

INTEGRAÇÃO DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS NA MEDIÇÃO EM LINHAS DE PRODUÇÃO

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Resumo: Existem grandes vantagens potenciais ao integrar o sistema de medição por coordenadas junto à linha de produção seriada. Com essa abordagem, o diagnóstico dimensional das peças seria feito seguinte à sua fabricação, eliminando movimentações de materiais e perdas de tempo, além da informação gerada estar atualizada com a condição do processo produtivo e, eventuais desajustes serem detectados quase em tempo real. No entanto, a busca dessas vantagens ao integrar a medição na linha de produção traz consigo desafios metrológicos, devido às condições pouco controladas dos ambientes de produção. Este artigo irá descrever as vantagens e desafios da integração da medição por coordenadas em linhas de produção, descrevendo tecnologias existentes atualmente e incluindo ensaios realizados em sistemas de medição por coordenadas para avaliar a influência da temperatura sobre os resultados.

Palavras-chave: Metrologia, Medição por coordenadas, Automação da manufatura

1. PRESENÇA E IMPORTÂNCIA DA MEDIÇÃO POR COORDENADAS NO CONTROLE DE PROCESSOS SERIADOS

A Tecnologia de Medição por Coordenadas é o recurso mais poderoso que a indústria possui para o desenvolvimento dimensional de produtos, controle dimensional de peças e melhoria da capacidade de processos. Por causa das suas enormes potencialidades geométricas, boa exatidão, flexibilidade e automatização, a Medição 3D tem sido cada vez mais necessária nas diversas cadeias produtivas. Nesse contexto, ela é largamente utilizada nas etapas de desenvolvimento do produto, de desenvolvimento dos processos e no controle de processos seriados. No controle dimensional de processos seriados a Medição por Coordenadas atua em diversas fases do andamento da produção (Fig. 1) (Sousa, 2014).

Desenvolvimento de produto



Desenvolvimento de processo



Controle de processo e de produto

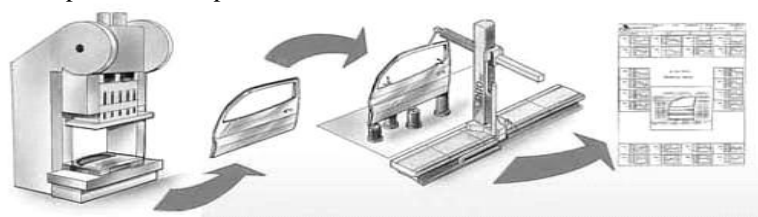


Figura 1 - Presença da medição por coordenadas na garantia de qualidade de processos seriados

Independente da etapa de produção seriada em que a medição por coordenadas é realizada, a confiabilidade dos resultados gerados é o requisito mais importante para o sucesso das operações de medição. Medições erradas levam a ajustes indevidos em processos e ferramentais de produção, e também à classificação indevida de produtos, quando peças fora das tolerâncias são aprovadas e peças dentro das tolerâncias são reprovadas (Pfeifer, 2002). Este requisito faz com que a medição por coordenadas classicamente opere em condições ambientais bem controladas e protegidas de fatores perturbadores como temperatura, vibrações e impurezas, e assim a medição é realizada desconectada fisicamente do processo produtivo, no que se convencionou a chamar de medição *off line*. Esta abordagem auxiliar grandemente na obtenção de baixa incerteza de medição necessária à boa confiabilidade metrológica dos resultados, mas esta desconexão física com os processos produtivos gera entraves operacionais que geram perdas de produtividade.

2. VANTAGENS OPERACIONAIS DA MEDIÇÃO INTEGRADA NA LINHA DE PRODUÇÃO

A integração das atividades de medição dentro do processo produtivo classicamente têm ocorrido com instrumentação simples como instrumentos manuais (paquímetros, micrômetros, ...) calibradores, sensores de medição pontuais, ogivas de medição, dentre outros. Embora tenham sua importância comprovada junto aos processos, estes métodos de medição nem de longe possuem a capacidade de revelar informações geométricas como a medição por coordenadas. Dadas as enormes potencialidades e boa exatidão, a medição por coordenadas é largamente empregada em produção seriada mas, devido a requisitos operacionais e metrológicos, sua atuação se dá quase que exclusivamente *off line*, ou seja, afastada e desconectada da linha de produção. Este afastamento gera atividades adicionais de movimentação de materiais, tempos de espera para estabilização térmica, dentre outras tarefas, que impactam no andamento da produção e em sua produtividade. No aspecto qualidade, este afastamento espacial e temporal da medição em relação à produção provoca demora em ações corretivas nos processos de produção. Há sempre um retardo entre a ocorrência de um desajuste na fabricação, a sua percepção pela medição e o ajuste para correção de desvios neste processo (Fig. 2).

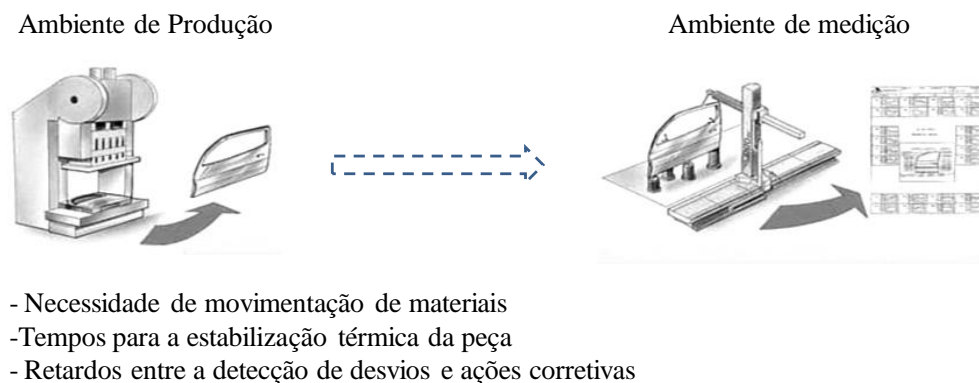


Figura 2 - Características da medição por coordenadas em modo *off line*

Existiriam assim, em tese, grandes vantagens potenciais ao integrar o sistema de medição por coordenadas junto à linha de produção, pois, com essa abordagem, o diagnóstico dimensional das peças seria feito seguinte à sua fabricação, eliminando movimentações de materiais e perdas de tempo, além da informação gerada estar atualizada com a condição do processo produtivo e, eventuais desajustes serem detectados quase em tempo real. Outra vantagem potencial desse cenário é a possibilidade de conexão computacional do sistema de medição com o sistema de fabricação, permitindo a correção automática de desvios de processo a partir da medição da peça. Com este objetivo os sistemas de medição por coordenadas têm evoluído na perspectiva de serem aplicados junto aos processos produtivos, havendo várias aplicações atualmente neste sentido (Fig. 3). É todo um cenário potencialmente vantajoso em relação à medição fora da linha de produção, mas que tem sua aplicação limitada por fatores de influência sobre os resultados que impactam na confiabilidade metrológica dos processos de medição.

3. DESAFIOS METROLÓGICOS DA MEDIÇÃO INTEGRADA NA LINHA DE PRODUÇÃO

A busca das vantagens descritas ao integrar a medição na linha de produção traz consigo desafios metrológicos (Fig. 4). Áreas de produção possuem características ambientais bastante agressivas às atividades de medição tais como:

- Temperatura sem controle, variando bastante conforme o período do dia e a época do ano;
- Vibrações geradas pelas máquinas de produção (centros de usinagem, prensas, etc) e por sistemas de transporte (empilhadeiras, pontes rolantes);
- Nível de sujidade potencialmente alto: poeira, partículas líquidas em suspensão, etc

Além disso existem influências dos próprios processos produtivos, como o calor residual existente nas peças ao serem fabricadas, e a existência de irregularidades superficiais como rebarbas, cavacos e resíduos de fluidos de corte. Estes aspectos podem provocar erros de medição sistemáticos e aleatórios que, se não mantidos sob controle, podem gerar erros nos ajustes de processos seriados e controle de produtos que inviabilizam a aplicação da medição por coordenadas nesse cenário.

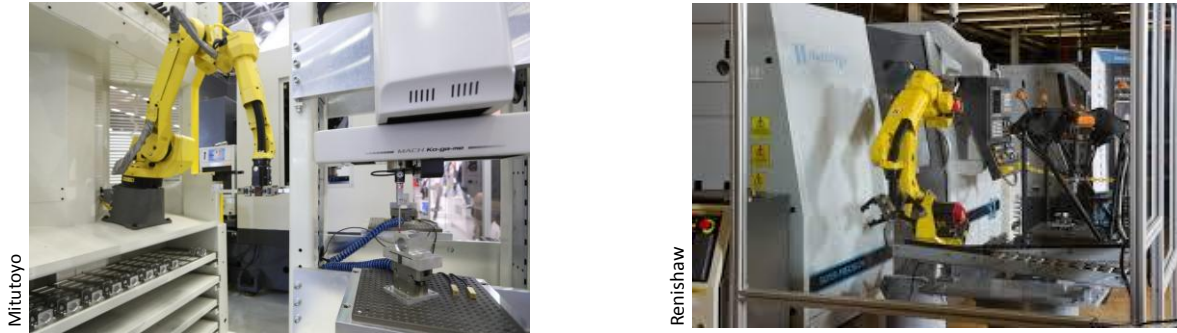


Figura 3 - Sistemas de Medição por Coordenadas para medição *in line* junto aos processos produtivos

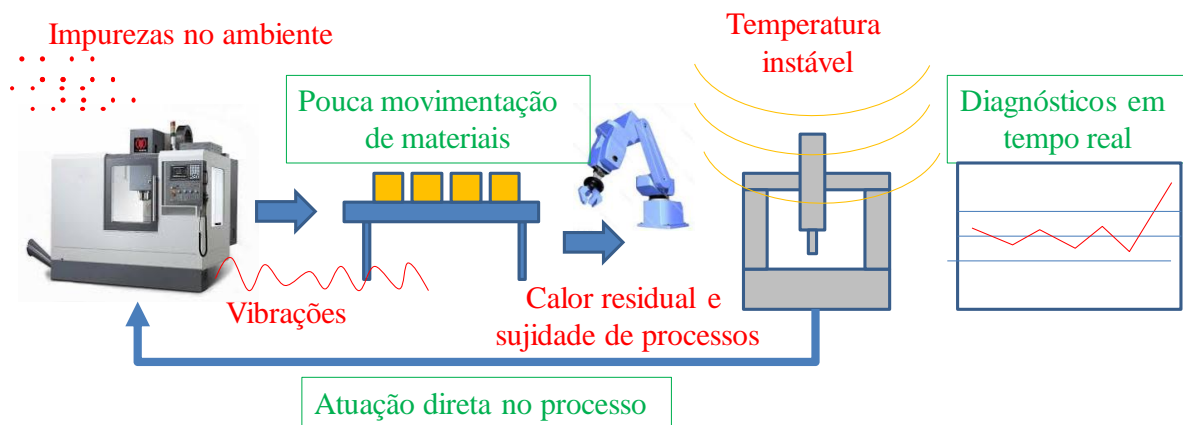


Figura 4 - Vantagens e desafios da medição por coordenadas em modo *in line*

De todas as fontes de influência sobre os resultados de medição a temperatura é o fator que mais gera preocupação no momento de empregar a medição por coordenadas em modo *in line*. A temperatura dos ambientes de produção bem como a temperatura das peças após o processo podem variar para bem distante da temperatura normalizada de 20° C definida pela Norma ISO 1, prejudicando a exatidão da máquina de medir e alterando a dimensão das peças. Tomando como exemplo uma máquina de medir com escalas de medição de vidro medindo uma peça de 300 mm, o erro causado pela dilatação diferencial entre máquina de medir e peça (em μm) pode ser estimado pela equação (1), na forma:

$$Erro = L \cdot \{[(T_1 - 20) \cdot \alpha_1] - [(T_2 - 20) \cdot \alpha_2]\} \quad (1)$$

Assumindo o valor do coeficiente de dilatação térmica de 7,8 $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$ para o vidro, e analisando a dilatação para peças de aço (11,5 $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$) e alumínio (23,5 $\mu\text{m}/\text{m} \cdot ^\circ\text{C}$), a estimativa do erro de medição pode ser vista no gráfico da Fig. 5, que considera a temperatura de peça e máquina idênticas.

Se for considerado que exista diferença de temperatura entre a peça e a máquina, os erros podem ser maiores. O gráfico da Fig. 6 ilustra a estimativa de erros de medição praticados com uma máquina em um ambiente a 27°C, medindo peças de aço e alumínio acima desta temperatura aquecidas pelo calor residual dos processos de fabricação.

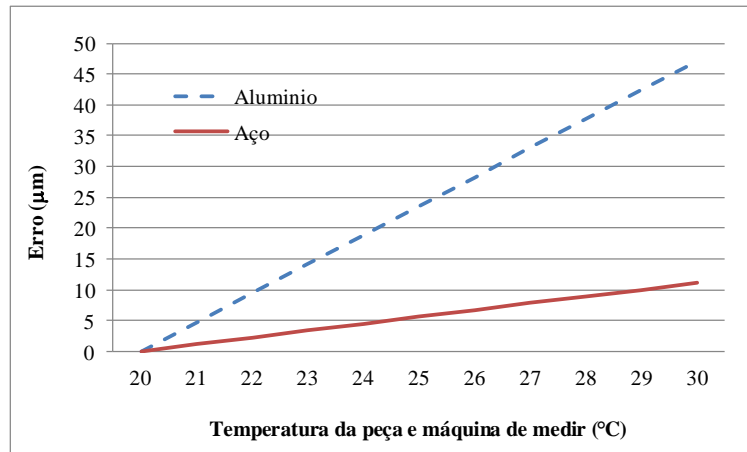


Figura 5 - Erro de medição causado por efeito da temperatura ambiente sobre a máquina de medir e uma peça de 300 mm

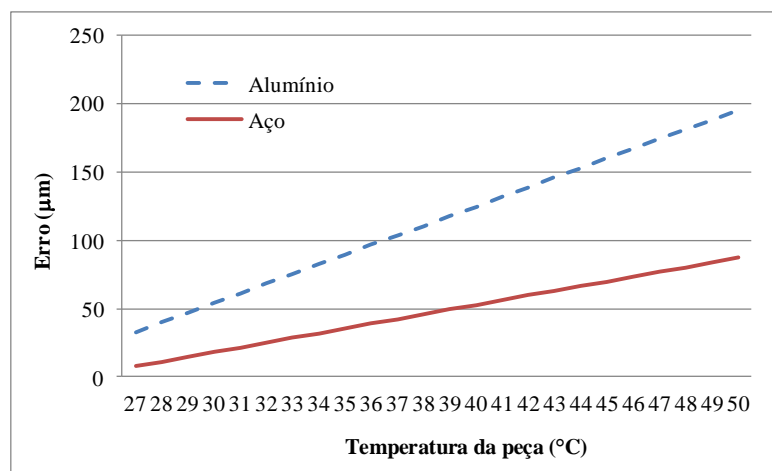


Figura 6 - Erro de medição causado pela diferença entre as temperaturas da máquina de medir (a 27°C) e a peça

Além dos aspectos metrológicos, outro aspecto importante para a aplicação da medição por coordenadas em linha é a necessidade de disponibilidade operacional dos equipamentos. Uma vez implantada na medição *in line* a medição por coordenadas é uma ferramenta de processo, atuando como sensor que gera informações para ajustes e alarmes. Nesse contexto o processo produtivo é bloqueado em caso de má função no processo de medição, e assim os equipamentos devem apresentar uma alta taxa de disponibilidade, bem como uma pronta assistência técnica em caso de problemas.

4. MÉTODOS PARA MINIMIZAR O EFEITO DA TEMPERATURA NA MEDIÇÃO EM LINHA

Para a redução dos efeitos da temperatura sobre os processos de medição por coordenadas em linha podem ser aplicados métodos **absolutos** ou **diferenciais** para corrigir ou compensar estes efeitos.

O **método de medição absoluto** opera por meio da indicação direta dos resultados, sendo aplicado sobre eles uma correção matemática da dilatação térmica da máquina de medir e da peça, obtidos a partir do conhecimento dos materiais e temperaturas destes. A máquina de medir mostrada na Fig. 7 pode operar segundo este método. O equipamento possui sensores de temperatura nas escalas dos eixos cartesianos e sensores que são apoiados sobre a peça a medir ao longo do processo de medição (Hocken, 2012). O monitoramento das temperaturas das escalas da máquina e da peça permite estimar o erro de medição por meio da equação 1, e este erro é corrigido dos resultados das medições. Com isso, os resultados são, em teoria, calculados na referência normalizada de 20°C.

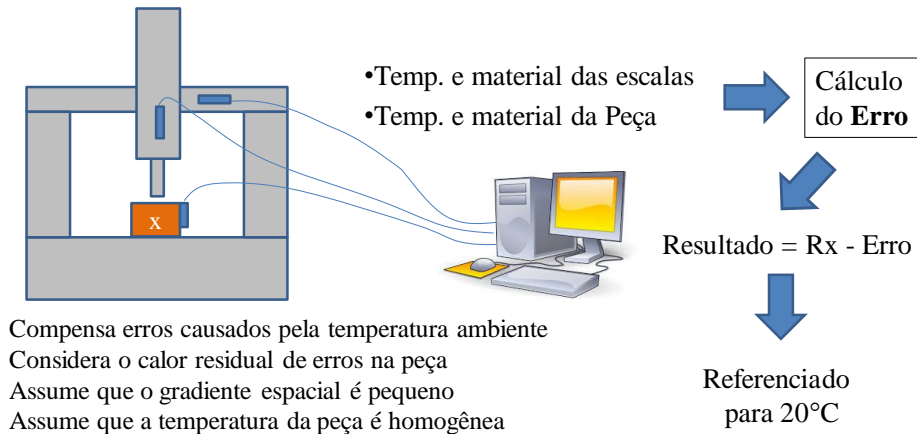


Figura 7 - Correção do efeito da temperatura em medição por coordenadas operando em modo absoluto

No **método diferencial** de medição por coordenadas (Fig. 8) a máquina de medir funciona como um comparador de medição, havendo a necessidade de uma peça calibrada para "zerar" a máquina. Esta peça calibrada tem suas dimensões definidas em uma máquina de medir de boa exatidão a 20°C, assumindo uma baixa incerteza de medição nestas dimensões. Uma vez calibrada, a peça fica posicionada na máquina de medir em linha no ambiente de produção, sofrendo o mesmo efeito da temperatura ambiente. Em operação esta peça calibrada é medida e os valores indicados são assumidos como nominais pela máquina de medir. Quando inicia o controle seriado, as peças de produção são medidas e as diferenças com a peça calibrada são calculadas e esta informação é empregada para o diagnóstico dos processos e produtos. Caso a temperatura ambiente se varie acima de um valor definido pelo usuário, a peça calibrada deve ser medida novamente e o sistema de medição novamente "zerado" com os valores obtidos. Uma outra estratégia, mais demorada, é a medição sempre da peça calibrada ao medir cada peça de produção. A máquina de medir por coordenadas visualizada na figura 7 pode operar também segundo o método diferencial, e existem no mercado sistemas de medição que opera especificamente no modo diferencial, com a máquina de medir visualizada na figura 8. Estas estratégias para lidar com a questão da temperatura estão presentes em vários sistemas de medição por coordenadas. Algumas máquinas de medir operam de modo absoluto ou diferencial, enquanto outros sistemas operam somente em modo diferencial.

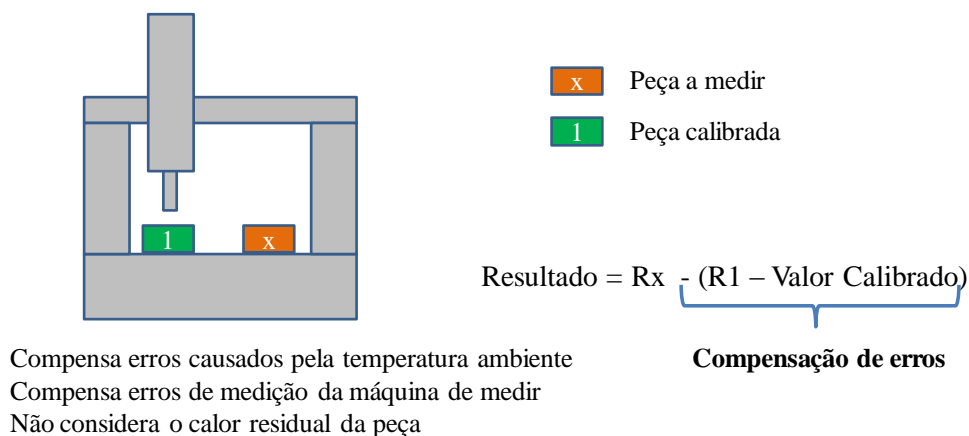


Figura 8 - Correção do efeito da temperatura em medição por coordenadas operando em modo diferencial

5. AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA METROLÓGICA DA COMPENSAÇÃO DE TEMPERATURA

Para avaliação da eficiência destes métodos de compensação do efeito da temperatura foram realizados ensaios com máquinas de medir operando em modo absoluto e diferencial. Nos testes em modo absoluto foi empregada inicialmente uma máquina Mitutoyo Crysta Apex 574 equipada com sensores de temperatura nas escalas e na peça, localizada em um ambiente de medição sem controle de temperatura (Fig. 9). Esta máquina está integrada a um robô Nashi que realiza a carga e descarga automática da peça.



Figura 9 - Máquina de medir integrada a robô em ambiente sem controle de temperatura

Neste teste o diâmetro e altura em uma mesma peça foram medidos ao longo de cerca de 7 horas em um ambiente onde a temperatura da máquina e da peça variou cerca de 3°C. Todas as medições ocorreram com a ativação da compensação automática de temperatura da máquina, e os resultados obtidos em medições de diâmetro e altura em uma peça de aço mantiveram-se praticamente estáveis. A Fig. 10 mostra a variação dimensional medida em relação à primeira medição (11:27), e a variação de temperatura ambiente.

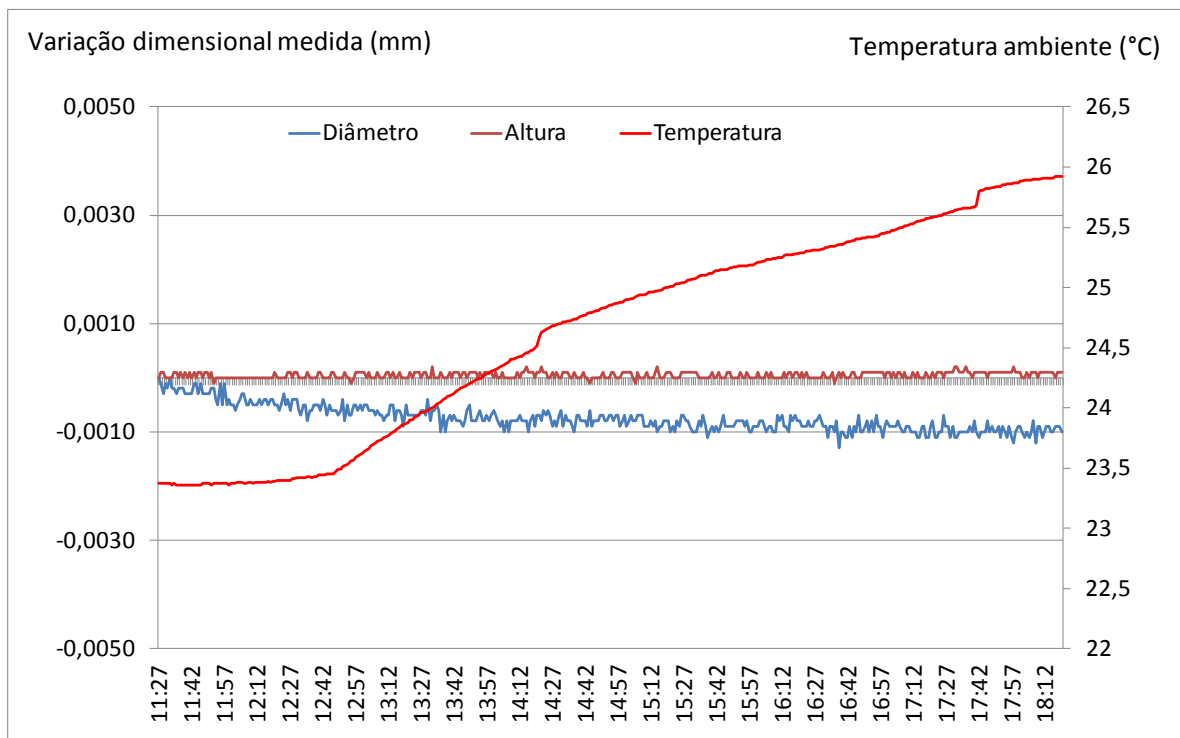


Figura 10 - Variação dimensional da peça com a correção automática do efeito da temperatura

Nos testes anteriores a peça foi deixada no mesmo ambiente da máquina, possuindo praticamente a mesma temperatura, para avaliar o efeito da temperatura ambiente. No entanto, em um processo seriado normalmente não há tempo para a peça a medir estabilizar junto à máquina. Quase sempre, uma peça que sai do processo de fabricação possui temperatura acima da máquina a medir. Para avaliar a eficiência da compensação da temperatura presente pelo calor residual de processo na peça, outro teste foi realizado agora com uma máquina de medir Mitutoyo Crysta Apex S 7106 em um ambiente com temperatura próxima a 20°C, para minimizar a parcela de erro causado pelo ambiente (Fig.11).

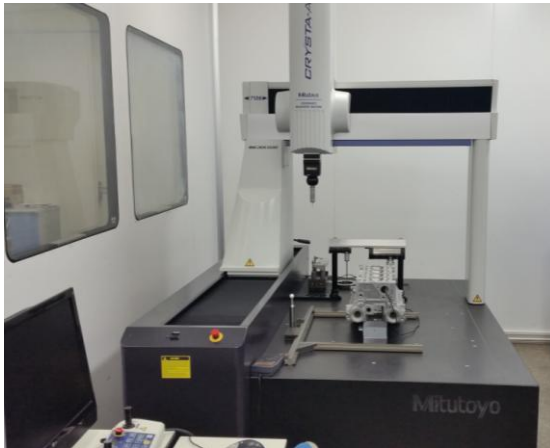


Figura 11 - Infraestrutura laboratorial empregada para compensação de calor residual da peça

Neste teste uma peça de alumínio (cabeçote de motor de automóvel) foi climatizada e medida a 20°C para estabelecer valores de referência de 3 dimensões (largura, comprimento e distância). Estes valores de referência encontram-se na tabela 1, a seguir.

Dimensão	Comprimento	Distância	Largura
Valor de referência (mm)	392,1790	335,9910	166,2460

Tabela 1: Valores de referência das dimensões da peça estabelecidos a 20°C

Após isso esta mesma peça de alumínio foi deixada em um refrigerador até a sua temperatura chegar próximo a 12°C. Neste momento a peça foi levada até a máquina de medir, sendo medida duas vezes a cada 1°C de variação aproximadamente, enquanto a peça sofria a estabilização térmica natural até atingir a temperatura da sala de medição. A Fig. 12 mostra a variação dimensional ocorrida nos resultados das medições em relação ao valor de referência da tabela 1, e a temperatura em que as medições foram feitas, podendo-se observar uma variação reduzida, por causa da compensação automática de temperatura.

Após este teste, a peça foi levada até um aquecedor até sua temperatura chegar próximo a 32°C. Neste momento a peça foi novamente levada à sala de medição, sendo medida duas vezes a cada 1°C de variação aproximadamente até sua temperatura atingir temperatura de 20°C. Os resultados deste teste podem ser visualizados na Fig. 13, podendo-se constatar novamente a eficiência do processo de compensação de temperatura presente na máquina de medir Crysta Apex da Mitutoyo, mesmo diante de uma variação severa de temperatura na peça, de 12,22°C até 31,92°C.

Para efeito de comparação, as variações esperadas para estas mesmas características dimensionais caso as compensações de temperatura não estivessem ativadas são mostrados na tabela 2 a seguir. Os erros residuais após a correção de temperatura não podem ser considerados significativos tendo em vista que estão dentro da incerteza de medição da máquina de medir por coordenadas para estas dimensões.

Dimensão	Largura	Comprimento	Distância
Varição nos resultados com a compensação de temperatura	0,0769 mm	0,1825 mm	0,1555 mm
Varição esperada sem a compensação de temperatura	0,0029 mm	0,0047 mm	0,0038 mm
Redução da variação dimensional com a compensação	97%	95%	98%

Tabela 2: Variação dimensional medida e estimada diante da variação de temperatura imposta à peça

Resultados obtidos de outro ensaio buscam avaliar a eficiência da compensação do efeito da temperatura em um sistema de medição por coordenadas que opera em modo diferencial, modelo Renishaw Equator. Nestes testes um anel padrão com diâmetro de 50 mm foi medido 180 vezes ao longo de 3 dias, mediante duas condições de teste. Na primeira condição (Fig. 14) o anel foi medido em modo absoluto ao longo de todo o tempo, sem nenhuma zeragem. Nessa condição, o erro de medição em relação ao valor nominal do anel variou cerca de 3,5 µm ao longo de todas as medições. O valor elevado do erro (cerca de 0,150 mm) deve-se à parcela de erro sistemático do sistema de medição, não compensado neste teste inicial pois o mesmo operou em modo absoluto, fora da característica normal de funcionamento do sistema. Durante estes testes a temperatura variou cerca de 3°C.

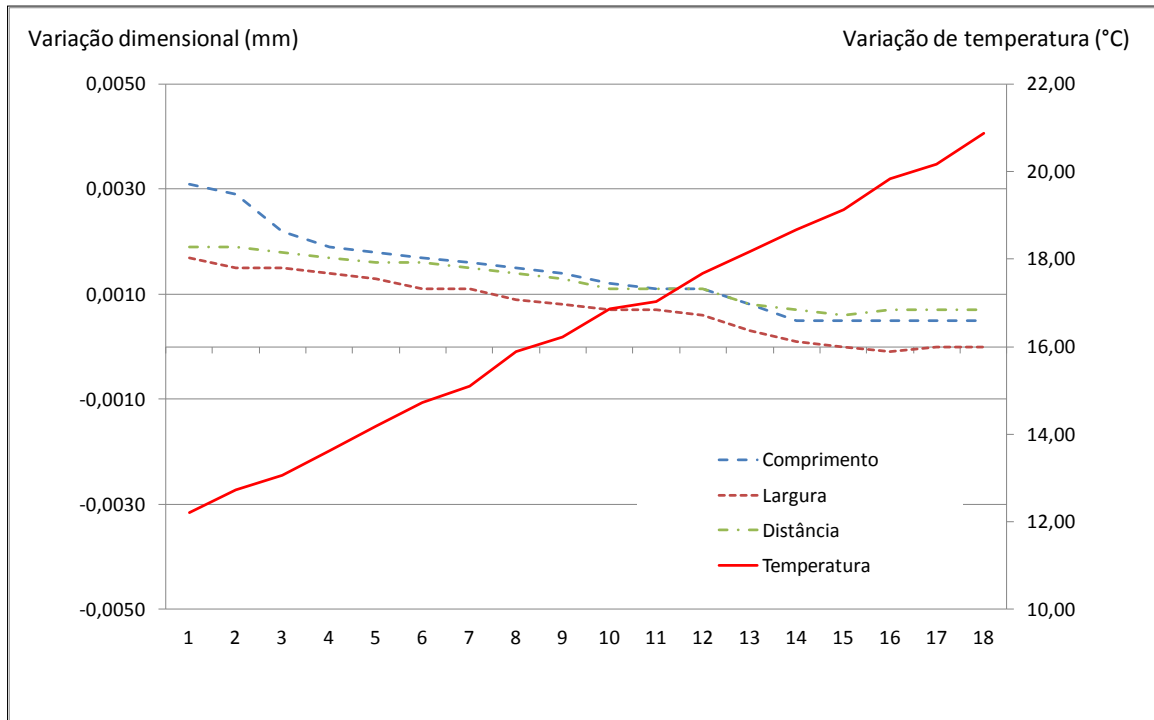


Figura 12 - Variação dimensional em relação ao valor de referência com compensação da temperatura

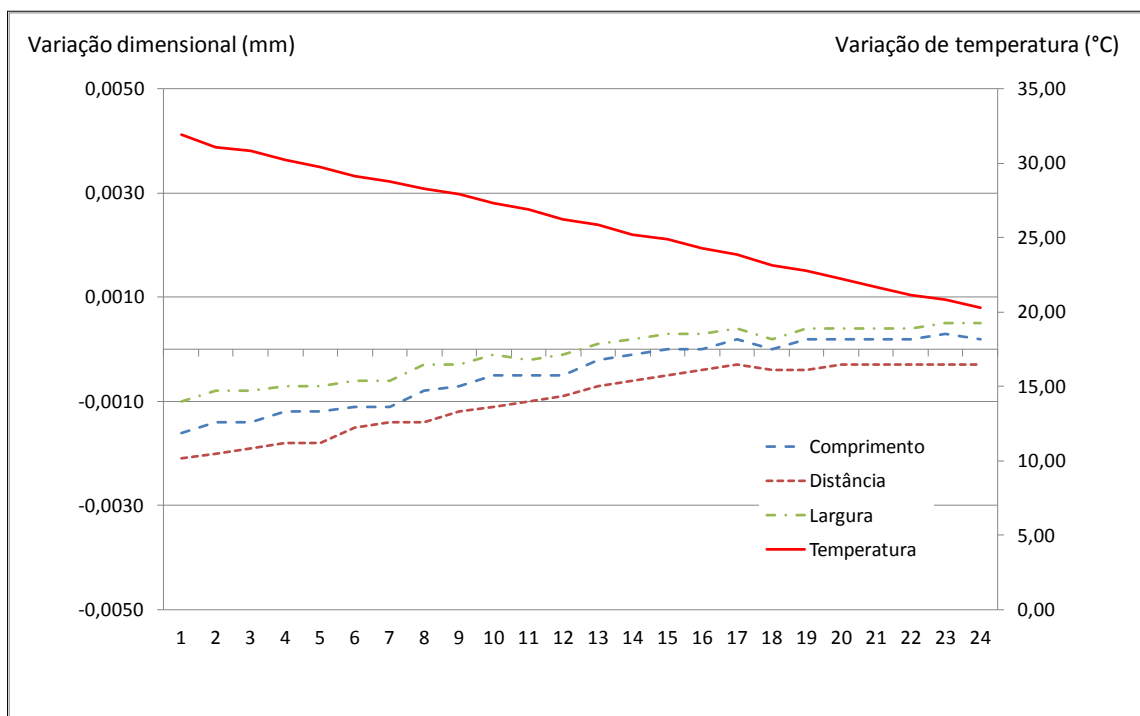


Figura 13 - Variação dimensional em relação ao valor de referência com compensação da temperatura

Na segunda condição de teste, o anel padrão foi medido por comparação contra outro anel padrão calibrado (Fig. 15). Ou seja, em cada uma das 180 medições media-se um anel padrão calibrado, adotando a indicação da medição como o zero do sistema de medição. Após isso se media o outro anel e a sua dimensão era estabelecida por comparação com o anel calibrado. Como as duas peças estavam na mesma condição de temperatura, há a expectativa de minimização do efeito da variação de temperatura sobre os resultados, o que de fato se verificou. Nessa condição, o erro de medição em relação ao valor calibrado do anel variou cerca de 0,8 µm ao longo de todas as medições, dentro da incerteza de medição da máquina de medir para esta dimensão.

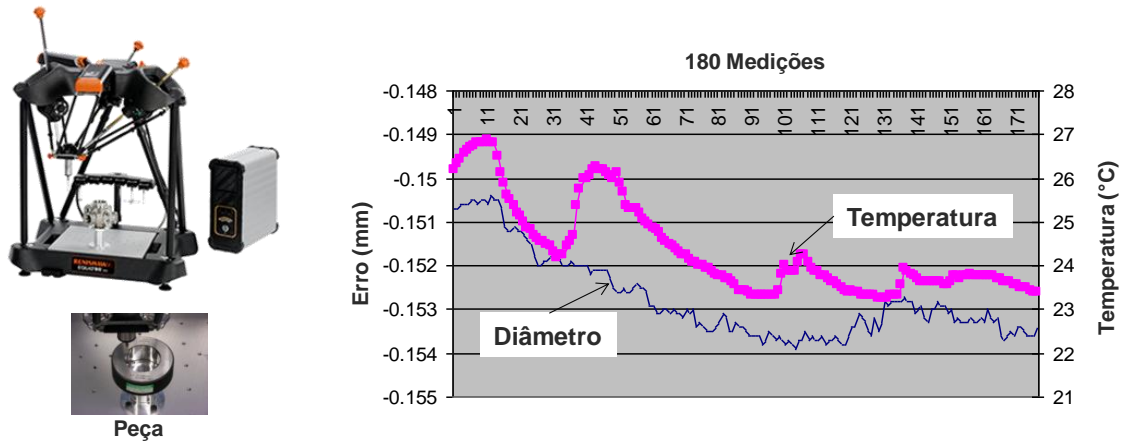


Figura 14- Efeito da variação de temperatura sobre sistema de medição por coordenadas operando em modo absoluto sem compensação de temperatura: amplitude encontrada de 3,5 μm

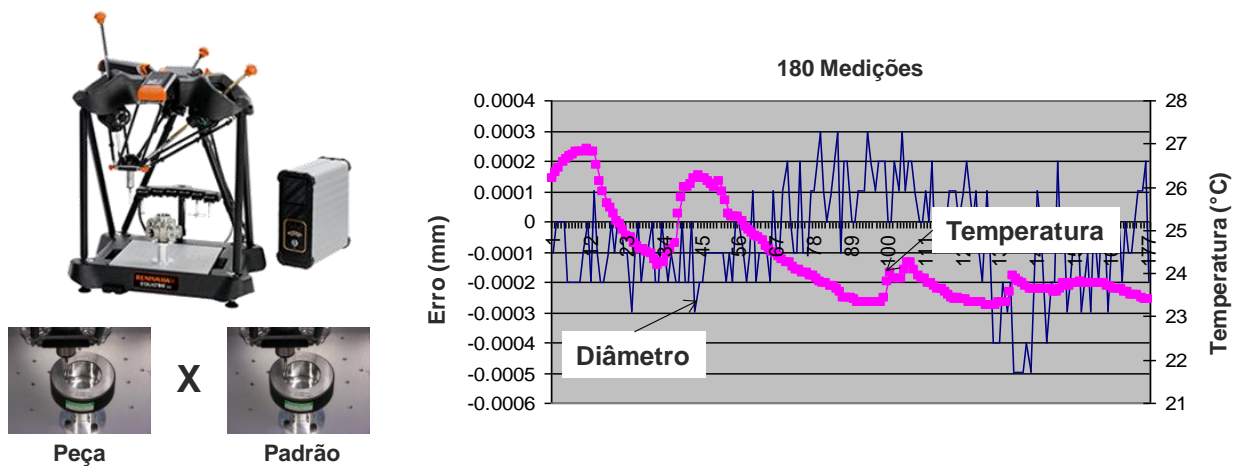


Figura 15 - Efeito da variação de temperatura sobre sistema de medição por coordenadas operando em modo diferencial, por comparação com um padrão calibrado: amplitude encontrada de 0,8 μm

Os dois ensaios com máquinas de medir por coordenadas operando em modo absoluto e diferencial revelaram resultados semelhantes. A diferença nos valores obtidos por cada equipamento não é significativa visto que estão dentro da incerteza de medição das máquinas de medir para as dimensões das características avaliadas.

6. CONCLUSÕES

A integração da medição por coordenadas em linhas de produção possui atrativos operacionais que têm motivado a aproximação da tecnologia dos ambientes de produção. A eliminação de tempos e movimentos de peças para as salas de medição *off line*, e os ganhos em termos de ações de correção sobre os processos de fabricação são citados como os mais significativos para a produção seriada.

No entanto, a busca dessas vantagens ao integrar a medição na linha de produção traz consigo desafios operacionais e metrológicos. Áreas de produção possuem características ambientais mais agressivas às atividades de medição, como vibrações, alto nível de sujidade e, principalmente, a temperatura dos ambientes de produção, os quais impõem desafios metrológicos nesta migração da medição por coordenadas. Estes aspectos precisam ser bem gerenciados para conciliar as vantagens operacionais da medição em linha com a confiabilidade metrológica necessária.

Além dos aspectos metrológicos, outro aspecto importante para a aplicação da medição por coordenadas em linha é a necessidade de disponibilidade operacional dos equipamentos. Uma vez implantada na medição *in line* a medição por coordenadas é uma ferramenta de processo, atuando como sensor que gera informações para ajustes e alarmes. Nesse contexto o processo produtivo é bloqueado em caso de má função no processo de medição, e assim os equipamentos devem apresentar uma alta taxa de disponibilidade, bem como uma pronta assistência técnica em caso de problemas.

Operando nestas condições, é muito importante avaliar a estabilidade da máquina em intervalos curtos através de testes de verificação (Sousa et alii, 2014).

Este artigo procurou abordar este tema e avaliar a influência da temperatura sobre resultados de medições sob condições menos controladas, empregando tecnologias de medição por coordenadas em modo absoluto e diferencial. Os resultados obtidos nas condições avaliadas mostram que é possível, mediante certos cuidados e empregando estratégias e tecnologias atuais, corrigir a influência da temperatura sobre os resultados das medições. Situações diversas das avaliadas neste artigo e encontradas nos ambientes de produção requerem um estudo particularizado de cada caso para que estas mesmas conclusões sejam válidas.

7. AGRADECIMENTOS

À Mitutoyo Sul Americana por disponibilizar seu ambiente e sua máquina de medir Crysta Apex integrada a um robô de alimentação automático de peças para a realização dos testes com sistemas de medição por coordenadas com compensação térmica automática.

À Renishaw Latino Americana por disponibilizar resultados de testes realizados sob condições de temperatura sem controle, com sistemas de medição por coordenadas em modo diferencial Equator.

8. REFERÊNCIAS

Sousa, A. R. Formação Avançada de Metrologistas 3D. Anais do Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, CIMMEC, 2014. Gramado - RS.

Pfeifer, T. Production Metrology. Ed. Oldenbourg, 2002.

Hocken, R; Pereira, P. Coordinate Measuring Machines and Systems, CRC Press, 2012.

Sousa, A.R; Schneider, G. Monitoramento Preditivo da Estabilidade Geométrica de Máquinas de Medir por Coordenadas. Anais do Congresso Internacional de Metrologia Mecânica, CIMMEC, 2014. Gramado - RS.

ISO 1 - Geometrical Product Specifications (GPS) — Standard reference temperature for geometrical product specification and verification, 2002.

9. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

INTEGRATION OF COORDINATE MEASURING MACHINES FOR MEASUREMENTS IN PRODUCTION LINES

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Abstract: *There are potential advantages by integrating coordinate measuring machines in the production line. With this approach, the dimensional measurements of the parts would be made close to the manufacturing, eliminating transport of materials and loss of time. Other great advantage is that the geometric information obtained is updated with the condition of the production process and possible problems can be detected almost in real time. However, the integration of the measurement in the production line brings metrology challenges due to poorly controlled environment conditions of the manufacturing. This work describes the advantages and challenges of the integration of coordinate measuring machines in production lines, describing existing technologies and including testes on coordinate measuring systems to evaluate the influence of temperature on the results.*

Keywords: *Metrology, Coordinate Measuring Machines, Automation of Manufacturing*

The authors are the only responsible for the content of the printed material presented in this work.