



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

PRISCILA PONTES BRITO DA SILVA

**TESTES FUNCIONAIS DO DESEMPENHO DE UMA *ROUTER* COM
ACIONAMENTO POR CNC**

Recife
2019

PRISCILA PONTES BRITO DA SILVA

**TESTES FUNCIONAIS DO DESEMPENHO DE UMA *ROUTER* COM
ACIONAMENTO POR CNC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal de Pernambuco como
requisito parcial para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

S586t Silva, Priscila Pontes Brito da.
Testes funcionais do desempenho de uma *router* com acionamento por CNC /
Priscila Pontes Brito da Silva. - 2019.
79 folhas, il., tab., abr. e sigl.
Orientador: Prof. Tiago Leite Rolim.
TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Departamento de
Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui referências, apêndices e anexo.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-15

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG/EPP**

**ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – TCC 2**

Aos 09 dias do mês de dezembro do ano de dois mil e dezenove, às 10h, na Sala 02 do PPGEM, no prédio anexo do DEMEC, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **Acompanhamento dos testes funcionais do desempenho de uma “router” com acionamento por CNC**, elaborado pela aluna **Priscila Pontes Brito da Silva**, matrícula **072.198.274-31**, composta pelos professores **Tiago Leite Rolim** (Orientador), **Alex Elton de Moura** (membro titular) e **Carlos Augusto do Nascimento Oliveira** (membro titular). Após a exposição oral, o candidato foi arguido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente e deliberaram pela aprovação do candidato, atribuindo-lhe a média 9,0 (nove), julgando-o apto à conclusão do curso de Engenharia Mecânica. Para constar, redigi a presente ata aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Prof. (a): **Prof. Tiago Leite Rolim** **Nota:**
Orientador(a):

Assinatura: _____

Prof. (a)/Membro(a): **Prof. Alex Elton de Moura** **Nota:**

Assinatura: _____

Prof. (a)/Membro(a): **Prof. Carlos Augusto do Nascimento
Oliveira** **Nota:**

Assinatura: _____

Recife, 09 de dezembro de 2019.

Prof. José Maria Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EPP - UFPE

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente por ter me dado essa oportunidade e me proporcionar perseverança para chegar até aqui.

Aos meus pais, Sidney Brito e Diana Pontes, pelo amor, incentivo e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos, Sidney Jr e Silas, por todo apoio, conselhos e por estarem sempre ao meu lado.

Ao meu noivo, George Cavalcanti, por toda paciência, amor, compreensão e por estar sempre presente nos momentos difíceis.

A toda minha família que sempre esteve presente, me ajudando e apoiando em todos os momentos.

Ao meu orientador, professor Dr. Tiago Leite Rolim, pela oportunidade e suporte no pouco tempo que lhe coube, bem como pelo empenho e recursos dedicados a elaboração deste trabalho.

Aos professores José Carlos Albuquerque da Silva e Alex Elton Moura por toda a ajuda necessária para a concretização do presente trabalho.

Aos meus amigos, agradeço por toda força e incentivo.

RESUMO

O crescimento tecnológico e a necessidade de suprir a demanda do setor industrial resultou no desenvolvimento das máquinas ferramentas. Ao longo dos anos elas tiveram de ser aperfeiçoadas, de modo que fossem capazes de fabricar peças com geometrias mais complexas, com ótimo acabamento superficial e de forma mais rápida. Com essa finalidade e com o desenvolvimento da eletrônica e da computação, as máquinas evoluíram de forma com que fosse permitida a automatização e flexibilização da fabricação, através do Comando Numérico (NC), que evoluiu para o Comando Numérico Computadorizado (CNC), favorecendo o surgimento dos centros de usinagem. A *router* é considerada um centro de usinagem, onde o diferencial dela é o pórtico móvel que possibilita a fabricação de peças artesanais, esculturas em madeira, polímeros e metais não ferrosos. Como as peças passaram a ser fabricadas de forma mais rápida, surgiu a necessidade de desenvolver uma máquina que fosse capaz de medi-las rapidamente e de forma confiável. Para isso, foram desenvolvidas as Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC). Entretanto, como nenhuma máquina ferramenta é perfeita, e pode sofrer influências de algumas fontes de erro, é necessário que seja feito um ensaio geométrico nas máquinas ferramentas para garantir a qualidade dimensional das peças usinadas. Nesse contexto, este trabalho propõe a avaliação de uma *router* CNC desenvolvida no trabalho de conclusão do curso de mestrado do Professor José Carlos Albuquerque da Silva, do PPGEM, através da usinagem de peças na referida *router*, que serão avaliadas na máquina de medição tridimensional.

Palavras-chave: *Router* CNC. Máquina ferramenta. Erros geométricos. Máquina de Medição por Coordenadas.

ABSTRACT

Technological growth and the need to meet the demand of the industrial sector has resulted in the development of machine tools. Over the years they had to be refined so that they could make parts with more complex geometries, with better surface finish and faster. For this purpose and with the development of electronics and computing, the machines evolved so that the automation and flexibility of manufacturing were allowed, through Numerical Control (NC), which evolved to Computer Numeric Control (CNC), favoring the emergence of machining centers. The router is considered a machining center, where its differential is the mobile gantry that allows the manufacture of handicrafts, wood carvings, polymers and non-ferrous metals. As parts started to be manufactured faster, there was a need to develop a machine that could measure them quickly and reliably. For this, the Coordinate Measuring Machines (MMC) were developed. However, since no machine tool is perfect, and can be influenced by some sources of error, a geometric test must be done on the machine tools to ensure the dimensional quality of the machined parts. In this context, this work proposes the evaluation of a CNC router developed in the conclusion of the master's course of Professor José Carlos Albuquerque da Silva, from PPGEM, by machining parts in the referred router, which will be evaluated in the three-dimensional measuring machine.

Keywords: CNC router. Machine tool. Geometric errors. Coordinate Measuring Machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Exemplo de <i>Router</i> CNC.	20
Figura 2 -	(a) <i>Router</i> com 2 eixos (b) <i>Router</i> com 3 eixos (c) <i>Router</i> com 4 eixos (d) <i>Router</i> com 5 eixos.	21
Figura 3 -	<i>Router</i> CNC de mesa móvel.....	22
Figura 4 -	<i>Router</i> CNC de pórtico móvel.....	22
Figura 5 -	Máquina de Medição por Coordenadas.....	24
Figura 6 -	Máquina de Medição por Coordenadas e seus subsistemas.....	24
Figura 7 -	Diagrama de Ishikawa das principais fontes de erros na medição por coordenadas.....	25
Figura 8 -	Modelo de corpo rígido em relação ao eixo Y.	26
Figura 9 -	Conhecimentos requeridos ao operador de MMC.	27
Figura 10 -	Fatores que influenciam na conformidade geométrica da peça.	30
Figura 11 -	Exemplos de ensaios geométricos.....	31
Figura 12 -	<i>Laser</i> Inteferométrico para verificação de posicionamento.	31
Figura 13 -	(a) Esquadro e (b) relógio comparador.	32
Figura 14 -	Ensaio geométrico pelo método <i>ball bar</i>	33
Figura 15 -	Ensaio geométrico de trajetória com o <i>grid encoder</i>	33
Figura 16 -	Peça teste conforme NBR NM-ISO 10791-7: 1999.....	34
Figura 17 -	Fatores que influenciam os desvios geométricos em máquinas ferramenta.	35
Figura 18 -	Exemplos de deformações termicamente induzidas em uma fresadora.	36
Figura 19 -	Rigidez prejudicada pela configuração desfavorável da máquina.	37
Figura 20 -	Sistema de controle em malha fechada de uma máquina ferramenta acionada por CNC.	38
Figura 21 -	Centro de Usinagem vertical com 3 eixos.....	38
Figura 22 -	<i>Router</i> CNC avaliada.	41
Figura 23 -	Principais componentes da <i>router</i> CNC.....	41
Figura 24 -	(a) Motor de passo (b) <i>spindle</i>	42
Figura 25 -	(a) Fusos de esferas recirculantes (b) guias lineares	43
Figura 26 -	Peça fixada para o fresamento.....	43
Figura 27 -	Fresadora vertical utilizada para preparar as faces avaliadas.....	43

Figura 28 -	Peça usinada para ser fixada na mesa da <i>router</i> CNC.	44
Figura 29 -	Modelo CAD da peça.	44
Figura 30 -	Ferramenta utilizada para o fresamento CNC.	45
Figura 31 -	MMC <i>Mitutoyo Beyond Crysta574</i> , localizada no LAMECO.	46
Figura 32 -	Furo central nas peças teste 1 e 2.	46
Figura 33 -	Furos laterais nas peças teste 1 e 2.	47
Figura 34 -	Retas 1, 2, 3 e 4 projetadas nas arestas do quadrado inclinado.	47
Figura 35 -	Inclinação do quadrado.	48
Figura 36 -	Representação das distâncias entre os centros de cada furo ao furo central.	49
Figura 37 -	Representação da reta 1 – 3 na peça teste.	49
Figura 38 -	Peça fixa e alinhada na mesa da <i>router</i> CNC.	51
Figura 39 -	(a) Peça 1 usinada resultante do 1º código (b) Peça 1 usinada resultante do 2º código c) Peça 1 usinada resultante do 3º código.	51
Figura 40 -	Peça 2 usinada para o ensaio geométrico.	52

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 -	Parâmetros de corte para a usinagem das peças na <i>router</i> CNC.....	45
Quadro 2 -	Dados estatísticos para avaliar a exatidão das medições do diâmetro do furo C das peças 1 e 2.	53
Quadro 3 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade do furo C das peças 1 e 2.	53
Quadro 4 -	Dados estatísticos para avaliar a exatidão das medições do diâmetro dos furos laterais da peça 1.	54
Quadro 5 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade dos furos laterais da peça 1.....	55
Quadro 6 -	Dados estatísticos para avaliar a exatidão das medições do diâmetro dos furos laterais da peça 2.	56
Quadro 7 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade dos furos laterais da peça 2.....	56
Quadro 8 -	Dados estatísticos das medições dos ângulos entre as retas perpendiculares do quadrado inclinado da peça 1.....	57
Quadro 9 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das medições dos ângulos entre as retas perpendiculares da peça 1.	58
Quadro 10 -	Dados estatísticos referentes as medições dos ângulos entre as retas paralelas do quadrado inclinado da peça 1.....	58
Quadro 11 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das medições dos ângulos entre as retas paralelas da peça 1.	59
Quadro 12 -	Dados estatísticos referentes as medições das distâncias entre o furo central C e os furos laterais da peça 1.	60
Quadro 13 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das distâncias entre os centros dos furos C e laterais da peça 1.....	61
Quadro 14 -	Dados estatísticos das medições das distâncias entre o furo C e os laterais da peça 2.....	61
Quadro 15 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das distâncias entre os centros dos furos C e laterais da peça 2.....	62
Quadro 16 -	Resultado das medições do ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 das peças 1 e 2.	63

Quadro 17 -	Dados estatísticos para avaliação da repetitividade dos ângulos entre as linhas 1-3 e 2-4 das peças 1 e 2.	64
-------------	---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Resultado das medições do diâmetro do furo central C da peça usinada 1.....	52
Tabela 2 -	Resultado das medições do diâmetro do furo central C da peça usinada 2.....	52
Tabela 3 -	Resultado das medições dos diâmetros dos furos laterais da peça usinada 1.....	54
Tabela 4 -	Resultado das medições dos diâmetros dos furos laterais da peça usinada 2.....	55
Tabela 5 -	Resultado das medições dos ângulos entre as retas perpendiculares do quadrado inclinado da peça usinada 1.....	57
Tabela 6 -	Resultado das medições do ângulo entre as retas paralelas do quadrado inclinado da peça usinada 1.....	58
Tabela 7 -	Resultado da medição do ângulo do quadrado inclinado.....	59
Tabela 8 -	Resultado das medições das distâncias entre o furo central C e os furos laterais da peça usinada 1.....	59
Tabela 9 -	Resultado das medições das distâncias entre o furo central C e os furos laterais da peça usinada 2.....	61
Tabela 10 -	Resultado das medições do ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 da peça usinada 1.....	63
Tabela 11 -	Resultado das medições do ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 da peça usinada 2.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CNC	<i>Computer Numeric Control</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LAMECO	Laboratório de Medição por Coordenadas
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i>
MMC	Máquina de Medição por Coordenadas
NBR	Norma Brasileira
NC	<i>Numerical Control</i>
NM	Norma Mercosul
PPGEM	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
\bar{x}	Média aritmética amostral
μ	Média populacional esperada
μ_0	Média populacional sob a hipótese nula
s	Desvio padrão amostral
σ	Desvio padrão populacional
n	Tamanho da amostra aleatória
α	Nível de significância
β	Poder do teste
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA	16
1.2	JUSTIFICATIVA	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Objetivo Geral.....	17
1.3.2	Objetivos Específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	DESENVOLVIMENTO DAS MÁQUINAS FERRAMENTAS.....	18
2.2	CENTRO DE USINAGEM E MÁQUINA FERRAMENTA	19
2.3	<i>ROUTER</i> CNC	19
2.3.1	<i>Router</i> CNC de mesa móvel	21
2.3.2	<i>Router</i> CNC de pórtico móvel.....	22
2.4	MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	23
2.4.1	Princípio de medição por coordenadas.....	23
2.5	FONTES DE ERRO NA MEDIÇÃO	25
2.5.1	Máquina de Medição	25
2.5.2	Ambiente.....	26
2.5.3	Peça	27
2.5.4	Operador e estratégia de medição.....	27
2.6	TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS	27
2.6.1	Tolerância Geométrica de Forma	28
2.6.2	Tolerância Geométrica de Orientação.....	28
2.6.3	Tolerância Geométrica de Posição	29
2.6.4	Tolerância Geométrica de Batimento	29
2.7	FATORES DE INFLUÊNCIA NA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA DE PEÇAS.....	29
2.8	ENSAIOS GEOMÉTRICOS	30
2.8.1	<i>Laser</i> Interferométrico	31
2.8.2	Réguas/Esquadros e Relógio comparador.....	32
2.8.3	<i>Ball Bar</i>	33
2.8.4	<i>Grid Encoder</i>	33
2.8.5	Peças Padrão Usinadas.....	34

2.9	FATORES DE INFLUÊNCIA NOS DESVIOS GEOMÉTRICOS EM MÁQUINAS FERRAMENTA	35
2.9.1	Erros Geométricos da Máquina Ferramenta.....	35
2.9.2	Efeitos Térmicos na Máquina Ferramenta	36
2.9.3	Rigidez Finita da Máquina Ferramenta	37
2.9.4	Sistema de Controle da Máquina Ferramenta.....	37
2.9.5	Erros em função da montagem da máquina ferramenta e dos componentes	38
2.10	TESTE DE HIPÓTESES E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	39
3	METODOLOGIA.....	41
3.1	<i>ROUTER</i> CNC AVALIADA.....	41
3.1.1	Estrutura da máquina	42
3.1.2	Acionamento.....	42
3.1.3	Transmissão de Movimento	42
3.2	MATERIAL ESCOLHIDO E PREPARAÇÃO DAS FACES AVALIADAS DA PEÇA.....	43
3.3	MÉTODO DE ENSAIO ESCOLHIDO E GEOMETRIA DA PEÇA ENSAIADA	44
3.4	MÉTODO DE INSPEÇÃO	45
3.4.1	Furo Central.....	46
3.4.2	Furos Laterais	47
3.4.3	Quadrado Inclinado	47
3.4.4	Distância entre os centros dos furos.....	48
3.4.5	Análise de perpendicularidade das peças 1 e 2	49
3.4.6	Avaliação através do teste de hipóteses e do coeficiente de variação.....	49
4	RESULTADOS	51
4.1	PEÇAS USINADAS	51
4.1.1	Medições do diâmetro do furo central C das peças 1 e 2	52
4.1.2	Medições dos diâmetros dos furos laterais das peças 1 e 2	53
4.1.3	Medição no quadrado inclinado.....	57
4.1.4	Medições das distâncias entre os centros dos furos das peças 1 e 2	59
4.1.5	Medições da análise de perpendicularidade das peças 1 e 2.....	62
5	CONCLUSÃO.....	65
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66

REFERÊNCIAS.....	67
APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DA PEÇA ADAPTADA DA NBR NM ISO 10791-7 (1999).	71
APÊNDICE B – PROGRAMAS DO FRESAMENTO CNC.....	72
ANEXO A – PEÇA-TESTE CONFORME NBR NM-ISSO 10791-7: 1999.	79

1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo segue a contextualização e problema desta pesquisa.

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E PROBLEMA DE PESQUISA

Atualmente, com o aumento da competitividade no mercado e do desenvolvimento tecnológico, a indústria tem procurado trabalhar de forma cada vez mais prática, buscando sempre a redução dos custos de produção e o aumento da eficiência no dia a dia, não deixando de visar a qualidade do produto (ARDILA, 2013).

Com o desenvolvimento da tecnologia, foram desenvolvidas máquinas acionadas através do Comando Numérico Computadorizado (CNC), não ficando limitadas a capacidade humana, o que resultou no aumento da produtividade e na capacidade de fabricar peças mais precisas e de forma mais rápida (FIEBIG, 2018).

A usinagem é um processo muito utilizado dentre os outros processos de fabricação, devido aos níveis de exatidão e precisão que podem atingir, sendo largamente utilizado em operações de acabamento (SOUSA, 2000). Como ainda hoje não é possível obter peças perfeitas, no tocante a dimensão, forma e acabamento, toda peça deverá possuir limites de tolerância das medições (DÓRIA, 2005).

A exatidão de usinagem é definida como o grau de concordância entre as características de projeto de uma peça e aquelas medidas na peça fabricada. Portanto, uma peça pode ser considerada aceitável, desde que as dimensões e a geometria dela permaneçam dentro dos limites de tolerância especificados (SOUZA, 2011). A tolerância dimensional é a diferença entre as dimensões máximas e mínimas de uma dimensão nominal (FORTULAN, 2017), enquanto a tolerância geométrica está associada às variações admissíveis de forma e posição da peça.

É necessário então conhecer os fatores que influenciam na conformidade geométrica de uma peça usinada, onde entre eles estão as especificações das máquinas ferramentas que serão utilizadas.

1.2 JUSTIFICATIVA

A seleção da máquina para uma operação de usinagem influencia significativamente nas dimensões, forma e acabamento das peças fabricadas.

De acordo com Sousa (2000, p. 52):

A qualificação geométrica da máquina ferramenta pode ser definida como a operação de verificar a sua exatidão geométrica para certificar-se de que a máquina atende às especificações do fabricante e/ou aos requisitos do processo de usinagem ao qual se destina. Sempre que necessário, alguma alteração é realizada no equipamento para que a sua exatidão venha a ficar compatível com as especificações, ficando a máquina, assim, qualificada geometricamente para a operação.

Portanto, sabendo que a produção de peças dentro das tolerâncias estabelecidas está intrinsecamente ligada a variação fornecida pela máquina ferramenta, é necessário avaliar quais os erros que podem ocorrer durante a usinagem na *router* CNC.

1.3 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados os principais objetivos deste trabalho de pesquisa.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar os testes funcionais de desempenho de uma *router* CNC, e avaliar os erros que ela pode apresentar durante a usinagem, por meio da medição das peças usinadas, utilizando para tanto a metrologia tridimensional através da Máquina de Medição por Coordenadas (MMC).

1.3.2 Objetivos Específicos

- Preparação das peças adaptadas de acordo com a norma NBR NM ISO 10791-7 (1999);
- Identificar os parâmetros a serem avaliados como um índice de eficiência da *router* CNC;
- Medição das peças usinadas utilizando a Máquina de Medição por Coordenadas (MMC);
- Identificar e analisar os desvios das peças usinadas na *router* CNC.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção é apresentado um referencial teórico acerca do tema da pesquisa.

2.1 DESENVOLVIMENTO DAS MÁQUINAS FERRAMENTAS

Por muito tempo, o homem dependeu da produção artesanal para fabricação de objetos utilizados por ele (CRISCOLO, 2018). No entanto, o crescente consumo exigiu uma resposta mais rápida dos meios de produção, fazendo com que o artesanato não fosse mais suficiente para suprir a demanda.

Segundo Criscolo (2018, p.1):

“O torno foi uma das primeiras e mais importantes máquinas utilizadas na fabricação de peças. Em uma de suas primeiras concepções, os movimentos de rotação da máquina eram controlados por pedais. A ferramenta para torner, que dava forma ao produto, ficava na mão do operador, o que lhe exigia habilidade no processo de fabricação. Quando a ferramenta foi fixada à máquina, o operador passou a ter mais liberdade para trabalhar. Este foi o nascimento da máquina ferramenta.”

Ao longo do tempo, as máquinas foram se aperfeiçoando, fazendo com que elas possuíssem maiores rendimentos. Desde o início da revolução industrial, quando surgiram as primeiras máquinas ferramentas, até meados dos anos 70 do século XX, “as máquinas ferramentas sempre evoluíram com base em soluções puramente mecânicas, no máximo incorporando elementos eletrotécnicos e eletrônicos básicos” (STOETERAU, 2004, p. 6).

No entanto, as máquinas operatrizes tinham que ser mais rápidas para conseguir suprir a demanda da produção. Com o passar dos anos e com o avanço do desenvolvimento tecnológico, o Comando Numérico (NC), passou a ser o Comando Numérico Computadorizado (CNC), originando os centros de usinagem CNC (LEITE et al., 2011).

A introdução de máquinas acionadas por CNC mudou o cenário da fabricação. Geometrias que antes eram consideradas difíceis, se tornaram fáceis de serem produzidas, além do número de etapas de usinagem que requeriam ação humana ser reduzido (XU, 2017).

“O comando numérico comanda e controla a operação, dando ordem de execução de percurso, fazendo com que os eixos da máquina se desloquem automaticamente, seguindo uma linha de comando previamente programada.” (GUIMARÃES, 2013, p. 21).

Foram desenvolvidas também ferramentas como o *Computer Aided Design* (CAD) e o *Computer Aided Manufacturing* (CAM), para auxiliar os processos de projeto e fabricação de peças, em indústrias de pequeno, médio e grande porte (DAMBROZ et. al 2017).

Segundo Miralles (2009, p. 20):

Após a criação de um modelo tridimensional de uma forma geométrica complexa em um sistema CAD, é necessário realizar a transferência desse modelo geométrico para um sistema CAM, onde será realizada a programação NC para, posteriormente, ser transferida ao comando numérico da máquina ferramenta CNC, onde será produzida.

2.2 CENTRO DE USINAGEM E MÁQUINA FERRAMENTA

A NBR NM-ISO 230-1 (1999, p. 3) define e descreve a máquina ferramenta como “uma máquina acionada por fonte externa, não portátil durante o funcionamento, que permite a usinagem de metais, madeiras etc., mediante remoção ou deformação plástica de materiais.”

Já a NBR NM-ISO 10791-7 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1999, p. 2) define centro de usinagem:

Um centro de usinagem é uma máquina ferramenta comandada numericamente capaz de executar operações de usinagem múltiplas, incluindo fresamento, mandrilamento, furação e rosqueamento, como também troca automática de ferramentas ou unidade similar de armazenamento, de acordo com o programa de usinagem.

As operações realizadas por estes centros de usinagem são controladas por CNC (SATO, 2014). Existem basicamente dois tipos de centros de usinagem, para peças rotacionais e para peças prismáticas. As que são para peças com simetria de revolução (rotacionais), são comumente chamados de centros de torneamento ou torno (FERNEDA, 1999) e para peças prismáticas podem ser o fresamento, furação.

2.3 ROUTER CNC

Com a expansão do setor moveleiro e a alta demanda, foi necessário que o setor industrial possuísse máquinas ferramentas confiáveis, controladas por computador e com excelente precisão na usinagem (FIEBIG, 2018). Essas máquinas são chamadas de *router* CNC, ilustrada na Figura 1, que é um modelo de máquina ferramenta que vem se destacando na fabricação de peças em madeiras, polímeros, borrachas, metais não ferrosos entre outros materiais maleáveis (SILVA, 2018).

Elas são mais utilizadas para usinagem de madeiras, sendo comum para fabricação de painéis de *Medium Density Fiberboard* (MDF) mas também podem ser utilizadas para usinar outros tipos de materiais mais leves como ligas de alumínio, plásticos, chapas de acrílico ou outros polímeros (BORTOLAN, 2017), respeitando seus limites de usinagem.

Figura 1 - Exemplo de *Router* CNC.



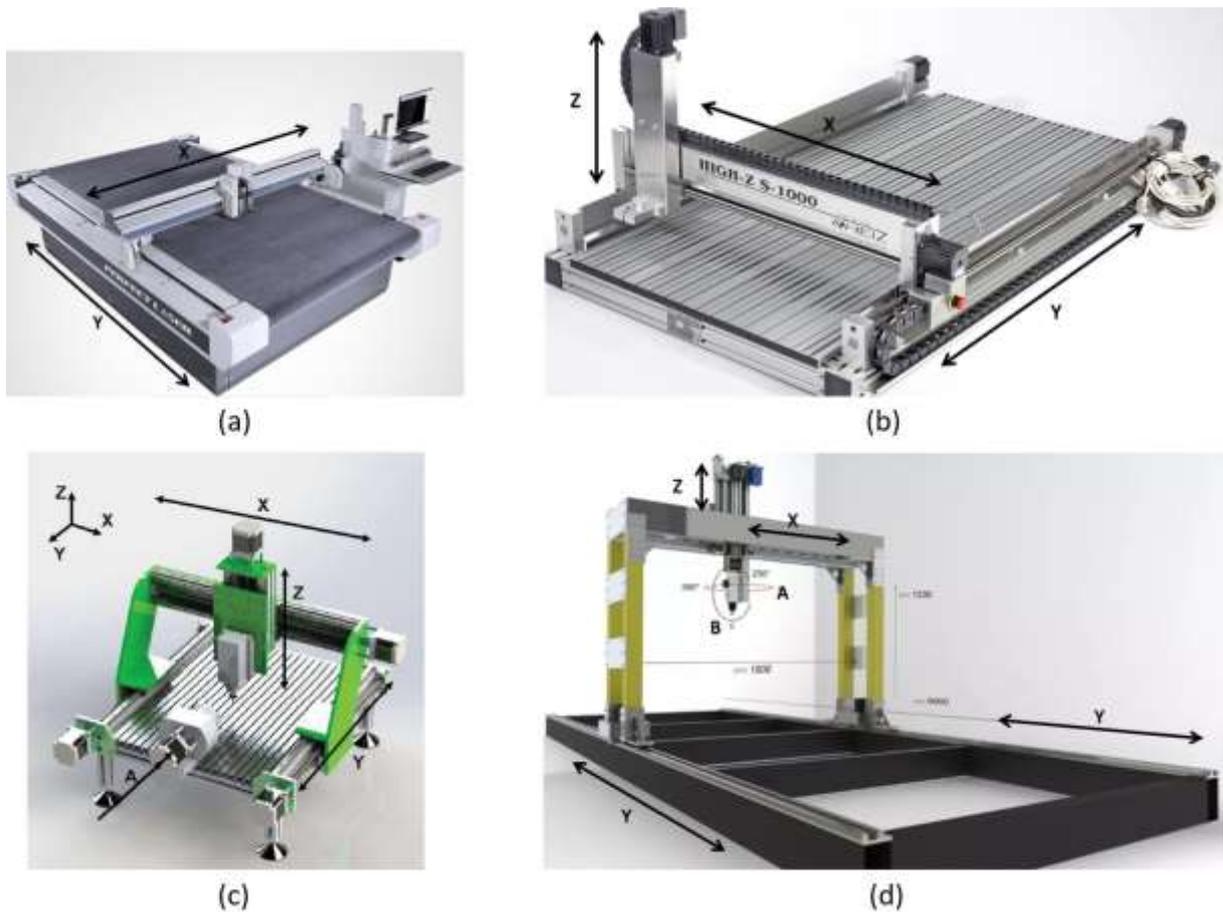
Fonte: Albert (2011).

O movimento dos eixos de uma *router* CNC é realizado através de um sistema de controle onde o operador da máquina pode visualizar em que posição a máquina se encontra, e se outros parâmetros, como o avanço e a velocidade, estão corretos. Esse equipamento é chamado de controlador CNC, que interpreta o código G e envia os sinais para os *drivers* (FIEBIG, 2018).

De acordo com Delgado e Eduardo (2018, p. 28), as *routers* podem possuir diferentes quantidades de eixos, como mostrado na Figura 2:

- Dois eixos: tem como direção de corte os eixos “X” e “Y” (Figura 2a);
- Três eixos: são as mais comuns, possuindo movimentos nos eixos “X”, “Y” e “Z” (Figura 2b);
- Quatro eixos: Possui o movimento nos três eixos, “X”, “Y” e “Z”, além de também possuir um quarto eixo (A) para rotacionar a peça (Figura 2c);
- Cinco eixos: Pode girar a ferramenta e/ou a peça em dois dos seus eixos de ação de corte (Figura 2d).

Figura 2 - (a) Router com 2 eixos (b) Router com 3 eixos (c) Router com 4 eixos (d) Router com 5 eixos.



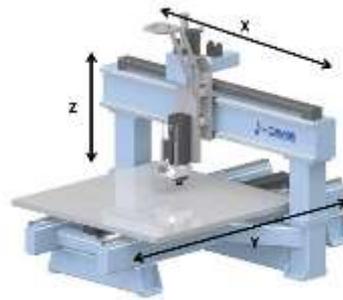
Fonte: A Autora (2019).

As *routers* podem ser classificadas de acordo com a sua estrutura, onde as mais comuns e mais utilizadas pela indústria atualmente são as de mesa móvel e as de pórtico móvel (ALBERT, 2011).

2.3.1 Router CNC de mesa móvel

Nesse tipo de configuração, o pórtico é fixo e a mesa é móvel, como mostrado na Figura 3, então de acordo com Coelho e Raszl (2005, p. 1) “tanto a peça de trabalho como a ferramenta se movimentam: a peça se desloca ao longo do eixo longitudinal e a ferramenta, ao longo dos eixos transversal e vertical.”

Figura 3 - Router CNC de mesa móvel.



Fonte: Adaptada do catálogo *Direct Industry* (2019).

A maior vantagem desse tipo de configuração é que a estrutura possui maior rigidez, mas possui várias desvantagens. Dentre elas estão as dimensões do equipamento, pois como a mesa é móvel, o equipamento deverá ter o dobro do tamanho, para que a ferramenta seja capaz de usinar em toda a superfície da mesa. Consequentemente, o equipamento terá o peso total maior, além de possuir uma menor capacidade de peso admissível sobre a mesa (CRISTOFOLINI, 2017).

2.3.2 Router CNC de pórtico móvel

Nesse tipo de configuração, mostrado na Figura 4, o pórtico é móvel, ou seja, a peça que será usinada fica fixa à mesa, enquanto a ferramenta de corte percorre o caminho de corte sobre a mesa de trabalho através do pórtico móvel.

De acordo com Coelho e Raszl (2005, p. 1) as *routers* de pórtico móvel “são mais adequadas para peças de grande porte e, como consequência, somente a ferramenta se move ao longo dos três eixos.” Portanto, esse tipo de *router* é mais utilizado em plantas industriais (DELGADO; EDUARDO, 2018), devido a possibilidade de obter uma maior área de trabalho, em comparação às que possuem a mesa móvel.

Figura 4 - Router CNC de pórtico móvel.



Fonte: Adaptada do catálogo *Direct Industry* (2019).

A maior diferença entre essa configuração e a de mesa móvel, é que para o mesmo tamanho da mesa, este *design* requer metade do espaço (Albert, 2011).

Além disso, de acordo com Cristofolini (2017), as outras vantagens desta configuração são:

- Capacidade de suportar peças mais pesadas sobre a mesa;
- Possui maior velocidade de deslocamento longitudinalmente;
- Capacidade de usinar peças maiores que a dimensão da mesa.

2.4 MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Na indústria, as máquinas de medição por coordenadas são utilizadas para fazer a verificação geométrica da produção, fornecendo representações de sistemas coordenados cartesianos, retilíneos e tridimensionais (HAMBURG-PIEKAR, 2006).

“A qualidade dos produtos tem que ser assegurada, o que só acontece quando os sistemas de medição confiáveis forem utilizados no controle da qualidade da produção”. (SILVA et al, 2014, p. 396). Por isso, as máquinas de medição por coordenadas são largamente utilizadas na metrologia industrial pelo fato de serem rápidas, exatas e possuírem um alto grau de confiabilidade (BARROS, 2012).

Outra vantagem da utilização da máquina de medição por coordenadas é que ela verifica não só as características dimensionais, como também as características geométricas (FANHA, 2011).

A principal função de um sistema de medição por coordenadas é medir a geometria real de uma peça, comparar com a geometria ideal (de projeto) dessa peça e avaliar o resultado, através do tamanho, forma, localização e orientação da peça.

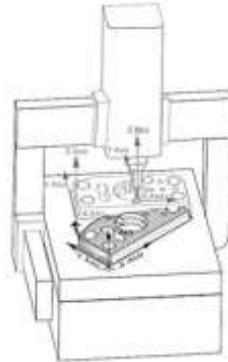
Através da máquina de medição por coordenadas, determinam-se algumas coordenadas de pontos sobre a peça a ser medida. Esses pontos são processados pelo computador associado a máquina e resultam nos parâmetros geométricos da peça.

2.4.1 Princípio de medição por coordenadas

Como mostrado na Figura 5, a base para a medição por coordenadas é o sistema cartesiano (x, y, z), onde esses três eixos permitem que as medições sejam feitas em três dimensões (FANHA, 2011). Assim, a posição de um certo ponto da superfície da peça é

definida em coordenadas cartesianas. Usando uma série de pontos, é possível construir detalhadamente os elementos geométricos.

Figura 5 - Máquina de Medição por Coordenadas.



Fonte: Hexagon (2019).

Segundo Hamburg-Piekar (2006, p. 7), “em MMC, a geometria de uma peça é obtida por apalpação de pontos discretos sobre a superfície. Cada ponto medido é expresso na forma de coordenadas medidas”.

Os pontos são medidos através dos sensores, ou apalpadores, que são dispositivos que geram os sinais da MMC. “O sistema reconhece a coleta de uma característica quando a ponta do apalpador toca uma peça fazendo com que a haste sofra um deslocamento ou deflexão.” (ALMEIDA, 2015). As MMC’s consistem fundamentalmente dos subsistemas detalhados na Figura 6.

Figura 6 - Máquina de Medição por Coordenadas e seus subsistemas.



Fonte: Hamburg-Piekar (2006).

2.5 FONTES DE ERRO NA MEDIÇÃO

Segundo Albertazzi (2008, p. 168), o processo de medição pode ser definido como o “Conjunto de fatores envolvidos em uma operação de medição. Abrange o meio de medição, o procedimento de medição, o agente que efetua a medição o método de medição e a clara definição do mensurando.”

Os erros sempre estão presentes em qualquer tipo de sistema, inclusive nos processos de medição. O erro de medição é a diferença entre o valor verdadeiro e o valor indicado no sistema de medição (FANHA, 2011).

As fontes de erro de medição podem ser classificadas em quatro grandes grupos: equipamento, que neste caso será a MMC, ambiente, peça e operador (ARENHART, 2007). No diagrama de Ishikawa mostrado na Figura 7, estão apresentadas as fontes de erros.

Figura 7 - Diagrama de Ishikawa das principais fontes de erros na medição por coordenadas.



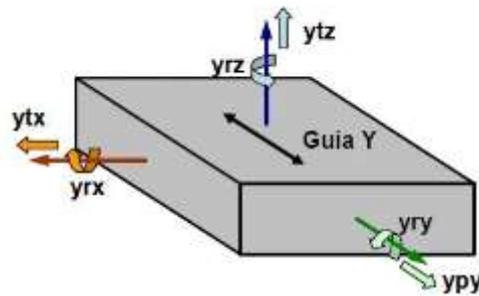
Fonte: Hamburg-Piekar (2006).

2.5.1 Máquina de Medição

Os erros geométricos apresentados pelas máquinas de medição, são consequências das imperfeições de fabricação ou de montagem dos componentes mecânicos, como as guias, mesas, escalas, mancais e rolamentos (BARROS, 2012).

O modelo mais utilizado para descrever os erros geométricos na máquina de medição é o de corpo rígido, mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Modelo de corpo rígido em relação ao eixo Y.



Fonte: Arenhart (2007).

Considerando o modelo de corpo rígido para uma guia apenas (eixo Y, como mostrado na Figura 8), “existem seis graus de liberdade (três de rotação e três de translação) que podem gerar erros de deslocamentos do sistema de apalpação em relação às escalas.” (ARENHART, 2007, p. 7).

2.5.2 Ambiente

As condições ambientais em que são efetuadas as medições podem afetar o resultado da medição. As fontes que possuem forte influência para o erro relacionado ao ambiente são a variação de temperatura, vibração e as partículas em suspensão.

As alterações de temperatura podem modificar o objeto da medição. Embora os laboratórios de medição possuam temperatura controlada, segundo Fanha (2011), tem-se ainda algumas fontes de erros térmicos, como:

- Ambiente (presença de lâmpadas, iluminação natural, outras máquinas);
- Pessoas (calor gerado pelas pessoas que trabalham na máquina);
- Memória Térmica (a peça medida ainda possui a temperatura do ambiente em que estavam);
- Calor gerado pela MMC (o uso da própria máquina gera calor).

Os erros provenientes de vibrações podem ser minimizados através do uso de amortecedores na mesa da máquina e do afastamento das máquinas de medição do ambiente de produção. Os erros resultantes das partículas em suspensão podem ser minimizados mantendo a pressão da sala de medição superior ao ambiente externo (ARENHART, 2007).

2.5.3 Peça

A peça a ser medida por si só não representa uma fonte de erro. As propriedades da peça como o acabamento superficial (pode ocorrer interpretações equivocadas dos resultados da medição), rigidez, dureza, coeficiente de dilatação térmica (a peça pode dilatar caso a temperatura varie de forma significativa no ambiente), módulo de elasticidade (pode ocorrer uma deformação elástica quando a peça for apalpada), peso (pode deformar a estrutura da MMC), efeitos de fixação (resulta em fixação inadequada) e desvios na forma da peça, podem representar uma fonte de erro (BARROS, 2012).

2.5.4 Operador e estratégia de medição

Segundo Arenhart (2007, p. 26), “os erros provenientes do uso de estratégias de medição deficientes são relacionados diretamente à qualidade e à quantidade dos pontos adquiridos na extração das características a serem avaliadas”. Portanto, dependendo da estratégia, a medição pode gerar um desvio de posicionamento.

As estratégias de medição são definidas pelo operador, então faz sentido afirmar que as habilidades do operador também possuem forte influência no processo de medição. Na Figura 9 estão mostrados alguns conhecimentos que o operador deve possuir, de forma com que ele possa minimizar os erros provenientes da estratégia de medição.

Figura 9 - Conhecimentos requeridos ao operador de MMC.



Fonte: Fanha (2011).

2.6 TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS

Nas operações de acabamento os cuidados são maiores, pois requerem maior precisão no tocante a dimensão e forma, e qualquer erro no processo pode inviabilizar o produto, fazendo com que todo o investimento feito anteriormente seja perdido (SOUSA, 2000).

As tolerâncias dimensionais não são suficientes e não garantem por si só o funcionamento adequado da peça (FERREIRA, 2013). Logo, é importante a existência das tolerâncias geométricas, pois elas definem os desvios geométricos permitidos numa peça sem que a sua funcionalidade e montabilidade sejam prejudicadas (FANHA, 2011).

Segundo a NBR 6409 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1997, p. 1), “As tolerâncias de forma e posição devem ser indicadas quando necessárias, ou seja, para assegurar requisitos funcionais, intercambiabilidade e processos de manufatura.”

Segundo a ISO 1101:2017, as tolerâncias geométricas são relacionadas quanto à forma, orientação, posição e batimento, ou seja, são as variações aceitáveis das formas e posições dos elementos da peça (ARAÚJO, 2019).

2.6.1 Tolerância Geométrica de Forma

Da mesma forma que não é possível obter uma peça real com as dimensões exatamente iguais às projetadas, também não é possível obter uma peça real com a forma rigorosamente igual à peça projetada. Para isso, existem as tolerâncias de forma, que são os desvios admissíveis que a peça pode apresentar em relação a forma geométrica de projeto de um elemento da peça, que podem ser de:

- Retilidade;
- Planicidade;
- Circularidade;
- Cilindricidade;
- Perfil de linha qualquer;
- Perfil superfície qualquer.

2.6.2 Tolerância Geométrica de Orientação

As tolerâncias de orientação estão relacionadas aos desvios admissíveis quanto a inclinação ideal de um elemento da peça, onde geralmente um elemento é escolhido como referência para a indicação dos outros elementos. As tolerâncias podem ser de:

- Paralelismo;
- Perpendicularidade;
- Inclinação.

2.6.3 Tolerância Geométrica de Posição

As tolerâncias de posição estão relacionadas aos desvios admissíveis quanto à localização ideal de um elemento da peça, que podem ser de:

- Concentricidade;
- Coaxialidade;
- Simetria.

2.6.4 Tolerância Geométrica de Batimento

As tolerâncias de batimento estão relacionadas aos desvios admissíveis quanto à oscilação de um elemento, quando o mesmo rotaciona em torno do próprio eixo. Quando isso ocorre, a peça pode sofrer deslocamentos em relação ao eixo. As tolerâncias podem ser dos tipos:

- Circular;
- Total.

2.7 FATORES DE INFLUÊNCIA NA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA DE PEÇAS

Segundo Dória (2005, p. 2), “durante a usinagem de uma determinada peça, ocorrerá sempre um desvio dimensional ou geométrico em relação às indicações nominais do desenho.”.

Para minimizar esses erros devem-se conhecer as necessidades do projeto quanto aos limites de tolerância especificados, ou seja, possuir um caráter preventivo quanto à fabricação dessas peças, minimizando ou até mesmo evitando a não conformidade.

Fatores internos e externos influenciam nos processos de fabricação (NETO, 2003). Eles podem ser relacionados a máquina ferramenta, programa CNC, peça, ferramenta de corte, ambiente e configuração da máquina. Na Figura 10 estão detalhados os fatores de produção envolvidos na usinagem que influenciam diretamente na conformidade geométrica das peças.

Figura 10 - Fatores que influenciam na conformidade geométrica da peça.



Fonte: Neto (2003).

2.8 ENSAIOS GEOMÉTRICOS

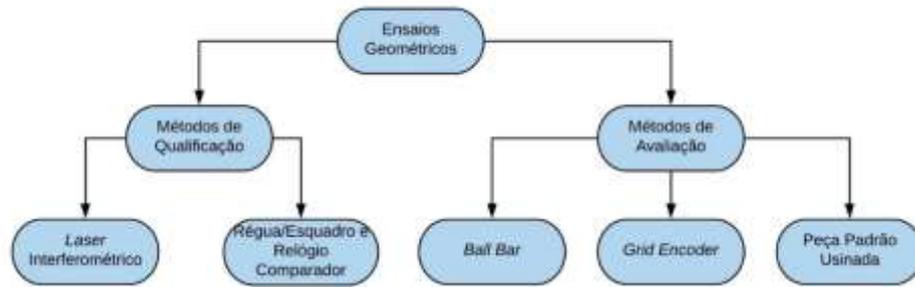
Os ensaios geométricos são de grande importância para a indústria, pois fornecem dados quantitativos e qualitativos acerca do comportamento geométrico da máquina ferramenta. Através dos dados obtidos no ensaio, é possível adotar medidas corretivas e preventivas sobre a máquina e/ou o processo, com o objetivo de reduzir os desvios geométricos e dimensionais nas peças usinadas (ARAÚJO, 2019).

O principal requisito de uma técnica de ensaio geométrico é a confiabilidade metrológica. Segundo Sousa (2000, p. 68), uma técnica de ensaio ideal deve possuir:

- Rapidez e praticidade operacional;
- Custo compatível com o benefício;
- O fornecimento de resultados úteis para os propósitos do ensaio.

Além dessas características descritas acima, Sousa (2000, p. 68) classifica os métodos atuais de ensaio geométrico em métodos de qualificação e métodos de avaliação. Na Figura 11 estão alguns exemplos de métodos de qualificação e de métodos de avaliação que são utilizados para a realização de ensaios geométricos nas máquinas ferramentas.

Figura 11 - Exemplos de ensaios geométricos.



Fonte: A Autora (2019).

Apesar de obter resultados bastante confiáveis e completos, os métodos de qualificação possuem difícil aplicação, exigindo pessoal altamente qualificado para o ensaio, e um elevado custo de equipamentos e tempo de ensaio (SOUSA, 2000).

Os métodos de avaliação apesar de envolverem um custo mais baixo para a realização do ensaio, serem mais rápidos e mais fáceis, apenas fornecem uma avaliação geral sobre o estado da máquina. São utilizados para uma avaliação de forma mais frequente e rápida da máquina (SOUSA, 2000).

2.8.1 *Laser Interferométrico*

A interferometria *laser*, como mostrado na Figura 12, é um método muito utilizado para obter grande exatidão na medição de distâncias (RENISHAW, 2019).

Figura 12 - *Laser* Interferométrico para verificação de posicionamento.

Fonte: Araújo (2019).

Segundo Sousa (2000, p. 69), “um interferômetro a *laser* é utilizado para determinar a trajetória de um refletor fixado na estrutura da máquina, em relação a um divisor de feixe óptico fixo.”.

Este sistema é o mais utilizado para ensaios geométricos de posicionamento e histerese nas máquinas ferramentas (SOUSA, 2000). As vantagens que podem ser destacadas deste método de ensaio são:

- Baixa incerteza de medição;
- Faixa de medição grandes;
- Oferece resultados adequados que servem para corrigir os erros no CNC da máquina ferramenta.

No entanto, é um método com um alto custo de equipamento, que demora muito tempo para ser realizado, mesmo com o pessoal capacitado.

2.8.2 Réguas/Esquadros e Relógio comparador

Esses métodos são os mais utilizados para ensaios geométricos de retilidade e perpendicularidade, mostrados na Figura 13. Eles fornecem resultados confiáveis, a operação é simples e relativamente rápida, além dos equipamentos serem de baixo custo (SOUSA, 2000).

Figura 13 – (a) Esquadro e (b) relógio comparador.



Fonte: A Autora (2019).

Durante o ensaio, os padrões são colocados na área de trabalho da máquina ferramenta e tocados por um relógio comparador enquanto a mesa móvel se desloca ao longo do eixo da máquina (ARAÚJO, 2019). A ponta de contato do relógio comparador sofrerá uma pressão que fará com que o ponteiro do mostrador rotacione. Essa reação traz duas consequências (INSTRUSUL, 2019):

- O ponteiro gira para o sentido horário: a diferença de medição é positiva, representando uma maior dimensão que a estabelecida na peça;
- O ponteiro gira para o sentido anti-horário: a diferença na medição é negativa, representando uma menor dimensão que a estabelecida na peça.

Uma das maiores limitações deste método é o fato de que os padrões devem ser proporcionais à área de trabalho, o que representa uma inviabilidade para máquinas ferramentas de grande porte (SOUSA, 2000).

2.8.3 *Ball Bar*

É um método de operação rápido e de fácil execução, ilustrado na Figura 14, servindo para ensaios de avaliação geral da máquina (SOUSA, 2000).

Figura 14 - Ensaio geométrico pelo método *ball bar*.



Fonte: Renishaw (2019).

Durante o ensaio, um transdutor de deslocamento mede as variações mínimas no raio enquanto a máquina segue uma trajetória circular programada ao redor da mesa (RANISHAW, 2019). Um *software* é utilizado para processar os desvios medidos, indicando quais são as fontes de erro presentes na máquina ensaiada (SOUSA, 2000).

2.8.4 *Grid Encoder*

Este método de ensaio mostrado na Figura 15, possui o sistema automatizado, que permite comparar visualmente a trajetória realizada com a que foi programada. Segundo Sousa (2000, p. 73), “uma placa fotossensível (*grid* bidimensional) mede a trajetória de um emissor de luz acoplado ao porta ferramenta da máquina.”

Figura 15 - Ensaio geométrico de trajetória com o *grid encoder*.



Fonte: Araújo (2019).

É um método bastante eficiente para avaliar o desempenho dinâmico da máquina ferramenta, além da preparação e execução do ensaio serem rápidos. No entanto, a avaliação é em uma região limitada, fazendo com que seja mais difícil ser utilizado em máquinas de maior porte (SOUSA, 2000).

2.8.5 Peças Padrão Usinadas

Esse tipo de ensaio utiliza as condições reais de trabalho da máquina, como os esforços de corte e influências térmicas. Neste método de ensaio, mede-se normalmente em uma máquina de medição por coordenadas peças padrão ou fabricadas em série, usinadas em condições de acabamento, como ilustrado na Figura 16, e a partir da medição dessas peças usinadas, observa-se os desvios nas peças relativas às dimensões projetadas, avaliando consequentemente a exatidão de trabalho da máquina ferramenta (SOUSA, 2000; ARAÚJO, 2019).

Figura 16 - Peça teste conforme NBR NM-ISO 10791-7: 1999.



Fonte: Araújo (2019).

Esse tipo de método possui baixo custo e é de rápida realização. Os resultados obtidos por este ensaio fornecem apenas uma avaliação geral do estado da máquina.

No entanto, através dele é difícil e/ou pouco confiável conseguir separar quais fontes de erro estão presentes na máquina. Por isso, os resultados possuem pouca utilidade para a correção dos erros no CNC (SOUSA, 2000), “porém servem como um indicador acerca da conformidade geométrica e dimensional da máquina.” (ARAÚJO, 2019, p. 30).

2.9 FATORES DE INFLUÊNCIA NOS DESVIOS GEOMÉTRICOS EM MÁQUINAS FERRAMENTA

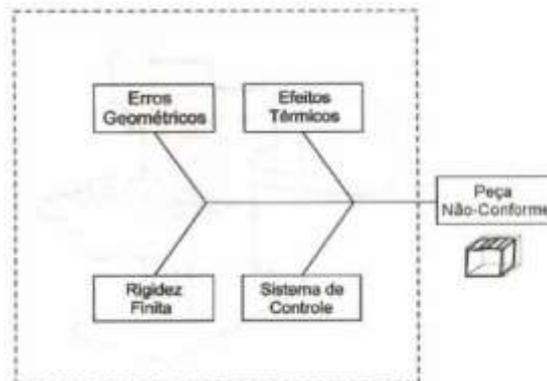
A máquina ferramenta contribui de forma significativa para a conformidade geométrica da peça. Alguns fatores como por exemplo, problema na fixação das peças, desgaste na ferramenta de corte (OLIVEIRA, 2009) podem alterar a exatidão de trabalho da máquina ferramenta, resultando em alterações nas dimensões e na geometria da peça, ou seja, peças fora das tolerâncias significam refugo e retrabalho (SOUSA; SCHNEIDER, 2000).

De acordo com SOUSA (2000, p.30):

A tendência de automação e integração de processos e o custo óbvio de verificar a exatidão das peças reforça a necessidade de agregar exatidão à peça no sistema de fabricação, em vez de somente verificá-la pós-processo. Embora esta verificação seja necessária para a garantia da qualidade no sistema de fabricação, a única forma de evitar não-conformidades nas peças é ter um processo capaz de atender os requisitos de exatidão das peças produzidas.

No entanto, na realidade existem alguns fatores, mostrados na Figura 17, que impedem que as máquinas ferramentas possam produzir peças iguais às planejadas.

Figura 17 - Fatores que influenciam os desvios geométricos em máquinas ferramenta.



Fonte: Sousa (2000).

2.9.1 Erros Geométricos da Máquina Ferramenta

Os erros geométricos estão presentes em todas as máquinas ferramenta, e eles são consequências de imperfeições mecânicas nas estruturas das máquinas ferramenta e de desalinhamentos dos componentes, ocasionando erros de forma e posição (LEITE et al., 2011).

2.9.2 Efeitos Térmicos na Máquina Ferramenta

Os efeitos térmicos que influenciam a conformidade da peça são aqueles provenientes de fontes externas ou internas que acabam provocando deformações térmicas nas estruturas das máquinas, além da própria peça e dos sistemas de medição e controle da máquina (ÁLVARES, 1990), que acabam afetando o comportamento geométrico da máquina ferramenta.

De acordo com Sousa (2000, p. 31), “Estima-se que 40% dos erros de uma máquina ferramenta se devam a efeitos térmicos.” Segundo Sousa (2013), as fontes que mais influenciam na deformação da máquina são:

- Atrito nos mancais e guias;
- A ação de corte no processo de usinagem e o cavaco que fica depositado na área de trabalho;
- Aquecimento durante a usinagem, entre a ferramenta de corte e a peça;
- Aquecimento do fluido de corte durante a usinagem;
- Aquecimento durante a transmissão dos motores elétricos;
- Atrito nos acionamentos e caixas de engrenagens;
- Aquecimento do sistema hidráulico da máquina.

As fontes internas de calor influenciam mais do que as fontes externas de calor, mas ambas influenciam diretamente no comportamento geométrico da máquina ferramenta. Por exemplo, a variação da temperatura no ambiente de trabalho ocorre mais lentamente quando comparado a variação da própria máquina ferramenta quando acionada (SOUSA, 2000).

Na Figura 18 são mostrados os exemplos de fontes de calor, tanto interna quanto externa, a qual estão sendo termicamente induzidas em uma fresadora e quais são os tipos de deformações que resultam na exposição dessas fontes.

Figura 18 - Exemplos de deformações termicamente induzidas em uma fresadora.



Fonte: Sousa (2013).

Por conta dessa grande influência que as fontes de calor exercem sobre a conformidade geométrica da máquina ferramenta, a NBR NM-ISO 230-1 descreve em quais as condições de temperatura de certos componentes antes do ensaio, de forma que possa verificar a exatidão da máquina em condições mais próximas que as condições normais de aquecimento e lubrificação.

Segundo a NBR NM-ISO 230-1 (1999, p. 9):

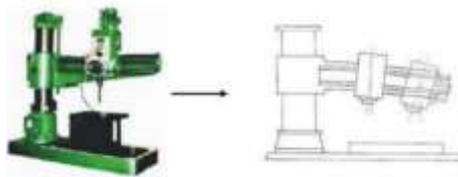
É necessário considerar-se o quanto a máquina altera-se dimensionalmente durante um ciclo normal de trabalho, comparando-se as condições na temperatura ambiente e na temperatura de trabalho. A sequência de preaquecimento e temperatura na qual a máquina deve ser ensaiada será objeto de concordância entre o fabricante e o usuário.

2.9.3 Rigidez Finita da Máquina Ferramenta

Para Sousa (2000), as deformações elásticas provenientes dos esforços mecânicos que ocorrem durante a usinagem, ou pelo peso da peça ou da máquina ferramenta, resultam na modificação da posição correta entre a peça e a ferramenta.

Em máquinas ferramenta de grande porte ou em máquinas com configuração desfavorável e baixa rigidez, como mostrado na Figura 19, o peso dos próprios componentes influencia no comportamento geométrico da máquina ferramenta.

Figura 19 - Rigidez prejudicada pela configuração desfavorável da máquina.



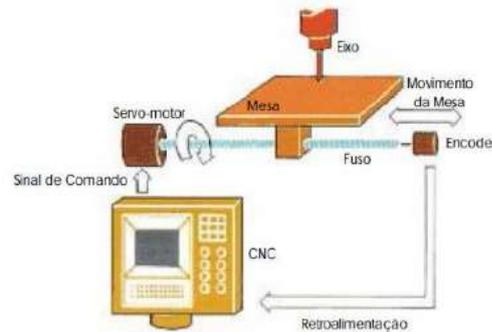
Fonte: Sato (2014).

2.9.4 Sistema de Controle da Máquina Ferramenta

O sistema de controle CNC de uma máquina ferramenta contribui significativamente no comportamento geométrico dela. O tempo que o sistema de controle CNC leva para processar as informações do CNC possui grande influência sobre o comportamento geométrico da máquina ferramenta, pois ele pode representar uma limitação na velocidade de avanço, atuando diretamente na movimentação dos eixos de uma máquina.

Na Figura 20 está mostrado o sistema de controle em malha fechada de uma máquina ferramenta acionada por CNC.

Figura 20 - Sistema de controle em malha fechada de uma máquina ferramenta acionada por CNC.



Fonte: Sato (2014).

De acordo com Sousa (2000, p. 38):

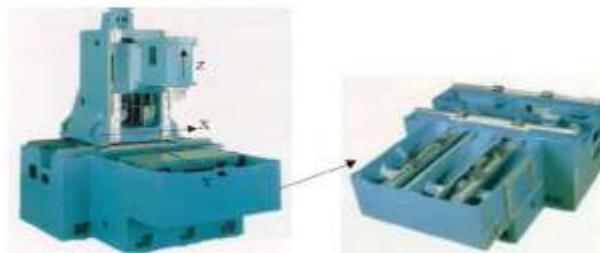
Um outro problema para o CNC nas trajetórias curvas é que quase sempre há a inversão de movimento de pelo menos algum dos eixos envolvidos, e esta inversão requer que os servomotores respondam de maneira uniforme e estável aos sinais vindos do CNC, sob pena de que algum atraso ou instabilidade provoque alterações geométricas na peça. Nesta mudança de direção, deficiências mecânicas da máquina também contribuem significativamente para erros na peça.

2.9.5 Erros em função da montagem da máquina ferramenta e dos componentes

Alguns erros geométricos podem ser resultados da montagem dos componentes da máquina ferramenta e a limitação de fabricação. Quanto mais uma máquina for utilizada, conseqüentemente mais desgaste ela terá, de forma que ao longo do tempo ocorram alterações estruturais, modificando o comportamento geométrico da máquina ferramenta (SATO, 2014).

A Figura 21 mostra um centro de usinagem de 3 eixos, onde estão as guias e os fusos de acionamento dos eixos da máquina.

Figura 21 - Centro de Usinagem vertical com 3 eixos.



Fonte: Sato (2014).

Os desvios que podem ocorrer, de acordo com SOUSA (2000, p. 41) são:

Erros de fabricação das guias provocam desvios de retitude e inclinações (tombamento, rolamento e guinamento), e erros de fabricação no fuso provocam erros de posicionamento linear em máquinas que utilizam *encoders* rotativos como sistema de medição de deslocamento. Os erros de montagem provocam desalinhamentos e folgas entre componentes da máquina levando aos erros de perpendicularidade entre eixos. As folgas existentes nos elementos de acionamentos causam histerese e má repetitividade no posicionamento dos eixos.

2.10 TESTE DE HIPÓTESES E COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

Segundo Voitto (2019, p. 1):

O teste de hipótese é uma ferramenta estatística baseada na utilização de uma amostra aleatória extraída de uma população de interesse, com o objetivo de testar uma afirmação sobre um parâmetro ou característica desta população. Não se trata de uma simples comparação matemática entre dois ou mais valores, mas da necessidade de compreender se o valor obtido a partir de uma determinada amostra representa uma simples variação amostral da situação atual ou não.

Sendo assim, o teste de hipóteses é um procedimento padrão que tem como finalidade testar uma afirmação sobre uma propriedade da população. Caso, sob uma certa hipótese, a probabilidade de ocorrer um determinado acontecimento for muito pequeno, conclui-se que a hipótese não deve ser verdadeira (ABREU, 2007).

No teste de hipótese bilateral ou bicaudal, a hipótese nula (H_0) engloba o valor do parâmetro que se assume verdadeiro. Essa afirmação deve ser escrita em forma de igualdade ($H_0: \mu = \mu_0$). A hipótese alternativa (H_1) é a afirmação que indica que o parâmetro possui o valor diferente do que é indicado na hipótese nula ($H_1: \mu \neq \mu_0$) (ABREU, 2007).

O erro do tipo I ocorre quando H_0 é rejeitado, sendo ele verdadeiro. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é simbolizada pelo α , definido como o nível de significância do teste. O erro do tipo II ocorre quando H_0 é aceito, sendo ele falso. A probabilidade de cometer um erro do tipo II é simbolizada pelo β , definido como o poder ou potência do teste.

O valor da estatística t para média (tem distribuição t de *Student*, com $n - 1$ graus de liberdade), com o valor do desvio padrão populacional (σ) desconhecido e o tamanho da amostra é pequeno ($n < 30$), é calculado através da equação 1. É usado para tomar a decisão sobre aceitar ou rejeitar a hipótese nula (ABREU, 2007).

$$t = \frac{\bar{x} - \mu}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (1)$$

A região de rejeição ou crítica, é determinada através dos pontos críticos, que no teste bilateral são os pontos $-t_{\alpha/2}$ e $t_{\alpha/2}$, a partir da distribuição t de *Student* com $n - 1$ graus de liberdade. Caso o valor estatístico t calculado seja maior que $t_{\alpha/2}$ e menor que $-t_{\alpha/2}$, ele estará na região de rejeição, logo a hipótese nula deverá ser rejeitada.

O coeficiente de variação é utilizado para comparar a variabilidade dos conjuntos de dados, pois o desvio padrão é afetado pela magnitude dos dados, ou seja, ele não é uma medida resistente (PORTAL ACTION, 2019). Ele pode ser calculado através da equação 2 mostrada abaixo:

$$CV (\%) = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (2)$$

3 METODOLOGIA

Nesta seção é apresentada a metodologia dessa pesquisa.

3.1 ROUTER CNC AVALIADA

A *router* CNC avaliada neste trabalho, que é do tipo pórtico móvel, está representada na Figura 22. Ela possui um volume de trabalho de 550 mm x 550 mm x 100 mm (X, Y e Z). A máquina foi projetada para ter quatro eixos, sendo três com movimentos lineares (X, Y e Z) e um com movimento de rotação (eixo A). No entanto, neste trabalho só serão avaliados os três eixos com movimentos lineares.

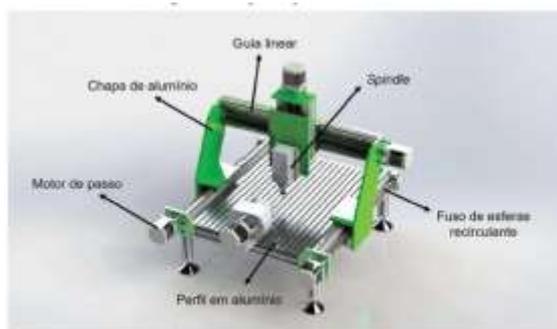
Figura 22 - Router CNC avaliada.



Fonte: Silva (2018).

Na Figura 23 podem ser identificados os seguintes componentes: estrutura metálica de alumínio com perfis e chapas, mecanismos de transmissão de movimentos (lineares e de rotação), motores de passo e *spindle*.

Figura 23 - Principais componentes da *router* CNC.



Fonte: Silva (2018).

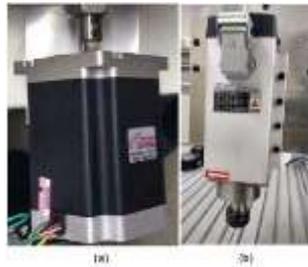
3.1.1 Estrutura da máquina

A estrutura de uma máquina ferramenta consiste no uso de perfis extrudados e chapas em liga de alumínio devido à boa usinabilidade desse material e a razão massa-resistência elevada (o que deixa a máquina leve).

3.1.2 Acionamento

Os motores de passo e o *spindle*, ilustrado na Figura 24a, são responsáveis pelo sistema de acionamento da *router* CNC. Para acionar os eixos, são utilizados motores de passo que são muito usados em sistemas que necessitam de um controle preciso do eixo do motor. A *router* possui 4 motores de passo, sendo um para o eixo X, dois para o eixo Y, e um para o eixo Z.

Figura 24 – (a) Motor de passo (b) *spindle*.



Fonte: Adaptado de Silva (2018).

Para o acionamento da ferramenta de corte é utilizado um *spindle*, ilustrado na Figura 24b, que é um motor muito utilizado para usinagem de materiais como plástico, madeira, alumínio e ligas leves de aço (FIEBIG, 2018).

3.1.3 Transmissão de Movimento

Para a transmissão dos movimentos da *router* CNC, foi escolhida a combinação da utilização de fusos de esferas recirculantes com guias lineares.

Para conversão do movimento circular do motor em movimento linear, foram escolhidos os fusos de esferas recirculantes com castanha dupla, ilustrada na Figura 25a. Para guiar os eixos X, Y e Z da máquina foram escolhidas as guias lineares, mostrada na figura 25b.

Figura 25 - (a) Fusos de esferas recirculantes (b) guias lineares



Fonte: Adaptado de Silva (2018).

3.2 MATERIAL ESCOLHIDO E PREPARAÇÃO DAS FACES AVALIADAS DA PEÇA.

O material escolhido para a usinagem das peças utilizado na realização do ensaio geométrico foi o poliacetal com dimensões de 144 mm x 144 mm x 32 mm. A escolha do material foi realizada pela disponibilidade dele.

Para a preparação das faces avaliadas da peça, ilustrada na Figura 26, foi feita uma usinagem convencional em uma fresadora vertical, com um cabeçote fresador com 3 pastilhas de 50 mm de diâmetro, mostrada na Figura 27.

Figura 26 - Peça fixada para o fresamento.



Fonte: A Autora (2019).

Figura 27 - Fresadora vertical utilizada para preparar as faces avaliadas.



Fonte: A Autora (2019).

Para fazer a fixação da peça na mesa da *router* CNC, foi feito um rasgo no meio da peça de 10 mm de profundidade, utilizando uma fresa de topo em metal duro de 14 mm de diâmetro, ilustrada na Figura 28.

Figura 28 - Peça usinada para ser fixada na mesa da *router* CNC.

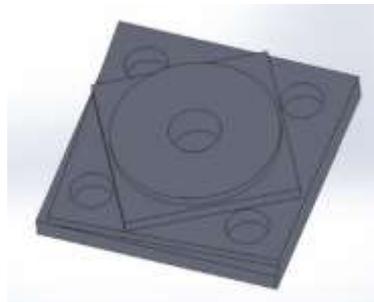


Fonte: A Autora (2019).

3.3 MÉTODO DE ENSAIO ESCOLHIDO E GEOMETRIA DA PEÇA ENSAIADA

O método escolhido para o ensaio geométrico foi uma adaptação ao método da peça padrão usinada. A geometria da peça teve que ser adaptada ao que a NBR NM ISO 10791-7 (1999) recomenda, como está mostrada no apêndice A, por conta da disponibilidade do material. As peças tiveram as dimensões reduzidas em 10%, com exceção do furo central, como mostrada na Figura 29, além dos furos laterais não serem escalonados conforme o modelo de peça padrão indicado na norma para avaliação da máquina.

Figura 29 - Modelo CAD da peça.



Fonte: A Autora (2019).

Foi utilizado o *software Solidworks* para realizar o modelamento e o desenho técnico da peça, e o programa do fresamento CNC (Apêndice B). Para a execução da usinagem, foi

elaborado em estudo preliminar através da simulação no *software* CAM do *Solidworks*, a fim de simular as estratégias de usinagem e detectar algum problema na execução definitiva.

Durante a simulação do caminho da ferramenta no CAM, foi detectado um problema que fez com que os lados que possuem 3° de inclinação não fossem devidamente usinados, diferindo do que foi projetado. Por isso, o código G gerado teve de ser dividido em 3 códigos G diferentes, um para cada etapa da usinagem.

O primeiro código G foi gerado para a usinagem do cilindro e do quadrado inclinado 15° em relação a linha de centro. O segundo código G foi gerado para a usinagem de duas faces com 3° de inclinação. O terceiro código G foi gerado para a usinagem dos furos laterais e do furo central.

Para os testes, foram utilizadas duas peças cujas dimensões já foram citadas. A ferramenta utilizada em todas as operações será uma fresa de topo em metal duro de 6 mm de diâmetro, conforme mostrada na Figura 30.

Figura 30 - Ferramenta utilizada para o fresamento CNC.



Fonte: A Autora (2019).

Os parâmetros de corte que foram utilizadas para a usinagem das peças na *router* CNC estão mostradas no Quadro 1.

Quadro 1 - Parâmetros de corte para a usinagem das peças na *router* CNC.

Parâmetros de corte	
Velocidade de avanço	900 mm/min
Rotação	8000 rpm
Profundidade de corte	3 mm
Velocidade de corte	150,79 m/min

Fonte: A Autora (2019).

3.4 MÉTODO DE INSPEÇÃO

A medição dos parâmetros das peças usinadas foi realizada no Laboratório de Medição por Coordenadas (LAMECO), do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE. Para tanto,

foi utilizada a máquina de medir por coordenadas da marca *Mitutoyo*, Modelo *Beyond Crysta574*, com CNC, com faixa nominal de 500 mm x 700 mm x 400 mm, resolução de 0,0005 mm e certificado de calibração número 03206/13 (RBC), ilustrada na Figura 31.

Figura 31 - MMC *Mitutoyo Beyond Crysta574*, localizada no LAMECO.



Fonte: A Autora (2019).

As regiões medidas foram definidas diante da adaptação do modelo de peça (Anexo A) da norma ISO 10791-7 (1999), dos objetivos propostos e dos recursos disponíveis e estão relacionadas a seguir.

3.4.1 Furo Central

Foram feitas quatro medições do diâmetro do furo central C da peça 1 e quatro medições do diâmetro do furo central C da peça 2, como mostrada na Figura 32.

Figura 32 - Furo central nas peças teste 1 e 2.

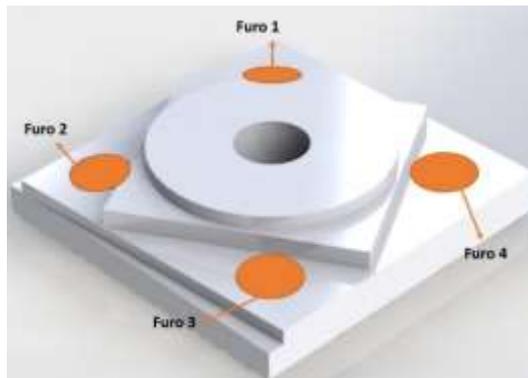


Fonte: A Autora (2019).

3.4.2 Furos Laterais

Foram feitas quatro medições dos diâmetros dos furos 1, 2, 3 e 4, como mostrado na Figura 33, da peça 1 e quatro medições dos diâmetros dos furos 1, 2, 3 e 4 da peça 2.

Figura 33 - Furos laterais nas peças teste 1 e 2.

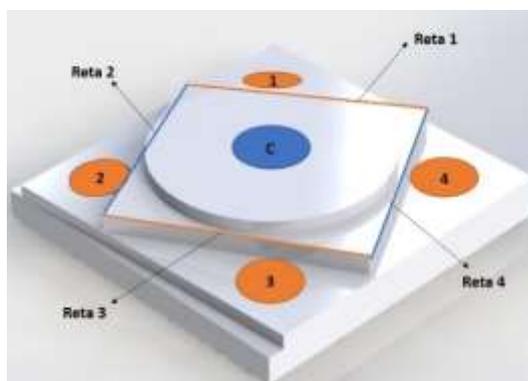


Fonte: A Autora (2019).

3.4.3 Quadrado Inclinado

Para a verificação da perpendicularidade e paralelismo entre as arestas do quadrado inclinado, foram projetadas as retas 1, 2, 3 e 4, ilustradas na Figura 34, e foi medido através da MMC qual o ângulo entre elas. Não foi possível fazer essa medição na peça 2 por conta de alguns problemas que ocorreram durante a usinagem e fizeram com que a perpendicularidade e o paralelismo do quadrado inclinado não pudessem ser avaliados.

Figura 34 - Retas 1, 2, 3 e 4 projetadas nas arestas do quadrado inclinado.

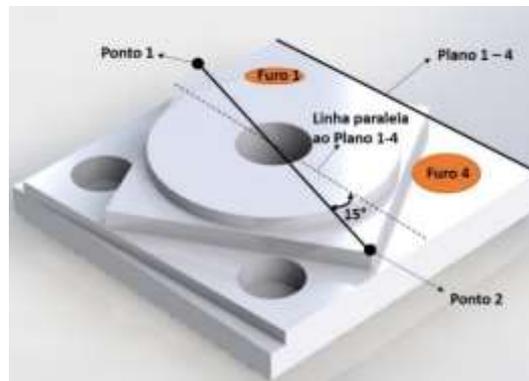


Fonte: A Autora (2019).

Para a verificação da perpendicularidade, foram verificados os ângulos entre as retas 1 e 2, retas 2 e 3 e as retas 3 e 4. Já para a verificação de paralelismo, foram verificados os ângulos entre as retas 1 e 3 e as retas 2 e 4.

Para verificar a inclinação dos 15° do quadrado que as peças da norma possuem, foi criado um plano na face da peça 1, entre os furos 1 e 4, nomeado de plano 1-4, paralelo a uma linha imaginária que passa pelo centro da peça. Foi criada uma reta através da ligação entre os pontos 1 e 2, encontrados no vértice do quadrado inclinado, onde o ângulo entre esta reta e a linha paralela ao plano 1-4 deveria ser igual a 15° , como mostrado na Figura 35.

Figura 35 - Inclinação do quadrado.



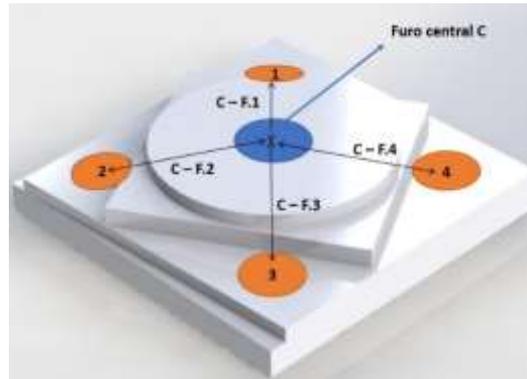
Fonte: A Autora (2019).

Como foi citado anteriormente, por conta de alguns problemas que ocorreram na máquina durante a usinagem da peça 2, tornou-se inviável a verificação do ângulo de inclinação do quadrado.

3.4.4 Distância entre os centros dos furos

Foram feitas medições das distâncias entre os centros de cada furo ao furo central das duas peças usinadas, ou seja, distância do centro do furo C ao furo 1 (C-F.1), distância do centro do furo C ao furo 2 (C-F.2), distância do centro do furo C ao furo 3 (C-F.3) e distância do centro do furo C ao furo 4 (C-F.4), como mostrada na Figura 36.

Figura 36 - Representação das distâncias entre os centros de cada furo ao furo central.

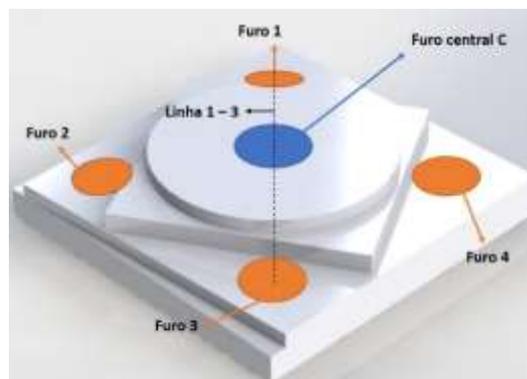


Fonte: A Autora (2019).

3.4.5 Análise de perpendicularidade das peças 1 e 2

Para a verificação da perpendicularidade das duas peças, foram construídas duas retas, uma que se inicia no centro do furo 1 ao centro do furo 3, ilustrada na Figura 37, passando pelo centro do furo C. Da mesma forma, foi criada uma reta que se inicia no centro do furo 2 até o centro do furo 4, passando pelo centro do furo C.

Figura 37 - Representação da reta 1 – 3 na peça teste.



Fonte: A Autora (2019).

3.4.6 Avaliação através do teste de hipóteses e do coeficiente de variação

Foi utilizado um nível de confiança de 95%, e como consequência, o nível de significância (α) de 5%.

Para avaliar a exatidão da *router* CNC, foram calculados a estatística T e o P-valor, com o auxílio do *software Action Stat* e do Excel, onde o P-valor consiste na probabilidade de errar ao rejeitar H_0 , quando ela é verdadeira, fazendo com que seja cometido um erro do tipo I.

Para avaliar a repetitividade da *router* CNC, foi utilizada a condição de que se o coeficiente de variação for menor que 10% da variação do processo, ela é aceitável.

Com o auxílio do *software Action Stat*, foi calculado o coeficiente de variação para assim avaliar a repetitividade entre as medições.

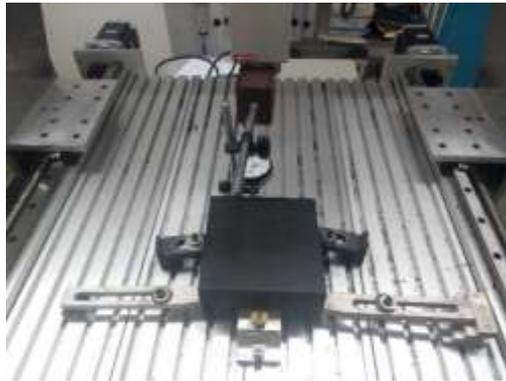
4 RESULTADOS

Nesta seção estão apresentados os resultados dessa pesquisa.

4.1 PEÇAS USINADAS

Utilizando um relógio comparador, as peças foram alinhadas na mesa da *router* CNC para serem usinadas. As peças foram fixadas em posições diferentes da mesa, para verificar a repetitividade da *router* CNC em diferentes posições da mesa. Na Figura 38 mostra em qual posição da mesa a peça 1 foi usinada.

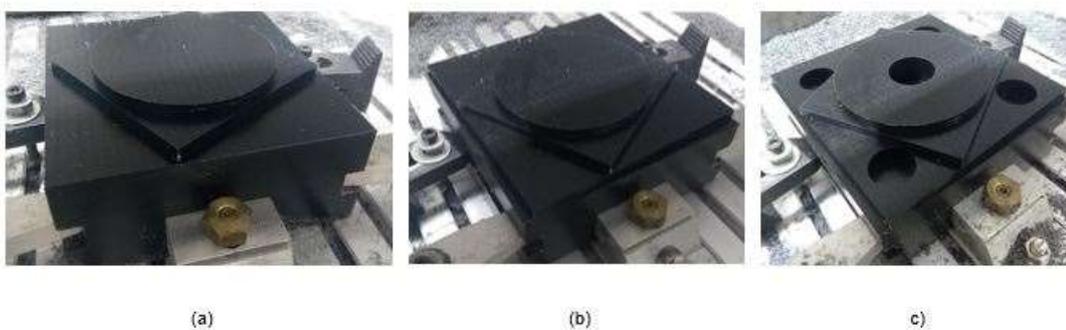
Figura 38 - Peça fixa e alinhada na mesa da *router* CNC.



Fonte: A Autora (2019).

A peça 1 usinada para o ensaio geométrico está ilustrada na Figura 39.

Figura 39 - (a) Peça 1 usinada resultante do 1º código (b) Peça 1 usinada resultante do 2º código c) Peça 1 usinada resultante do 3º código.



Fonte: A Autora (2019).

A peça 2 usinada para o ensaio geométrico está ilustrada na Figura 40.

Figura 40 - Peça 2 usinada para o ensaio geométrico.



Fonte: A Autora (2019).

Após a usinagem das peças, elas foram submetidas as medições na MMC para a obtenção dos resultados das medições.

4.1.1 Medições do diâmetro do furo central C das peças 1 e 2

Na Tabela 1 encontram-se os resultados das medições do diâmetro do furo central C da peça 1.

Tabela 1 - Resultado das medições do diâmetro do furo central C da peça usinada 1.

	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Medição 4 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Furo C	29,9598	29,9504	29,9517	29,9469	29,9522	0,005457105

Fonte: A Autora (2019).

Na Tabela 2 encontram-se os resultados das medições do diâmetro do furo central C da peça 2.

Tabela 2 - Resultado das medições do diâmetro do furo central C da peça usinada 2.

	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Medição 4 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Furo C	30,0261	29,9617	30,0364	30,0003	30,0061	0,033282065

Fonte: A Autora (2019).

Fazendo um teste de hipóteses através do Excel, com os valores médios das medições do diâmetro do furo central C das peças 1 e 2, sendo o valor nominal da peça padrão igual a 30 mm, foram calculados os dados estatísticos mostrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Dados estatísticos para avaliar a exatidão das medições do diâmetro do furo C das peças 1 e 2.

Dados estatísticos para avaliação da exatidão – furo C das peças 1 e 2		
Informações	Furo C (1)	Furo C (2)
Média (mm)	29,9522	30,0061
Estatística t calculada	-17,51844466	0,368066107
P-valor bilateral	0,000405427	0,737260725
t crítico bilateral	3,182446305	3,182446305

Fonte: A Autora (2019).

Comparando o valor da estatística t (em módulo) com o valor do t crítico da distribuição bicaudal, que varia com o valor do grau de liberdade, tem-se que para o furo C da peça 1, a estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H₀ seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I ao rejeitar a H₀ neste caso, é dada pelo valor de P, que foi igual a 0,0405%.

Para o furo C da peça 2, a estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H₀ seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H₀ fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 73,72%.

No Quadro 3 encontram-se os dados necessários para avaliar se ela possuiu uma boa repetitividade na usinagem dos furos C das duas peças.

Quadro 3 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade do furo C das peças 1 e 2.

Repetitividade - Furo central C das peças 1 e 2			
	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
Furo C - peça 1	29,9587	0,015283488	0,05101519
Furo C - peça 2	30,0061	0,033282065	0,11091757

Fonte: A Autora (2019).

Através dos coeficientes de variação calculados, através do *software Action Stat*, e tendo como condição possuir uma boa repetitividade caso ele seja menor que 10%, é possível avaliar que a *router* apresentou uma boa repetitividade quanto a usinagem dos furos C das peças 1 e 2.

4.1.2 Medições dos diâmetros dos furos laterais das peças 1 e 2

Na Tabela 3 encontram-se os resultados das medições dos diâmetros dos furos laterais da peça 1.

Tabela 3 - Resultado das medições dos diâmetros dos furos laterais da peça usinada 1.

	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Medição 4 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Furo 1	24,9972	24,9868	24,9747	24,9846	24,9858	0,00923052
Furo 2	24,8851	24,9918	24,9931	24,9862	24,9641	0,052718403
Furo 3	24,9941	24,9911	24,9961	24,9700	24,9878	0,012059678
Furo 4	24,9919	25,0059	24,9810	24,9688	24,9869	0,015794725

Fonte: A Autora (2019).

Sabendo que o valor nominal do diâmetro do furo é de 25 mm, foi feito um teste de hipóteses, através do Excel, para saber, através das medições feitas, se os desvios nos valores dos diâmetros eram aceitáveis, mostrados no Quadro 4.

Quadro 4 - Dados estatísticos para avaliar a exatidão das medições do diâmetro dos furos laterais da peça 1.

Dados estatísticos para avaliação da exatidão – furos laterais da peça 1				
Informações	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4
Média (mm)	24,9846	24,9695	24,9869	24,9862
Estatística t calculada	-3,071332916	-1,363850119	-2,019125221	-1,658781665
P-valor bilateral	0,054505282	0,265929613	0,136771698	0,195741163
t crítico bilateral	3,182446305	3,182446305	3,182446305	3,182446305

Fonte: A Autora (2019).

Comparando o valor da estatística t (em módulo) com o valor do t crítico da distribuição bilateral, tem-se que:

- **Diâmetro do furo 1:** A estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 5,45%.
- **Diâmetro furo 2:** A estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 26,59%.
- **Diâmetro furo 3:** A estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 13,68%.

- **Diâmetro furo 4:** A estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 19,57%.

Quanto à repetitividade com relação à medição dos diâmetros dos furos laterais, foram calculados os coeficientes de variação, através do *Action Stat*, entre as medições do diâmetro de cada furo da peça 1 e o coeficiente de variação entre as medições da média de cada furo. Os dados estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade dos furos laterais da peça 1.

Dados estatísticos para avaliação da repetitividade – furos laterais da peça 1			
	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
Furo 1	24,9846	0,006445412	0,025800189
Furo 2	24,9695	0,003666515	0,014671714
Furo 3	24,9869	0,013852918	0,055443311
Furo 4	24,9862	0,018908816	0,075679967

Fonte: A Autora (2019).

Através dos coeficientes de variação calculados, é possível avaliar que a *router* apresentou uma boa repetitividade quanto a usinagem dos furos laterais da peça 1.

Na Tabela 4 encontram-se os resultados das medições dos diâmetros dos furos laterais da peça 2.

Tabela 4 - Resultado das medições dos diâmetros dos furos laterais da peça usinada 2.

	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Medição 4 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Furo 1	25,1148	25,1018	25,0901	25,0740	25,0952	0,017350961
Furo 2	25,0091	25,0514	24,9838	25,0546	25,0247	0,034268876
Furo 3	25,0633	25,0227	25,0680	25,0584	25,0531	0,02064219
Furo 4	25,1313	25,1151	25,1279	25,1425	25,1292	0,011281253

Fonte: A Autora (2019).

Foi feito também um teste de hipóteses, através do Excel, para as medições dos diâmetros dos furos laterais da peça 2. Os dados calculados estão mostrados no Quadro 6.

Quadro 6 - Dados estatísticos para avaliar a exatidão das medições do diâmetro dos furos laterais da peça 2.

Dados estatísticos para avaliação da exatidão – furos laterais da peça 2				
Informações	Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4
Média (mm)	25,0952	25,0247	25,0531	25,1292
Estatística t calculada	10,97057417	1,443000366	5,144802998	22,9052573
P-valor bilateral	0,001621595	0,244720297	0,014231118	0,000182261
t crítico bilateral	3,182446305	3,182446305	3,182446305	3,182446305

Fonte: A Autora (2019).

Comparando o valor da estatística t (em módulo) com o valor do t crítico da distribuição bilateral, tem-se que:

- **Diâmetro furo 1:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é dada pelo valor de P, igual a 0,16%.
- **Diâmetro furo 2:** A estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, é dada pelo valor de P, igual a 24,47%.
- **Diâmetro furo 3:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é dada pelo valor de P, igual a 1,42%.
- **Diâmetro furo 4:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é dada pelo valor de P, igual a 0,018%.

Quanto à repetitividade das medições dos diâmetros dos furos laterais, foram calculados os coeficientes de variação, através do *ActionStat*, entre as medições do diâmetro de cada furo. Os dados estão apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade dos furos laterais da peça 2.

Dados estatísticos para avaliação da repetitividade – furos laterais da peça 2			
	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
Furo 1	25,0952	0,017350961	0,069140624
Furo 2	25,0247	0,034268876	0,136940069
Furo 3	25,0531	0,02064219	0,082393755
Furo 4	25,1292	0,011281253	0,044893004

Fonte: A Autora (2019).

Através dos coeficientes de variação calculados, avalia-se que a *router* apresentou uma boa repetitividade, já que os coeficientes foram menores que 10%.

4.1.3 Medição no quadrado inclinado

Na Tabela 5 encontram-se os resultados das medições dos ângulos entre as retas perpendiculares do quadrado inclinado da peça 1.

Tabela 5 - Resultado das medições dos ângulos entre as retas perpendiculares do quadrado inclinado da peça usinada 1.

	Medição (°)
Reta 1 - Reta 2	90,1236
Reta 2 - Reta 3	89,8992
Reta 3 - Reta 4	90,1036
Média (°)	90,0421
Desvio Padrão (°)	0,124187

Fonte: A Autora (2019).

Sabendo que o valor nominal do ângulo entre retas perpendiculares é de 90°, foi feito um teste de hipóteses, através do Excel, para saber se os desvios nos valores dos ângulos eram aceitáveis, mostrados no Quadro 8.

Quadro 8 - Dados estatísticos das medições dos ângulos entre as retas perpendiculares do quadrado inclinado da peça 1.

Dados estatísticos para avaliação da exatidão – peça 1	
Média (°)	90,0421
Estatística t calculada	0,5876377
P-valor bilateral	0,616284953
t crítico bilateral	4,30265273

Fonte: A Autora (2019).

A estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 61,63%.

Quanto à repetitividade, foi calculado o coeficiente de variação entre as medições dos ângulos entre elas. Os dados estão apresentados no Quadro 9.

Quadro 9 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das medições dos ângulos entre as retas perpendiculares da peça 1.

Dados estatísticos para avaliação da repetitividade – retas perpendiculares da peça 1			
Retas medidas	Média (°)	Desvio Padrão (°)	Coefficiente de Variação (%)
Reta 1 - Reta 2, Reta 2 - Reta 3, Reta 3 - Reta 4	90,0421	0,124187171	0,137921178

Fonte: A Autora (2019).

Através do coeficiente de variação calculado, é possível avaliar que a *router* apresentou uma boa repetitividade quanto à usinagem das retas perpendiculares do quadrado inclinado.

Na Tabela 6 encontram-se os resultados das medições dos ângulos entre as retas paralelas do quadrado inclinado da peça 1.

Tabela 6 - Resultado das medições do ângulo entre as retas paralelas do quadrado inclinado da peça usinada 1.

	Medição (°)
Reta 1 - Reta 3	0,0125
Reta 2 - Reta 4	0,0072
Média (°)	0,0099
Desvio Padrão (°)	0,003748

Fonte: A Autora (2019).

Sabendo que o valor nominal do ângulo entre retas paralelas é de 0°, foi feito um teste de hipóteses, através do Excel, para saber se os desvios nos valores dos ângulos eram aceitáveis, mostrados no Quadro 10.

Quadro 10 - Dados estatísticos referentes as medições dos ângulos entre as retas paralelas do quadrado inclinado da peça 1.

Dados estatísticos para avaliação da exatidão – peça 1	
Média (°)	0,0099
Estatística t calculada	3,716981132
P-valor bilateral	0,16731175
t crítico bilateral	12,70620474

Fonte: A Autora (2019).

A estatística t calculada é menor que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 16,73%.

Quanto à repetitividade com relação às medições dos ângulos entre as retas paralelas, foi calculado o coeficiente de variação entre as medições dos ângulos entre elas. Os dados estão apresentados no Quadro 11.

Quadro 11 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das medições dos ângulos entre as retas paralelas da peça 1.

Dados estatísticos para avaliação da repetitividade – retas paralelas da peça 1			
	Média (°)	Desvio Padrão (°)	Coefficiente de Variação (%)
Reta 1 - Reta 3 e Reta 2 - Reta 4	0,0099	0,003747666	38,04736995

Fonte: A Autora (2019).

Como coeficiente de variação calculado foi maior que 10%, é possível avaliar que a *router* não apresentou uma boa repetitividade quanto à usinagem das retas paralelas do quadrado inclinado.

Na tabela 7 encontra-se o resultado da medição do ângulo entre o plano criado 1-4 e a reta limitada pelos pontos 1 e 2, da peça 1.

Tabela 7 - Resultado da medição do ângulo do quadrado inclinado da peça 1.

Medição (°)	
Plano 1-4 e reta entre os pontos 1 e 2	15,0167

Fonte: A Autora (2019).

4.1.4 Medições das distâncias entre os centros dos furos das peças 1 e 2

Na Tabela 8 encontram-se os resultados das medições das distâncias entre o centro do furo central C com os centros dos furos laterais da peça 1.

Tabela 8 - Resultado das medições das distâncias entre o furo central C e os furos laterais da peça usinada 1.

	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Medição 4 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Furo C - Furo 1	66,0597	66,0580	66,0615	66,0585	66,0594	0,001556438
Furo C - Furo 2	66,1661	66,0761	66,0580	66,0672	66,0919	0,050048543
Furo C - Furo 3	65,9919	65,9877	65,9760	65,9856	65,9853	0,006730527
Furo C - Furo 4	66,1016	66,1069	66,1046	66,1041	66,1043	0,00217409

Fonte: A Autora (2019).

Sabendo que o valor nominal da distância entre os centros dos furos com o centro do furo C é 66,19 mm, foi feito um teste de hipóteses, através do Excel, para saber se os desvios eram aceitáveis, mostrados no Quadro 12.

Quadro 12 - Dados estatísticos referentes as medições das distâncias entre o furo central C e os furos laterais da peça 1.

Informações	Distância C-F.1	Distância C-F.2	Distância C-F.3	Distância C-F.4
Média (mm)	66,0594	66,0919	65,9853	66,1043
Estatística t calculada	-167,7869337	-3,922192093	-60,82732771	-78,83758814
P-valor bilateral	4,66811E-07	0,029482392	9,78931E-06	4,498E-06
t crítico bilateral	3,182446305	3,182446305	3,182446305	3,182446305

Fonte: A Autora (2019).

Comparando o valor da estatística t (em módulo) com o valor do t crítico da distribuição bilateral, tem-se que:

- **Distância C-F.1:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I ao rejeitar a H0 neste caso, é praticamente nula.
- **Distância C-F.2:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I ao rejeitar a H0 neste caso, é dada pelo valor de P, que foi igual a 2,95%.
- **Distância C-F.3:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I ao rejeitar a H0 neste caso, é praticamente nula.
- **Distância C-F.4:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I ao rejeitar a H0 neste caso, é praticamente nula.

Quanto à repetitividade das medições destas distâncias, foram calculados os coeficientes de variação entre as medições da distância do centro de cada furo ao centro do furo C. Os dados estão apresentados no Quadro 13.

Quadro 13 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das distâncias entre os centros dos furos C e laterais da peça 1.

Dados estatísticos para avaliação da repetitividade – distâncias entre os centros da peça 1			
	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
Distância C-F.1	66,0594	0,001892969	0,002865559
Distância C-F.2	66,0919	0,009050414	0,013698822
Distância C-F.3	65,9853	0,006237788	0,009453615
Distância C-F.4	66,1043	0,001493318	0,002259003

Fonte: A Autora (2019).

Através coeficientes de variação calculados, foi possível avaliar que a *router* apresentou uma boa repetitividade quanto as distâncias do centro do furo C para o centro dos furos 1, 2, 3 e 4 da peça 1.

Na Tabela 9 encontram-se os resultados das medições das distâncias entre o centro do furo C e os dos furos laterais da peça 2.

Tabela 9 - Resultado das medições das distâncias entre o furo central C e os furos laterais da peça usinada 2.

	Medição 1 (mm)	Medição 2 (mm)	Medição 3 (mm)	Medição 4 (mm)	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
Furo C – F.1	65,8274	65,8476	65,7598	65,7709	65,8014	0,0427054
Furo C – F.2	65,9315	66,0078	65,9596	65,9999	65,9747	0,0357067
Furo C – F.3	66,0012	65,9773	66,0640	66,0234	66,0165	0,0368537
Furo C – F.4	66,1437	66,0919	66,1225	66,1253	66,1209	0,0214690

Fonte: A Autora (2019).

Foi feito também um teste de hipóteses, através do Excel, para as medições fornecidas pela Tabela 9. Os dados calculados estão mostrados no Quadro 14.

Quadro 14 - Dados estatísticos das medições das distâncias entre o furo C e os laterais da peça 2

Informações	Distância C-F.1	Distância C-F.2	Distância C- F.3	Distância C-F.4
Média (mm)	65,8014	65,9747	66,0165	66,1209
Estatística t calculada	-18,1979429	-12,05936972	-9,416962735	-6,441855428
P-valor bilateral	0,000361995	0,001227014	0,002537364	0,007585579
t crítico bilateral	3,182446305	3,182446305	3,182446305	3,182446305

Fonte: A Autora (2019).

Comparando o valor da estatística t (em módulo) com o valor do t crítico da distribuição bicaudal, tem-se que:

- **Distância C-F.1:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é dada pelo valor de P, que foi igual a 0,036%.
- **Distância C-F.2:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é dada pelo valor de P, que foi igual a 0,12%.
- **Distância C-F.3:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é dada pelo valor de P, que foi igual a 0,25%.
- **Distância C-F.4:** A estatística t calculada é maior que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja rejeitada, ou seja, a *router* não apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I é dada pelo valor de P, que foi igual a 0,75%.

Quanto à repetitividade, foram calculados os coeficientes de variação entre as medições fornecidas pela Tabela 9. Os dados estão apresentados no Quadro 15.

Quadro 15 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade das distâncias entre os centros dos furos C e laterais da peça 2.

Dados estatísticos para avaliação da repetitividade – distâncias entre os centros da peça 2			
	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)	Coefficiente de Variação (%)
Furo C - Furo 1	65,8014	0,042705376	0,064900382
Furo C - Furo 2	65,9747	0,035706675	0,05412177
Furo C - Furo 3	66,0165	0,036853709	0,055825017
Furo C - Furo 4	66,1209	0,02146897	0,032469289

Fonte: A Autora (2019).

Através dos coeficientes de variação calculados, é possível avaliar que a *router* apresentou uma boa repetitividade quanto as distâncias do centro do furo C para o centro dos furos 1, 2, 3 e 4 da peça 2.

4.1.5 Medições da análise de perpendicularidade das peças 1 e 2

Na Tabela 10 encontram-se os resultados das cinco medições do ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 da peça 1.

Tabela 10 - Resultado das medições do ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 da peça usinada 1.

	Medição 1 (°)	Medição 2 (°)	Medição 3 (°)	Medição 4 (°)	Medição 5 (°)	Média (°)	Desvio Padrão (°)
Linha 1-3 e linha 2-4	90,1197	90,1339	89,8728	90,1344	90,1294	90,0780	0,114884346

Fonte: A Autora (2019).

Na Tabela 11 encontram-se os resultados das quatro medições ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 da peça 2.

Tabela 11 - Resultado das medições do ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 da peça usinada 2.

	Medição 1 (°)	Medição 2 (°)	Medição 3 (°)	Medição 4 (°)	Média (°)	Desvio Padrão (°)
Linha 1-3 e linha 2-4	90,1778	89,8431	90,1275	89,8572	90,0014	0,1759457

Fonte: A Autora (2019).

Sendo o valor nominal do ângulo entre retas perpendiculares é de 90° , também foi feito um teste de hipóteses, através do Excel, para saber se os desvios nos valores dos ângulos eram aceitáveis nas peças 1 e 2, mostrado no Quadro 16.

Quadro 16 - Resultado das medições do ângulo entre as linhas 1-3 e 2-4 das peças 1 e 2.

Informações	Linha 1-3 e linha 2-4 (1)	Linha 1-3 e linha 2-4 (2)
Média (°)	90,0780	90,0014
Estatística t calculada	1,518942752	0,015913998
P-valor bilateral	0,203397202	0,988302196
t crítico bilateral	2,776445105	3,182446305

Fonte: A Autora (2019).

Comparando os valores da estatística t (em módulo), das peças 1 e 2, com o valor do t crítico da distribuição bilateral, as estatísticas t calculadas foram menores que t crítico, fazendo com que a hipótese H0 seja aceita, ou seja, a *router* apresentou boa exatidão. A probabilidade de cometer um erro do tipo I, caso H0 fosse rejeitada, é dada pelo valor de P, que foi igual a 20,34% para a peça 1 e 98,83% para a peça 2.

Quanto à repetitividade com relação às medições dos ângulos entre as retas perpendiculares tanto da peça 1, quanto da peça 2, foram calculados os coeficientes de variação entre as medições dos ângulos entre elas. Os dados estão apresentados no Quadro 17.

Quadro 17 - Dados estatísticos para avaliação da repetitividade dos ângulos entre as linhas 1-3 e 2-4 das peças 1 e 2.

Dados estatísticos para avaliação da repetitividade – ângulos entre as linhas 1-3 e 2-4 das peças 1 e 2			
	Média (°)	Desvio Padrão (°)	Coefficiente de Variação (%)
Linha 1-3 e linha 2-4 (peça 1)	90,0780	0,114884346	0,127538683
Linha 1-3 e linha 2-4 (peça 2)	90,0014	0,17594573	0,195492215

Fonte: A Autora (2019).

Através dos coeficientes de variação calculados, foi possível avaliar que a *router* apresentou uma boa repetitividade quanto aos ângulos entre as linhas perpendiculares 1-3 e 2-4, das peças 1 e 2.

Através da avaliação das medições das peças usinadas e os testes de hipóteses, foi possível observar que a *router* apresentou alguns desvios nas dimensões medidas.

Esses erros podem ter sido provenientes de uma má comunicação entre o sistema de controle CNC e a máquina ferramenta, já que segundo Sousa (2000, p.36), o CNC é responsável pelo recebimento dos códigos de programação e ajuste dos parâmetros de “velocidade, direção, e distância para os movimentos necessários para seguir trajetória programada, e calcular uma série de posições para cada eixo, a serem obedecidas ao longo da trajetória programada, na velocidade desejada.”.

Esses erros também podem ter sido originados pelas limitações na fabricação e na montagem dos componentes da máquina ferramenta, que segundo Sousa (2000, p. 41), “desgastes ocorridos com o uso da máquina juntamente com alterações estruturais modificam o comportamento geométrico da máquina, levando a erros de trajetória e posicionamento na movimentação de seus eixos.”.

Esses erros também podem ter ocorrido devido às folgas nos acoplamentos dos eixos dos motores de passo, ou devido a alguma configuração incorreta dos *drivers* dos motores de passo.

5 CONCLUSÃO

A *router* CNC apresentou uma boa repetitividade quanto à usinagem dos furos laterais e central, assim como também nas usinagens em ângulo requeridas nas peças teste conforme proposta da norma NBR NM ISO 10791-7 (1999).

Quanto à exatidão, a *router* CNC apresentou bons resultados das medições realizadas nos parâmetros da peça 1. Entretanto para a peça 2, os resultados das medições foram afetados pelo surgimento de folgas nos acoplamentos entre eixo do motor e fuso do eixo y.

Outra conclusão é que, a máquina deverá passar por mais testes funcionais de desempenho, após melhorias nos ajustes mecânicos e eletrônicos, garantindo assim atendimento coerente com as tolerâncias de forma e dimensão exigidos pelos setores da indústria e meios artesanais.

Portanto, foi cumprido o objetivo geral deste trabalho que visa realizar os testes funcionais de desempenho da *router* CNC desenvolvida no trabalho de conclusão do curso de mestrado do Professor José Carlos Albuquerque da Silva, do PPGEM.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Verificar a repetitividade da máquina em posições diferentes da mesa;
- Realizar ensaio geométrico pelo método da usinagem de peças teste conforme a NBR NM ISO 10791-7 (1999);
- Testar novos materiais para as peças usinadas.

REFERÊNCIAS

- ABREU, A. M.; **Capítulo 5: Testes de hipóteses estatísticas**. 2007. Disponível em: <http://cee.uma.pt/edu/Bioest/teorica/capitulo5.pdf>. Acesso em: 14 dez. 2019.
- ALBERT, A.; **Understanding CNC routers**. 1. ed. Vancouver: FPInnovations – Forintek Division, 2011.
- ALBERTAZZI, A. G.; SOUSA, A. R.; **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. Barueri: Manole, 2008.
- ALMEIDA, K. **Componentes de uma máquina de medição por coordenadas - CMM**. 2015. Disponível em: <https://www.linkedin.com/pulse/componentes-de-uma-m%C3%A1quina-medi%C3%A7%C3%A3o-por-coordenadas-cmm-almeida>. Acesso em: 01 nov. 2019.
- ÁLVARES, A. J. **A tecnologia de medição por coordenadas como base para regulação da qualidade geométrica do processo de usinagem CNC**. 1990. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 1990.
- ARAÚJO, R. P. **Desenvolvimento de programa computacional para avaliação de erros geométricos em centros de usinagem**. 2019. 274 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, 2019.
- ARDILA, L. K. R. **Estudo do comportamento dinâmico de máquina-ferramenta CNC com ênfase na implementação de sistemas de controle**. 2013. 341 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, 2013.
- ARENHART, F. A. **Desempenho metrológico de máquinas de medição por coordenadas no âmbito industrial brasileiro**. 2007. 62 f. Trabalho submetido à ABCM para participação do prêmio ABCM-Yehan Numata, na categoria de graduação.
- BARROS, W. S. **Estudo sobre a confiabilidade metrológica de máquinas de medição por coordenadas na utilização de varreduras por contato**. 2012. 245 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.
- BORTOLAN, F. **Sistema de movimentação por pinhão e cremalheira para router CNC de grande deslocamento e baixo custo, voltado ao corte de madeira**. 2017. 138 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Pará, 2017.
- COELHO, T. A. H.; RASZL, G.; **Desenvolvimento Atual e Tendências Futuras em Máquinas de Cinemática Paralela**: Cidade: São Paulo, Departamento de Engenharia Mecatrônica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- CRISCOLO, R. **Máquinas operatrizes – Como tudo começou**. 2018. Disponível em: <http://www.megamachine.com.br/maquinas-operatrizes-seu-inicio/>. Acesso em: 13 nov. 2019.

CRISTOFOLINI, O. **Análise de estruturas para máquina CNC de baixo custo, para usinagem de não metais.** 2017. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Faculdade Anhanguera, 2017.

DAMBROZ, G. P. B.; MACIEL, O. R.; SILVA, J. P. W.; VALDIERO, A. C.; RASIA, L. A. (2017) **Metodologia passo a passo para projeto e fabricação de peças em sistema CAD/CAM em fresadora router CNC.** XXVIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia.

DELGADO, C.; EDUARDO, J. **Diseño e implementación de un prototipo de router cnc portátil para el maquinado de superficies de madera, mediante el uso de software libre para el laboratorio de mecatrónica.** 2018; 155 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Universidad de las fuerzas armadas, 2018.

DIRECT INDUSTRY. **ROUTER CNC/ de 3 eixos/ de pórtico.** Disponível em: <<https://www.directindustry.com/pt/prod/diversified-machine-systems/product-101789-1360335.html#>>. Acesso em: 13 nov. 2019.

DÓRIA, M. A. T. **Análise da influência da rigidez do sistema nos erros dimensionais e geométricos no processo de torneamento.** 2005. 72 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, 2005.

FANHA, M. C. A. **Estudo de estratégias de medição para controle do dimensionamento geométrico e toleranciamento (GD&T) em peças estampadas.** 2011. 131 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Pará, 2011.

FERNEDA, A. B. **Integração metrologia, CAD e CAM: uma contribuição ao estudo de engenharia reversa.** 1999. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, 1999.

FERREIRA, A. M. **Estudo dos erros de forma no fresamento de geometrias complexas.** 2013. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior Tupy, 2013.

FIEBIG, R. **Protótipo de um CNC ROUTER.** 2018. 63 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade de Passo Fundo, 2018.

FORTULAN, A. C. A. **Aula 06 – Tolerâncias: dimensional, forma e posição.** Curso de Desenho Técnico Mecânico 1. 2017. Notas de Aula. Universidade de São Paulo.

GUIMARÃES, H. A. S. **Evolução do processo de usinagem convencional para usinagem CNC (Controle Numérico Computadorizado).** 2013. 41 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário do Sul de Minas, 2013.

HAMBURG-PIEKAR, D. S. **Calibração de peças padrão em máquinas de medir por coordenadas.** 2006. 167 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

HEXAGON. **Introdução de coordenação de metrologia.** 2019. Disponível em: <https://www.hexagonmi.com/pt-BR/solutions/technical-resources/metrology-%20101/intro-to-coordinate-metrology>. Acesso em: 01 nov. 2019.

ISO 1101. **Geometrical product specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out.** ISO - International Standard Organization, 2017.

INSTRUSUL. **O que é o relógio comparador?** 2019. Disponível em: <http://blog.instrusul.com.br/o-que-e-o-relogio-comparador/>. Acesso em: 15 nov. 2019.

LEITE, W. O.; NIGRI, E. M.; OLIVEIRA, E. M.; ABRÃO, A. M.; RUBIO, J. C. C. (2011) **Projeto orientado para a manufatura: Compensação dos desvios geométricos de máquinas ferramenta por meio do seu produto acabado.** 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Caxias do Sul, RS. 11 a 15 de abril.

MIRALLES, C. E. **Análise de estratégias de corte no fresamento com 5 eixos.** 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba, 2009.

NBR NM ISO 230-1. **Código de ensaio de máquinas-ferramenta, Parte 1: Exatidão geométrica de máquinas-ferramenta operando sem carga ou em condições de acabamento,** ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.

NBR 6409. **Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho,** ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

NBR NM ISO 10791-7. **Condições de ensaio para centros de usinagem – Parte 7: exatidão da peça-teste acabada,** ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.

NETO, A. A. B. **A tecnologia da medição por coordenadas na calibração de peças padrão e medição de peças com geometrias complexas.** 2003. 99 f. Dissertação (Mestrado em Metrologia) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

OLIVEIRA, J. E. F. **Desenvolvimento de um programa computacional para a integração de dados de projeto, fabricação e medição de peças torneadas com ênfase na síntese de tolerâncias dimensionais determinísticas.** 2009. 242 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

PORTAL ACTION. **Repetitividade e reprodutibilidade.** 2019. Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/analise-dos-sistemas-de-medicao/24-repetitividade-e-reprodutibilidade>. Acesso em: 30 nov. 2019.

RENISHAW. **QC20-W ballbar system.** 2019. Disponível em: <https://www.renishaw.com/pt/qc20-w-ballbar-system--11075>. Acesso em: 15 nov. 2019.

RENISHAW. **Sistema Laser XL-80.** 2019. Disponível em: <https://www.renishaw.com.br/pt/sistema-laser-xl-80--8268>. Acesso em: 15 nov. 2019.

SATO, H. H. **Aplicação de um método de ensaio geométrico em um centro de usinagem.** 2014. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Fabricação Mecânica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2014.

SILVA, E. S.; NÓBREGA, L. H. M. S.; SILVA, V. N.; FILHO, M. S. (2014) **Projeto e desenvolvimento de uma máquina de medição por coordenadas automatizada.** Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, MG. 20 a 24 de set.

SILVA, J. C. A., **Projeto mecânico, fabricação, montagem e ensaios geométricos em uma router CNC com quatro eixos.** 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

SOUSA, A. R.; SCHNEIDER, C. A., **Uma técnica alternativa para o ensaio geométrico de Centros de Usinagem.** CONEM – Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2000, Natal – RN: UFRN, 2000.

SOUSA, A. R. **Padrões corporificados e a tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de centros de usinagem.** 2000; 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, 2000.

SOUSA, R. F. S., **Desenvolvimento de uma metodologia para determinação e análise dos deslocamentos térmicos de máquina ferramenta usando o método dos elementos finitos e redes neurais artificiais.** 2013; 140 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, 2013.

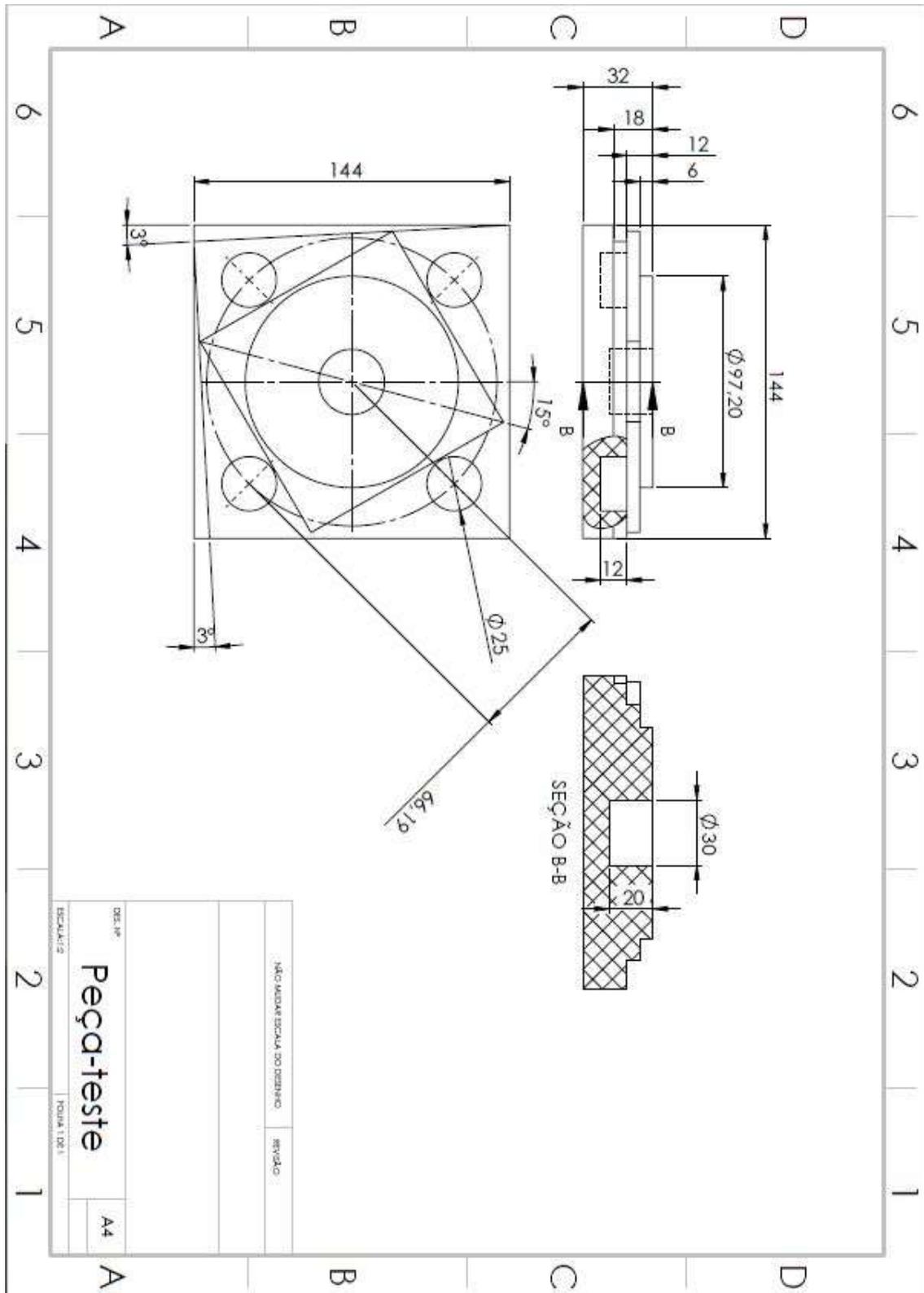
SOUZA, A. J. **Processo de fabricação por usinagem parte 2.** Curso de Engenharia Mecânica. 2011. Apostila de Usinagem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

STOETERAU, R. L. **Introdução ao Projeto de Máquinas Ferramentas Modernas.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

VOITTO. **Teste de hipótese: o que é e para que serve.** 2019. Disponível em: <https://www.voitto.com.br/blog/artigo/teste-de-hipotese>. Acesso em: 14 dez. 2019.

XU, X. Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 5-8, p. 1893-1900, 2017.

APÊNDICE A – Desenho técnico da peça adaptada da NBR NM ISO 10791-7 (1999).



Fonte: Autor (2019).

APÊNDICE B – Programas do fresamento CNC.**Código Parcial 1:**

O0001
N1 G21
N2 (6MM CRB 2FL 19 LOC)
N3 G91 G28 X0 Y0 Z0
N4 T01 M06
N5 S7500 M03
N6 G90 G00 X44.637 Y-44.637
N7 G43 Z2.5 H01 M08
N8 G01 Z-3. F900.
N9 G17 Y-38.657 F900.
N10 G02 X38.657 Y-44.637 I-44.637 J38.657
N11 G01 X44.637
N12 X47.037 Y-47.037
N13 Y-31.57
N14 G02 X31.57 Y-47.037 I-47.037 J31.57
N15 G01 X47.037
N16 X49.437 Y-49.437
N17 Y-22.338
N18 G02 X22.338 Y-49.437 I-49.437 J22.338
N19 G01 X49.437
N20 X51.837 Y-51.837
N21 Y-1.138
N22 G02 X1.138 Y-51.837 I-51.837 J1.138
N23 G01 X51.837
N24 X54.237 Y-54.237
N25 Y54.237
N26 X1.138
N27 X38.657 Y44.637
N28 G02 X44.638 Y38.657 I-38.657 J-44.637
N29 G01 Y44.637

N30 X38.657
N31 X31.57 Y47.037
N32 G02 X47.038 Y31.57 I-31.57 J-47.037
N33 G01 Y47.037
N34 X31.57
N35 X22.338 Y49.437
N36 G02 X49.437 Y22.338 I-22.338 J-49.437
N37 G01 Y49.437
N38 X22.338
N39 G00 Z2.5
N40 X1.138 Y51.837
N41 G01 Z-3. F900.
N42 G02 X51.837 Y1.138 I-1.138 J-51.837 F900.
N43 G01 Y51.837
N44 X1.138
N45 G00 Z2.5
N46 X22.338 Y49.437
N47 G01 Z-3. F900.
N48 X31.57 Y47.037 F900.
N49 X38.657 Y44.637
N50 X1.138 Y54.237
N51 X-54.237
N52 Y1.138
N53 X-44.637 Y38.657
N54 G02 X-38.657 Y44.638 I44.638 J-38.657
N55 G01 X-44.637
N56 Y38.657
N57 X-47.037 Y31.57
N58 G02 X-31.57 Y47.038 I47.037 J-31.57
N59 G01 X-47.037
N60 Y31.57
N61 X-49.437 Y22.338
N62 G02 X-22.338 Y49.437 I49.438 J-22.338
N302 X51.85 Y0

N303 Z-.5
N304 G01 Z-5.917 F900.
N305 G02 I-51.85 J0 F900.
N328 X66.237 Y-66.238
N329 Y-29.546
N330 X2.687 Y-66.237
N331 X66.237
N332 X68.637 Y-68.638
N333 Y-25.39
N334 X-6.27 Y-68.637
N335 X68.637
N710 G02 X70.823 Y-21.356 I-1.839 J2.68
N711 G01 X-15.227 Y-71.037
N712 X71.037
N713 X73.437 Y-73.438
N740 X25.39 Y68.637
N741 X68.637 Y-6.27
N742 Y68.637
N743 X25.39
N880 G03 I-15. J0
N1010 G00 Z2.5
N1011 X57.625 Y-12.896
N1012 Z-3.25
N1013 G01 Z-6. F900.
N1014 G02 X56.352 Y-17.645 I-57.625 J12.896 F900.
N1015 G01 X59.363 Y-15.906
N1122 I51.6 J0
N1123 X-51.597 Y.6 I51.6 J0
N1124 G03 X-51.767 Y1.026 I-.6 J.007
N1125 G40 G01 X-53.948 Y3.258
N1126 G00 Z3.
N1127 X46.916 Y30.817
N1128 G01 Z-9. F900.
N1129 G41 D21 X46.108 Y27.803 F900.

N1130 G03 X46.168 Y27.348 I.58 J-.155

N1131 G01 X73.296 Y-19.64 F900.

N1132 X-19.64 Y-73.296

N1133 X-73.296 Y19.64

N1151 G00 Z3.

N1152 Z25. M09

N1153 G91 G28 Z0

N1154 G28 X0 Y0

N1155 M30

Código Parcial 2:

O0001

N1 G21

N2 (6MM CRB 2FL 19 LOC)

N3 G91 G28 X0 Y0 Z0

N4 T01 M06

N5 S8000 M03

N6 G90 G00 X-72.217 Y-79.5

N7 G43 Z2.5 H01 M08

N8 G01 Z-3. F900.

N9 G17 Y-76.709 F900.

N10 X-79.5 Y62.266

N11 Z-5.95 F900.

N12 X-72.217 Y-76.709 F900.

N13 Y-79.5

N14 Z-8.9 F900.

N15 Y-76.709 F900.

N16 X-79.5 Y62.266

N17 Z-11.85 F900.

N18 X-72.217 Y-76.709 F900.

N19 Y-79.5

N20 Z-14.8 F900.

N340 G41 D21 X73.189 Y-67.967 F900.

N341 G03 X72.756 Y-67.813 I-.401 J-.446

N342 G01 X-64.895 Y-75.027 F900.

N343 G03 X-65.31 Y-75.225 I.031 J-.599

N344 G40 G01 X-67.398 Y-77.544

N345 G00 Z3.

N346 X75.508 Y-70.054

N347 Z-6.

N348 G01 Z-12. F900.

N349 G41 D21 X73.189 Y-67.967 F900.

N350 G03 X72.756 Y-67.813 I-.401 J-.446

N351 G01 X-64.895 Y-75.027 F900.

N352 G03 X-65.31 Y-75.225 I.031 J-.599

N353 G40 G01 X-67.398 Y-77.544

N354 G00 Z3.

N355 X75.508 Y-70.054

N356 Z-9.

N357 G01 Z-15. F900.

N358 G41 D21 X73.189 Y-67.967 F900.

N359 G03 X72.756 Y-67.813 I-.401 J-.446

N360 G01 X-64.895 Y-75.027 F900.

N361 G03 X-65.31 Y-75.225 I.031 J-.599

N362 G40 G01 X-67.398 Y-77.544

N363 G00 Z3.

N364 X75.508 Y-70.054

N365 Z-12.

N366 G01 Z-18. F900.

N367 G41 D21 X73.189 Y-67.967 F900.

N368 G03 X72.756 Y-67.813 I-.401 J-.446

N369 G01 X-64.895 Y-75.027 F900.

N370 G03 X-65.31 Y-75.225 I.031 J-.599

N371 G40 G01 X-67.398 Y-77.544

N372 G00 Z3.

N373 Z25. M09

N374 G91 G28 Z0

N375 G28 X0 Y0

N376 M30

Código Parcial 3:

O0001

N1 G21

N2 (6MM CRB 2FL 19 LOC)

N3 G91 G28 X0 Y0 Z0

N4 T01 M06

N5 S8000 M03

N6 G90 G00 X0 Y0

N7 G43 Z2.5 H01 M08

N8 G01 Z-3. F900.

N9 G17 X2.15 F900.

N10 G03 I-2.15 J0 F900.

N11 G01 X4.55

N12 G03 I-4.55 J0

N13 G01 X6.95

N14 G03 I-6.95 J0

N15 G01 X9.35

N16 G03 I-9.35 J0

N17 G01 X11.75

N18 G03 I-11.75 J0

N19 I-11.75 J0

N20 G01 X0

N1060 X37.521 Y45.788 I.599 J.038

N1061 G40 G01 X39.862 Y43.726

N1062 G00 Z3.

N1063 X46.8 Y46.8

N1064 Z-18.

N1065 G01 Z-24. F900.

N1066 G41 D21 X39.862 Y49.874 F900.

N1067 X37.521 Y47.812

N1068 G03 X37.319 Y47.4 I.397 J-.45

N1069 X37.3 Y46.8 I9.481 J-.6 F900.

N1070 I9.5 J0

N1071 X37.319 Y46.2 I9.5 J0

N1072 X37.521 Y45.788 I.599 J.038

N1073 G40 G01 X39.862 Y43.726

N1074 G00 Z3.

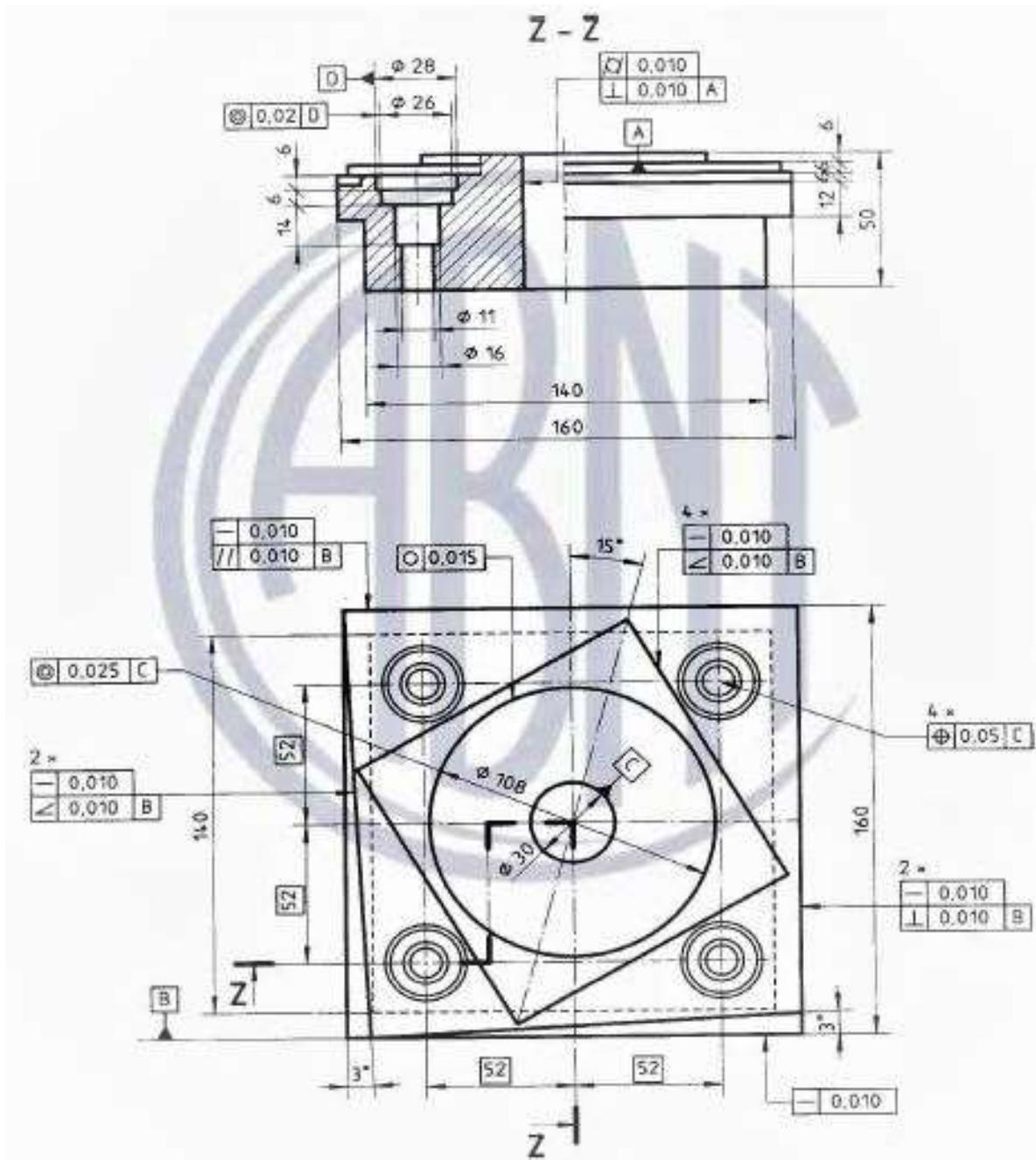
N1075 Z25. M09

N1076 G91 G28 Z0

N1077 G28 X0 Y0

N1078 M30

ANEXO A – Peça-teste conforme NBR NM-ISSO 10791-7: 1999.



Fonte: Araújo (2019).