

## **APLICAÇÃO DA NORMA ISO 10791-7 PARA DETERMINAÇÃO DOS ERROS DE UM CENTRO DE USINAGEM UTILIZANDO PEÇAS PADRÕES DE TESTE**

**Arthur Fernandes Brolesi<sup>1</sup>**

**Alexandre Milanez<sup>2</sup>**

**Resumo:** A existência de diversas fontes de erros, está intrínseco ao processo de usinagem, contudo nem sempre esses valores são de conhecimento dos operadores e usuários do equipamento. Isso pode acarretar em problemas na geometria final da peça usinada, levando em alguns casos até mesmo no descarte da peça. Portanto, esse trabalho tem como objetivo descobrir quais são os erros relacionados a geometria das peças produzidas pelo centro de usinagem CNC da faculdade SATC, até então desconhecidos. Para análise de erro geométrico das peças usinadas foram aplicados os procedimentos descritos na ISO 10791-7, cujo objetivo é padronizar e simplificar o processo de análise desses erros com a utilização de peças de teste padrão fabricadas no maquinário em estudo. Para encontrar os valores das cotas solicitadas pela norma foi empregado o uso de uma máquina de medir coordenadas (MMC). Ao fim do procedimento experimental encontrou-se então os erros de forma, e as incertezas envolvidas no processo de fabricação, os quais apresentaram valores na ordem de 0,02 mm sendo os maiores erros encontrados nas cotas de circularidade e concentricidade. Os estudos também indicam que as peças apresentaram baixo desvio-padrão entre as medições, o que garante valores de incerteza que estão na ordem de +/- 0,003 mm.

**Palavras-chave:** Centros de usinagem. Máquina de medir coordenada. Erros dimensionais.

### **1. INTRODUÇÃO**

Existe a necessidade cada vez maior de máquinas-ferramentas com maior precisão de usinagem, que atendam a tendência industrial global de peças com geometrias complexas. Entretanto, muitas são as fontes de erros existentes que podem influenciar diretamente no desempenho e exatidão (Goulart,2019).

Com a finalidade de manter os custos de produção baixos e aumentar a eficiência produtiva, obtendo um menor número de peças rejeitadas, se faz necessário o estudo para determinar os erros dimensionais que estão atribuídos ao processo de usinagem (Supakumnerd;Chungchoo,2015).

---

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: arthurbrolesi@hotmail.com

<sup>2</sup> Prof. Dr. Eng Alexandre Milanez. E-mail: alexandre.milanez@satc.edu.br

Porém para determinar estes erros geométricos e dimensionais já existentes no centro de usinagem se faz necessário o emprego de técnicas de medição. Uma das quais consiste no emprego de uma máquina de medição de coordenadas (MMC), para a calibração de peças padrões de teste, produzidas no respectivo centro de usinagem CNC em análise.

Encontra-se no laboratório de usinagem da SATC o centro de usinagem CNC da marca ROMI modelo D600, que é utilizado para aulas práticas do curso de engenharia mecânica, técnico em fabricação mecânica entre outros, para fins de pesquisa ou projetos. Entretanto são desconhecidos os erros de geometria e dimensão das peças produzidas pelo equipamento.

Com intuito de identificar e comparar quais são os erros no equipamento, propõe-se a fabricação de peças padrões de teste segundo a norma ISO 10791-7 e a subsequente medição das cotas definidas pela norma, utilizando uma máquina de medição de coordenadas (MMC). Por meio dos dados obtidos pelas medições será possível determinar os valores dos erros e incertezas.

Devido a que se tratar de centros de usinagem comandadas numericamente, está intrínseco ao seu uso a relação de tolerâncias que podem ser obtidas ao usinar uma determinada peça, porém é de suma importância que se tenha conhecimento dos erros agregados ao processo de fabricação para que essas tolerâncias possam ser aplicadas aos projetos.

A necessidade de se realizar testes como o sugerido no presente trabalho, se dá ao fato de que muitas vezes os erros e incertezas são desconhecidos e podem de maneira expressiva resultar na perda da peça após a usinagem por problemas dimensionais. Deste modo, realizar um estudo para determinar a precisão dessas máquinas-ferramentas, é importante quando se deseja obter uma peça com maiores precisões dimensionais de maneira rápida com o menor número de peças não conformes.

O trabalho tem como objetivo realizar a fabricação de peças teste segundo a norma ISO 10791-7, no centro de usinagem D600 presente no laboratório de usinagem da faculdade SATC. Posteriormente a medição das respectivas peças em uma máquina de medição de coordenadas para determinar os erros encontrados na sua fabricação.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A fundamentação teórica apresenta o embasamento necessário para compreensão e definição do que são os centros de usinagem CNC, e suas respectivas fontes de erros. Contemplando também a explicação do uso adequado de máquinas de medição de coordenadas que serão de suma importância para a realizar o processo experimental do trabalho.

### 2.1 CENTROS DE USINAGEM CNC

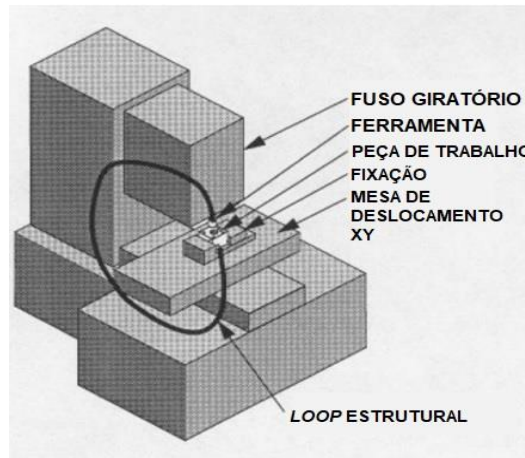
Conforme Koelbel (2005, p.27), CNC é um equipamento eletrônico capaz de receber informações, manejá-las e enviá-las em forma de comandos à máquina-ferramenta de modo que esta, isento do contato do homem possa efetivamente realizar suas operações. Os CNCs podem receber informações através de diversas formas. As mais antigas utilizam de leitoras de fita para tratar a informação, as mais atuais onde é possível inserir as informações diretamente pelo painel que controla a máquina ou por meio de computadores ligados em redes locais. Nestes equipamentos os programas de usinagem são enviados para o CLP (Controladores Lógicos Programáveis), que por sua vez executa as funções com base nestas informações.

Segundo Azevedo (2017, p.13) a composição básica de um CNC consiste em quatro elementos principais: elemento de entrada de dados, computador, mecanismos comandados ou auxiliares. Apesar de considerar apenas os itens citados existe uma integração extremamente complexa de equipamentos, mecanismos, dispositivos e processadores empregados em uma máquina CNC.

### 2.2 ERROS ASSOCIADOS AO CENTRO DE USINAGEM

De acordo com Schwenke *et al* (2008) a precisão dos centros de usinagem são afetadas diretamente por diversas fontes de erros e, essas fontes podem modificar diretamente a geometria da máquina presentes no chamado *loop* estrutural. Este, definido como o conjunto de componentes mecânicos que mantém uma posição relativa entre os objetos especificados. A Fig.1 demonstra os componentes que fazem parte do *loop* estrutural.

Figura 1 – Loop estrutural de um sistema de usinagem



Fonte: baseado e/ adaptado de Slocum (2000).

Devido a mudanças nesses componentes estruturais, a posição e orientação em relação à peça de trabalho diferem-se das posições e orientações nominais, resultando em um erro relativo a essas informações.

As fontes de erro relatadas a seguir afetam a precisão da posição e orientação do equipamento, sendo essas as fontes mais relevantes e responsáveis por grande parte dos erros do centro de usinagem, contemplando respectivamente: erros térmicos, erros geométricos e cinemáticos, forças dinâmicas e cargas estáticas. (Schwenke et al. 2008).

### 2.1.1 Erros geométricos e cinemáticos

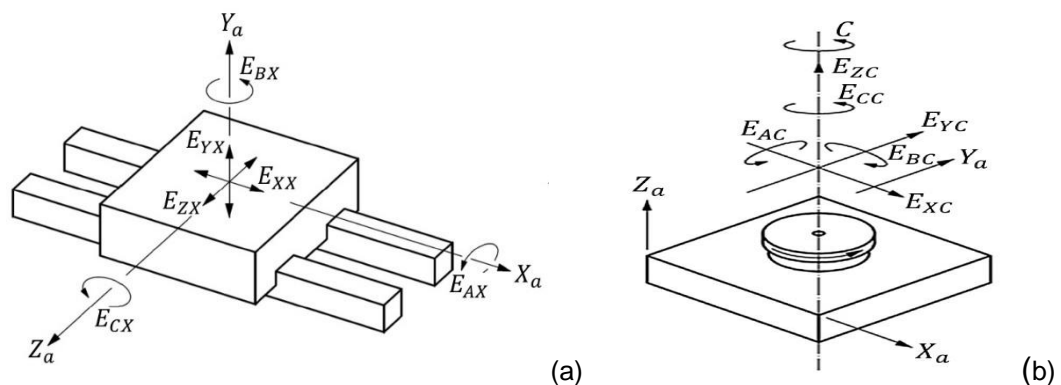
Os erros geométricos são erros originados em consequência da imperfeição geométrica e dimensional dos componentes do equipamento, bem como sua montagem no *loop* estrutural da máquina, os erros dos sistemas de medição da máquina e os respectivos desalinhamentos dos eixos (Schwenke et al. 2008).

Segundo Okafor e Ertekin (2000, p. 1119) esses erros geométricos são considerados como erros que existem em condições de partida a frio da máquina-ferramenta. Essas imperfeições mudam gradualmente com o tempo devido à deterioração dos componentes mecânicos estruturais. O efeito prático dessas imprecisões geométricas é gerar erros na forma e no paralelismo entre os próprios

elementos móveis da máquina. Demonstram-se como erros de posição e orientação da ferramenta em relação à peça de trabalho.

De acordo com Goulart (2019) os erros geométricos incluem erros de posicionamento e erros de forma de cada componente da máquina. Já os erros cinemáticos são basicamente relacionados aos erros que ocorrem quando dois ou mais eixos estão se movendo simultaneamente e também deflexões causadas pelas curvas de aceleração dos eixos, que ocorrem quando o eixo reverte seu movimento. Ambos são erros resultantes do processo de fabricação e montagem dos componentes da máquina-ferramenta. Assumindo que os eixos móveis da máquina se comportem como corpos rígidos podem ser definidos para cada um dos eixos (X, Y e Z): três erros translacionais e três rotacionais como vistos na Fig.2.

Figura 2 – Erros geométricos nos eixos para um movimento linear (a) e para o movimento rotacional (b)



Fonte: baseado de ISO 230-1 (2012).

### 2.1.2 Forças dinâmicas

A trajetória de usinagem a ser realizada por uma máquina-ferramenta é afetada pelo comportamento dinâmico da estrutura da máquina. Nesse caso, devido as forças variáveis, como forças de usinagem ou forças causadas por acelerações ou desacelerações devem ser consideradas. As vibrações também podem resultar em deformação estrutural da máquina sob consideração, sendo essas deformações na estrutura difíceis de compensar. Isto se dá devido às diversas amplitudes, frequências de excitação e ângulos de fase presentes, desta forma contribuindo de maneira direta

na incerteza de posicionamento da ferramenta de usinagem em relação a peça de trabalho (Schwenke et al. 2008).

As respectivas vibrações podem ser divididas em excitações externas ou auto excitações, segundo Liu (2009). A excitação externa, é basicamente composta por imperfeição nos elementos da máquina, vibrações do piso e os impactos da ferramenta de corte em contato com a peça. Essas vibrações de excitação chegam a uma frequência muito próxima a frequência natural da máquina, deste modo aumentando significativamente o deslocamento estrutural da máquina. Essas vibrações devem ser reduzidas ou evitadas com o intuito de diminuir a influência na qualidade final da peça usinada.

Já as vibrações auto excitadas são causadas por efeitos regenerativos, ou seja, relacionadas aos problemas dinâmicos no processo de corte. A mais relevante é conhecida como “*chatter*” que se dá no efeito vibratório causado pela ondulação da superfície de usinagem. Embora as fontes de vibração externas e auto excitada sejam de origens diferentes, ambos contribuem para reduzir a precisão da máquina de diferentes maneiras (Archenti, 2014).

### **2.1.3 Cargas estáticas**

Segundo Goulart (2019) a rigidez estática está relacionada às cargas que são constantes ou de pequena variação durante a operação, resultando em deflexões do loop estrutural da máquina. No entanto, por ser uma carga de pouca variação ou até mesmo constante esta alteração estrutural tende a não se alterar.

Elas podem ser o resultado de diferentes massas posicionadas dentro do volume de trabalho ou mesmo devido ao movimento dos carros da máquina. Um exemplo também seria o próprio peso da peça de trabalho, que pode desta forma causar uma deflexão considerável na mesa da máquina. Outro detalhe importante, é que as partes moveis da máquina que possuem peso elevado, ao mudarem sua posição podem aumentar as forças e momentos aplicadas a estrutura ocasionando deformações.

Como a rigidez é a capacidade de resistir às deflexões causadas pelas cargas aplicadas, o loop estrutural está diretamente relacionado à rigidez da máquina. Nesse caso, mudanças sutis no o loop podem refletir grandes mudanças no

desempenho da máquina.

## 2.2 APLICAÇÃO NORMA ISO 10791-7

Para a aplicação da técnica de medição envovida no presente trabalho é empregada uma norma internacional que entrega as informações necessárias para realização dos testes nos centros de usinagem, sendo a respectiva norma, a ISO 10791-7(2014).

Segundo a Organização Internacional de Normalização (2014) o objetivo da ISO 10791-7 é fornecer informações o mais amplamente e abrangente possível em testes e verificações. Esta norma internacional também estabelece as tolerâncias ou valores máximos aceitáveis, para os resultados dos testes correspondentes aos centros de usinagem de precisão. Sendo também aplicável, total ou parcialmente, as fresadoras e mandriladoras CNC, quando sua configuração, componentes e movimentos são compatíveis com os testes descritos.

De acordo com Supakumnerd e Chungchoo (2015) a ISO 10791-7 testa as condições de centros de usinagem e também abrange a precisão de um corpo de prova acabado em comparação ao padrão ISO, detalhando as informações do procedimento correto para realização dos testes. A aplicação da ISO abrange diversas finalidades sendo elas: comparação, aceitação, manutenção ou definição da precisão do equipamento.

### 2.2.1 Peça padrão de teste

Para a realização do procedimento de teste a norma ISO 10791-7 (2014) determina os parâmetros dimensionais da peça, o tipo do teste e o tamanho nominal da peça. Levando em consideração que o teste a ser realizado nos equipamentos será de posicionamento e contorno. Esse teste é então classificado pela norma como a sigla M1 conforme a Tab.1 e o tamanho nominal da peça escolhida é de 80 mm.

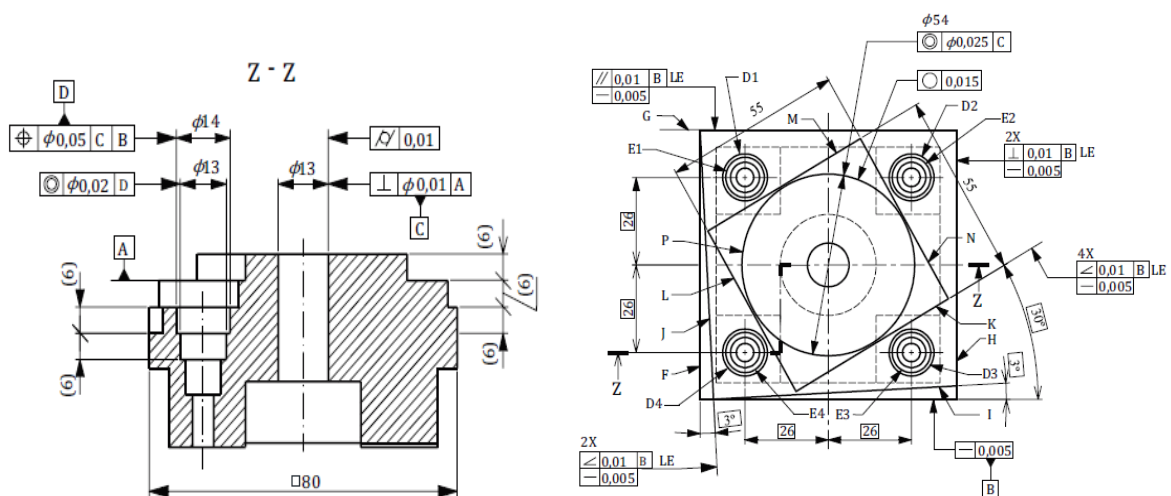
Tabela 1 – Tipos, tamanhos e designações das peças de teste segundo a norma ISO 10791-7

Tipo	Tamanho nominal	Designação
M1 - Peça teste de contorno e posicionamento	80 mm	Peça teste ISO 10791-7 M1_80
	160 mm	Peça teste ISO 10791-7 M1_160
M2 - Peça teste de faceamento	80 mm	Peça teste ISO 10791-7 M2_80
	160 mm	Peça teste ISO 10791-7 M2_80
M3 - Peça de tronco conico	15°	Peça teste ISO 10791-7 M3_15
	45°	Peça teste ISO 10791-7 M3_45
M4 - Peça teste de quadrado	80 mm	Peça teste ISO 10791-7 M4_80
	160 mm	Peça teste ISO 10791-7 M4_160

Fonte: baseado e/ adaptado de Supakumnerd e Chungchoo (2015).

De acordo com Geldart et al. (2003) a peça padrão apresentada na Fig. 3, consiste em uma série de passes e acabamento em perfis diferentes, destinados a verificar o desempenho das máquinas-ferramentas sob uma variedade de condições cinemáticas. A medição pode fornecer algumas informações úteis para avaliar o desempenho da máquina. Estas informações incluem-se: cilíndricidade dos furos; retidão do eixo do furo e a referência; retidão dos lados; enquadramento dos lados; paralelismo; circularidade; concentricidade; retidão das faces; precisão dos ângulos; planicidade das faces.

Figura 3 – Peça teste ISO-10791-7 M1\_80



Fonte: baseado e/ adaptado de Supakumnerd e Chungchoo (2015).

## 2.3 CÁLCULOS DE INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Segundo Couto (2002) a avaliação da estimativa da incerteza de medição pelo método clássico definido pela norma ISO GUM (Guia para Expressão de Incerteza) é feita a partir das etapas básicas: avaliação das fontes incertezas padrão das grandezas de entrada; determinação da incerteza padrão combinada; cálculo dos graus de liberdade efetivos; determinação da incerteza expandida.

### 2.3.1 Avaliação e definição das fontes de incertezas de entrada

A VIM (2012), define dois tipos de incerteza padrão, a do tipo A que é a avaliação em um componente da incerteza de medição por uma análise estatística dos valores medidos, obtidos sob condições definidas de medição. E a do tipo B que é a incerteza de medição determinada por um método de avaliação que não a análise estatística de uma série de observações.

Para o tipo A na maioria dos casos, a melhor estimativa disponível do valor esperado de uma grandeza que varia aleatoriamente e para um número  $n$  de observações independentes obtidas sob as mesmas condições de medição, é a média aritmética ou média das observações Eq. 2 (ISO GUM,2008).

$$\bar{Xm} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Xk \quad (2)$$

Através do valor obtido pode-se estimar o valor do desvio-padrão experimental ( $S$ ), por meio da Eq. 3 e o valor da incerteza padronizada do tipo A ( $\mu_{tipoA}$ ) com a Eq. 4:

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (Xk - \bar{Xm})^2} \quad (3)$$

$$\mu_{tipoA} = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

Para o tipo B as incertezas podem ser obtidas através do certificado de

calibração do instrumento de medição ( $\mu_{padrão}$ ), apresentado na Eq. 5. Através da incerteza da resolução do equipamento de medição por meio de uma distribuição retangular ( $\mu_{r-u}$ ) ou triangular ( $\mu_{r-t}$ ) utilizadas na Eq. 6 e 7.

$$\mu_{padrão} = \frac{\mu_{certificado}}{k} \quad (5)$$

$$\mu_{r-u} = \frac{R/2}{\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$\mu_{r-t} = \frac{R/2}{\sqrt{6}} \quad (7)$$

### 2.3.2 Determinação da incerteza padrão combinada

A incerteza padrão combinada ( $\mu_c$ ) apresentada na Eq. 8 é o resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com o quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas (ISO GUM,2008).

$$\mu_c = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2 + \mu_3^2 \dots + \mu_n^2} \quad (8)$$

### 2.3.3 Cálculo dos graus de liberdade e fator de abrangência

A norma NIS 3003 (1995) recomenda que o fator de abrangência  $k$ , para o cálculo da incerteza expandida, seja igual a 2. Este valor corresponde a aproximadamente 95,45% de confiança estatística. Entretanto, se as contribuições para a incerteza relativa a repetitividade for grande comparadas com as outras distribuições e o número de repetições for pequeno, existe uma possibilidade de que a distribuição de probabilidade normal não seja adequada.

Para esses casos é necessário realizar o cálculo do valor dos graus de liberdade efetivos ( $veff$ ) e para isso a norma ISO GUM (2008) recomenda a utilização da equação de Welch-Satterwaite dada pela Eq. 10, baseado nos graus de liberdade

para cada fonte de incerteza, valor calculado através da Eq. 9 e a utilização da Tab.3 para determinar o fator de abrangência que atinga o nível de confiabilidade desejado.

$$v_i = n - 1 \tag{9}$$

$$v_{eff} = \frac{\mu_c^4}{\sum_{i=1}^n \mu_i^4 / v_i} \tag{10}$$

Tabela 2 – Relação dos graus de liberdade efetivos com o fator de abrangência para um nível de confiabilidade de 95,45%.

Graus de liberdade efetivos	Fator de abrangência para 95,45% de confiabilidade
1	13,97
2	4,53
3	3,31
4	2,87
5	2,65
10	2,28
∞	2

Fonte: baseado e adaptado de ISO GUM (2008).

### 2.3.4 Determinação da incerteza expandida e erro de medição

Para a finalização do cálculo da incerteza é necessário aplicar o valor do fator de abrangência  $k$  encontrado no valor da incerteza combinada, calculada através da Eq. 11. O valor final do erro de medição associado a sua incerteza expandida, junto a sua unidade de medida, é apresentado da seguinte forma: erro de medida (aplicando as correções dos erros sistemáticos conhecidos) +/- incerteza expandida (ISO GUM, 2008).

$$U = k * \mu_c \tag{11}$$

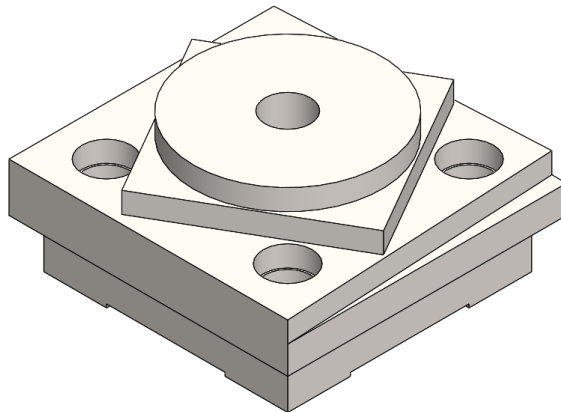
### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O projeto foi dividido em duas partes principais que consistem primeiramente no projeto 3D e fabricação das peças e posteriormente a medição e cálculo dos resultados para apresentar o erro final.

#### 3.1 PROJETO E DEFINIÇÃO DA PEÇA DE TESTE

Para a realização do projeto é necessário a utilização do modelo de peça teste descrito na norma ISO-10791-7 modelo M1-80 de acordo com a pesquisa de Supakumnerd e Chungchoo (2015). Por meio do desenho técnico retirado da norma foi realizado de um desenho 3D apresentado na Fig. 4 por meio do software SolidWorks para sua melhor representação. Com o projeto em 3D facilita-se o processo de programação dos centros de usinagem para a fabricação final da peça.

Figura 4 – Peça teste em 3D



Fonte: do autor (2020)

#### 3.2 MATERIAIS E FABRICAÇÃO

A norma ISO especifica as informações necessárias para a realização dos testes, porém não delimita um material padrão e ferramental específico para a fabricação das peças. Portanto opta-se por um material de melhor usinabilidade e parâmetros de usinagem que resultem em um produto final com maior precisão e

exatidão. Na Tab. 3 encontram-se todos os dados utilizados na realização da fabricação.

Tabela 3 – Informações requeridas pela ISO 10791-7

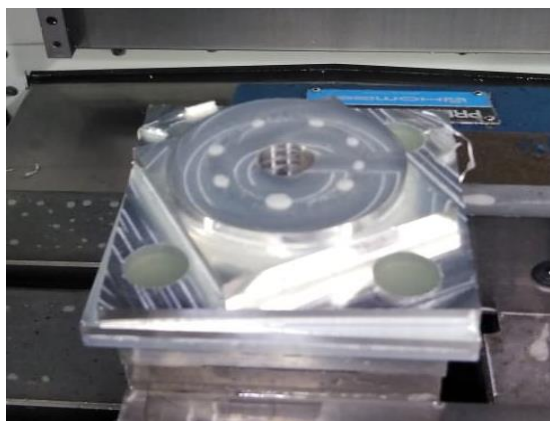
<b>Dado de entrada</b>	<b>Descrição</b>
Material da peça	Aluminio liga 6063
Tipo do teste	Peça teste ISO 10791-7 M1_80
Ferramenta de corte	Sandvik CoroMill 390, 12 mm com 3 arestas de corte
Pastilha de corte	Sandvik 390R-070204E-NL H13A
Velocidade de corte	2500 rpm
Avanço da ferramenta	350 mm/min
Fluido de Corte	Lubri cort S 316

Fonte: do autor (2020).

A ferramenta fresadora disponibilizada pela faculdade SATC, possui erros de batimento, isto é, um desvio na sua circularidade, que pode influenciar diretamente nas dimensões finais da peça. Para poder mitigar este erro sistemático, a ferramenta foi levada a empresa ICON onde foi utilizado um projetor de perfil para encontrar o desvio de batimento, que apresentou um erro de 0,08 mm valor que foi usado na etapa de programação para compensar o erro.

A usinagem das peças foi realizada no laboratório de usinagem da SATC no centro de usinagem ROMI D600, sendo que toda a programação foi realizada diretamente no painel de comando da máquina. Foram fabricadas três peças padrão de teste idênticas com o mesmo material e ferramentas, a Fig. 5 mostra a peça final usinada.

Figura 5 – Peça teste usinada



Fonte: do autor(2020).

### 3.3 MEDIÇÃO DAS PEÇAS

Para a medição das peças foi utilizado uma máquina de medição por coordenadas do fabricante Mitutoyo, modelo Crysta-Plus M7106 da empresa Estática Metrologia e Instrumentação, apresentado na Fig. 6.

Figura 6 – Máquina de medir coordenadas



Fonte: do autor(2020).

Hamburg-Piekar (2006) define que as medições com MMC implicam sempre na realização dos seguintes passos:

- Qualificação do sistema de apalpação e calibração da ponta de medição (esfera, disco, etc), utilizando, por exemplo, uma esfera padrão.
- Identificação da posição da peça no sistema de coordenadas da máquina.
- Medição de pontos coordenados na superfície da peça.
- Apresentação dos resultados da medição após a transformação das medições no sistema de coordenadas.

Flack (2014) explica que matematicamente é necessário um mínimo de pontos para se determinar uma geometria específica, porém, ao utilizar uma máquina de medir coordenadas recomenda-se um número maior de pontos para uma correta coleta de dados. As recomendações para os pontos de contato apresentados na Tab. 4 foram utilizadas como padrão para o processo de medição.

Tabela 4 – Recomendações para os pontos de contatos mínimos para as geometrias de medição

<b>Tipo de geometria</b>	<b>Quantidade mínima</b>	<b>Quantidade recomendada</b>
Linha reta	2	5
Plano	3	9 (aproximadamente 3 linhas de 3 pontos)
Circunferência	3	7
Esfera	4	9 (3 círculos em 3 planos diferentes)
Cone	6	12 (círculos em 4 planos paralelos diferentes)
Elipse	4	12
Cilindro	5	12 (círculos em 4 planos paralelos diferentes )
Cubo	6	18 (no mínimo 3 pontos por face)

Fonte: baseado e/ adaptado de Flack (2014).

Com as determinações recomendadas seguiu-se o teste de referência usados por Geldart et al. (2003) para obter as medidas das seguintes cotas indicadas:

- 1) Circularidade do cilindro maior e do furo central;
- 2) Concentricidade cilindro maior e do furo central;
- 3) Paralelismos do diamante e da base;
- 4) Perpendicularidades do diamante e da base;
- 5) Retilidade do diamante e da base;
- 6) Angularidade do diamante e da base;
- 7) Ângulos de 3°;
- 8) Planicidade da base e do topo;

### 3.4 CALCÚLO DAS INCERTEZAS

Para a realização dos cálculos das incertezas algumas informações são necessárias, sendo a primeira delas a determinação das fontes de incerteza-padrão. Para o teste realizado, considerando todas as condições de calibração determinadas pela ISO GUM (2008), utilizou-se apenas três fontes de incerteza-padrão sendo elas respectivamente: a incerteza do padrão herdada de um certificado de calibração, incerteza relacionada a resolução do padrão de medida (com distribuição retangular), incerteza relacionada ao desvio padrão das medições.

Com o valor conhecido de incerteza do certificado, equivalente a 0,001 mm, aplica-se a Eq. 5 utilizando um fator de abrangência de 2 e obtêm-se um valor de incerteza-padrão de 0,0005 mm. E além disso sabe-se o a resolução da máquina de

medir coordenadas (MMC) que é de 0,0001 mm com esse valor aplica-se a Eq. 6 e obtêm-se o valor de 0,00003 mm.

Os desvios-padrão utilizados foram calculados para cada conjunto de medições, considerando 5 medições para cada cota específica utilizando a Eq. 3. Desta forma com o valor das três fontes de incerteza pode-se obter a incerteza combinada e graus de liberdade efetivo de cada medição separadamente, e por fim a determinação da incerteza expandida com o uso da Eq. 10.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após realizar a etapa de procedimento experimental e realizar as medidas e cálculos das incertezas foi possível obter então os erros finais do conjunto de cotas determinadas pela norma e suas respectivas incertezas de cada uma das peças de teste.

##### 4.1 ERROS DE CIRCULARIDADE E CONCENTRICIDADE

As cotas que relacionam a usinagem com interpolação circular e os furos circulares fornecem as informações relacionadas a concentricidade e circularidade da peça teste, apresentados na Tab. 5 e o gráfico comparativo na Fig. 7.

Tabela 5 – Resultados dos erros e incertezas circulares.

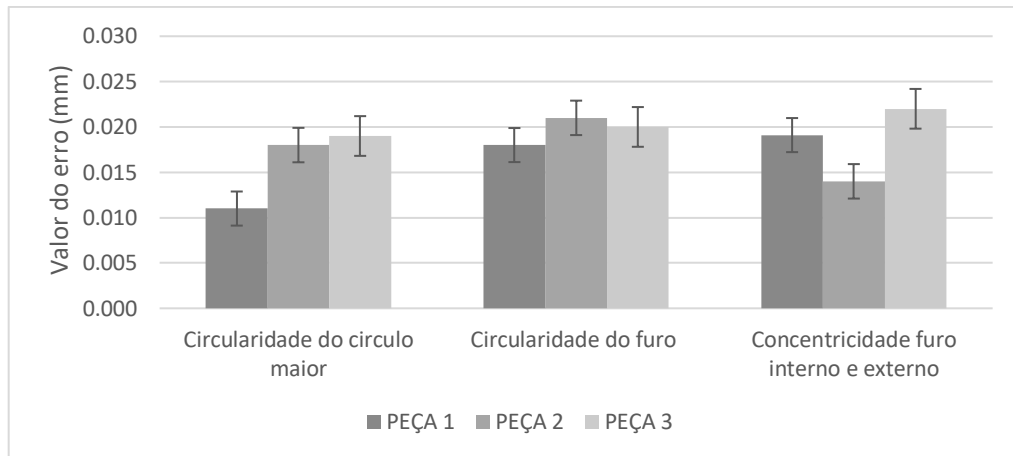
Peça n°	Descrição da cota	Erro médio (mm)	+/- Incerteza (mm)
1	1 - Circularidade do círculo maior	0,011	0,004
	2 - Circularidade do furo	0,018	0,004
	3 - Concentricidade furo interno e externo	0,019	0,003
2	1 - Circularidade do círculo maior	0,018	0,003
	2 - Circularidade do furo	0,021	0,003
	3 - Concentricidade furo interno e externo	0,014	0,002
3	1 - Circularidade do círculo maior	0,019	0,003
	2 - Circularidade do furo	0,020	0,003
	3 - Concentricidade furo interno e externo	0,022	0,002

Fonte: do autor(2020).

Segundo Geldart et al. (2003) como o movimento interpolado é intensivo, isto é, existe a presença do movimento de mais de um eixo de coordenadas isso

provoca-se uma distorção maior ao usinar superfícies circulares. Nota-se então que os erros associados a essas cotas são relativamente maiores do que as cotas lineares

Figura 7 – Erros circulares



Fonte: do autor(2020).

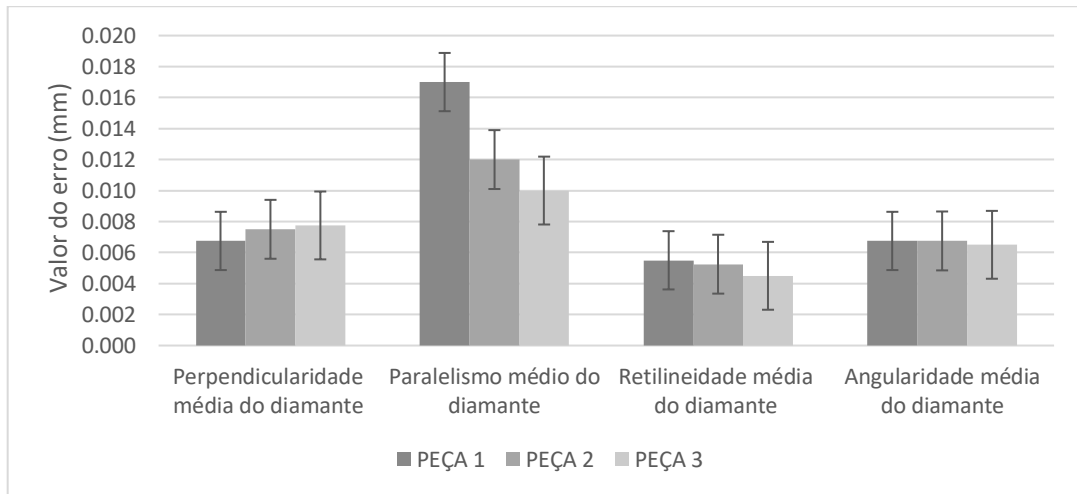
#### 4.2 ERROS DO DIAMANTE E DA BASE

Os erros relacionados a usinagem linear do diamante superior e da base quadrada da peça fornecem as informações relacionadas aos dados apresentados na Tab. 6 e Tab. 7 juntamente com os gráficos comparativos nas Fig. 8 e Fig.9.

Tabela 6 – Resultados dos erros do diamante.

Peça n°	Descrição da cota	Erro médio (mm)	+/- Incerteza (mm)
1	1 - Perpendicularidade média do diamante	0,007	0,003
	2 - Paralelismo médio do diamante	0,017	0,003
	3 - Retilidade média do diamante	0,006	0,002
	4 - Angularidade média do diamante	0,007	0,003
2	1 - Perpendicularidade média do diamante	0,008	0,002
	2 - Paralelismo médio do diamante	0,012	0,003
	3 - Retilidade média do diamante	0,005	0,003
	4 - Angularidade média do diamante	0,007	0,002
3	1 - Perpendicularidade média do diamante	0,008	0,003
	2 - Paralelismo médio do diamante	0,010	0,003
	3 - Retilidade média do diamante	0,005	0,003
	4 - Angularidade média do diamante	0,007	0,003

Fonte: do autor(2020).

**Figura 8 – Erros do diamante**


Fonte: do autor(2020).

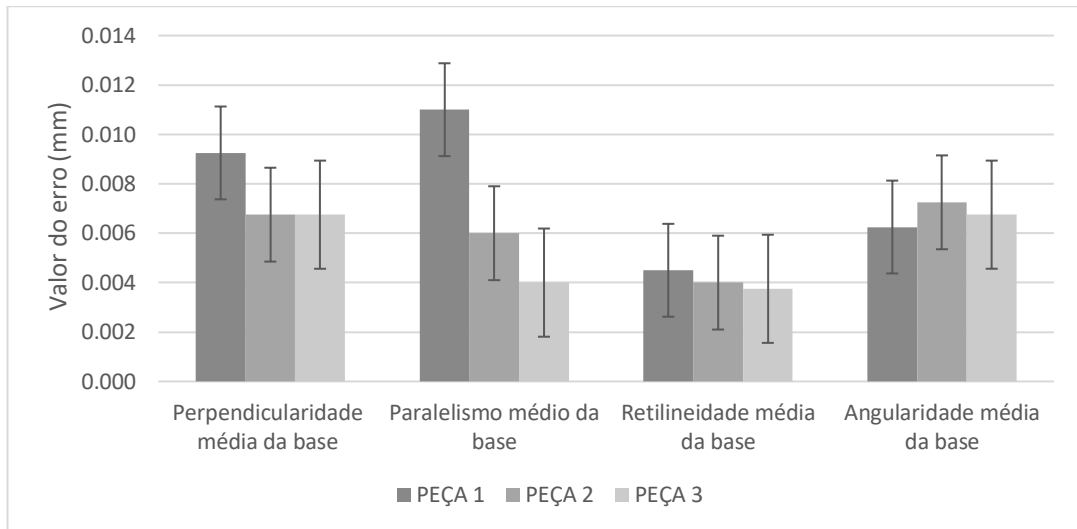
Os resultados lineares apresentaram erros menores que 0,02 mm tanto para a base quanto para o diamante. Isso era de se esperar, pois esse tipo processo utiliza de movimentos simples de deslizamento da ferramenta de corte.

**Tabela 7 – Resultados dos erros da base.**

Peça n°	Descrição da cota	Erro médio (mm)	+/- Incerteza (mm)
1	1 - Perpendicularidade média da base	0,009	0,003
	2 - Paralelismo médio da base	0,011	0,002
	3 - Retilidade média da base	0,005	0,002
	4 - Angularidade média da base	0,006	0,002
2	1 - Perpendicularidade média da base	0,007	0,002
	2 - Paralelismo médio da base	0,006	0,004
	3 - Retilidade média da base	0,004	0,002
	4 - Angularidade média da base	0,007	0,002
3	1 - Perpendicularidade média da base	0,007	0,002
	2 - Paralelismo médio da base	0,004	0,002
	3 - Retilidade média da base	0,004	0,003
	4 - Angularidade média da base	0,007	0,003

Fonte: do autor(2020).

Figura 9 – Erros da base



Fonte: do autor(2020).

### 4.3 ERROS DE PLANICIDADE

Os erros relacionados a planicidade da usinagem no topo da peça e na parte superior da base são apresentados na Tab. 8 e o gráfico comparativos na Fig.12. Ao comparar os resultados das outras cotas medidas nota-se que os menores erros foram relacionados a planicidade da peça.

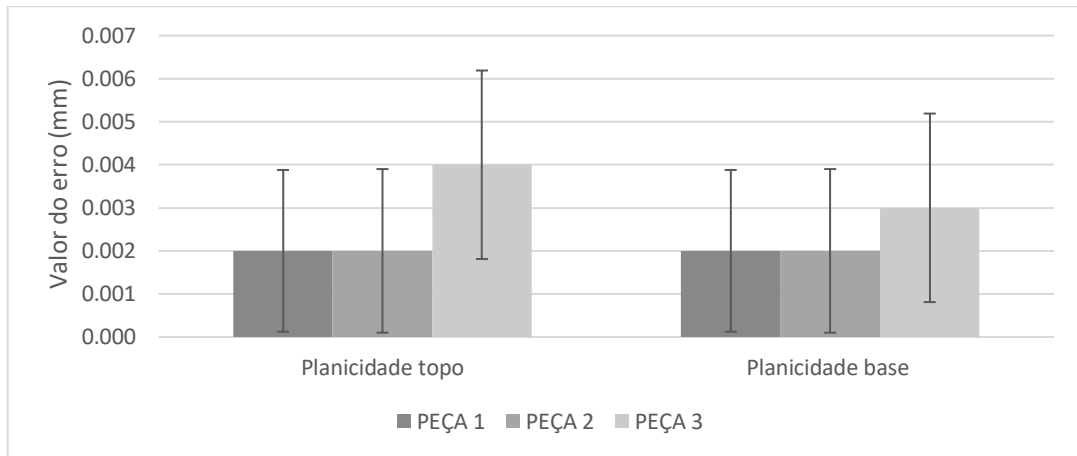
Porém ao comparar o valor do erro médio com a incerteza percebe-se que o valor da incerteza é considerável para as respectivas medidas, sendo talvez recomendável a utilização de outro equipamento de medição para que as incertezas possam ser menores do que o valor atual.

Tabela 8 – Resultados dos erros de planicidade.

Peça n°	Descrição da cota	Erro médio (mm)	+/- Incerteza (mm)
1	1 - Planicidade topo	0,002	0,002
	2 - Planicidade base	0,002	0,002
2	1 - Planicidade topo	0,002	0,002
	2 - Planicidade base	0,002	0,002
3	1 - Planicidade topo	0,004	0,002
	2 - Planicidade base	0,003	0,002

Fonte: do autor(2020).

Figura 10 – Erros de planicidade



Fonte: do autor(2020).

#### 4.4 ERROS ANGULARES

Os erros relacionados aos dois ângulos de 3° nas laterais das peças fornecem as informações relacionadas a angularidade e são apresentados na Tab. 9 e o gráfico comparativos na Fig.11.

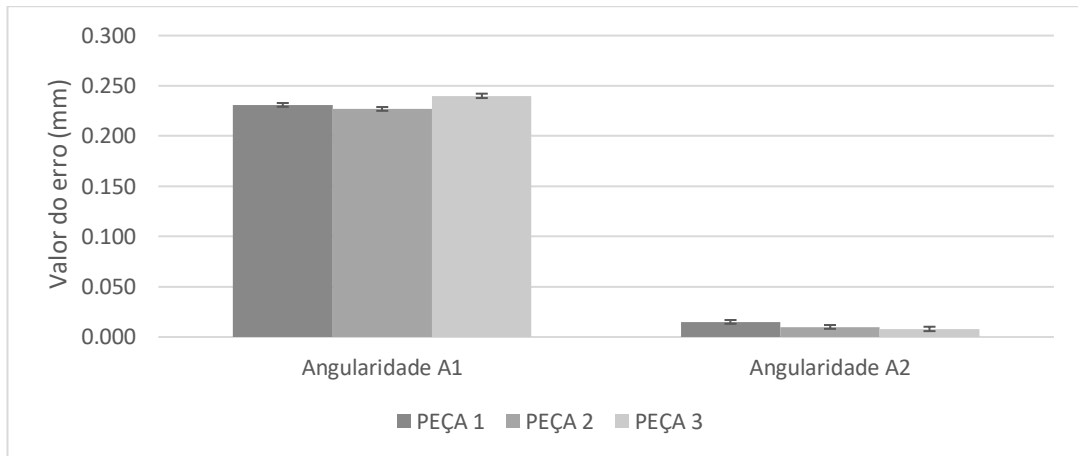
Tabela 9 – Resultados dos erros angulares.

Peça n°	Descrição da cota	Erro médio (mm)	+/- Incerteza (mm)
1	1 – Angularidade A1	0,231	0,002
	2 – Angularidade A2	0,015	0,002
2	1 – Angularidade A1	0,227	0,002
	2 – Angularidade A2	0,010	0,002
3	1 – Angularidade A1	0,240	0,003
	2 – Angularidade A2	0,008	0,002

Fonte: do autor(2020).

Identifica-se um erro considerável para os ângulos A1, porém o mesmo não está relacionado a problemas geométricos no processo de usinagem e sim relacionado a um erro no procedimento de programação identificado posterior a usinagem. Desta forma os erros nessa cota específica podem ser ignorados no quesito valor de erro e apenas considerado a reprodutibilidade nas 3 peças de teste.

Figura 11 – Erros angulares



Fonte: do autor(2020).

#### 4.5 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DO TESTE

De acordo com Supakumnerd e Chungchoo (2015) a importante limitação do método é que, nesse estado, a técnica proposta não pode ser aplicada em alguns casos como: 1) as condições de corte da peça de teste diferem das condições de corte da peça de trabalho; 2) as propriedades dos materiais da peça de teste diferem das propriedades do material da peça de trabalho.

Porém as peças padrão utilizadas no estudo e os resultados experimentais indicaram que a técnica proposta pode ser utilizada para avaliar o desempenho de usinagem dos centros de usinagem CNC. Além disso, aplicando esta técnica, os usuários do equipamento podem aproximar-se ao erro geométrico do produto com antecedência. Contudo, essa técnica precisa ser aprimorada para melhorar sua precisão na aproximação erro geométrico e de correções para mitigar o erro final do produto.

#### 5. CONCLUSÃO

Levando em consideração os resultados obtidos com os testes realizados e a análise dos dados encontrados pode-se concluir que:

- O centro de usinagem em estudo apresentou valores com uma média menor que 0,020 mm e devido ao pequeno desvio-padrão das medidas da

MMC, isto é, repetitividade dos valores medidos, obteve-se então valores de incerteza que estão na ordem de +/- 0,003 mm. Dessa maneira a máquina em estudo pode ser utilizada para diversas aplicações contanto que o critério de aceitação do produto fabricado seja maior do que os valores encontrados.

- Ao analisar os gráficos comparativos percebe-se que os maiores erros no processo de usinagem se encontram nas medidas relacionadas a usinagem de perfis circulares ou dos furos.
- Vale ressaltar a importância de se compensar o erro de batimento da ferramenta fresadora antes do processo de usinagem, procedimento que garantiu a redução no erro geométrico final.

Desta forma, apesar de ser um método de análise mais simplificado de um centro de usinagem CNC o trabalho apresentou ótimos resultados mesmo ainda sujeito a aprimoramentos no método, garantindo assim que a utilização do equipamento em estudo é confiável para a maioria das aplicações propostas.

## 5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHO FUTUROS

Ressalta-se, porém, a necessidade de trabalhos posteriores com a medição do outro centro de usinagem CNC presente no laboratório da SATC utilizando do mesmo procedimento e norma, para que então seja possível a comparação e determinação da maior eficácia e desempenho de usinagem entre os equipamentos.

Outro ponto importante para a análise em trabalhos posteriores seria o estudo dos erros circulares e os fatores que influenciam para o aumento desse erro, visto que os mesmos foram os erros de maior valor encontrado.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos que ajudaram de maneira direta ou indireta na realização deste, em especial ao orientador Alexandre Milanez, professor do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC, ao líder do laboratório de calibração da

empresa Estática Metrologia e instrumentação Vanilsio Salvalaggio Ascari e a Guilherme Peraro da empresa Alumasa.

## 6. BIBLIOGRAFIA

ARCHENTI, Andreas. **Prediction of machined part accuracy from machining system capability**. CIRP annals, v. 63, n. 1, p. 505-508, 2014.

AZEVEDO, Américo Luiz de. **Fundamentos do CNC para usinagem**. 1ª Edição. São José dos Campos/SP: JAC gráfica e editora, 2017.

COUTO, Paulo Roberto Guimarães; OLIVEIRA, Jackson da Silva; CINELLI, Leonardo Rodrigues. **Algumas Considerações sobre as Metodologias de Cálculo da Estimativa da Incerteza de Medição citadas no ISO GUM 95**. 2002.

FLACK, David. **CMM measurement strategies**. 2014.

GELDART, Martin et al. **A direct comparison of the machining performance of a variax 5 axis parallel kinetic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 43, n. 11, p. 1107-1116, 2003.

GOULART, Tedni de Abreu. **Performance assessment of machine tools based on structural stiffness**, 2019.

HAMBURG-PIEKAR, Daniel Samuel, et al. **Calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas**, 2006.

INMETRO. VIM – **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. Edição luso-brasileira. Rio de Janeiro. 2012.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. 230-1: **test code for machine tools: part 1: geometric accuracy of machines operating under no-load or quasi-static conditions**. Geneva, 2012b.

ISO GUM, **Avaliação de dados de Medição - Guia para a expressão de incerteza de medição**, 1ª edição brasileira, 2008.

KOELBEL, Maikon Adolfo dos Santos. **Automatizando a usinagem do conjunto do pressionador de entrada utilizando a linguagem g em um centro de usinagem com comando fanuc 21i/mb**. p. 19, 2005.

LIU, Xiongwei. **Machining dynamics in milling processes**. In: Machining Dynamics. Springer, London, 2009. p. 167-231.

NIS 3003, **The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibrations**, Edition 8, may 1995.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DE NORMALIZAÇÃO, **ISO 10791-7: Test conditions for machining centres-- Part 7: Accuracy of finished test pieces**, p. 24, 2014.

OKAFOR, Anthony Chukwuekwu; ERTEKIN, Yalcin M. **Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics**. International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 40, n. 8, p. 1199-1213, 2000.

SCHWENKE, Heinrich et al. **Geometric error measurement and compensation of machines—an update**. CIRP Annals, v. 57, n. 2, p. 660-675, 2008.

SUPAKUMNERD, Kittichote; CHUNGCHOO, Chatchapol. **An Application of Finished Test Piece Methods for Evaluating the Performance of Computer Numerical Control Machining and Turning Centers**, 2015.

## LISTA DE SÍMBOLOS

$X_m$	[---]	Média aritimetica;
$n$	[---]	Quantidade de observações;
$X_k$	[---]	Valor da observação;
$S$	[---]	Desvio-padrão;
$H_{tipoA}$	[---]	Incerteza tipo-A

$\mu_{\text{padrão}}$	[---]	Incerteza do padrão;
$\mu_{\text{certificado}}$	[---]	Incerteza do certificado de calibração;
$\mu_{r-u}$	[---]	Incerteza com distribuição retangular
$\mu_{t-u}$	[---]	Incerteza com distribuição triangular
<b>K</b>	[---]	Fator de abrangência (curva T-student);
<b>R</b>	[---]	Resolução do instrumento;
$\nu_i$	[---]	Graus de liberdade para uma fonte de incerteza
<b><math>\nu_{\text{eff}}</math></b>	[---]	Graus de liberdade efetivos;
$\mu_c$	[---]	Incerteza combinada;
$\mu_i$	[---]	Incerteza de cada fonte;
$\nu_i$	[---]	Graus de liberdade [n-1];
<b>U</b>	[---]	Incerteza expandida.