, além de uma estrutura e guias oca fabricadas de alumínio.

A variação termicamente induzida dos erros de posição, na MM3C, depende da posição, da temperatura, do material da guia e da escala e do princípio de montagem entre ambos.

Na Máquina de Medir o “drift” térmico para os erros de retilineidade e angulares de todos os eixos pode ser levantado em apenas um ponto de observação, enquanto que na Retificadora Cilíndrica torna-se necessário o levantamento do “drift” em pelo menos 4 pontos. Com isto o número de dados a serem manipulados durante a modelagem do comportamento térmico na MM3C é, consideravelmente, menor, assim como o tempo necessário para a coleta dos dados.

A Máquina de Medir apresenta uma vantagem adicional em relação à Retificadora Cilíndrica. Esta vantagem consiste na possibilidade de correção dos erros térmicos em Máquinas de Medir após efetuar a medição, enquanto para a Retificadora estes efeitos devem ser corrigidos durante a usinagem das peças.

## **6. AGRADECIMENTOS**

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) e ao CNPq pelo suporte financeiro para desenvolvimento das pesquisas.

## **7. REFERÊNCIAS**

- Di Giacomo, B.; Valdés, R.A., 2002, “Estudo do Comportamento Térmico de Máquinas de Medir de Tres Coordenadas”. Revista Internacional Información Tecnológica, Chile, Vol.13, No. 6, pp.111-116.
- Bryan, J.B., 1990, “International Status of Thermal Error Research”. Annals of the CIRP, Vol. 39, No. 2, pp. 645-656.
- Bryan, J.B., 1995, “Temperature Fundamentals”. Cap. 8, pp.227-264 in Bosch, J.A., 1995, “Coordinate Measuring Machines and Systems”. Marcel Dekker, Inc.
- Valdés, A.R., 2003, “Modelo de Sintetização de Erros Termicamente Induzidos em Máquinas de Medir a Três Coordenadas”. Tese (doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo. São Carlos. São Paulo. Brasil. 191p.
- Vieira Sato, D.P., 1997, “Uma Contribuição ao Modelo de Sintetização de Erros em Máquinas Ferramentas”, Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos –Universidade de São Paulo. Brasil. 193p.

## **DIFFERENCES AND SIMILARITIES OF THE THERMAL BEHAVIOUR OF MACHINES TOOLS AND MEASURING MACHINES**

### **Rosenda Valdés Arencibia**

Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 [arvaldes@sc.usp.br](mailto:arvaldes@sc.usp.br)

### **Benedito Di Giacomo**

Escola de Engenharia de São Carlos. Av. Trabalhador Sãocarlense N.400 Bairro Centro. São Carlos. SP. CEP: 13566-590 [bgiacomo@sc.usp.br](mailto:bgiacomo@sc.usp.br)

### **Denise Pizarro Vieira Sato**

Fundação Educacional Inaciana Pe. Sabóia de Medeiros – UniFEI. Av. Humberto de A. C. Branco, 3972 - São Bernardo do Campo - SP- CEP:  
09850-901 [denise@4all.com.br](mailto:denise@4all.com.br)

**Abstract.** This work aims to present a causes and effects of thermal variations in the behaviour of machine tools and coordinate measuring machines. The comparison performed between a CNC grinding machine and a moving bridge coordinate measuring machine copes with the following characteristics: soak-out time, heat sources, materials, thermal memory, metrological structure, temperature and mass distributions, among others. The thermally induced deformations on the measuring machine are less significant due to its enhanced design.

**Keywords:** Thermal Errors, thermal drift, metrological structure.