

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA CAMPUS FLORIANÓPOLIS DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE
METAL-MECÂNICA**

BRUNO JUNG GOENAGA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE
ERROS CAUSADOS PELA TEMPERATURA NA MEDIÇÃO
POR COORDENADAS EM AMBIENTE FABRIL**

FLORIANÓPOLIS, 2022

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA CAMPUS FLORIANÓPOLIS DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE
METAL-MECÂNICA**

BRUNO JUNG GOENAGA

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE
ERROS CAUSADOS PELA TEMPERATURA NA MEDIÇÃO
POR COORDENADAS EM AMBIENTE FABRIL**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido
ao Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia de Santa Catarina como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro em Engenharia de Mecatrônica.

Orientador: Prof. Doutor. André Roberto de Sousa

FLORIANÓPOLIS, 2022.

**AVALIAÇÃO DE MÉTODOS DE COMPENSAÇÃO DE ERROS CAUSADOS PELA
TEMPERATURA NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS EM AMBIENTE FABRIL**

BRUNO JUNG GOENAGA

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico em 2022 e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis, XX de Dezembro, 2022.

Banca Examinadora:

André Roberto de Sousa, Prof. Doutor.

Professor Gabriel Costa Sousa, M. Eng.

Professor Gregory Chagas da Costa Gomes, M. Eng.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe, Lisandre Simone Jung Goeanaga e ao meu pai Carlos Alberto Rigol, por estarem sempre ao meu lado, prestando apoio e sempre acreditando em mim. Agradeço todo esforço para que eu pudesse ter a oportunidade de fazer uma graduação em uma excelente faculdade.

Aos meus de colegas de curso, em especial a Eduarda Faber, Stefane da Silva, Paulo de Souza, Lucas Peters, Diego Amorim e Thiago Lírio, por todo conhecimento compartilhado, pelo auxílio no desenvolvimento de projetos e seminários, e por todo caminho traçado de desafios durante a graduação que nos fizeram ser amigos, foi um prazer imenso tê-los ao meu lado nesses momentos de luta e de glória.

Aos meus amigos, Mateus Fim, Murillo Maciel, Guilherme Secco, Lucca Binnate, Lucas Sabô, Vic Westin, Tiago Amorim e Isadora Faber, que tive a oportunidade de conhecer durante o meu período de realização do curso e que me apoiam e aconselharam em diversos momentos, tanto acadêmicos como de minha vida pessoal.

Ao professor André Roberto de Sousa, que aceitou me orientar durante o desenvolvimento deste estudo, me auxiliou e incentivou em todos os momentos, estendo esse agradecimento a todos os professores do curso de engenharia mecatrônica que contribuíram na minha formação acadêmica, em especial aos professores que integram a minha banca.

À Fundação CERTI que participou do trabalho apoiando com a calibração de uma peça padrão no seu laboratório de medição por coordenadas, um dos mais modernos, qualificados e de maior exatidão do Brasil.

Resumo

Existem grandes vantagens potenciais em integrar o sistema de medição por coordenadas junto à linha de produção seriada, sendo a principal delas a velocidade com que a qualidade dos produtos é analisada e confirmada. No entanto, essa proximidade traz desafios, visto que o ambiente de produção possui fatores agressivos à exatidão das medições, sendo a principal delas a temperatura. Medições realizadas em temperaturas distantes de 20° C provocam erros causados pela dilatação térmica da peça e do sistema de medição. Este trabalho de TCC propôs-se a investigar este desafio da área de medição por coordenadas para se inserir na indústria 4.0, e avaliar experimentalmente a eficácia das correções de temperatura pelos métodos de comparação e sensoriamento de modo a determinar a melhor estratégia e as condições de implementação. Experimentos foram planejados e executados e os resultados permitem atestar a grande importância da correção de erros causados pela temperatura, independentemente de qual método seja aplicado nesta correção.

Palavras-chave: Metrologia, Medição por coordenadas, Erros de medição, Indústria 4.0.

Abstract

There are great advantages and positive aspects when integrating the coordinate measuring system with the serial production line. For these reasons, in order to maintain good dimensional quality in production, attention must be paid to some properties that may interfere with these results, temperature being one of these factors. Measurements carried out at temperatures far from 20° C have considerable errors caused by thermal expansion of the part and the measurement system. This project work proposed to investigate this challenge of the area of coordinate measurement to be inserted in industry 4.0, and experimentally evaluate the effectiveness of temperature corrections by comparison and sensing methods in order to determine the best strategy and conditions of Implementation. Experiments were planned and executed and the results allow attesting the great importance of correcting errors caused by temperature, regardless of which method is applied in this correction.

Keywords: Metrology, Coordinate measurement, Error compensation methods, Metrology 4.0.

Lista de Figuras

Figura 1 - Presença da medição por coordenadas na garantia de qualidade de processos seriados.	15
Figura 2 - Principais sistemas de medição por coordenadas.	16
Figura 3 - Características da medição por coordenadas em modo off line.	18
Figura 4 - Processo de integração na indústria 4.0.	19
Figura 5 – Correção pelo método direto.	22
Figura 6 – Correção pelo método comparação.	23
Figura 7 - (a) Máquina tridimensional do IFSC; (b) braço articulado de medição do IFSC.	26
Figura 8 – Síntese dos experimentos.	27
<i>Figura 9 – Peças utilizadas nos experimentos sendo aquecidas na estufa do IFSC. ...</i>	<i>28</i>
Figura 10 - Diagrama realizado na CERTI.	29
Figura 11 - Peça sendo calibrada na CERTI.	30
Figura 12 – Resultados obtidos na calibração da peça na fundação CERTI.	31
Figura 13 - Peça sendo calibrada no IFSC a 20°C.	32
Figura 14 - Comparação de erros antes e depois da correção na peça calibrada.	35
Figura 15- Comparação de erros antes e depois da correção na peça não calibrada. .	36
Figura 16 - Erros antes e após a correção em relação ao método de comparação, MMC.	40
Figura 17 - Erros antes e após a correção em relação ao método de comparação, braço de medição.	42

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Calibração das peças a 20°C no IFSC.....	32
Tabela 2 - Compensação da temperatura na peça calibrada pelo método direto.	33
Tabela 3 - Eficácia da compensação da temperatura na peça calibrada pelo método direto.....	34
Tabela 4 - Compensação da temperatura na peça não calibrada pelo método direto. .	35
Tabela 5 – Eficácia da compensação da temperatura na peça não calibrada pelo método direto.	36
Tabela 6 - Compensação na peça calibrada pelo método direto – braço de medição. .	37
Tabela 7– Eficácia da compensação na peça calibrada pelo método direto – braço de medição.	37
Tabela 8 - Compensação na peça não calibrada pelo método direto – braço de medição.	38
Tabela 9– Eficácia da compensação na peça não calibrada pelo método direto – braço de medição.....	38
Tabela 10 - Compensação pelo método de comparação – Máquina de medir CNC.....	39
Tabela 11 - Eficácia da compensação pelo método de comparação – Máquina de medir CNC.....	40
Tabela 12 - Compensação pelo método de comparação – Braço de medição.....	41
Tabela 13- Eficácia da compensação pelo método de comparação – Braço de medição.	41
Tabela 14 - Resultados método direto na MMC.	42
Tabela 15 - Resultados método de comparação na MMC.	43
Tabela 16 - Resultados método direto no braço.....	43
Tabela 17 - Resultados método de comparação no braço.....	43

Lista de Abreviaturas e Siglas

IFSC	Instituto Federal de Santa Catarina
CNC	Centros de Usinagem com Comandos Numéricos
SI	Sistema Internacional
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
IoT	<i>Internet of Things</i>
IoS	<i>Internet of Services</i>
CERTI	Centro de Metrologia e Instrumentação da Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras
RBC	Rede Brasileira de Calibração

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Justificativa e relevância.....	11
1.2 Objetivos	13
1.2.1 Objetivo Geral	13
1.2.2 Objetivos Específicos.....	13
1.2.3 Estrutura do Trabalho Escrito.....	13
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1 Medição por coordenadas na manufatura atual	15
2.2 Indústria 4.0 e a imersão da medição por coordenadas no chão de fábrica.....	17
2.3 Erros de medição causados pela temperatura	20
2.4 Métodos de compensação de erros.....	21
2.4.1 Método direto	21
2.4.2 Métodos de comparação	22
2.5 Artifícios da estatística na metrologia	24
3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO	26
3.1 Experimentos propostos	26
3.2 Seleção e calibração das peças.....	28
4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS	33
4.1 Compensação pelo método direto	33
4.1.1 Medição em temperaturas variadas com a máquina de medir CNC.....	33
4.1.2 Medição em temperaturas variadas com o braço articulado de medição	37
4.2 Compensação pelo método da comparação.....	39
4.2.1 Medição em temperaturas variadas com a máquina de medir	39
4.2.2 Medição em temperaturas variadas com o braço de medição	40
4.3 Avaliação da eficácia dos métodos.....	Erro! Indicador não definido.
4.3.1 Medição com máquina de medir CNC	42
4.3.2 Medição com o braço.....	43
Resultado pelo método direto:.....	43
5 CONCLUSÕES	45
5.1 Análise do trabalho desenvolvido.....	45
5.2 Recomendações para trabalhos futuros	47
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
ANEXO A – Relatório de Medição 1543/22 FUNDAÇÃO CERTI.	50

1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da manufatura ao longo do tempo os métodos de fabricação sofreram avanços intensos, sendo uma das principais conquistas desse meio os centros de usinagem com comando numéricos (CNC), capazes de produzir peças de modo rápido e com alta precisão.

Essa evolução também ocorreu na área de metrologia, e mais particularmente na área de medição por coordenadas. Originalmente as máquinas de medir operavam de modo offline, em um ambiente de temperatura controlada e praticamente livre de perturbações externas como forma de assegurar alta exatidão nas medições. Esse modo de operar traz vantagens metrológicas, mas traz dificuldades operacionais, como o fato de estarem distantes dos processos produtivos.

Mais recentemente a tecnologia de medição por coordenadas passou a operar também inserida na linha de produção, tornando-se assim uma atividade *online* onde se oferece a possibilidade de conexão computacional do sistema de medição com o sistema de fabricação, no qual se é permitido correções relacionadas ao dimensionamento do produto. Porém, com essa inserção no meio fabril vieram novos desafios; estar inserido em um ambiente agressivo pode gerar erros metrológicos onde um dos fatores de erro mais relevante é o da temperatura, pois ele relaciona tanto o processo de fabricação que está sendo realizado como a propriedades do material usado, uma vez que, o efeito causado pela variação de temperatura em uma peça esta diretamente ligado a sua dilatação. Para amenizar este problema métodos e tecnologias vêm sendo empregadas e são o tema principal deste trabalho.

1.1 Justificativa e relevância

As máquinas de medir por coordenadas são, há muitos anos, largamente empregadas pelas indústrias para a caracterização geométrica de seus produtos. Tradicionalmente estes sistemas têm sido empregados em condições ambientais bem controladas, como laboratórios de metrologia e salas de medidas com temperaturas controladas em 20° C, visto que a temperatura é o principal fator de erros causados pelo ambiente de medição.

Com a Indústria 4.0 cada vez mais estes sistemas têm sido levados para ambientes de produção, sem controle de temperatura, dada a necessidade de aproximação e integração da medição com a fabricação, para maior rapidez na identificação de erros e automação das ações de correção de processos.

Neste cenário há o desafio de assegurar a exatidão das medições em condições em que a temperatura não é controlada, podendo variar mais de 10° C em um só dia. Em uma peça de alumínio de 500 mm, por exemplo, esta variação pode provocar um erro de 0,12 mm, incompatível com os requisitos de exatidão de muitas peças mecânicas.

Para minimizar a influência da temperatura vêm sendo testados métodos de medição buscando compensar este erro. Os dois principais métodos empregados atualmente são:

- a) Medição por comparação, na qual um artefato calibrado é medido e, em seguida, a peça a inspecionar também. Os erros encontrados no artefato calibrado são usados para corrigir a peça inspecionada.
- b) Medição com correção por sensores, na qual a temperatura da peça inspecionada e da máquina de medir são monitoradas, um software calcula o erro e uma a correção é aplicada ao resultado de medição, trazendo-o para a referência de 20°C.

Ambos os métodos possuem vantagens e desvantagens e não há um consenso sobre qual a melhor estratégia a ser implementada para melhorar a exatidão das medições realizadas integradas na produção. Este trabalho de TCC propõe investigar este desafio da área de medição por coordenadas para se inserir na indústria 4.0, e avaliar experimentalmente a eficácia das correções de temperatura pelos métodos de comparação e sensoriamento de modo a determinar a melhor estratégia e as condições de implementação.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Aplicar e avaliar métodos de compensação térmica ocorrida em processos de medição por coordenada realizados em temperaturas não controladas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para a avaliação e construção deste trabalho e estudo em máquinas de medir por coordenada, elencou-se, neste contexto os objetivos específicos:

- Estudo de métodos usados para redução de erros causados pela temperatura;
- Execução de experimentos para compensação de erros;
- Comparação da eficácia dos métodos de compensação de erros;
- Análise estatística dos resultados para elencar uma conclusão;

1.2.3 Estrutura do Trabalho Escrito

Para descrever as atividades realizadas e os resultados obtidos, esta dissertação está estruturada e distribuída com a seguinte sequência:

O atual capítulo aborda as considerações iniciais a respeito do tema deste trabalho, sua relevância para a atualidade, bem como traz os objetivos gerais e específicos que foram desenvolvidos.

O capítulo dois aborda a revisão da literatura que possibilita o conhecimento necessário para fazer o que fora proposto no capítulo anterior e também faz uma abordagem de como as máquinas de medir por coordenadas estão presentes no chão de fábrica da indústria 4.0.

A partir da revisão de conhecimentos, torna-se possível elencar, apontar e realizar – no capítulo três – os métodos de compensação de erro através de

experimentos. Este capítulo também tem como objetivo apresentar a peça utilizada e suas características e propriedades.

No capítulo seguinte se encontra o centro deste trabalho, onde são mostrados os valores obtidos com os experimentos e a trajetória da peça em seu esfriamento e aquecimento. Também avalia o desempenho dos métodos de compensação de erros mostrando didaticamente os valores com e sem correções matemáticas e a porcentagem de sua eficácia em média e desvio padrão.

O capítulo cinco é abordado de maneira sintética às considerações finais a respeito dos resultados desse trabalho e também à contribuição para o meio científico, acadêmico e industrial.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Medição por coordenadas na manufatura atual

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 atualmente. Nesse contexto, ela é largamente utilizada nas etapas de desenvolvimento do produto, de desenvolvimento dos processos e no controle de processos seriados e em todas estas etapas a confiabilidade dos resultados é uma necessidade básica para a eficiência dos processos.

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

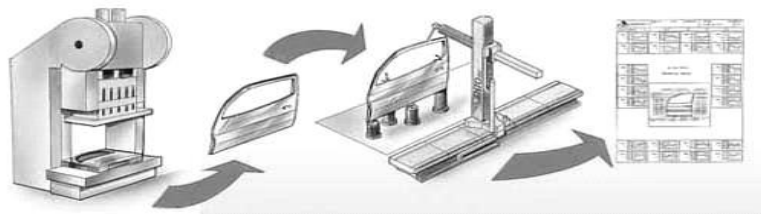
Desenvolvimento de produto



Desenvolvimento de processo



Controle de processo e de produto

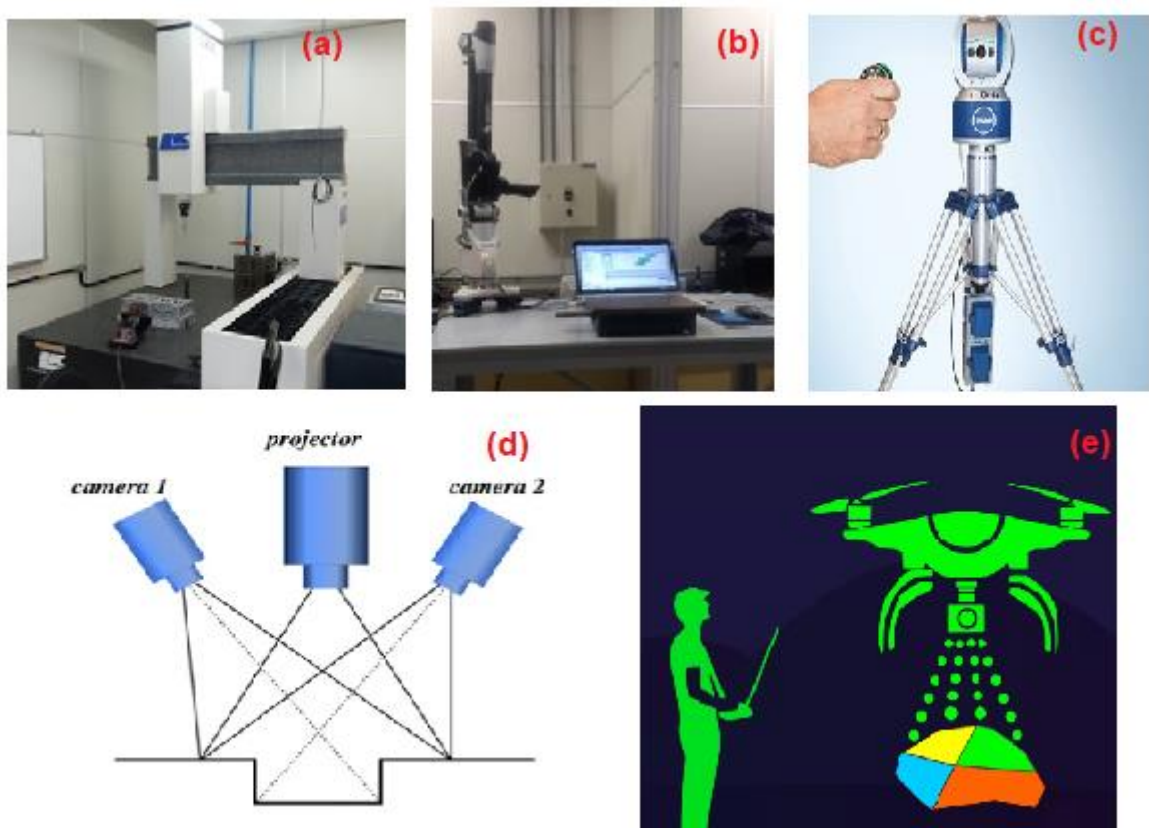


Fonte: SOUSA, ANDRÉ; GONZÁLES, RICARDO (2008).

São diversas as tecnologias de medição capazes de inspecionar a geometria das peças através de pontos cartesianos, sendo as mais frequentes as mostradas na figura 2 abaixo:

- (a) máquinas de medir tridimensionais;
- (b) braços articulados de medição;
- (c) laser *tracker*;
- (d) projeção de luz estruturada;
- (e) fotogrametria digital;

Figura 2 - Principais sistemas de medição por coordenadas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2022).

No mercado há a presença de mais de 10.000 sistemas de medição, com predominância para emprego em medições offline, em salas de medidas bem controladas em temperatura (Neto, A.A.B, 2003). Este cenário 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 offline.

Esta abordagem auxilia 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.

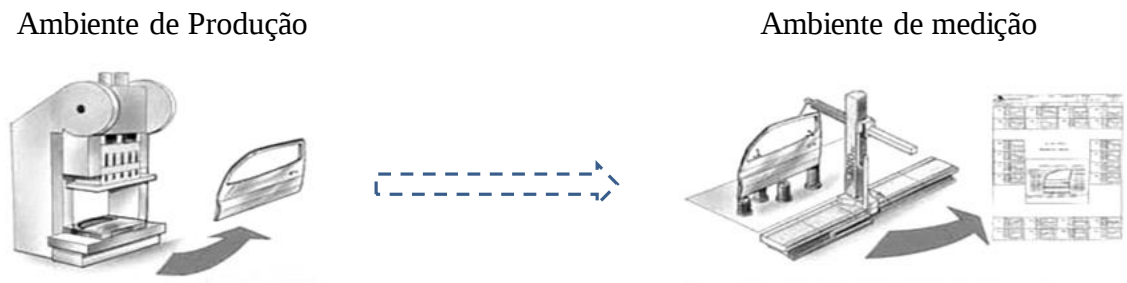
2.2 Indústria 4.0 e a imersão da medição por coordenadas no chão de fábrica

No conceito da indústria 4.0 as máquinas possuem a capacidade de conexão física e computacional de modo que possam operar de modo coordenado com vistas a maximizar a qualidade e produtividade dos processos. Isso requer que equipamentos de medição estejam inseridos no ambiente fabril e integrados com sistemas de movimentação (robôs, esteiras, etc.) e máquinas-ferramenta. Esta imersão da medição por coordenadas dentro das fábricas em ambientes 4.0 é possível por causa de tecnologias como IoT (*Internet of things*), Computação em nuvens (*cloud computing*), dentre outras e traz vantagens e desafios.

Como citado, dadas as enormes potencialidades e boa exatidão – capacidade de fornecer resultados corretos, ou seja, o mais próximo possível do valor de referência, 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. 3).

Figura 3 - Características da medição por coordenadas em modo *off line*.



- Necessidade de movimentação de materiais
- Tempos para a estabilização térmica da peça
- Retardos entre a detecção de desvios e ações corretivas

Fonte: SOUSA, ANDRÉ; GONZÁLES, RICARDO (2008).

Existem assim, 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 produtivo, especialmente no atual cenário da indústria 4.0.

No entanto, a busca das vantagens descritas ao integrar a medição na linha de produção traz consigo desafios metrológicos (Figura 3). Áreas de produção possuem características ambientais bastante agressivas às atividades de medição tais como:

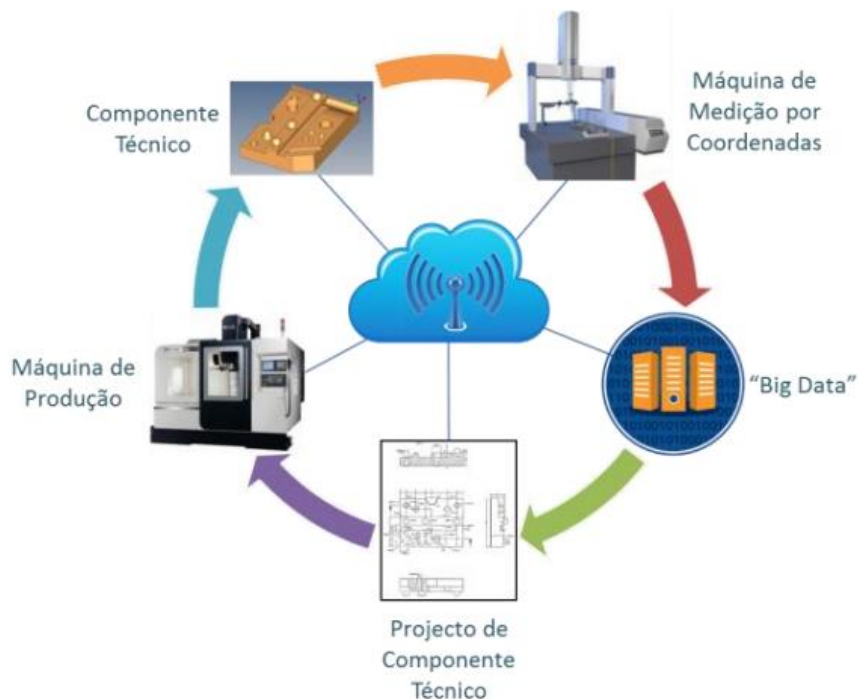
- Temperatura sem controle, variando bastante conforme o período do dia e a época do ano;

- 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.

As vantagens da metrologia 4.0 se destacam em um serviço de controle estatístico de processos em tempo real no andamento da atividade de calibração, coleta automática do instrumento a ser calibrado e integração entre instalação, equipamento e banco de dados que possuem as informações já armazenadas de padrões de calibração.

Figura 4 - Processo de integração na indústria 4.0.



Fonte: CATIM - Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica (2017).

A figura 4, retrata a independência e ao mesmo tempo a correlação dos instrumentos de medição com os elementos de fábrica e ressalta a importância entre hardware, software e nuvem.

A presença da metrologia 4.0 em ambientes de produção, traz um resultado de calibração e medição com alto nível de confiabilidade e produtividade na instrumentação, consequentemente atinge um padrão fiel e importante a ser seguido e mantido em uma linha de produção que prioriza qualidade e resultado.

2.3 Erros de medição causados pela temperatura

Fisicamente, nas suas estruturas moleculares os materiais mudam suas dimensões em função da temperatura. A essa propriedade é dada o nome de dilatação térmica, onde a variação das dimensões lineares de uma peça de determinado material é proporcional à variação de temperatura. Esse fator de proporcionalidade e relação é denominado de coeficiente de dilatação térmica no qual, cada elemento possui um fator, frequentemente representado pela letra grega α .

Ao se integrar o sistema de medição por coordenada em uma linha de produção, traz uma vantagem grande sobre o dimensionamento das peças feitas, pois elimina a retirada das mesmas do ambiente de produção, o que economiza tempo e possibilita o reconhecimento de erros o que permite ajustes quase que em tempo real.

Porém, em meio a esse cenário de vantagens da introdução de equipamentos metrológicos em linhas de produção, suas aplicações são cerceadas por agentes que fortemente intervêm nos resultados, fatores esses que afligem na confiabilidade metrológica dos processos de medição (Sousa, A.R., 2015).

A peça a ser medida não apresenta fonte de erro por si própria. Entretanto, as interações de suas características físicas e mecânicas (e suas variações) com a estratégia de medição, com o ambiente e com a própria máquina de medir por coordenada provocam uma das mais significativas fontes de erro em medição por coordenada (ARENHART, et al., 2008).

A temperatura interfere na qualidade das medições, pois tanto a peça como o equipamento que está sendo usado, seja ele uma máquina de medir por coordenadas ou um instrumento mais comum como um paquímetro sofrem efeitos de dilatação e variam bastante em relação a temperatura normalizada de 20°C, definida pela Norma ISO 1. E, se for considerado a existência de uma diferença significativa entre a peça e a máquina, os erros e incertezas podem vir a ser ainda maiores.

Utilizando as propriedades físicas conhecidas, o erro causado pela dilatação diferencial entre máquina de medir e peça (em μm) pode ser estimado pela equação (1), na forma:

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

Onde:

L = dimensão da peça medida (mm)

T_1 = temperatura da peça (°C)

α_1 = coeficiente de dilatação térmica da peça (mm/m.°C)

T_2 = temperatura da máquina de medir (°C)

α_2 = coeficiente de dilatação térmica da máquina de medir (mm/m.°C)

2.4 Métodos de compensação de erros

Para corrigir e reduzir os efeitos da temperatura sobre os resultados e os processos de medição por coordenadas em um ambiente fabril, em estudo estatístico podem ser empregados seguintes métodos: método direto e método por comparação.

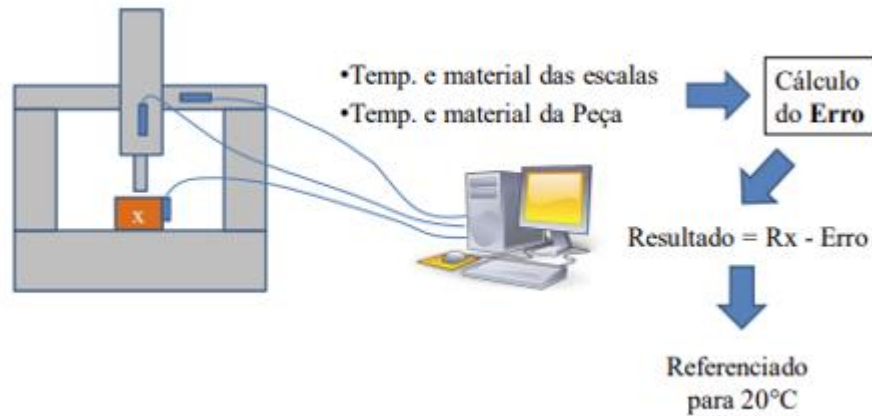
2.4.1 Método direto

O método direto é a aplicação de uma correção matemática da dilatação térmica que relaciona essa variação no tamanho da peça e na máquina de medir, dado que é conhecido através da relação do material que os compõe e da temperatura no momento em que fora realizado a medição por coordenada.

Para se estimar o erro de medição, utiliza-se a equação 1 já apresentada anteriormente. Essa equação compensa os erros causados pela temperatura

ambiente, pois considera o calor residual de erros na peça, e assume que o gradiente espacial é pequeno e arroga que a temperatura da peça é homogênea.

Figura 5 – Correção pelo método direto.



Fonte: Integração De Sistemas de Medição por Coordenadas na Medição em Linhas de Produto. Sousa, A.R., 2015. (Modificada pelo autor, 2022).

Para conseguir os valores dessas correções, utiliza-se a fórmula apresentada na figura 5:

$$Resultado = Rx - Erro \quad (2)$$

Onde:

Rx = dimensão da peça a ser estudada (mm)

Erro = Erro obtido através da equação (1).

Em suma, o resultado é uma subtração do valor medido pelo erro, assim, tem-se uma compensação para que o valor obtido esteja nos mesmos conformes do que o valor referência.

2.4.2 Métodos de comparação

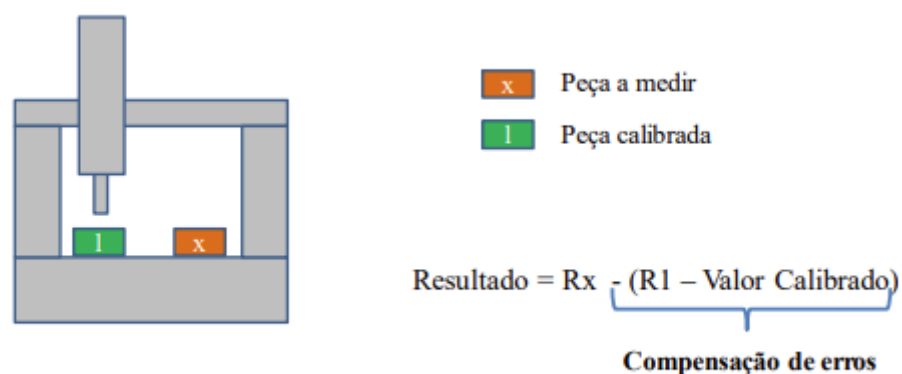
Neste método, a máquina de medição por coordenada funciona como um comparador, porém, para se ter sentido em fazer uma comparação, deve-se ter uma peça devidamente calibrada para obter o zero da máquina, que é um ponto de referência, no qual é zero para o sistemas de coordenadas da máquina e o ponto

inicial para todos os demais sistemas de coordenadas e pontos de referência. A peça calibrada deve ter as suas dimensões definidas e contabilizadas em uma máquina de medir de referência com um alto grau de exatidão a 20° C, esse grau de exatidão é o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro mensurado para respeitar a padronização do SI e conduzir um resultado o com um baixo grau de incerteza, ou seja medições com valores coerentes e sem tanta disparidade entre eles.

Após a calibração dessa peça, a mesma é levada a máquina de medir para sofrer os mesmos fatores de influências externas, ou seja, sofrer o mesmo efeito de dilatação causado pela temperatura, seja ela ambiente ou forçada através de outros meios.

Os dados das medições são primeiramente obtidos na peça a medir e em seguida – contando que os dois estejam na mesma temperatura – na peça calibrada, a correção é feita utilizando o comparativo das duas medições com a compensação de erro.

Figura 6 – Correção pelo método comparação.



Fonte: Integração De Sistemas de Medição por Coordenadas na Medição em Linhas de Produto Sousa, A.R., 2015. (Modificada pelo autor, 2022).

Para conseguir os valores dessa correção por comparação, utiliza-se da equação mostrada na figura 6:

$$\text{Resultado} = R_x - (R_l - \text{Valor Calibrado}) \quad (3)$$

Onde:

Rx = dimensão da peça a ser estudada (mm)

R1 = dimensão da peça calibrada (mm)

Valor calibrado = medição do valor calibrado (mm)

Ambos os métodos possuem vantagens e limitações e não há um consenso geral sobre que método se mostra mais eficaz em determinadas situações.

2.5 Artíficos da estatística na metrologia

Para fazer o tratamento dos dados obtidos e conseguir valores coerentes para serem aplicados nas equações, foi utilizado de artifícios da estatística, essa que é extremamente relevante no estudo e aplicação na metrologia.

Pode parecer estranho misturar estatística com metrologia, mas na verdade estas duas ciências estão fortemente relacionadas. Quando são feitas várias medidas de uma mesma peça com um mesmo instrumento, nem sempre é utilizado o valor mais baixo ou mais elevado. Uma medida muito comum utilizada nesse caso poderia ser, por exemplo, a média aritmética de todas as medições (Cirilo, J.S.N, 2012).

A eficácia dos métodos de compensação foi estimada a partir da comparação entre os parâmetros metrológicos de **precisão**, **tendência** e **incerteza de medição**, bem como, com esses valores, pela determinação do erro normalizado de cada método.

A **precisão** dos resultados em condições de repetibilidade foi calculado pela equação:

$$Precisão = \frac{t \cdot S}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Onde:

t = coeficiente de *student* para n – 1 graus de liberdade e 95,45% de confiança estatística

S = desvio-padrão amostral

n = número de repetições realizadas nos ensaios para cada resultado médio

A **tendência** é a estimativa do erro sistemático e sendo calculada pela diferença entre a média das medidas de uma grandeza e o seu valor de referência.

$$Tendência = X - VVC$$

Onde:

X = média das indicações obtidas nas medições

VVC = Valor Verdadeiro Convencional

Para a estimativa da **incerteza de medição**, foram considerados como fontes de incerteza relevantes a precisão obtida experimentalmente (fonte de incerteza tipo A) e a incerteza devida à máquina de medir por coordenadas (fonte de incerteza tipo B) sendo calculada por:

$$Incerteza = \sqrt{Precisão^2 + Exatidão\ do\ equipamento^2} \quad (6)$$

Para avaliar se a diferença na exatidão obtida nos métodos de ensaio de correção direta e por comparação é relevante estatisticamente foi empregado o cálculo do erro normalizado, através da equação:

$$EN = \frac{|Td1 - Td2|}{\sqrt{Inc1^2 + Inc2^2}} \quad (7)$$

Sendo:

Td1 – tendência no método 1

Td2 – tendência no método 2

Inc1 – Incerteza no método 1

Inc2 – Incerteza no método 2

Se o erro normalizado resultar acima de 1,0 significa que os métodos são estatisticamente distintos e, caso o erro normalizado fique abaixo de 1,0, significa que os métodos possuem desempenho equivalentes.

3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Para avaliar a eficiência dos métodos de compensação de erro gerados pelo efeito da temperatura foram realizados ensaios com a máquina de medir por coordenadas e com o braço de medição do laboratório de metrologia do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Campus Florianópolis, ambos operando tanto no modo direto como no de comparação – Figura 7.

Figura 7 - (a) Máquina tridimensional do IFSC; (b) braço articulado de medição do IFSC.



Fonte: Autoria própria (2022).

3.1 Experimentos propostos

Para a realização do trabalho os seguintes experimentos foram planejados, como ilustra a figura 8.

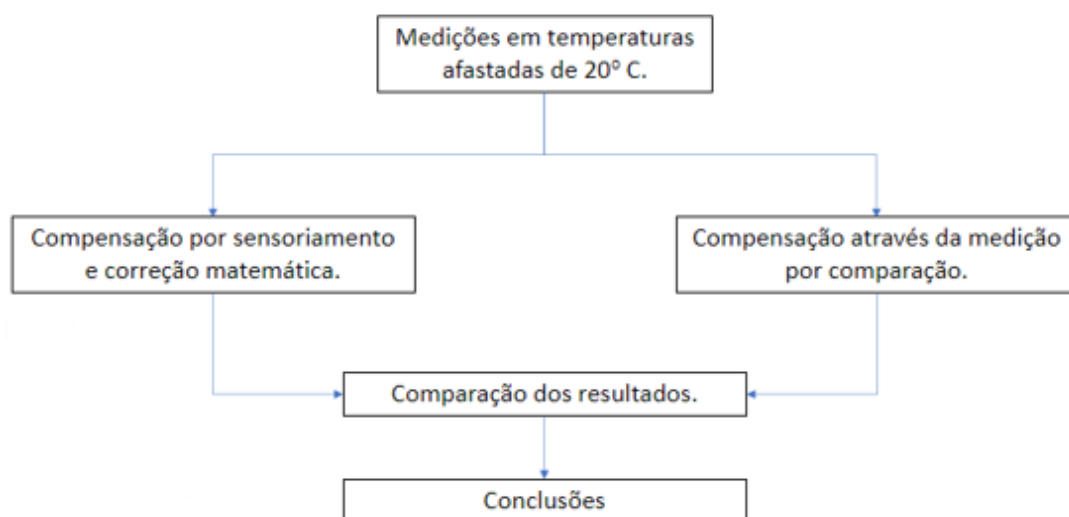
Os experimentos, primeiramente foram divididos em duas partes, pois foram utilizados dois sistemas de medição: uma máquina tridimensional e um braço de medição.

Os ensaios foram realizados de início no braço de medição, para ambos os métodos. As peças, após atingirem a temperatura desejada para o início dos experimentos, foram fixadas lado a lado para facilitar as medições e, assim, os valores eram extraídos através do software de medição utilizado no braço, fazendo medições na peça não calibrada e em seguida na peça calibrada. As temperaturas eram obtidas com o auxílio de sensores simples de temperatura que eram colocados em pontos da peça, mostrado na figura 9. Seus resultados foram armazenados em planilhas de Excel para serem tratados durante as análises dos mesmos.

Em outra etapa, foram realizadas as medições na máquina de medir por coordenada, utilizando-se dos mesmos artifícios para a medição no braço, aguardando a temperatura desejada e fazendo as medições rápidas das peças uma ao lado da outra.

Ambos os resultados das medições foram separados por ordem crescente de temperatura, para que se pudesse fazer uma análise mais criteriosa baseando-se na dilatação linear do material da peça.

Figura 8 – Síntese dos experimentos.



Fonte: Autoria própria (2022).

Para provocar aumento de temperatura, foi utilizado de uma estufa que está presente no laboratório de soldagem do IFSC, e a temperatura máxima atingida e

utilizada para as medições foi de 28,2°C. Para estes experimentos, a peça foi aquecida e levada até a máquina de medir, que estava em temperatura mais baixa.

Figura 9 – Peças utilizadas nos experimentos sendo aquecidas na estufa do IFSC.



Fonte: Autoria própria (2022).

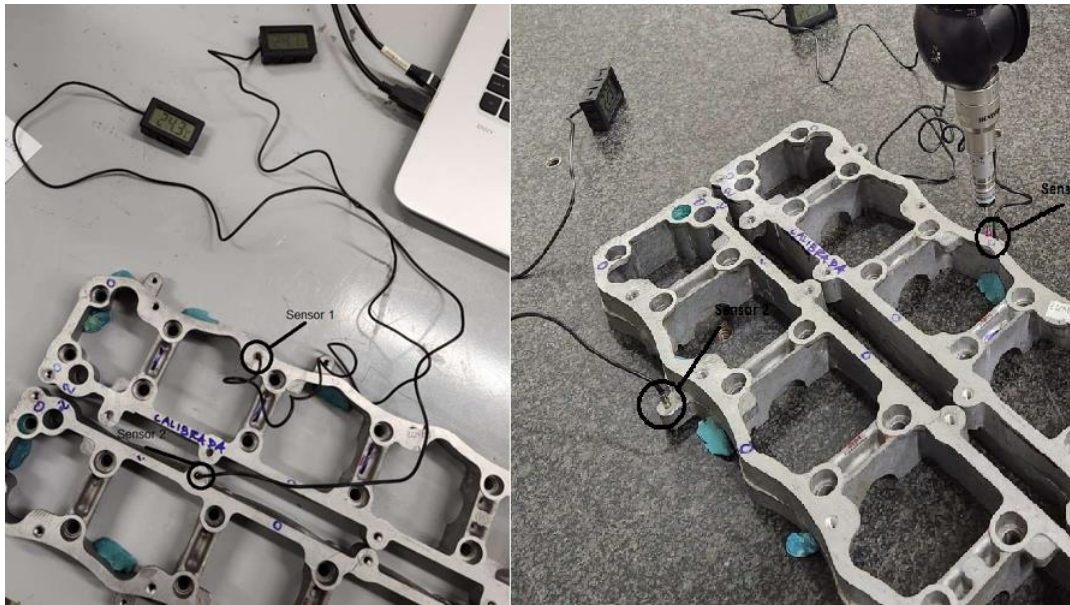
Para resfriar as peças, elas foram deixadas em uma sala a 16°C até elas atingirem a mesma temperatura que a sala. Desse modo a medição seria realizada com a máquina de medir e a peça, ambas, em temperatura abaixo de 20° C.

3.2 Seleção e calibração das peças

Para os experimentos foram selecionadas 2 peças com dimensões próximas o suficiente para não afetar os experimentos realizados e do mesmo material, uma representando a peça a medir e o outro a peça calibrada.

Após avaliar várias opções foram escolhidos dois mancais de cabeçotes de motor de automóvel (Figura 10). A seleção destas peças ocorreu, além da disponibilidade no laboratório de metrologia, pelo fato de serem de alumínio, metal bastante sensível à variação de temperatura.

Figura 10 - Peças utilizadas nos experimentos e sensores de temperatura posicionados.



Fonte: Autoria própria (2022).

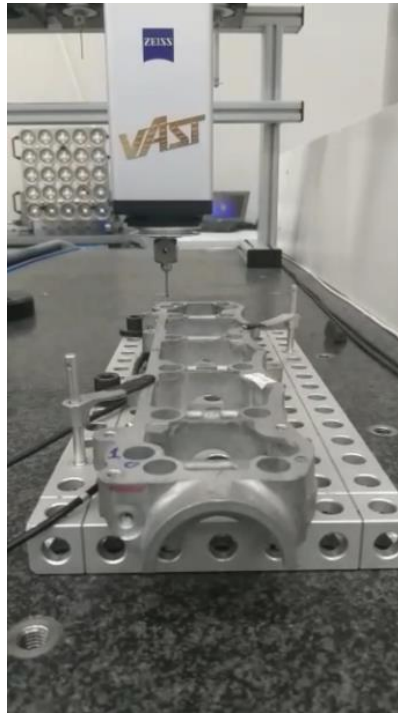
Uma das peças foi calibrada a 20°C em um laboratório de metrologia da Fundação CERTI, referência no Brasil em exatidão, e pertencente à RBC, Rede Brasileira de Calibração. A figura 11 mostra a peça sendo calibrada neste ambiente e a figura 12 apresenta os resultados obtidos. Para esse trabalho de conclusão o resultado utilizado foi o da medição de 343,7198 mm.

Figura 10 - Diagrama realizado na CERTI.



Fonte: Relatório de Medição pela fundação CERTI, n° 1543/22 (2022).

Figura 11 - Peça sendo calibrada na CERTI.



Fonte: Disponibilizado pela Fundação CERTI.

Figura 12 – Resultados obtidos na calibração da peça na fundação CERTI.**Resultados**

Característica	Valor Medido	U	k	V _{eff}
Distância [mm]	343,7198	0,0013	2,00	infinito
X_Ponto 1 [mm]	7,1471	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 1 [mm]	-0,0011	0,0007	2,00	infinito
Z_Ponto 1 [mm]	-3,0036	0,0007	2,00	infinito
X_Ponto 2 [mm]	0,0014	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 2 [mm]	7,1631	0,0007	2,00	infinito
Z_Ponto 2 [mm]	-3,0009	0,0007	2,00	infinito
X_Ponto 3 [mm]	-7,1472	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 3 [mm]	-0,0002	0,0007	2,00	infinito
Z_Ponto 3 [mm]	-3,0010	0,0007	2,00	infinito
X_Ponto 4 [mm]	0,0005	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 4 [mm]	-7,1631	0,0007	2,00	infinito
Z_Ponto 4 [mm]	-3,0039	0,0007	2,00	infinito
X_Ponto 5 [mm]	7,1387	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 5 [mm]	343,6420	0,0014	2,00	infinito
Z_Ponto 5 [mm]	-3,0042	0,0007	2,00	infinito
X_Ponto 6 [mm]	0,0875	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 6 [mm]	350,8850	0,0014	2,00	infinito
Z_Ponto 6 [mm]	-2,9990	0,0007	2,00	infinito
X_Ponto 7 [mm]	-7,1386	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 7 [mm]	343,8047	0,0014	2,00	infinito
Z_Ponto 7 [mm]	-2,9995	0,0007	2,00	infinito
X_Ponto 8 [mm]	-0,0835	0,0007	2,00	infinito
Y_Ponto 8 [mm]	336,5545	0,0013	2,00	infinito
Z_Ponto 8 [mm]	-2,9980	0,0007	2,01	331

Fonte: Relatório de Medição pela fundação CERTI, n° 1543/22 (2022).

Esta peça foi, então, usada para calibrar a outra peça. Isso foi feito na máquina de medir do IFSC, em temperatura próxima a 20° C e empregando o método de comparação para correção de erros da máquina e da dilatação térmica das peças. A figura 14 mostra este ensaio e o resultado desta calibração.

Figura 13 - Peça sendo calibrada no IFSC a 20°C.



Fonte: Autoria própria (2002).

Tabela 1 - Calibração das peças a 20°C no IFSC.

PEÇA CALIBRADA TEMP APROX 20,0°C		PEÇA NÃO CALIBRADA TEMP APROX 20,0°C	
1	343,720	1	343,904
2	343,719	2	343,903
		3	
		4	
		5	
MÉDIA	343,720	MÉDIA	343,904

Fonte: Autoria própria (2022).

Deste modo, de posse das 2 peças com dimensões conhecidas através de uma média ponderada para ter um valor mais próximo da referência, partiu-se para a realização dos experimentos em temperaturas abaixo e acima de 20°C, utilizando-se dos valores de 343,720 mm para a peça calibrada e 343,904 mm para a peça não calibrada.

4 EXPERIMENTOS E RESULTADOS

Este capítulo descreve os experimentos realizados em diversas condições de temperatura e traz a análise dos resultados obtidos.

4.1 Compensação pelo método direto

Nestes experimentos as peças calibradas na CERTI e no IFSC foram medidas em diferentes temperaturas. Sensores de temperatura foram empregados para medir a temperatura da peça e da máquina de medir e os resultados foram corrigidos matematicamente a partir do erro calculado. Os ensaios foram realizados na máquina de medir CNC e no braço de medição.

4.1.1 Medição em temperaturas variadas com a máquina de medir CNC

Dadas as limitações do resfriamento da sala de medidas, a menor temperatura possível ficou próximo a 17°C. Na estufa a temperatura máxima da peça ficou próxima de 28°C por ser este valor próximo do máximo encontrado em medições de chão de fábrica e para segurança no manuseio das peças.

A tabela 2 mostra as temperaturas da peça e da máquina de medir para cada ensaio e o erro estimado presente no resultado obtido, causado pela dilatação térmica diferencial entre a peça e a máquina de medir. Este erro calculado foi usado para corrigir o seu respectivo resultado, obtendo-se um erro após a correção, calculado pela diferença do resultado corrigido em relação à dimensão calibrada da peça.

Tabela 2 - Compensação da temperatura na peça calibrada pelo método direto.

Temperatura da peça (°C)	Temperatura da máquina (°C)	Rx (mm)	Erro calculado (mm)	Resultado corrigido (mm)	Erro após correção (mm)
17,1	17,1	343,712	-0,016	343,728	0,008
19,5	19,5	343,716	-0,003	343,719	-0,001
20,0	20,0	343,720	0,000	343,720	0,000
20,5	20,5	343,723	0,003	343,720	0,000
20,9	20,9	343,723	0,005	343,718	-0,002
21,5	21,5	343,729	0,008	343,721	0,001
22,3	23,2	343,729	0,010	343,719	-0,001
23,1	22,5	343,734	0,019	343,715	-0,004

24,1	23,6	343,740	0,024	343,716	-0,004
25,5	22,5	343,750	0,039	343,712	-0,008
28,2	22,5	343,779	0,061	343,718	-0,002

Fonte: do autor.

O erro após a correção é obtido com a aplicação da equação 1 com o novo valor estimado, ou seja, com o resultado corrigido.

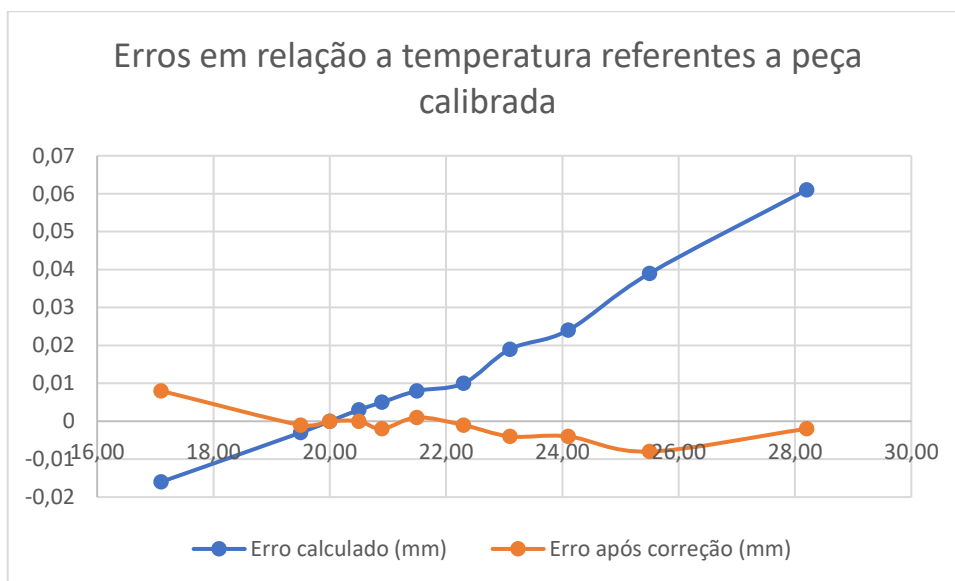
A partir do erro calculado e do erro após a correção calculou-se o % de redução para avaliar a eficácia do método de compensação da temperatura. Estes resultados estão na tabela 3.

A tabela 3, a seguir, mostra agora os resultados corrigidos em cada temperatura, e os erros em relação à dimensão da peça calibrada na Fundação CERTI. A quinta coluna chamada eficácia compara o erro residual em relação ao erro calculado.

Tabela 3 - Eficácia da compensação da temperatura na peça calibrada pelo método direto.

Temperatura da peça (°C)	Temperatura da máquina (°C)	Erro calculado (mm)	Erro após correção (mm)	Eficácia
17,1	17,1	-0,016	0,008	49%
19,5	19,5	-0,003	-0,001	62%
20,0	20,0	0,000	0,000	100%
20,5	20,5	0,003	0,000	84%
20,9	20,9	0,005	-0,002	65%
21,5	21,5	0,008	0,001	88%
22,3	23,2	0,010	-0,001	90%
23,1	22,5	0,019	-0,004	76%
24,1	23,6	0,024	-0,004	84%
25,5	22,5	0,039	-0,008	78%
28,2	22,5	0,061	-0,002	97%
Redução média				79%

Fonte: do autor.

Figura 14 - Comparação de erros antes e depois da correção na peça calibrada.**Fonte: Autoria própria.**

Este mesmo procedimento foi aplicado na medição da peça não calibrada e os resultados estão indicados nas tabelas 4 e 5 a seguir. Percebe-se a mesma redução média encontrada na peça calibrada e em ambas uma elevada eficácia na redução dos erros causados pela temperatura.

Tabela 4 - Compensação da temperatura na peça não calibrada pelo método direto.

Temperatura da peça (°C)	Temperatura da máquina (°C)	Rx (mm)	Erro calculado (mm)	Resultado corrigido (mm)	Erro após correção (mm)
17,1	17,1	343,893	-0,016	343,909	0,008
19,2	19,5	343,900	-0,003	343,903	-0,001
20,0	20,0	343,904	0,000	343,904	0,000
20,5	20,5	343,906	0,003	343,903	-0,001
20,9	20,9	343,906	0,005	343,901	-0,003
21,5	21,5	343,911	0,008	343,903	-0,001
22,5	22,5	343,916	0,014	343,902	-0,002
23,2	23,5	343,920	0,017	343,903	-0,001
23,6	23,6	343,925	0,020	343,905	0,001
24,8	22,5	343,933	0,033	343,900	-0,004
27,2	22,5	343,949	0,053	343,896	-0,008

Fonte: do autor.

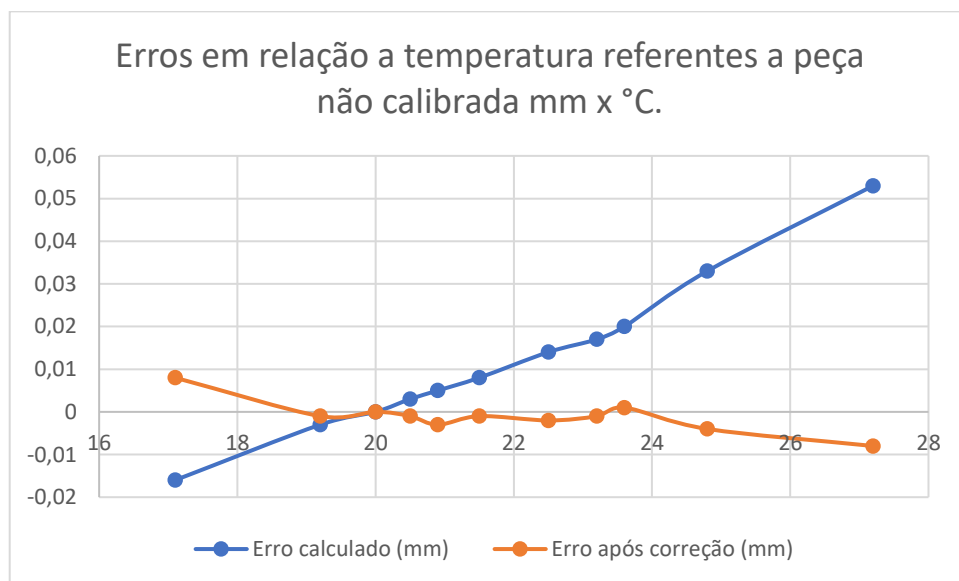
Tabela 5 – Eficácia da compensação da temperatura na peça não calibrada pelo método direto.

Erro calculado (mm)	Erro após correção (mm)	Eficácia
-0,016	0,008	69%
-0,003	-0,001	55%
0,000	0,000	100%
0,003	-0,001	73%
0,005	-0,003	40%
0,008	-0,001	85%
0,014	-0,002	87%
0,017	-0,001	95%
0,020	0,001	94%
0,033	-0,004	89%
0,053	-0,008	86%
Redução média		79%

Fonte: do autor.

Abaixo, uma avaliação em gráfico de como o erro calculado e o erro após a correção se comportam:

Figura 15- Comparação de erros antes e depois da correção na peça não calibrada.



Fonte: Autoria própria.

4.1.2 Medição em temperaturas variadas com o braço articulado de medição

Os mesmos ensaios foram realizados com o braço articulado de medição e as tabelas de resultados estão mostradas a seguir, para a peça calibrada e não calibrada, considerando 20°C a temperatura do braço em todos os ensaios.

Tabela 6 - Compensação na peça calibrada pelo método direto – braço de medição.

Temperatura da peça (°C)	Temperatura da máquina (°C)	Rx (mm)	Erro calculado (mm)	Resultado corrigido (mm)	Erro após correção (mm)
16,1	20,0	343,618	-0,032	343,650	-0,070
17,9	20,0	343,636	-0,017	343,653	-0,066
21,0	20,0	343,635	0,008	343,627	-0,093
23,3	20,0	343,697	0,027	343,670	-0,050
24,0	20,0	343,703	0,033	343,670	-0,050
24,7	20,0	343,733	0,039	343,694	-0,026
26,3	20,0	343,708	0,052	343,656	-0,064
27,3	20,0	343,738	0,060	343,678	-0,042
28,6	20,0	343,781	0,071	343,710	-0,010

Fonte: do autor.

Tabela 7– Eficácia da compensação na peça calibrada pelo método direto – braço de medição.

Erro calculado (mm)	Erro após correção (mm)	Eficácia
-0,032	-0,070	0%*
-0,017	-0,066	0%*
0,008	-0,093	0%*
0,027	-0,050	0%*
0,033	-0,050	0%*
0,039	-0,026	34%
0,052	-0,064	0%*
0,060	-0,042	30%
0,071	-0,010	86%
Redução média		15%

Fonte: do autor.

*Observação: o erro após a correção ficou maior do que antes, assumindo-se não haver correção.

O mesmo procedimento foi realizado na peça não calibrada e os resultados estão mostrados nas tabelas 8 e 9 a seguir.

Tabela 8 - Compensação na peça não calibrada pelo método direto – braço de medição.

Temperatura da peça (°C)	Temperatura da máquina (°C)	Rx (mm)	Erro calculado (mm)	Resultado corrigido (mm)	Erro após correção (mm)
16,1	20,0	343,830	-0,032	343,862	-0,042
17,9	20,0	343,858	-0,017	343,875	-0,029
21,0	20,0	343,864	0,008	343,856	-0,048
22,8	20,0	343,894	0,023	343,871	-0,033
23,5	20,0	343,874	0,029	343,845	-0,059
23,8	20,0	343,865	0,031	343,834	-0,070
24,2	20,0	343,921	0,035	343,886	-0,018
24,9	20,0	343,918	0,040	343,878	-0,026
27,1	20,0	343,972	0,059	343,813	-0,091
27,3	20,0	343,914	0,060	343,854	-0,050

Fonte: do autor.

Tabela 9– Eficácia da compensação na peça não calibrada pelo método direto – braço de medição.

Erro calculado (mm)	Erro após correção (mm)	Eficácia
-0,032	-0,042	0%*
-0,017	-0,029	0%*
0,008	-0,048	100%
0,023	-0,033	0%*
0,029	-0,059	0%*
0,031	-0,070	0%*
0,035	-0,018	49%
0,040	-0,026	35%
0,059	-0,091	0%*
0,060	-0,050	17%
Redução média		20%

Fonte: do autor.

*Observação: o erro após a correção ficou maior do que antes, assumindo-se não haver correção.

Dos resultados da compensação de temperatura com o braço de medição observa-se uma redução média bem inferior ao da máquina CNC. Esse efeito foi causado pela incerteza do braço de medição em si ser da mesma ordem da dilatação térmica ocorrida nos testes, provocando maior incerteza nas correções calculadas e

nos resultados corrigidos. Embora, não foi considerado os valores das incertezas das medições aplicadas em cada equação apresentada, tanto para o método direto como para o método de comparação.

4.2 Compensação pelo método da comparação

As peças calibradas na CERTI e no IFSC foram medidas em diferentes temperaturas. Com os resultados foi usado o método de comparação para ver a sua eficácia e compará-la com a eficácia do método direto. Os ensaios foram realizados na máquina de medir CNC e no braço de medição.

4.2.1 Medição em temperaturas variadas com a máquina de medir

Nos ensaios de compensação pelo método de comparação a peça calibrada e a peça não calibrada eram medidas juntas na mesma temperatura e em posições próximas na máquina de medir para garantir a similaridade necessária às compensações. Os erros encontrados na peça calibrada eram usados para corrigir os resultados na peça não calibrada. Os resultados corrigidos foram então comparados com a dimensão calibrada da peça para calcular o erro após a correção. Estes dados estão na tabela 10, a seguir.

Tabela 10 - Compensação pelo método de comparação – Máquina de medir CNC

Temperatura das peças (°C)	R1 (mm)	Erro encontrado (mm)	Rx (mm)	Resultado corrigido (mm)	Erro após correção (mm)
17,1	343,712	-0,008	343,893	343,901	-0,003
19,5	343,716	-0,004	343,900	343,904	0,000
20,0	343,720	0,000	343,904	343,904	0,000
20,5	343,723	0,003	343,906	343,903	-0,001
20,9	343,723	0,003	343,906	343,903	-0,001
21,5	343,729	0,009	343,911	343,902	-0,002
22,5	343,729	0,009	343,916	343,907	0,003
23,2	343,734	0,014	343,920	343,906	0,002
23,6	343,740	0,020	343,925	343,905	0,001
24,8	343,750	0,030	343,933	343,903	-0,001
27,2	343,779	0,059	343,949	343,890	-0,014

Fonte: do autor.

Novamente para obtenção dos valores dos erros após a correção, foi aplicado a equação 1, onde foi aplicado o resultado corrigido como sendo o Rx.

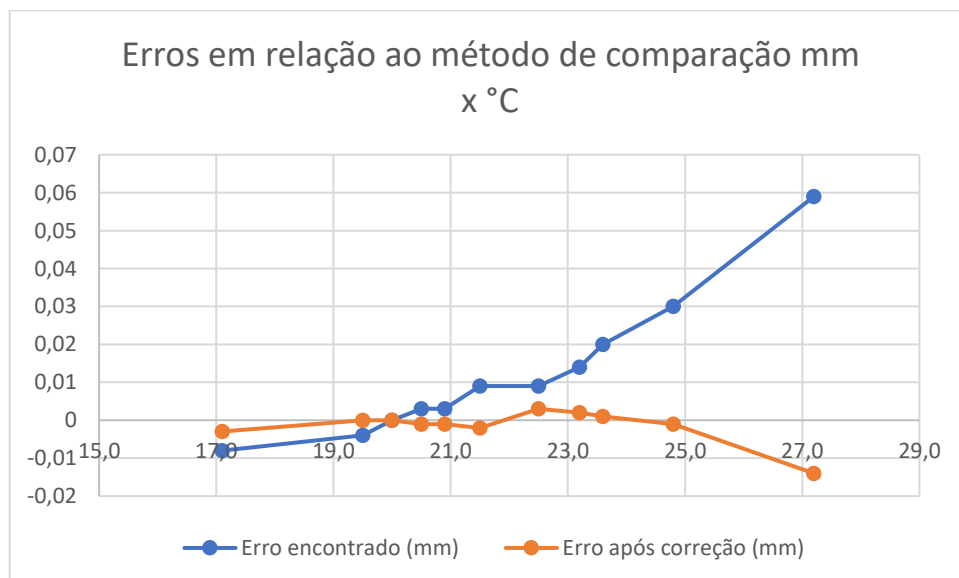
A partir do erro antes da correção e do erro após a correção calculou-se o % de redução para avaliar a eficácia do método de compensação da temperatura. Estes resultados estão na tabela 11 a seguir.

Tabela 11 - Eficácia da compensação pelo método de comparação – Máquina de medir CNC.

Erro encontrado (mm)	Erro após correção (mm)	Redução
-0,008	-0,003	59%
-0,004	0,000	95%
0,000	0,000	100%
0,003	-0,001	63%
0,003	-0,001	63%
0,009	-0,002	76%
0,009	0,003	70%
0,014	0,002	87%
0,020	0,001	96%
0,030	-0,001	96%
0,059	-0,014	76%
Redução média		80%

Fonte: dou autor.

Figura 16 - Erros antes e após a correção em relação ao método de comparação, MMC.



Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Medição em temperaturas variadas com o braço de medição

Os mesmos artifícios foram utilizados para as medições com o braço, os resultados podem ser encontrados abaixo nas tabelas 12, 13 e em sua comparação de erros na figura 18.

Tabela 12 - Compensação pelo método de comparação – Braço de medição.

Temperatura das peças (°C)	R1 (mm)	Erro encontrado (mm)	Rx (mm)	Resultado corrigido (mm)	Erro após correção (mm)
16,1	343,618	-0,102	343,830	343,932	0,028
17,9	343,636	-0,084	343,858	343,942	0,038
21,0	343,671	-0,049	343,864	343,913	0,009
23,3	343,697	-0,023	343,894	343,917	0,013
24,0	343,703	-0,017	343,874	343,891	-0,013
24,7	343,733	0,013	343,865	343,852	-0,052
26,3	343,708	-0,012	343,921	343,933	0,029
27,3	343,738	0,018	343,918	343,900	-0,004
28,6	343,781	0,061	343,872	343,811	-0,093

Fonte: do autor.

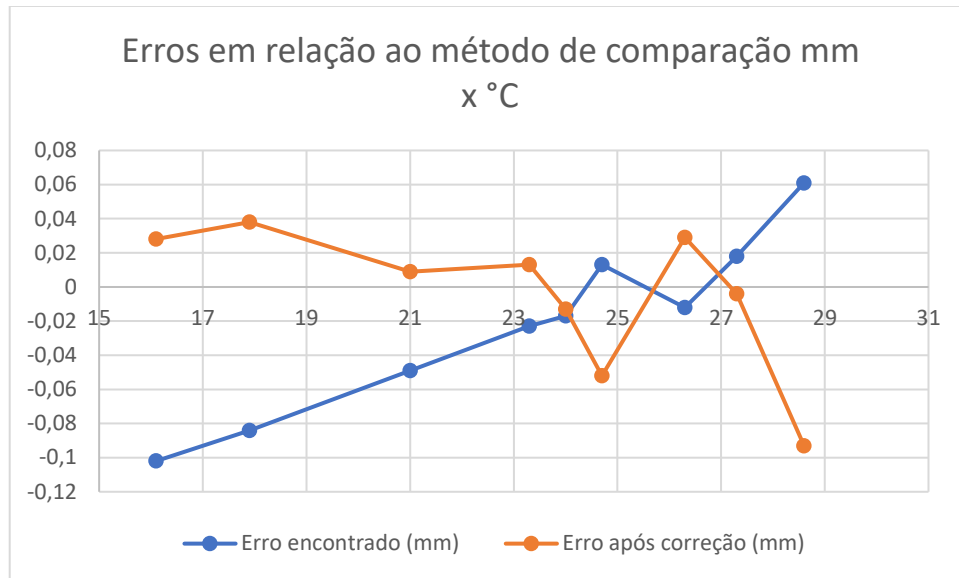
Tabela 13- Eficácia da compensação pelo método de comparação – Braço de medição.

Erro encontrado (mm)	Erro após correção (mm)	Redução
-0,102	0,028	0%*
-0,084	0,038	0%*
-0,049	0,009	0%*
-0,023	0,013	0%*
-0,017	-0,013	0%*
0,013	-0,052	10%
-0,012	0,029	0%*
0,018	-0,004	10%
0,061	-0,093	67%
Redução média		9%

Fonte: do autor.

*Observação: o erro após a correção ficou maior do que antes, assumindo-se não haver correção.

Figura 17 - Erros antes e após a correção em relação ao método de comparação, braço de medição.



Fonte: Autoria própria.

4.3 Medição com máquina de medir CNC

Os resultados obtidos com a máquina de medir CNC estão reunidos na tabela 14 e 15, podendo-se observar bastante semelhança entre os indicadores.

- **Resultado pelo método direto:**

Tabela 14 - Resultados método direto na MMC.

Tendência	0,014 mm
Precisão	0,015 mm
Desvio padrão	0,157 mm
Número de repetições	11 repetições
Exatidão da máquina CNC	0,005 mm
Incerteza	0,015 mm

Fonte: do autor.

- **Resultados pelo método de comparação:**

Tabela 15 - Resultados método de comparação na MMC.

Tendência	0,012 mm
Precisão	0,013 mm
Desvio padrão	0,154 mm
Número de repetições	11 repetições
Exatidão da máquina CNC	0,005 mm
Incerteza	0,014 mm

Fonte: do autor.

Esta semelhança é confirmada pelo cálculo do erro normalizado, que resultou em um valor bastante baixo.

$$EN = \frac{|0,014 - 0,012|}{\sqrt{0,015^2 + 0,014^2}} = 0,1 \quad (8)$$

4.3.1 Medição com o braço

Os resultados obtidos com a máquina de medir CNC estão reunidos nas tabelas 16 e 17, podendo-se observar bastante semelhança entre os indicadores.

Resultado pelo método direto:

Tabela 16 - Resultados método direto no braço.

Tendência	0,027 mm
Precisão	0,027 mm
Desvio padrão	0,710 mm
Número de repetições	9 repetições
Exatidão do braço	0,004 mm
Incerteza	0,028 mm

Fonte: do autor.

Resultados pelo método da comparação:

Tabela 17 - Resultados método de comparação no braço.

Tendência	-0,021 mm
Precisão	0,022 mm
Desvio padrão	0,337 mm
Número de repetições	9 repetições
Exatidão do braço	0,004 mm
Incerteza	0,046 mm

Fonte: Autoria própria.

Erro normalizado:

$$EN = \frac{|0,027 - (-0,021)|}{\sqrt{0,028^2 + 0,046^2}} = 0,89 \quad (9)$$

Nestes ensaios obteve-se um $EN < 1,0$, porém com valor bem maior do que na máquina CNC. O diagnóstico ao final é o mesmo, de que não foi possível afirmar que um ou outro método mostra-se mais eficaz na compensação das dilatações térmicas com o braço de medição.

5 CONCLUSÕES

5.1 Análise do trabalho desenvolvido

Este trabalho buscou abordar os desafios de minimizar erros de medição causados pela dilatação térmica em medições realizadas a temperaturas acima e abaixo da temperatura de referência de 20° C definida pela norma ISO1. Como já citado, cada vez mais as máquinas de medir por coordenadas têm sido levadas para ambientes de produção, sem controle de temperatura, dada a necessidade de aproximação e integração da medição com a fabricação, para maior rapidez na identificação de erros e automação das ações de correção de processos.

Nesse sentido foram avaliados experimentalmente os 2 principais métodos usados na indústria para esta redução de erros, que são o método da Medição por comparação e o Método da correção matemática do erro calculado a partir da medição de temperatura da peça e da máquina de medir. Os ensaios envolveram a seleção e calibração de peças de alumínio e a posterior medição dessas peças em distintas temperaturas.

Foram estimados os resultados de medição pelos dois métodos e comparados os erros antes e após a correção da dilatação. Do processamento dos resultados pode-se concluir:

- a) Houve uma alta eficácia na correção dos erros nos ensaios realizados na máquina de medir CNC. Como a exatidão dessa máquina é bem inferior aos valores da dilatação provocados, as correções mostraram-se efetivas, com eficácia média de cerca de 80% nos 2 métodos empregados.
- b) A avaliação da tendência e da incerteza em ambos os métodos revelou resultados similares, o que resultou em um erro normalizado de cerca de 0,1. Isso significa que, diante das condições experimentais disponíveis neste trabalho, os métodos mostraram-se ambos eficazes, não sendo possível afirmar que um se mostrou melhor do que o outro.
- c) Nos ensaios com o braço de medição houve bastante dificuldade de calcular uma correção efetiva pois os valores de dilatação térmica provocados foram da mesma ordem da exatidão do sistema de medição empregado. Isso indica que a compensação seria efetiva para medições realizadas em temperaturas

maiores. Obteve-se uma eficácia média de apenas 15 a 20%, evidenciando numericamente esta dificuldade.

- d) Na estimativa do erro normalizado com o braço de medição o valor ficou bem maior do que na máquina CNC, mas ainda abaixo de 1,0. Novamente não é possível afirmar que método se mostrou mais eficaz nestes ensaios.
- e) Do ponto de vista operacional o método de compensação com sensores é mais prático e econômico por não necessitar de uma 2ª peça calibrada e por considerar nos cálculos o calor residual do processo de fabricação, visto que a temperatura da peça é medida e a dilatação calculada e compensada. Vale ressaltar que é considerado a distribuição de temperatura como sendo homogênea na peça.
- f) O método de medição por comparação é potencialmente mais confiável pois se dispõe de uma peça calibrada. Com isso não somente erros pela temperatura são corrigidos, mas também erros da máquina de medir podem ser determinados. Como desvantagem, esse método considera que a peça a medir e a peça calibrada estão na mesma temperatura, o que nem sempre é verdade, principalmente ao medir uma peça recém-saída do processo de fabricação, pois após manufatura uma peça tende a estar em uma temperatura elevada, efeito causado pelo atrito e outras interferências que o processo produtivo possui com a peça.
- g) Nos ensaios realizados com a peça aquecida houve sempre a dificuldade de que a peça estava esfriando no decorrer da medição, dado que a sala de medidas estava em temperatura mais baixa. Isso certamente agregou incerteza nos resultados dos ensaios. O ideal seria medir as peças em ambiente em alta temperaturas (30 a 35° C) mas isso não foi viável neste trabalho. Nos ensaios realizados com a peça abaixo de 20° C este problema não ocorreu visto que a sala de medidas e a peça estavam na mesma temperatura.

De modo geral os resultados mostraram a grande importância em investir recursos para avaliar e corrigir erros causados por dilatações térmicas. Os aprendizados obtidos neste trabalho indicam que os objetivos foram alcançados, no entendimento dos métodos de compensação de erros que podem ser aplicados em um ambiente fabril e na avaliação experimental dos métodos.

5.2 Recomendações para trabalhos futuros

Algumas sugestões de trabalhos futuros que podem vir a contribuir dentro do propósito deste trabalho de avaliação e experimentos de eficácias dos métodos de compensação de erro estão listados abaixo:

- Utilização de sensores de temperatura de maior exatidão e, também a aplicação nos cálculos de forma mais aprofundada levando em conta as incertezas de cada uma das medições.
- Avaliação de peças de outros materiais, especialmente o aço
- Ensaio realizados em ambiente de alta temperatura, como ensaios realizados durante o período de verão
- Emprego do método de medição por comparação para inspeção de peças em centros de usinagem equipados com apalpador de medição

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- SOUSA, André Roberto de. **Integração de Sistemas de Medição por Coordenadas na Medição em Linhas de Produção**. 2015. 10 f. Instituto Federal de Santa Catarina, 2015.
- BRITO NETO, Antônio de Assis. **A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças com Geometrias Complexas**. 2003. 99 f. Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.
- ARENHART, Francisco Augusto. **Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro**. 2007. 62 f. Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- MAY, Francisco Pizzetti. **Incertezas na Medição Por Coordenadas com Ênfase na Contribuição da Forma da Peça e da Estratégia de Medição**. 2007. 101 f. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- ISO 10360-2 Coordinate Metrology Part 2. **Performance assessment of coordinate measuring machines (CMM)**, 1992.
- ISSO-GUM **Avaliação de Dados de Medição - Guia Para a Guia Para a Expressão de Expressão de Incerteza de Medição – Gum2008**, 2008.
- VEIGA, Celso Luiz Nickel. **Medição por Coordenadas em Maquinas Ferramentas com Comando Numérico - Método Diferencial**. 1986. 120 f. Engenharia de Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1986.
- OLIVEIRA, A.L, SOUZA, A.R, BRITO NETO, A.A., **Influencias da Incerteza de Medição por Coordenadas na Conformidade Dimensional de Peças Seriadas**. EQUALAB, 2002, São Paulo, p 123 - 137.
- SOUSA, A. R., **Garantia da Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas. Apostila de Curso da Fundação Certi**. Florianópolis, 2001.
- GIGO, L.G., **Estação de Medição por Coordenadas na Produção de Peças Complexas Metodologia De Especificação, Dissertação, Mestrado Em Metrologia Científica E Industrial**, UFSC, 87p., Florianópolis, Brasil, nov. 1999.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Guia para expressão da incerteza de medição. Terceira Edição Brasileira**, Rio de Janeiro, agosto de 2003.
- SOUSA, André Roberto de; GONZÁLEZ, Ricardo. **Programa De Formação Avançada Para Metrologistas Envolvidos Com A Área De Medição Por Coordenadas**. 2008. 6 f. 1º Congresso Internacioanal de Metrologia Mecânica, Rio de Janeiro, 2008.

OLIVEIRA, Ademir Linhares de. **Validação De Processos De Medição Por Coordenadas Em Perações De Controle De Qualidade**. 2003. 165 f., Engenharia Mecânica Labmetro, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

F.A.M. Ferreira; H.A.G. Guerra. **Os Desafios Da Metrologia Por Coordenadas Nos Processos De Controle Das Especificações Dimensionais E Geométricas De Componentes Técnicos, No Novo Paradigma Da Indústria 4.0**. Revista Produção e Desenvolvimento; v.4, n.1, p. 125-132, 2018.

FERREIRA, F., VICENTE, J., PEREZ, S. (2013) **Evaluation Of Coordinate Measuring Machines In The Industry, Using Calibrated Artefacts**. The Manufacturing Engineering Society International Conference. MESIC 2013, Procedia Engineering v.63, p.659-668, 2013.

ANEXOS

ANEXO A – Relatório de Medição 1543/22 FUNDAÇÃO CERTI.



ANEXO 1 - MEDIÇÃO CERTI.pdf