



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROGÉRIO PONTES DE ARAÚJO

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS EM CENTROS
DE USINAGEM COM AUXÍLIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL DEDICADA**

Recife

2019

ROGÉRIO PONTES DE ARAÚJO

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS EM CENTROS
DE USINAGEM COM AUXÍLIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL DEDICADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Materiais e Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.

Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Ferreira de Oliveira.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- A663p Araújo, Rogério Pontes de.
Procedimento para avaliação de erros geométricos em centros de usinagem com auxílio de ferramenta computacional dedicada / Rogério Pontes de Araújo. - 2019.
192 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Tiago Leite Rolim.
Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Ferreira de Oliveira.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui Referências e Anexos.
1. Engenharia Mecânica. 2. Erros geométricos. 3. Centros de usinagem. 4. Procedimento de verificação. 5. Ferramenta computacional. 6. GD&T. I. Rolim, Tiago Leite. (Orientador). II. Oliveira, José Eduardo Ferreira de. (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2019-378

ROGÉRIO PONTES DE ARAÚJO

**PROCEDIMENTO PARA AVALIAÇÃO DE ERROS GEOMÉTRICOS EM CENTROS
DE USINAGEM COM AUXÍLIO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL DEDICADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 20 / 09 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Tiago Leite Rolim (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Ricardo Artur Sanguinetti Ferreira (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (Examinador Interno)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

Dedico esse trabalho em especial a meus pais Reginaldo Guilherme de Araújo e Maria do Carmo Pontes de Araújo, a meu irmão Ronaldo Pontes de Araújo, a minha esposa Ana Cláudia Medeiros de Oliveira, a meu filho João Gabriel dos Santos Pontes de Araújo e a meu sobrinho Henrique Pontes de Araújo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me iluminado, me dando forças, saúde e disposição para concluir este trabalho, permitindo que mais uma etapa da minha vida fosse concretizada.

Aos meus pais, Reginaldo e Maria do Carmo por todo exemplo de vida e estímulos para nunca abandonar os estudos e realizar meus sonhos.

À minha esposa Ana Cláudia por todo apoio, companheirismo e palavras de incentivo para conclusão deste trabalho.

Ao meu filho João Gabriel, que muitas vezes ficou sem minha presença por conta dos meus estudos.

Ao meu irmão Ronaldo, por todo apoio e incentivo que me deu ao longo da minha vida.

Ao meu sobrinho Henrique, por ser sempre um amigo nas horas que precisei.

A todos da família Dantas por sempre acreditarem no meu potencial.

Ao meu orientador, Professor Dr. Tiago Leite Rolim que muito contribuiu para a concretização deste trabalho através de seus conselhos e trocas de experiências, tornando possível a realização de mais uma etapa em minha vida.

Ao meu coorientador Professor Dr. José Eduardo Ferreira de Oliveira, por toda sua contribuição e companheirismo.

Aos amigos engenheiros Alex Elton e José Carlos por toda contribuição que me deram ao longo do doutorado.

Ao amigo Reynolds por todas palavras de incentivo.

Ao amigo e professor do SENAI Santo Amaro, Joseilson, por toda sua colaboração na elaboração do programa CNC das peças-teste, simulações e fabricações.

Aos amigos Gustavo Rogério e Edson Lima, por toda contribuição na elaboração e desenvolvimento do programa computacional.

Ao Torneiro Mecânico Ivson Mário Siqueira Leite, por toda contribuição na fabricação das peças no torno convencional.

Ao amigo e engenheiro José Orlando, por todo incentivo e apoio que me deu para conclusão deste trabalho.

À empresa HSS do Brasil e em especial ao amigo Fernando Rabelo por todo apoio e contribuição.

À empresa MULTIMOLDES e em especial ao amigo Lázaro por todo apoio e contribuição.

À empresa API Automated Precision e em especial a Mariana e Natália que contribuíram de forma significativa para concretização deste trabalho.

Às instituições: Universidade Federal de Pernambuco e Universidade de Pernambuco

Aos colegas do PPGEM/UFPE que contribuíram de alguma forma para realização deste trabalho.

Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá.

(Ayrton Senna)

RESUMO

Como as máquinas ferramentas apresentam desvios, tanto a geometria quanto as dimensões das peças nelas fabricadas são comprometidas de forma direta, gerando distorções em relação ao projeto tanto nas dimensões quanto nas geometrias. Em face ao cenário competitivo no mundo da manufatura, se faz necessário ter conhecimento acerca do comportamento em termos dimensionais e geométricos dessas máquinas para que seja possível estabelecer a capacidade de processo delas, evitando desperdícios de tempo e dinheiro, satisfazendo às exigências funcionais dos produtos fabricados. Apesar dos ensaios geométricos serem importantes e necessários para especificar a utilização da máquina de forma correta, evitando prejuízos futuros, a maioria dos usuários não aplicam tais ensaios em suas máquinas quer seja por falta de conhecimento ou por falta de motivação, devido basicamente a dois fatores: longo período de tempo e custo elevado para realização do ensaio. Dentro deste contexto, este trabalho propõe uma metodologia para a verificação de erros geométricos em centros de usinagem, com auxílio de uma ferramenta computacional dedicada, desenvolvida no âmbito desta pesquisa, de forma a demandar baixo tempo e baixo custo com confiabilidade metrológica, a ser utilizada no chão de fábrica de empresas, de forma a garantir a qualidade de seus produtos, tornando-as competitivas.

Palavras-chave: Erros geométricos. Centros de usinagem. Procedimento de verificação. Ferramenta computacional. GD&T.

ABSTRACT

As machine tools have deviations, both the geometry and the dimensions of the parts they manufacture are directly compromised, generating distortions in relation to the design in both dimensions and geometries. Due to the competitive scenario in the world of manufacturing, it is necessary to have knowledge about the dimensional and geometric behavior of these machines in order to establish their process capability, avoiding waste of time and money, satisfying the functional requirements of manufactured products. Although geometric testing is important and necessary to specify the correct use of the machine, avoiding future damage, most users do not apply such testing to their machines due to lack of knowledge or lack of motivation, basically due to two factors: long time and high cost to perform the assay. Within this context, this work proposes a methodology for the verification of geometric errors in machining centers, with the aid of a dedicated computational tool, developed in the scope of this research, in order to demand low time and low cost with metrological reliability, to be used on the factory floor of companies, in order to ensure the quality of their products, making them competitive.

Keywords: Geometric errors. Machining centres. Verification procedure. Computational tool. GD&T.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
ASME	AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS
CAD	COMPUTED AIDED DESIGN
CNC	COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO
GD&T	GEOMETRIC DIMENSIONAL AND TOLERANCE
INPI	INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL
ISO	INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION
MCA	MACHINING CENTRES ANALYSER
MMC	MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS
NBR	NORMA BRASILEIRA
PLA	PLÁSTICO DE POLIÁCIDO LÁCTICO
RBC	REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO
UFPE	UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
VIM	VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE TERMOS FUNDAMENTAIS E GERAIS DE METROLOGIA

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Objetivo geral	17
1.1.2	Objetivos específicos	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	INFLUÊNCIAS NA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA DE PEÇAS USINADAS	18
2.2	COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO DAS MÁQUINAS FERRAMENTAS	18
2.2.1	Erros geométricos	19
2.2.2	Erros provenientes de efeitos térmicos	20
2.2.3	Erros induzidos por cargas	21
2.3	TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS	21
2.3.1	Classificação das tolerâncias geométricas	22
2.3.2	Símbolos indicativos das tolerâncias geométricas	23
2.4	ENSAIOS GEOMÉTRICOS	24
2.4.1	Reversão do esquadro mecânico	26
2.4.2	Medição das diagonais cruzadas	26
2.4.3	Lei dos cossenos	27
2.4.4	Laser interferométrico	28
2.4.5	Esquadro e relógio comparador	28
2.4.6	Peças padrão usinadas	29
2.4.7	Ball bar	30
2.4.8	Grid encoder	30
2.5	MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (MMC)	31
2.5.1	Princípio de medição por coordenadas	31
2.6	A NBR NM-ISO 10791-7: 1999 – CONDIÇÕES DE ENSAIO PARA CENTROS DE USINAGEM – PARTE 7: EXATIDÃO DA PEÇA-TESTE ACABADA	32
2.7	INCERTEZA DE MEDIÇÃO	34
2.8	CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DE UM RESULTADO	35
3	ESTUDOS DE CAMPO	36
3.1	VISITA À API AUTOMATED PRECISION	36
3.2	VISITA À EMPRESA METALÚRGICA LOCALIZADA NO ESTADO DE SÃO PAULO	36
3.3	VISITA À EMPRESA FABRICANTE DE MÁQUINAS FERRAMENTAS LOCALIZADA NO ESTADO DE SÃO PAULO	39
3.4	VISITA À EMPRESA METALÚRGICA LOCALIZADA NO ESTADO DE PERNAMBUCO	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	42

4.1	PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA PARA FABRICAÇÃO DAS PEÇAS-TESTE CONFORME NBR NM-ISO 10791-7: 1999.....	42
4.2	DADOS DOS CENTROS DE USINAGEM, FERRAMENTAS E PARÂMETROS DE CORTE.....	46
4.3	FABRICAÇÃO DAS PEÇAS-TESTE CONFORME NBR NM-ISO 10791-7: 1999	49
4.4	FABRICAÇÃO DO MODELO DA PEÇA-TESTE ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA	53
4.5	MEDIÇÃO DAS PEÇAS NA MMC.....	53
4.5.1	Medição do modelo da peça-teste	54
4.5.1.1	Medição dos elementos tolerados.....	56
4.5.1.1.1	<i>Determinação da origem na peça</i>	<i>56</i>
4.5.1.1.2	<i>Medição dos parâmetros tolerados do furo central</i>	<i>57</i>
4.5.1.1.2.1	<u>Cilindricidade.....</u>	<u>57</u>
4.5.1.1.2.2	<u>Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A.....</u>	<u>58</u>
4.5.1.1.3	<i>Medição dos parâmetros tolerados do quadrado</i>	<i>60</i>
4.5.1.1.3.1	<u>Retitude dos lados</u>	<u>60</u>
4.5.1.1.3.2	<u>Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B</u>	<u>62</u>
4.5.1.1.3.3	<u>Paralelismo do lado oposto à base B</u>	<u>62</u>
4.5.1.1.4	<i>Medição dos parâmetros tolerados do quadrado inclinado.....</i>	<i>63</i>
4.5.1.1.4.1	<u>Retitude dos lados</u>	<u>63</u>
4.5.1.1.4.2	<u>Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B</u>	<u>64</u>
4.5.1.1.4.3	<u>Perpendicularidade entre os lados.....</u>	<u>66</u>
4.5.1.1.5	<i>Medição dos parâmetros tolerados do círculo.....</i>	<i>66</i>
4.5.1.1.5.1	<u>Circularidade</u>	<u>66</u>
4.5.1.1.5.2	<u>Concentricidade do círculo externo e do furo mandrilado C.....</u>	<u>67</u>
4.5.1.1.6	<i>Medição dos parâmetros tolerados das faces inclinadas.....</i>	<i>68</i>
4.5.1.1.6.1	<u>Retitude das faces</u>	<u>68</u>
4.5.1.1.6.2	<u>Angularidade dos ângulos em relação à base B</u>	<u>69</u>
4.5.1.1.7	<i>Medição dos parâmetros tolerados dos furos mandrilados.....</i>	<i>70</i>
4.5.1.1.7.1	<u>Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C.....</u>	<u>70</u>
4.5.1.1.7.2	<u>Concentricidade do furo interno com o furo externo D.....</u>	<u>72</u>
4.5.1.1.7.3	<u>Perpendicularidade das diagonais entre furos</u>	<u>72</u>
4.5.1.2	Procedimento padrão de medição.....	74
4.5.2	Medição das peça-teste	74
4.5.2.1	Tratamento estatístico dos dados de medição.....	76
4.6	DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL MACHINING CENTRES ANALYSER - MCA	82
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	89
5.1	FABRICAÇÃO DAS PEÇAS-TESTE	89
5.2	MEDIÇÃO DO MODELO DA PEÇA-TESTE	89
5.3	VERIFICAÇÃO DE NORMALIDADE DOS DADOS DE MEDIÇÃO	90
5.4	MEDIÇÃO DAS PEÇAS-TESTE	90
5.4.1	Furo central	91

5.4.1.1	Cilindricidade.....	91
5.4.1.2	Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A.....	92
5.4.1.2.1	<i>Projeção YZ</i>	92
5.4.1.2.2	<i>Projeção ZX</i>	93
5.4.2	Quadrado	94
5.4.2.1	Retitude dos lados.....	94
5.4.2.1.1	<i>Lado 1</i>	94
5.4.2.1.2	<i>Lado 2</i>	95
5.4.2.1.3	<i>Lado 3</i>	96
5.4.2.1.4	<i>Lado 4</i>	97
5.4.2.2	Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	98
5.4.2.2.1	<i>Lado 1</i>	98
5.4.2.2.2	<i>Lado 2</i>	99
5.4.2.3	Paralelismo do lado oposto à base B	100
5.4.3	Quadrado inclinado	101
5.4.3.1	Retitude dos lados.....	101
5.4.3.1.1	<i>Lado 1</i>	101
5.4.3.1.2	<i>Lado 2</i>	102
5.4.3.1.3	<i>Lado 3</i>	103
5.4.3.1.4	<i>Lado 4</i>	104
5.4.3.2	Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B	104
5.4.3.3	Perpendicularidade entre lados.....	105
5.4.3.3.1	<i>Lados 1 e 2</i>	105
5.4.3.3.2	<i>Lados 2 e 3</i>	106
5.4.3.3.3	<i>Lados 3 e 4</i>	107
5.4.3.3.4	<i>Lados 4 e 1</i>	108
5.4.4	Círculo	109
5.4.4.1	Circularidade	109
5.4.4.2	Concentricidade do círculo externo e do furo mandrilado C.....	110
5.4.5	Faces inclinadas	111
5.4.5.1	Retitude das faces.....	111
5.4.5.1.1	<i>Face 1</i>	112
5.4.5.1.2	<i>Face 2</i>	113
5.4.5.2	Angularidade dos ângulos em relação à base B	114
5.4.5.2.1	<i>Face 1</i>	114
5.4.5.2.2	<i>Face 2</i>	115
5.4.6	Furos mandrilados	116
5.4.6.1	Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C	116
5.4.6.1.1	<i>Furo 1</i>	116
5.4.6.1.2	<i>Furo 2</i>	117
5.4.6.1.3	<i>Furo 3</i>	118
5.4.6.1.4	<i>Furo 4</i>	119
5.4.6.1.5	<i>Furo 5</i>	120
5.4.6.1.6	<i>Furo 6</i>	121

5.4.6.1.7	<i>Furo 7</i>	122
5.4.6.1.8	<i>Furo 8</i>	123
5.4.6.2	Concentricidade do furo interno com o furo externo D.....	124
5.4.6.2.1	<i>Furos 1 e 5</i>	124
5.4.6.2.2	<i>Furos 2 e 6</i>	125
5.4.6.2.3	<i>Furos 3 e 7</i>	126
5.4.6.2.4	<i>Furos 4 e 8</i>	127
5.4.6.3	Perpendicularidade das diagonais entre furos	128
5.5	ESTIMATIVA DE CUSTOS	133
5.6	PROGRAMA COMPUTACIONAL MACHINING CENTRES ANALYSER - MCA.....	134
6	CONCLUSÃO	147
7	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	149
	REFERÊNCIAS	150
	ANEXO A - Programas e sub-programas para fabricação da parte inferior da peça-teste tipo A conforme NBR NM ISO 10791-7:1999.....	155
	ANEXO B - Programas e sub-programas para fabricação da parte superior da peça-teste tipo A conforme NBR NM ISO 10791-7:1999.....	158
	ANEXO C - Descrição das ferramentas e suas principais aplicações.....	171
	ANEXO D - Parâmetros de corte utilizados na fabricação das peças- teste	178
	ANEXO E - Procedimento de medição padrão da peça-teste tipo A	180
	ANEXO F - Planilha para inserção de dados de medição.....	188
	ANEXO G - Modelo de relatório emitido pelo <i>software Machining Centres Analyser - MCA</i>	191

1 INTRODUÇÃO

O aumento da produção no mundo pelo uso de processos de manufatura é caracterizado pelo desenvolvimento tecnológico, que é impulsionado com o crescimento da competitividade. Sendo assim, processos de usinagem também têm passado por mudanças, visando atender às exigências do mercado, principalmente para garantir a qualidade esperada, reduzir os custos da produção e aumentar a produtividade (KISHAWY, 2004; GUNAY, 2004; SMITH 2016).

Na indústria moderna é cada vez mais intensa a utilização de máquinas ferramentas CNC de múltiplos eixos para produção de peças com geometrias complexas e tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas, isso por seu alto desempenho e flexibilidade (LACALLE, 2009; BERTASSO, 2012; LIW, 2018; XIA, 2019). Essas, por sua vez, têm uma contribuição significativa no desenvolvimento de um país, sendo essenciais na indústria metal mecânica moderna e na evolução de máquinas e equipamentos, agregando melhorias na qualidade de vida do homem através da fabricação de bens de consumo que proporcionam conforto e bem-estar, onde passaram por grande evolução nos últimos 30 anos com a contribuição dos vários ramos do conhecimento (mecânica, eletrônica, informática e novos materiais), passando de simples máquinas mecânicas para máquinas automatizadas com sistemas mecatrônicos, através da introdução do comando numérico computadorizado (ROLIM, 2003). Já na década de 80, cerca de 10% das máquinas produzidas nas nações mais industrializadas, eram máquinas ferramentas, e, aproximadamente, 10% da força de trabalho eram voltadas para construção dessas máquinas (WECK, 1984).

As máquinas ferramentas são classificadas de acordo com o tipo de princípio de funcionamento para dar forma, dimensão e acabamento a uma peça em função da especificação. O setor de máquinas e equipamentos é um indicador do investimento e da demanda industrial, estando presente em todas as cadeias produtivas da economia, tendo destaque no setor de bens de capital pelo seu papel difusor no progresso tecnológico, onde apresentou um faturamento de R\$ 606 bilhões em 2016, correspondendo a 22% da receita total da indústria de transformação (ABIMAQ, 2019). Aproximadamente 50% dos investimentos em atividades inovadoras realizadas pelas empresas da indústria brasileira estão voltados para a aquisição de novas máquinas e equipamentos (GUERRERO, 2013).

De acordo com o cenário atual, as empresas buscam cada vez mais adequar-se aos padrões de qualidade em função da competitividade, e com isso buscam em seus processos produtivos rapidez, flexibilidade, alta performance, confiabilidade e redução de custos, pois caso não obedeçam a esses padrões, rapidamente irão alcançar o insucesso. Contudo, não é fácil obter a excelência diante das inúmeras dificuldades impostas no dia a dia. É preciso buscar melhorias de forma contínua em todas as etapas envolvidas no processo produtivo (UENO, 1996).

São comuns os prejuízos gerados em um processo de fabricação devido à ineficiência do sistema de produção, que por sua vez eleva os custos do processo por conta de perdas de matéria-prima e tempo. Não sendo diferente para os processos de usinagem que em algumas atividades industriais apresentam grande perda de material e conferem à peça um alto valor agregado, uma vez que normalmente são utilizados como etapa final de um processo de fabricação. No entanto, com os processos de usinagem é possível obter níveis de precisão e exatidão impraticáveis em outros processos, justificando sua tamanha utilização principalmente nos processos de acabamento.

Precisão e exatidão em usinagem são os indicadores de avaliação mais significativos para qualidade e capacidade de processo de fabricação com máquinas ferramentas. Entretanto, essas máquinas não são perfeitas, e sofrem influência de algumas fontes, tais como: erros geométricos, desgastes de componentes mecânicos e ferramentas, efeitos térmicos, erros induzidos por cargas e erros provenientes de servomecanismo (ECKHARDT et al., 2008; ZHU, 2012; LASPAS, 2014). Nesse contexto, os erros geométricos podem representar aproximadamente 40% dos desvios existentes em uma peça usinada, possuindo características de repetibilidade, sistematicidade e invariância no tempo, sendo possível medi-los, para que sejam quantificados, compensados ou até mesmo eliminados, a fim de melhorar o desempenho da máquina (WANG, 2013).

Para monitoramento dos erros geométricos, utiliza-se como alternativa os ensaios geométricos que, além de possibilitarem informações sobre os possíveis desvios de forma, posição, orientação, batimento e dimensionais gerados pelas máquinas ferramentas, permitem ao usuário saber a capacidade do equipamento em atender às tolerâncias dimensionais e geométricas estabelecidas em projeto e com isso reduzir possíveis prejuízos de não conformidade. Entretanto, apesar dos ensaios geométricos serem importantes e necessários para estabelecer a utilização

da máquina de forma correta, a maioria dos usuários não aplicam tais procedimentos em suas máquinas por falta de conhecimento ou de motivação devido basicamente a dois fatores: longo período de tempo e custo elevado para realização do ensaio.

Buscando oferecer um instrumento que seja de fácil aplicação, baixo custo e confiável na análise geométrica de máquinas ferramentas, esse trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia para verificação de erros geométricos em centros de usinagem, a partir da fabricação e medição de peças-teste padrão com características dimensionais e geométricas estabelecidas pela NBR NM ISO 10791-7:1999, além do desenvolvimento de uma ferramenta computacional dedicada, denominada *Machining Centres Analyser – MCA*, na qual realiza o tratamento estatístico dos dados de medição e realiza a comparação com as tolerâncias geométricas estabelecidos em norma. Com isso, busca-se motivar os usuários de máquinas ferramentas a utilizar a metodologia proposta no chão de fábrica de empresas, de forma a garantir a qualidade de seus produtos, contribuindo assim, para a competitividade das organizações.

Os aspectos teóricos que fornecem embasamento ao trabalho desenvolvido são abordados no capítulo 2.

No capítulo 3 expõe-se uma apresentação sobre estudos de campo que serviram de embasamento para desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa.

No capítulo 4 são relatados os materiais e métodos utilizados no presente estudo.

Os resultados e discussões são apresentados no capítulo 5, as principais conclusões no capítulo 6 e no capítulo 7 estão as recomendações para trabalhos futuros.

1.1 OBJETIVOS

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

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar uma metodologia para verificação de erros geométricos em centros de usinagem, a partir de peças-padrão usinadas, com auxílio de uma ferramenta computacional dedicada, desenvolvida no âmbito da pesquisa.

1.1.2 Objetivos específicos

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre o estado da arte acerca do tema;
- Preparar a matéria-prima para fabricação das peças-teste;
- Fabricar peças-teste, conforme estabelecida na NBR NM ISO 10791-7: 1999;
- Produzir modelo da peça-teste através de manufatura aditiva;
- Medir as peças utilizando uma máquina de medição por coordenadas;
- Elaborar procedimento de medição padrão para verificação periódica;
- Desenvolver programa computacional baseado nas normas NBR NM ISO 10791-7:1999 e ISO GUM 2008.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

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

2.1 INFLUÊNCIAS NA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA DE PEÇAS USINADAS

Na fabricação de uma determinada peça pelo processo de usinagem, se faz necessário o conhecimento dos vários fatores ligados ao processo produtivo de forma direta e/ou indireta. Esses fatores influenciam diretamente nas dimensões finais do produto, podendo levar à geração de refugos, e com isso, a perdas significativas de material e tempo.

A conformidade de uma peça com as especificações de projeto depende terminantemente da performance da máquina ferramenta, que por sua vez, apresenta desvios, e dependendo do grau dos mesmos, não será capaz de produzir peças com determinadas tolerâncias (SOUZA, 2000).

Alguns dos fatores que têm influência direta na conformidade geométrica das peças usinadas são mostrados na Figura 2.1.

Figura 2.1 – Fatores de influência direta na conformidade geométrica



Fonte: O autor, 2019.

2.2 COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO DAS MÁQUINAS FERRAMENTAS

Desde as últimas décadas do século XX, qualidade é sinônimo de competitividade entre as empresas, que têm que atender às exigências dos clientes,

com preços atrativos, baixos preços e possuir sistemas de fabricação versáteis, apresentando rapidez, exatidão, flexibilidade e confiabilidade (ECKHARDT et al., 2008; ORREGO, 2000).

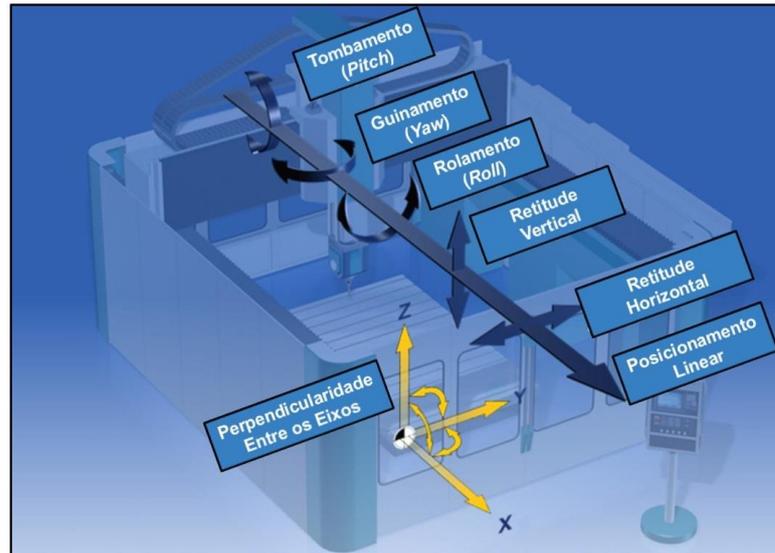
A partir da década de 70, com o desenvolvimento dos microprocessadores e da tecnologia de precisão (CAMPOS, 2010), o comando numérico tornou-se comando numérico computadorizado, onde a tecnologia da usinagem obteve um avanço expressivo no que se refere ao processo produtivo de um modo geral e na qualidade dos produtos acabados. Porém, o novo modelo de mercado tornou-se exigente, necessitando de peças de alta qualidade com as mais variadas geometrias e com tolerâncias dimensionais e geométricas cada vez mais estreitas (SOUZA, 2000). Diante do cenário atual, faz-se necessária uma observância no desempenho das máquinas ferramentas, que podem reproduzir desvios de forma e posição nas peças usinadas (SOUZA, 1998).

Para uma máquina ferramenta são consideradas três fontes principais de erros: erros provenientes de desvios geométricos, de efeitos térmicos e das cargas. (WECK, 1984; THEUWS, 1997; SOUZA, 2000; SCHWENKE et al., 2008; LEITE et al., 2011).

2.2.1 Erros Geométricos

Os erros geométricos estão presentes em todas as máquinas ferramentas, basicamente, como consequência das imperfeições dos componentes mecânicos e do desalinhamento dos elementos da máquina. Esses erros provocam erros de posição e orientação da ferramenta de corte em relação à peça de trabalho. Para cada eixo de uma máquina ferramenta existem 6 fontes de erros geométricos, sendo três de translação, onde um desses erros é de posição e os outros dois são de retitude, e três erros angulares conhecidos como rolamento (*roll*), tombamento (*pitch*) e guinamento (*yaw*). Ainda mais existem os erros de perpendicularidade entre os eixos. A Figura 2.2 apresenta o esquema de um centro de usinagem de três eixos, com indicação das principais componentes de erros presentes. Considerando uma máquina ferramenta que possui 3 eixos lineares e perpendiculares entre si, existirão 21 fontes erros geométricos (ORREGO, 2000; OKAFOR, 2000; FLORUSSEN et al., 2001; CAMARGO, 2004; SCHWENKE et al., 2008).

Figura 2.2 – Componentes de erros geométricos presentes em um centro de usinagem de 3 eixos



Fonte: Adaptado de API AUTOMATED PRECISION, 2018.

2.2.2 Erros Provenientes de Efeitos Térmicos

Em um processo de usinagem, até 75% dos erros de uma máquina ferramenta podem ser induzidos por efeitos térmicos, que por sua vez causam erros de posição relativa entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho, devido a expansões, contrações e deformações na estrutura da máquina ferramenta, resultantes de um gradiente de temperatura, prejudicando a qualidade da peça final. (WECK, 1984; TRAPET, 1991; OKAFOR, 2000; MAYR et al., 2012).

Os erros termicamente induzidos são provenientes de fatores externos e internos. Os fatores externos que têm influência direta no comportamento geométrico das máquinas ferramentas são basicamente:

- **Temperatura do ambiente:** pode sofrer variações pela temperatura externa, pelo calor gerado por outras máquinas ou equipamentos e pelas lâmpadas acesas no ambiente.
- **Memória térmica:** devido a uma mudança de ambiente, cada elemento necessita de um intervalo de tempo para se adequar às novas condições ambientais, uma vez que os elementos estruturais de uma máquina ferramenta e as peças a serem fabricadas normalmente são de materiais diferentes e possuem coeficientes de dilatação térmica diferentes.

Os fatores internos que têm influência direta no comportamento geométrico das máquinas ferramentas são basicamente:

- O calor gerado pelo atrito entre ferramenta de corte e a peça;
- O calor gerado pelo deslizamento de planos cristalográficos no mecanismo de formação do cavaco;
- O calor gerado por cavacos desprendidos da peça e depositados na estrutura da máquina;
- Fluido de corte aquecido pelo ciclo de trabalho;
- Mancais e rolamentos da máquina aquecidos pelo ciclo de trabalho;
- Fusos e guias da máquina aquecidos pelo ciclo de trabalho;
- Motores de acionamento da máquina;
- Aquecimento do sistema hidráulico da máquina.

Os fatores internos e externos agindo em conjunto, aliados à estrutura da máquina que envolve formas complexas e diferentes materiais, produzirão calor em diferentes intensidades, dificultando uma estabilidade térmica da mesma.

2.2.3 Erros Induzidos por Cargas

Durante um processo de usinagem, as principais cargas envolvidas são:

- Peso da peça;
- Peso dos elementos estruturais da máquina ferramenta;
- Forças dinâmicas e estáticas resultantes do processo de corte.

Essas cargas agindo em conjunto causam deformações elásticas na estrutura da máquina, influenciando diretamente na geometria e qualidade da peça final.

2.3 TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS

As tolerâncias geométricas abrangem os desvios aceitáveis nas formas e nas posições dos elementos que compõem a elaboração de uma peça.

Em geral, as peças não funcionam isoladamente, mas sim associadas a outras, estabelecendo conjuntos mecânicos que desempenham determinadas funções. Para isso é indispensável que funcionem convenientemente, conforme especificado em projeto (NETO, 2012).

Da mesma forma, caso seja necessário substituir uma das peças de um conjunto mecânico, é imprescindível que a substituta seja semelhante à substituída, garantindo a intercambiabilidade. No entanto, há imperfeições nas máquinas ferramentas, afetando as características das peças manufaturadas e impossibilitando a obtenção de características idênticas às ideais, fornecidas pelo projetista (SENAI, 2015).

Entretanto, certas variações nas características dos produtos, dentro de limites aceitáveis, não afetam sua funcionalidade. Esses desvios aceitáveis constituem a chamada tolerância. Objetos fabricados de acordo com as tolerâncias estabelecidas, podem não ser idênticos entre si, mas funcionam adequadamente quando trabalham em conjunto.

São basicamente três os tipos de tolerâncias existentes para fabricação de um produto: dimensional, geométrica e de acabamento superficial. A primeira refere-se aos desvios aceitáveis nas dimensões das peças, a segunda faz referência às variações permissíveis de forma e posição dos elementos que as compõem, enquanto que a terceira leva em consideração os desvios microgeométricos presentes na superfície.

A regulamentação das definições geométricas e os princípios gerais para indicação das tolerâncias de forma e posição se encontram na norma NBR 6409:1997, baseada na ISO 1101:1983, onde essa última foi atualizada e a versão mais recente é de 2017, além da ASME Y14.5: 2018 que trata do mesmo tema. Ainda há normatização acerca da execução de símbolos para tolerância geométrica, bem como suas dimensões e proporções através da ISO 7083:1983.

2.3.1 Classificação das Tolerâncias Geométricas

Conforme a ISO 1101:2017, as características toleradas são relacionadas quanto à forma, orientação, posição e batimento.

A tolerância de forma é a variação aceitável em relação a uma forma ideal, definida no projeto, podendo ser de:

- Retitude;
- Planeza;
- Circularidade;
- Cilindricidade;
- Perfil de linha qualquer;

- Perfil de superfície qualquer.

A tolerância de orientação faz referência ao desvio angular aceitável de um elemento geométrico da peça em relação à sua inclinação ideal, definida no projeto, podendo ser de:

- Paralelismo;
- Perpendicularidade;
- Inclinação.

A tolerância de posição faz referência ao desvio aceitável de localização de um elemento geométrico da peça em relação à sua localização ideal, definida no projeto, podendo ser de:

- Concentricidade;
- Coaxialidade;
- Simetria;
- Posição.

A tolerância de batimento faz referência aos desvios conjuntos aceitáveis de forma e posição, em relação ao eixo de simetria da peça, quando submetida à rotação. Esta é definida em projeto, podendo ser:

- Circular;
- Total.

Quanto à direção, pode ser classificada como: axial, radial, especificada ou qualquer.

2.3.2 Símbolos Indicativos das Tolerâncias Geométricas

Para cada tipo de tolerância geométrica se utiliza um símbolo padronizado conforme estabelece a ISO 7083:1983.

A Tabela 1 apresenta os símbolos para as características geométricas toleradas, conforme consta na ISO 1101: 2017.

Tabela 1 – Símbolos para as características geométricas toleradas

Especificação	Características	Símbolo
Forma	Retitude	
	Planeza	
	Circularidade	
	Cilindricidade	
	Perfil de linha qualquer	
	Perfil de superfície qualquer	
Orientação	Paralelismo	
	Perpendicularidade	
	Angularidade	
	Perfil de linha qualquer	
	Perfil de superfície qualquer	
	Posição	Posição
Concentricidade (para pontos centrais)		
Coaxialidade (para linhas medianas)		
Simetria		
Perfil de linha qualquer		
Perfil de superfície qualquer		
Batimento	Desvio circular	
	Desvio total	

Fonte: O autor, 2019.

2.4 ENSAIOS GEOMÉTRICOS

Os ensaios geométricos são imprescindíveis para empresas que trabalham focadas na qualidade, pois fornecem dados qualitativos e quantitativos acerca do comportamento geométrico da máquina ferramenta, sendo um diferencial frente aos clientes e concorrentes. A partir dos dados obtidos após a realização do ensaio, é possível adotar medidas preventivas e corretivas sobre a máquina e/ou processo de fabricação, objetivando reduzir possíveis desvios geométricos e dimensionais, garantindo a confiabilidade metrológica das peças fabricadas, e, conseqüentemente, diminuindo o percentual de refugos e retrabalhos (SCHWENKE et al., 2008; XIA 2019).

Os métodos de realização dos ensaios geométricos atuais são classificados como “métodos de verificação” e “métodos de qualificação” (TRAPET, 1991; ZHONG

et al., 2019; IBARAKI, 2019). Os métodos de verificação fornecem uma avaliação geral acerca do estado da máquina, sendo de aplicação rápida e fácil, envolvendo equipamentos de baixo custo. Alguns dos exemplos de métodos de verificação são: *grid encoder*, peça padrão usinada e *ball bar*.

Os métodos de qualificação fornecem dados bastante confiáveis e completos acerca do estado da máquina, mas apresentam dificuldade de aplicação, envolvendo pessoal altamente qualificado, tempos longos para realização do ensaio e alto custo dos equipamentos (DI GIACOMO, 1986; SOUZA, 2000; ECKHARDT et al., 2008). Alguns dos exemplos de métodos de qualificação são: *laser interferométrico* e réguas/esquadros e comparador.

Apesar dos ensaios geométricos possuírem grande destaque no que se refere a controle de qualidade e baixa incerteza de medição, ainda são pouco utilizados nas empresas de um modo geral, pois em algumas situações, se faz necessária a aplicação de vários métodos diferentes de ensaios em uma mesma máquina para se obter dados acerca das diferentes componentes de erro. Tudo isso desmotiva os usuários à realização de tal prática (SOUZA, 2000).

Em face às dificuldades encontradas, à utilização dos ensaios geométricos atuais, procura-se desenvolver novas técnicas que demandem baixo custo, rapidez e facilidade operacional e que possuam baixa incerteza de medição, alinhada a uma alta exatidão, garantindo a confiabilidade metrológica.

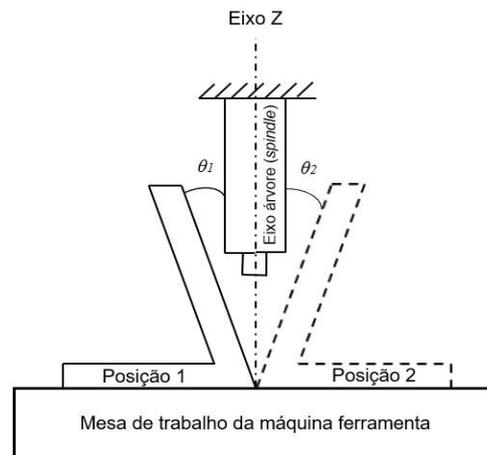
Com a utilização dos ensaios geométricos de forma sistemática e periódica, além da contribuição no controle de qualidade, obtém-se informações importantes acerca do estado da máquina, tais como: exatidão, capacidade de processo e, a partir dos dados obtidos, se necessário, podem ser realizadas compensações dimensionais no corretor do CNC. O ensaio pode ser realizado no próprio chão de fábrica, com redução de refugos e com isso menores perdas de tempo e material, garantindo a qualidade do produto e a minimização dos custos relacionados às perdas da não qualidade.

A seguir serão apresentados alguns dos principais métodos de realização de ensaios geométricos em máquinas ferramentas.

2.4.1 Reversão do esquadro mecânico

Utilizado para verificação de erros de perpendicularidade em máquinas que permitem a instalação de cabeçote apalpador, este método é representado na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Método da Reversão do Esquadro Mecânico



Fonte: O autor, 2014.

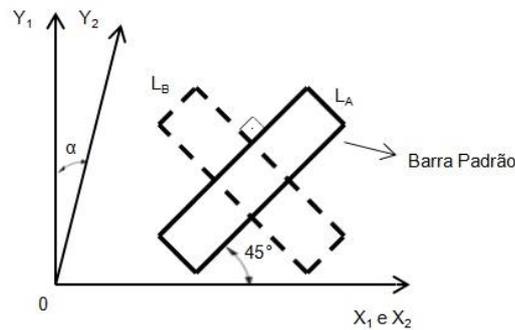
Esse procedimento consiste em apoiar uma das faces de um esquadro mecânico em L sobre uma mesa de trabalho da máquina ferramenta para que seja realizada a medição de uma aresta vertical localizada no eixo Z, a 90° do plano da base, e em seguida verifica-se o desvio θ_1 em graus, entre o eixo Z e a aresta medida. Posteriormente, gira-se o esquadro em 180° sobre o plano da mesa e mede-se novamente uma aresta vertical para verificação do desvio θ_2 em graus, em relação ao eixo Z. Através da equação (2.1) obtém-se o valor do erro de perpendicularidade α em graus.

$$\alpha = (\theta_1 - \theta_2) \text{ [graus]} \quad (2.1)$$

2.4.2 Medição das diagonais cruzadas

Utilizado para verificação de erros de perpendicularidade em máquinas que permitem instalação de cabeçote de medição, este método é representado na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Método das Diagonais Cruzadas



Fonte: O autor, 2014.

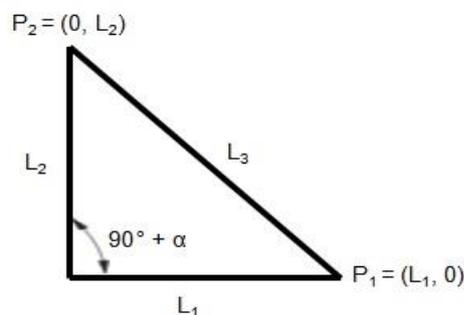
Consiste em medir uma peça padrão de comprimento L , em duas posições ortogonais entre si, no plano de uma mesa de trabalho da máquina ferramenta (plano XY). Na primeira posição a peça padrão é colocada a 45° no plano da mesa e é medido um comprimento L_A , e na segunda posição a peça é colocada a 90° em relação à primeira posição e é medido um novo comprimento L_B . Através da equação (2.2) obtém-se o valor do erro de perpendicularidade α em radianos.

$$\alpha = \frac{2(L_B - L_A)}{L_A + L_B} \text{radianos} \quad (2.2)$$

2.4.3 Lei dos cossenos

Utilizado para verificação de erros de perpendicularidade, em máquinas que permitem instalação de cabeçote de medição, este método é representado na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Método da Lei dos Cossenos



Fonte: O autor, 2014.

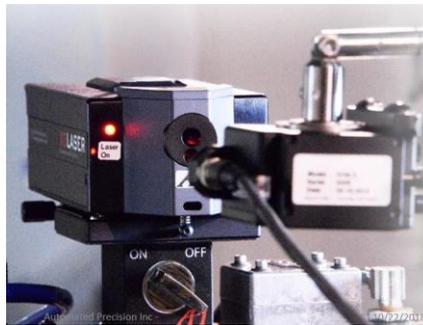
Consiste em medir os lados de um triângulo L_1 , L_2 e L_3 , com auxílio de um transdutor de frequência, e através da equação (2.3) obtém-se o valor do erro de perpendicularidade α em radianos.

$$\alpha = \frac{L_3^2 - L_1^2 - L_2^2}{2 \cdot L_1 \cdot L_2} \text{radianos} \quad (2.3)$$

2.4.4 Laser interferométrico

No método de ensaio com *laser* interferométrico, utiliza-se um interferômetro a *laser* para determinar a trajetória de um refletor preso à estrutura da máquina em relação a um divisor de feixe fixo. A Figura 2.6 ilustra a utilização do *laser* interferométrico para verificação de posicionamento.

Figura 2.6 – Laser Interferométrico para verificação de posicionamento



Fonte: API AUTOMATED PRECISION, 2018.

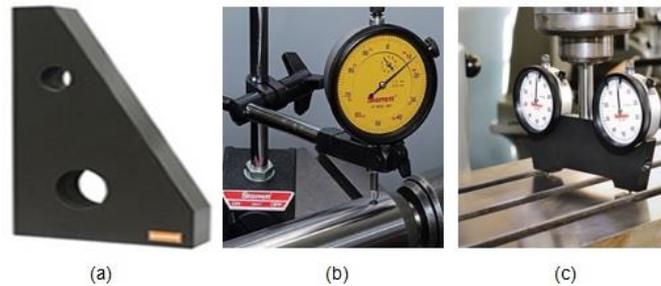
Este método apresenta baixa incerteza de medição e pode ser utilizado em grandes faixas de medição (FARAGO, 1994; SOUZA, 2000; CAMARGO, 2004). É o método mais empregado para realização de ensaios de histerese, posicionamento, retitude, erros de rotação e perpendicularidade em máquinas ferramentas.

Apesar dos benefícios apresentados por esse método, algumas das grandes limitações são a utilização de equipamentos de alto custo, necessidade de pessoal capacitado e de ser um ensaio demorado com custo elevado.

2.4.5 Esquadro e relógio comparador

No método de ensaio com esquadro e relógio comparador, ilustrados na Figura 2.7, coloca-se o padrão na área de trabalho da máquina ferramenta, e posteriormente toca-o com um relógio comparador à medida que a mesa móvel se desloca ao longo do eixo da máquina.

Figura 2.7 – (a) Esquadro, (b) e (c) relógio comparador



Fonte: O autor, 2014.

São métodos bastante utilizados para realização de ensaios de perpendicularidade e retitude, com instrumentação de baixo custo, operação simples e rápida, com fornecimento de dados confiáveis (WECK, 1984; FARAGO, 1994; SOUZA, 2000).

Uma das grandes limitações deste método, é que o padrão tem de ser proporcional à área de trabalho e, para máquinas ferramentas de grande porte, isto representa uma grande dificuldade.

2.4.6 Peças padrão usinadas

No método de ensaio com peças padrão usinadas, mede-se, normalmente em uma máquina de medição por coordenadas, peças padronizadas ou fabricadas em série, usinadas em condições de acabamento, conforme tipos (a) e (b) apresentados na Figura 2.8.

Figura 2.8 – Peças padrão usinadas



Fonte: O autor, 2019.

De acordo com os resultados obtidos, faz-se uma comparação entre as dimensões da peça real e as especificações de projeto, e dessa forma pode-se avaliar a exatidão de trabalho da máquina e obter informações acerca dos erros,

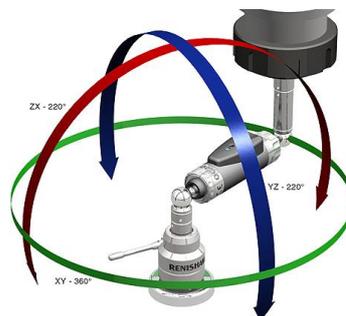
tanto dimensionais quanto geométricos. É um método rápido, de baixo custo e que pode ser utilizado para verificação de erros provenientes da máquina ferramenta (TRAPET, 1991; SOUZA, 2000, SAIKAEW, 2018).

Apesar dos benefícios apresentados por esse método, os resultados obtidos têm pouca utilidade para correção de erros no CNC, pois a separação das diversas fontes de erros da máquina é difícil, uma vez que sofre influência de diversas variáveis tais como temperatura, desgaste da ferramenta e esforços de corte por exemplo, porém servem como indicador acerca da conformidade geométrica e dimensional da máquina.

2.4.7 *Ball bar*

No método de ensaio com *ball bar*, ilustrado na Figura 2.9, utiliza-se um transdutor de deslocamento para medir os desvios radiais gerados quando a máquina realiza uma trajetória de interpolação circular.

Figura 2.9 – Ensaio de interpolação circular com *ball bar*



Fonte: RENISHAW, 2019.

É um método rápido, de fácil execução e pode ser utilizado para determinar erros do sistema de acionamento e de controle da máquina (PAHK, 1997; SOUZA, 2000; FLORUSSEN et al., 2001, RENISHAW, 2019).

Apesar dos benefícios apresentados por esse método, algumas das principais limitações são: a dificuldade na separação das diversas fontes de erros da máquina, limitação a trajetórias circulares, área de teste reduzida.

2.4.8 *Grid encoder*

No método de ensaio com *grid encoder*, ilustrado na Figura 2.10, utiliza-se uma placa fotossensível para medir a trajetória de um emissor de luz acoplado ao porta-ferramenta da máquina.

Figura 2.10 – Ensaio geométrico de trajetória com *grid encoder*



Fonte: HEIDENHAIN, 2019.

De acordo com os resultados obtidos, faz-se uma comparação visual entre as trajetórias programada e realizada. É um método que apresenta preparação e execução bastante rápidas, e é muito eficiente na avaliação de desempenho dinâmico da máquina (SOUZA, 2000; HEIDENHAIN, 2019).

Apesar dos benefícios apresentados por esse método, sua aplicação é dificultada em máquinas de grande porte porque o sistema avalia o desempenho da máquina em uma região limitada.

2.5 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (MMC)

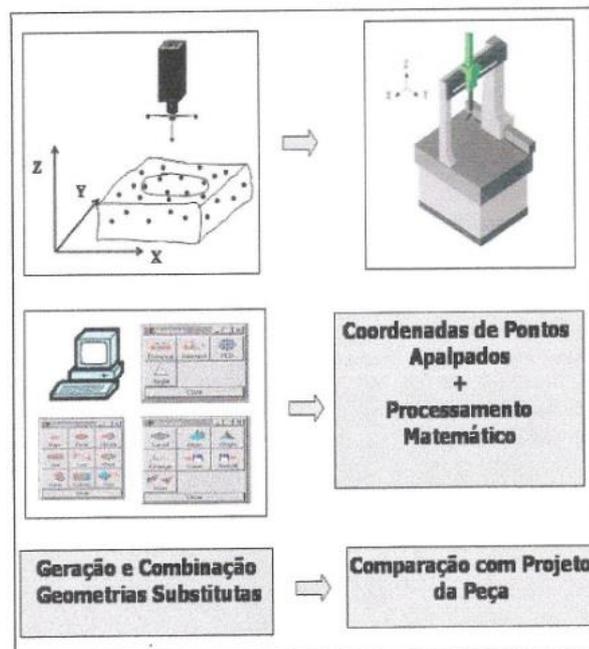
No cenário atual, qualidade é sinônimo de sobrevivência para as empresas de um modo geral, tendo as mesmas que se adequarem às normas de qualidade e atenderem às exigências de tolerâncias geométricas e dimensionais das peças fabricadas. Com isso, o mercado de medição de peças através de Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC) vem apresentando uma crescente demanda como instrumento essencial no controle de qualidade de produtos produzidos com tolerâncias geométricas e dimensionais cada vez mais estreitas e geometrias cada vez mais complexas (MAAS, 2001; VIEIRA, 2009). Por conta da sua capacidade de execução e confiabilidade metrológica, podem ser utilizadas na avaliação de peças padrão usinadas, a fim de mensurar os erros provenientes das máquinas ferramentas.

2.5.1 Princípio de medição por coordenadas

Com a tecnologia de medição por coordenadas, através da aquisição das coordenadas de pontos sobre a peça medida e um processamento matemático acerca dos valores obtidos, obtém-se dados referentes à chamada geometria

substituta, que é a geometria real da peça em função dos pontos medidos (ROLIM, 2003). Para determinar parâmetros dimensionais acerca de elementos de peças, o método de medição por coordenadas utiliza um conjunto de técnicas que efetua a aquisição das coordenadas (x_i, y_i, z_i) de pontos sobre a superfície medida e executa um processamento matemático, com auxílio de um software que possui algoritmos matemáticos específicos, a fim de ajustar os pontos coordenados às geometrias substitutas que modelam a peça a ser medida, sucedendo em medições de cones, esferas, ângulos, diâmetros, planos etc. Para obtenção das geometrias substitutas através dos pontos coordenados, utiliza-se na grande maioria dos casos, o método dos mínimos quadrados. Por conseguinte, é realizada uma comparação dos dados das geometrias substitutas com as dimensões e tolerâncias do projeto da peça. A Figura 2.11 ilustra o princípio da medição por coordenadas.

Figura 2.11 – Representação do princípio de medição por coordenadas



Fonte: ROLIM, 2003, 2018.

2.6 A NBR NM-ISO 10791-7: 1999 – CONDIÇÕES DE ENSAIO PARA CENTROS DE USINAGEM – PARTE 7: EXATIDÃO DA PEÇA-TESTE ACABADA

A presente norma, tomando como referência a NM-ISO 230-1: 1999, especifica um conjunto de ensaios de usinagem, sob condições de acabamento de peças-teste padronizadas, tanto em geometria quanto dimensões, fornecendo

indicações de parâmetros de corte, direções dos movimentos e diretrizes para realização dos testes, com o objetivo de fornecer requisitos necessários para a avaliação da exatidão de corte da máquina (NBR NM-ISO 10791-7: 1999).

Esta norma especifica dois tipos de peças para realização dos ensaios, a do tipo A, utilizada para verificação de contornos e posicionamentos, e a do tipo B, utilizada para verificação de planeza.

Na Figura 2.12 é apresentado um trecho da norma, onde contém uma tabela com os parâmetros tolerados da peça-teste tipo A com as respectivas tolerâncias.

Figura 2.12 – Tabela com parâmetros tolerados da peça-teste tipo A

Assunto	Tolerâncias Medida nominal <i>l</i>		Instrumentos de medição
	320	160	
	Dimensões em milímetros		
Furo central			
a) Cilindricidade	0,015	0,010	MMC ¹⁾
b) Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A	0,015	0,010	MMC
Quadrado			
c) Retitude dos lados	0,015	0,010	MMC ou régua e relógio comparador
d) Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação a base B	0,020	0,010	MMC ou esquadro e relógio comparador
e) Paralelismo do lado oposto à base B	0,020	0,010	MMC ou calibrador de altura e relógio comparador
Quadrado inclinado			
f) Retitude dos lados	0,015	0,010	MMC ou régua e relógio comparador
g) Exatidão dos ângulos de 75° em relação a base B	0,020	0,010	MMC ou régua de seno e relógio comparador
Círculo			
h) Circularidade	0,020	0,015	MMC ou relógio comparador ou instrumento de medição de circularidade
i) Concentricidade do círculo externo e o furo mandrilado C	0,025	0,025	MMC ou relógio comparador ou instrumento de medição de circularidade
FACES INCLINADAS			
j) Retitude das faces	0,015	0,010	MMC ou régua e relógio comparador
k) Exatidão dos ângulos em relação à base B	0,020	0,010	MMC ou régua de seno e relógio comparador
Furos mandrilados			
n) Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C	0,05	0,05	MMC
o) Concentricidade do furo interno com o furo externo D	0,02	0,02	MMC ou relógio comparador ou instrumento de medição de circularidade
¹⁾ Máquina de medição por coordenadas.			
NOTAS			
1 Se possível, utilize uma máquina de medição de coordenadas (MMC) para fazer as medições especificadas.			
2 Para os lados retos (do quadrado, quadrado inclinado e faces inclinadas), toque a superfície de medição com o apalpador, no mínimo em dez pontos, a fim de obter os desvios de retitude, perpendicularidade e paralelismo.			
3 Para o ensaio de circularidade (ou cilindridade), se a medição não é contínua, verificar no mínimo em quinze pontos (para cilindridade, em cada plano de medição). Para circularidade, recomendam-se medidas contínuas sem filtro.			

2.7 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Em processos manufatureiros, a qualidade dos produtos é avaliada por resultados que são estimativas resultantes de medições (VIM, 2012). Isso se dá basicamente em função dos 5 M's que causam influência direta no resultado da medição, conforme mostrado na Figura 2.13.

Figura 2.13 – Variáveis de influência no resultado de medição



Fonte: O autor, 2019.

Devido às diversas variáveis de influência no resultado de uma medição, é fundamental haver um intervalo em torno do mesmo, que abranja, com uma probabilidade específica, os valores a serem atribuídos ao mensurando (OLIVEIRA, 2009). Esse intervalo é chamado de incerteza de medição e define-se como o parâmetro associado ao resultado de uma medição, caracterizado pela dispersão dos valores que podem ser atribuídos a um mensurando (VIM, 2012).

A incerteza de medição é considerada como uma indicação quantitativa da variabilidade analítica de um resultado, demonstrando a qualidade do resultado obtido acerca de um determinado mensurando, além de permitir avaliar a confiabilidade dos dados medidos (NETO, 2012). É um valor originário da combinação de várias componentes que podem ser estimadas, tomando como base a distribuição estatística dos resultados de séries de medições, definido pelo desvio padrão experimental da média (incerteza tipo A) e por distribuições de probabilidades consideradas para outras fontes (incertezas tipo B), que por sua vez dependem de informações e experiências adquiridas (OLIVEIRA, 2009).

A metodologia para expressão da incerteza de medição é padronizada e consta no “Guia para Expressão da Incerteza de Medição – Avaliação de dados de Medição” (ISO GUM 2008).

2.8 CRITÉRIO DE ACEITAÇÃO DE UM RESULTADO

Não é incomum que uma série de medições ao ser analisada apresente alguns dados que pareçam estar errados por serem valores discrepantes em relação aos demais. São várias as causas que podem ocasionar tais fatos, como por exemplo: anotação errônea, avaliação incorreta da indicação, mau posicionamento do mensurando, força excessiva de apalpação, instabilidade das condições ambientais e etc. A princípio, tais valores deveriam ser excluídos da amostra. Por outro lado, precisam ser avaliados de forma criteriosa para se ter certeza de sua não permanência. Um teste matemático muito utilizado para decidir acerca do rechaço de dados é o “Teste de *Chauvenet*”, onde estabelece que uma medida x_i deve ser rejeitada se o valor de r , calculado através da equação 2.4, for maior do que o índice de rejeição de *Chauvenet* (R_C) que é função do número de medições n , e é apresentado na Tabela 2 (LINK, 2000).

$$r = \frac{|x_i - \bar{x}|}{S(x_i)} \quad (2.4)$$

Onde,

x_i = i-ésimo valor individual da medição

\bar{x} = Média aritmética amostral de n medições

$S(x_i)$ = Desvio padrão amostral

Tabela 2 – Valor de R_C em função do número de medições n (LINK, 2000)

n	2	3	4	5	6	7	10	15	25	50	100
R_C	1,15	1,38	1,54	1,65	1,73	1,80	1,96	2,13	2,33	2,57	2,81

Fonte: O autor, 2019.

Se forem detectados valores a serem excluídos (*outliers*), a média, o desvio padrão e a incerteza de medição devem ser recalculadas para a nova amostra.

3 ESTUDOS DE CAMPO

Foram realizadas viagens e visitas técnicas para acompanhar a realização de ensaios geométricos em máquinas ferramentas, com o intuito de obter informações acerca dos métodos atuais de avaliação dos erros, tomando conhecimento do estado da arte relativo a esse tema. Os locais visitados foram: *API Automated Precision* – São José dos Campos – SP; Empresa Metalúrgica e Fabricante de Máquinas Ferramenta, ambas localizadas no estado de São Paulo e Empresa Metalúrgica localizada no estado de Pernambuco.

3.1 VISITA À API AUTOMATED PRECISION

A *API Automated Precision* é uma empresa multinacional com filiais ao redor do mundo e sede nos Estados Unidos, atuando no ramo da metrologia tridimensional, onde oferece produtos e serviços em diversas áreas, tais como: *3D laser scanning*, calibração de robôs, calibração e certificação de *Laser Tracker*, engenharia reversa, inspeção e alinhamento, medição e planejamento, mapeamento de erros de máquinas ferramentas e treinamentos.

Foi realizada uma visita técnica às dependências de uma de suas filiais, localizada em São José dos Campos – SP, sendo possível conhecer de perto algumas das tecnologias mais avançadas para diagnóstico de máquinas, principalmente as que utilizam interferometria à laser. Também foi possível acompanhar a realização de ensaios geométricos em um centro de usinagem, pertencente à uma empresa cliente da *API Automated Precision*, onde foram utilizados os seguintes equipamentos: *Laser interferométrico XD – SN 4883*, *Spindle Analyser* e *Swivelcheck – SN 9503*.

3.2 VISITA À EMPRESA METALÚRGICA LOCALIZADA NO ESTADO DE SÃO PAULO

Trata-se de uma empresa nacional, localizada no estado de São Paulo, atuando no ramo da usinagem, onde dispõe de máquinas ferramentas de usinagem para fabricação e industrialização de peças e montagem de subconjuntos para os mais diversos segmentos, tais como: automobilístico, telecomunicações, automação industrial, aviação, mercado de reposição, energia, agrícola dentre outros. A Figura 3.1 expõe uma vista panorâmica de parte das dependências da referida empresa.

Figura 3.1 - Vista panorâmica de parte da empresa localizada em Sorocaba – SP



Fonte: O autor, 2017.

Na ocasião da visita, foram realizados ensaios geométricos em um centro de usinagem ROMI D800 com quatro (04) eixos.

Foi utilizado o *XD LASER – SN 4883*, para avaliação de erros lineares dos eixos X, Y e Z, e esquadro dos eixos X-Y e Y-Z. Na Figura 3.2 está sendo apresentada a utilização desse equipamento para avaliação dos erros no eixo X da máquina.

Figura 3.2 – *XD LASER – SN 4883* sendo utilizado no eixo X da máquina



Fonte: O autor, 2017.

Utilizando o *SPINDLE ANALYSER*, realizou-se avaliação de possíveis batimentos radiais e axiais no *spindle* da máquina. Na Figura 3.3 está sendo exibida a utilização deste equipamento no centro de usinagem analisado.

Figura 3.3 – Utilização do *SPINDLE ANALYSER* para avaliação de batimentos radial e axial no *spindle* da máquina



Fonte: O autor, 2017.

Com o *Swivelcheck – SN 9503*, verificou-se posicionamento angular no quarto eixo da referida máquina conforme apresentado na Figura 3.4

Figura 3.4 – Utilização do *Swivelcheck – SN 9503* para verificação de posicionamento angular do quarto eixo



Fonte: O autor, 2017.

Através deste estudo de campo foi possível acompanhar a execução de alguns dos ensaios geométricos mais modernos e que são utilizados ao redor do mundo por usuários e fabricantes de máquinas ferramentas. Na oportunidade, houve acompanhamentos de montagem dos equipamentos, realização de testes e medições, elaboração e interpretação de relatórios. Com isso, foram adquiridas experiências enriquecedoras para a elaboração do presente trabalho de pesquisa.

3.3 VISITA À EMPRESA FABRICANTE DE MÁQUINAS FERRAMENTAS LOCALIZADA NO ESTADO DE SÃO PAULO

A empresa fabricante de máquinas ferramentas é uma multinacional, localizada no estado de São Paulo, atuando no ramo fabril de máquinas ferramentas de usinagem, em especial centros de torneamento, tornos CNC, tornos convencionais, centros de usinagem e mandrilhadoras, cujos produtos e serviços são consumidos nos mercados nacional e internacional, atendendo aos mais variados setores industriais, como automobilístico, aeronáutico, defesa, agrícola, máquinas e equipamentos industriais e bens de consumo em geral.

Apesar de terem sido visitados vários setores do polo industrial, o de maior importância foi o de montagem e controle de qualidade de centros de usinagem, sendo possível conhecer toda a cadeia produtiva, desde montagens iniciais dos componentes mecânicos, até testes finais com as máquinas em funcionamento. A Figura 3.5 mostra imagens da visita às dependências da empresa fabricante de máquinas ferramentas.

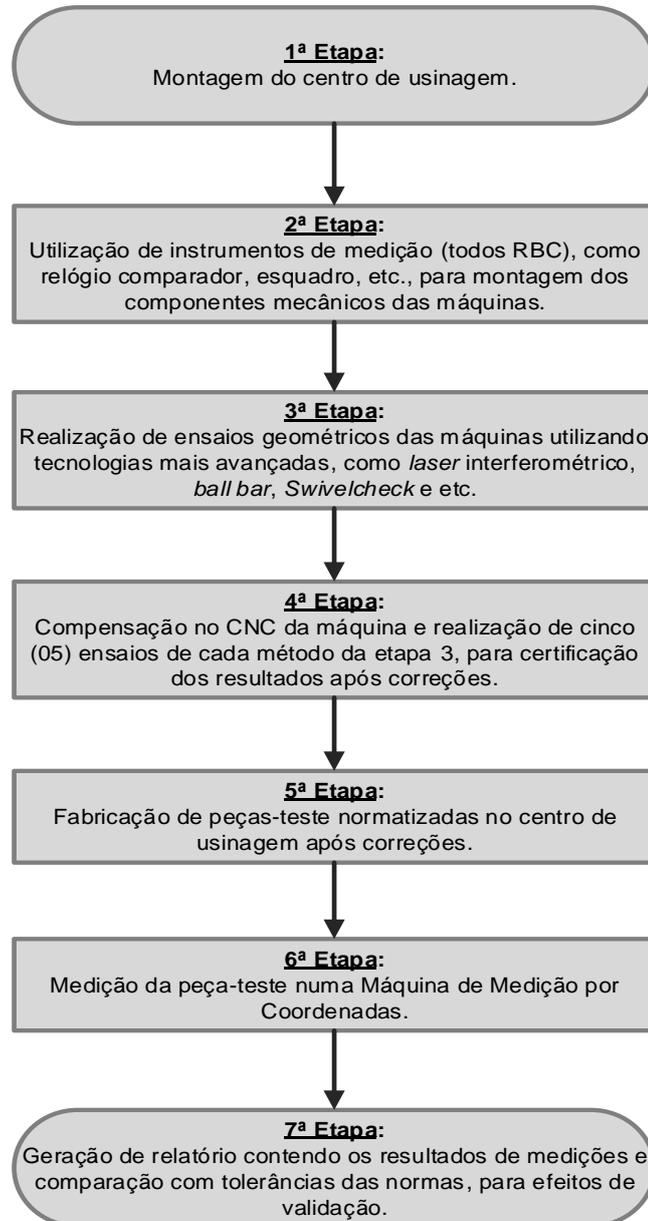
Figura 3.5 – Imagens da visita às dependências da empresa fabricante de máquinas ferramentas



Fonte: O autor, 2017.

Dentre as várias informações obtidas, uma de suma importância foi a sequência de tarefas que são realizadas junto ao setor responsável pelo controle de qualidade durante a manufatura dos centros de usinagem. A Figura 3.6 apresenta de forma sequencial essas etapas realizadas pela empresa fabricante.

Figura 3.6 – Sequência de atividades realizada pelo controle de qualidade da empresa fabricante durante a manufatura de centros de usinagem



Fonte: O autor, 2017.

3.4 VISITA À EMPRESA METALÚRGICA LOCALIZADA NO ESTADO DE PERNAMBUCO

A referida empresa é uma multinacional com filial no estado de Pernambuco, atuando no ramo fabril de peças automotivas, onde dispõe de várias máquinas ferramentas de usinagem em seu processo produtivo. Na ocasião, a empresa *API Automated Precision* realizou uma demonstração prática de ensaios geométricos em

um centro de usinagem, apresentando dois (02) dos seus produtos, o *XD LASER* e o *SPINDLE ANALYSER*.

Devido ao caráter apenas demonstrativo, não foi gerado relatório dos ensaios, e sim apresentação dos resultados durante os procedimentos, a fim de evidenciar a importância dos testes realizados de acordo com as respostas obtidas acerca do estado da máquina.

Os conhecimentos adquiridos durante o período de visitas, contribuíram de forma significativa para embasar os estudos que foram realizados no presente trabalho de pesquisa, bem como esclarecer a relevância do tema para a indústria moderna, que busca processos produtivos mais confiáveis e focados em qualidade.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo está subdividido nos seguintes tópicos:

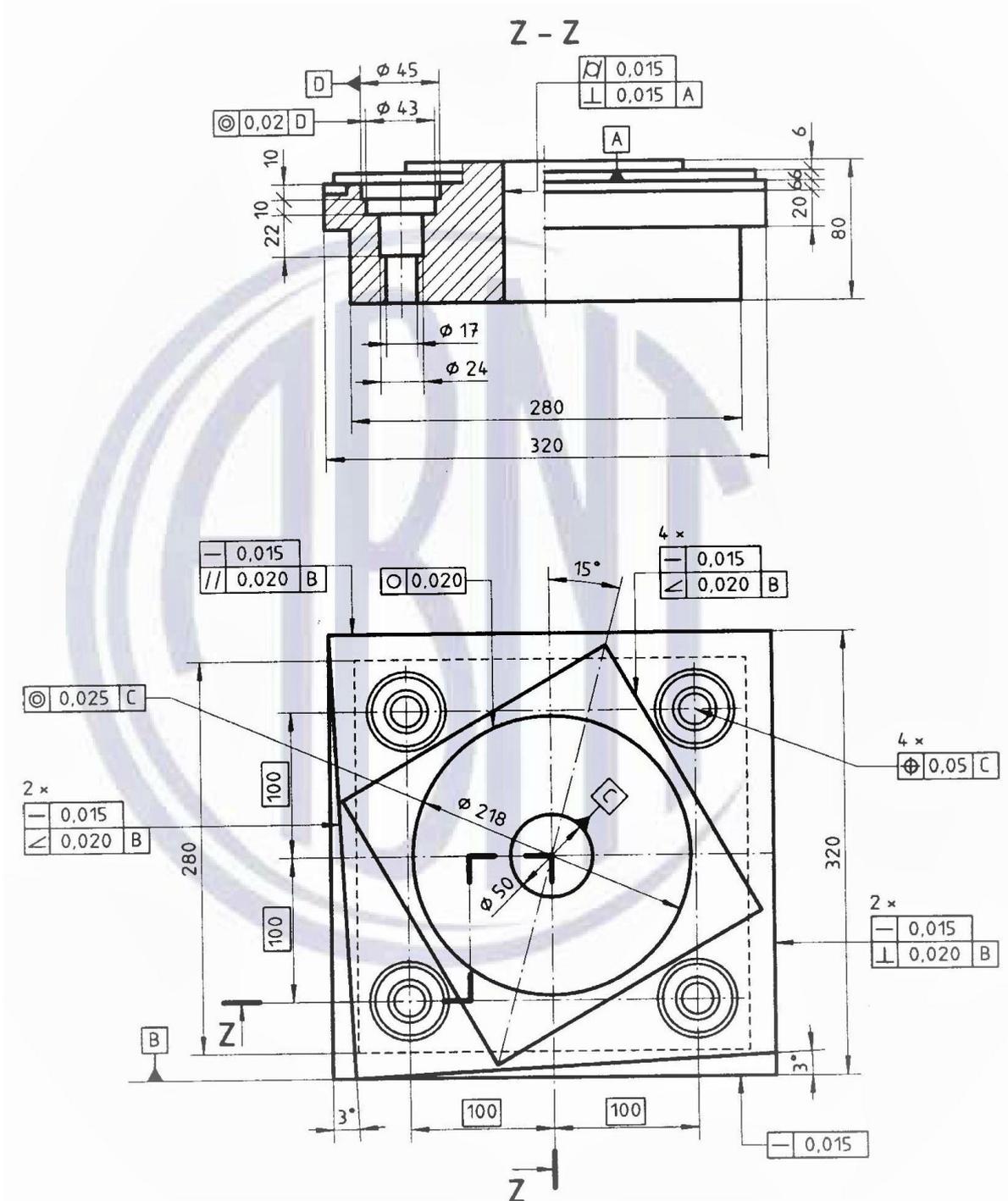
- Preparação da matéria-prima para fabricação das peças-teste conforme NBR NM ISO 10791-7:1999;
- Dados dos centros de usinagem, ferramentas e parâmetros de corte;
- Fabricação das peças-teste conforme NBR NM ISO 10791-7:1999;
- Fabricação de modelo da peça-teste através de manufatura aditiva;
- Medição das peças na MMC;
- Estimativa de custos
- Desenvolvimento de software computacional.

Os procedimentos experimentais foram realizados no LABMEC do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE, e em três empresas, localizadas na região metropolitana da cidade do Recife - PE.

4.1 PREPARAÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA PARA FABRICAÇÃO DAS PEÇAS-TESTE CONFORME NBR NM-ISO 10791-7: 1999

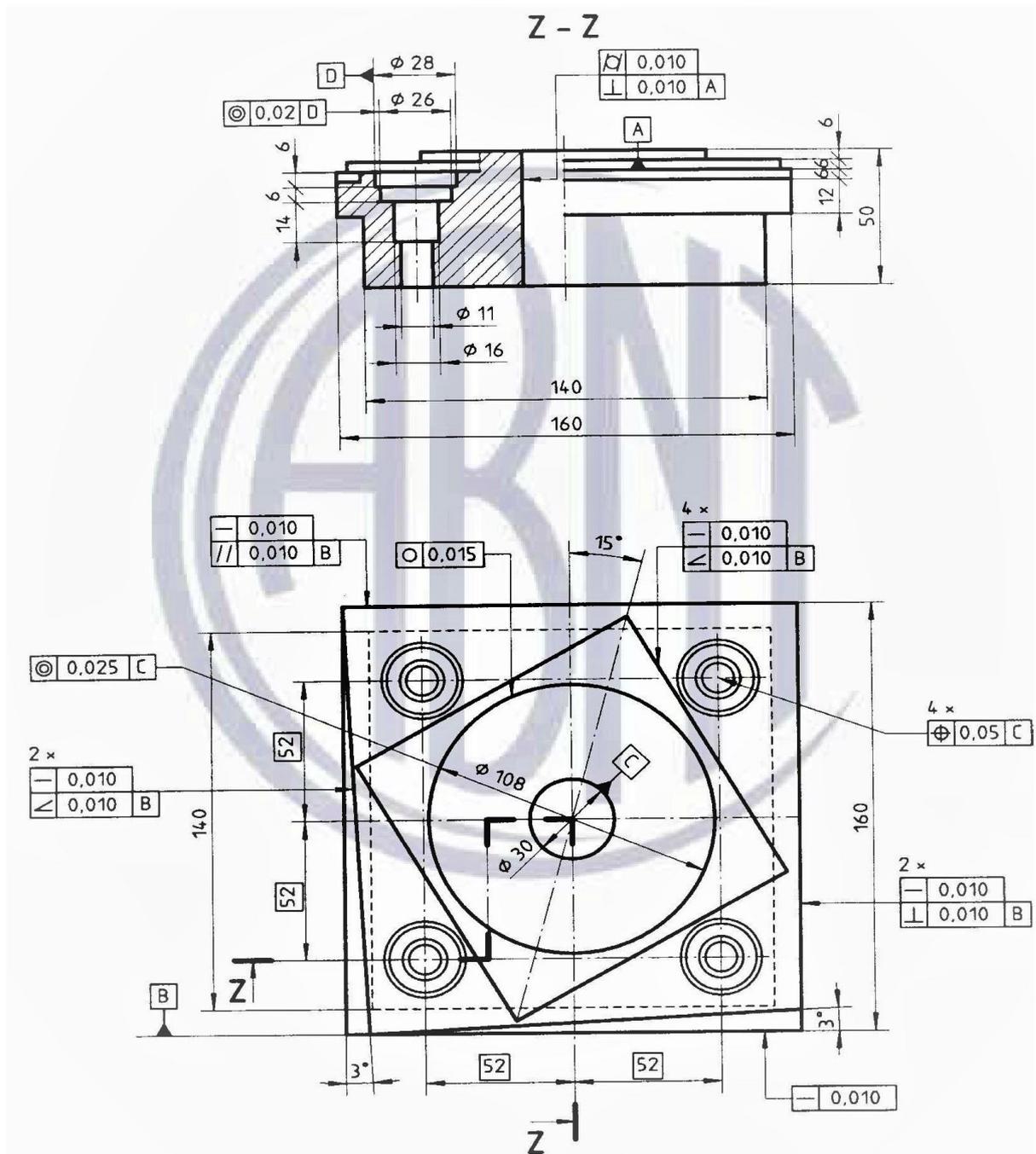
A NBR NM-ISO 10791-7: 1999, estabelece dois tipos de peça-teste para avaliação de centros de usinagem, sendo o Tipo A para posicionamento e contorno, com tamanhos nominais de 160 mm e 320 mm, respectivamente (também chamadas de peça-teste pequena e peça-teste grande) e Tipo B para faceamento, com tamanhos nominais de 80 mm e 160 mm, respectivamente. As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam os desenhos das peças-testes tipo A.

Figura 4.1 – Peça-teste Tipo A grande para ensaio de contorno e posicionamento



Fonte: ABNT, 2017.

Figura 4.2 – Peça-teste Tipo A pequena para ensaio de contorno e posicionamento

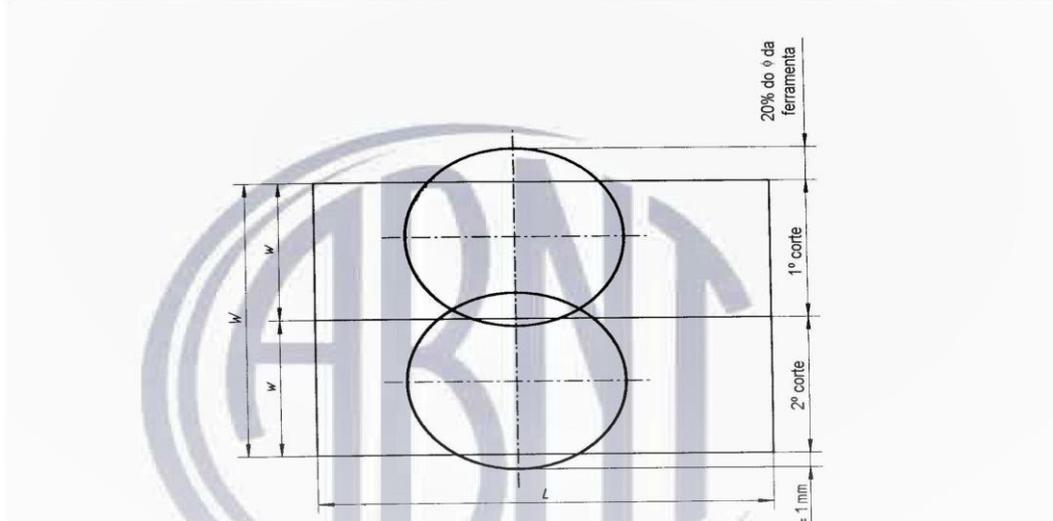


Fonte: ABNT, 2017.

A Figura 4.3 apresenta um trecho da NBR NM-ISO 10791-7: 1999, contendo uma tabela com as respectivas cotas e o desenho da peça-teste tipo B.

Figura 4.3 – Tabela contendo as respectivas cotas e desenho da peça-teste Tipo B para ensaio de faceamento

Largura da face W Mm	Comprimento da face L mm	Largura de corte W mm	Diâmetro da ferramenta de corte mm	Número de arestas
80	100 a 130	40	50	4
160	200 a 250	80	100	8



Fonte: ABNT, 2017.

A depender das dimensões da peça-teste escolhida, são consideradas para efeito de avaliação, faixas toleradas específicas. Ambas (Tipo A e Tipo B), podem ser fabricadas em alumínio ou ferro fundido cinzento conforme indicado na norma.

No presente estudo foi estabelecido que seriam fabricadas 06 (seis) peças-teste do Tipo A pequena (tamanho nominal de 160 mm) em ferro fundido cinzento, sendo 02 (duas) no centro de usinagem de cada empresa, de modo a realizar testes em cada um deles. Uma das máquinas é oriunda de uma instituição de ensino e as demais de duas empresas metalúrgicas, ambas pertencentes a região metropolitana da cidade do Recife. Nesse caso, foram denominadas genericamente de empresas A, B e C, respectivamente, apenas a título de identificação. O usuário da metodologia necessitará fabricar apenas uma peça-teste para realizar a verificação da máquina, porém, tratando-se de um trabalho de pesquisa, optou-se por uma extrapolação do número de amostras por equipamento, com o intuito de se obter maior confiabilidade dos resultados.

Como a do Tipo B é utilizada apenas para avaliação de planeza, foi determinado que esse parâmetro não seria medido, uma vez que os resultados das medições têm por objetivo a validação do programa computacional desenvolvido

neste trabalho, e com a do Tipo A já é possível atender os objetivos de programação. Porém, o *software* também será capaz de avaliar o parâmetro planeza nas peças usinadas.

A matéria prima utilizada foi um tarugo de ferro fundido cinzento de seção circular com diâmetro nominal de 215,9 mm e comprimento de aproximadamente 480 mm. Esse material foi seccionado em 06 (seis) partes iguais com comprimento próximo de 80 mm, e em cada parte foram realizadas operações de faceamento, torneamento cilíndrico externo e fresamento, de modo a deixá-las no formato de quadrilátero, conforme apresentado na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Matéria-prima após etapa de preparação



Fonte: O autor, 2017.

Todas as peças foram preparadas de modo a garantir a existência de sobremetal, para serem removidos a posteriori nos centros de usinagem, de modo a garantir forma, dimensão e acabamento conforme especificado na norma.

Foram elaborados programas e subprogramas em linguagem G, para fabricação da parte inferior (Anexo A) e superior (Anexo B) das peças-teste nos centros de usinagem.

4.2 DADOS DOS CENTROS DE USINAGEM, FERRAMENTAS E PARÂMETROS DE CORTE

Os equipamentos utilizados para manufatura das peças-teste foram 03 (três) centros de usinagem conforme dados da Tabela 3.

Tabela 3 – Dados dos centros de usinagem

Código Adotado	N° de Eixos	Fabricante	Modelo	N° de Série	Ano de Fabricação	Proprietário
MC-1	3	ROMI	D 600	016-017030-450	2013	Empresa A
MC-2	3	ROMI	D 600	016-009427-450	2009	Empresa B
MC-3	3	ROMI	D 600	016-008986-450	2009	Empresa C

Fonte: O autor, 2019.

Em cada centro de usinagem foi utilizado um conjunto de 11 (onze) ferramentas de corte novas, conforme descritas na Tabela 4.

Tabela 4 – Descrição das ferramentas utilizadas (continua...)

N° da Ferramenta	Código Adotado	Descrição
01	T1	Cabeçote fresador com diâmetro de 50 mm e 5 insertos de metal duro (Inserto marca ISENR modelo SPMT 100408R–HQ-M)
02	T2	Broca de centro em aço rápido com diâmetro de 3,18 mm
03	T3	Broca helicoidal em aço rápido com diâmetro de 11 mm
04	T4	Broca helicoidal em aço rápido com diâmetro de 25,4 mm
05	T5	Fresa de topo, em aço rápido, com 4 arestas principais e diâmetro de 16 mm
06	T6	Fresa de topo para desbaste, em aço rápido, com 4 arestas principais e diâmetro de 16 mm
07	T7	Fresa de topo de metal duro com 2 arestas principais e diâmetro de 10 mm
08	T8	Ferramenta de mandrilar com raio de 14 mm, em aço rápido
09	T9	Ferramenta de mandrilar com raio de 13 mm, em aço rápido

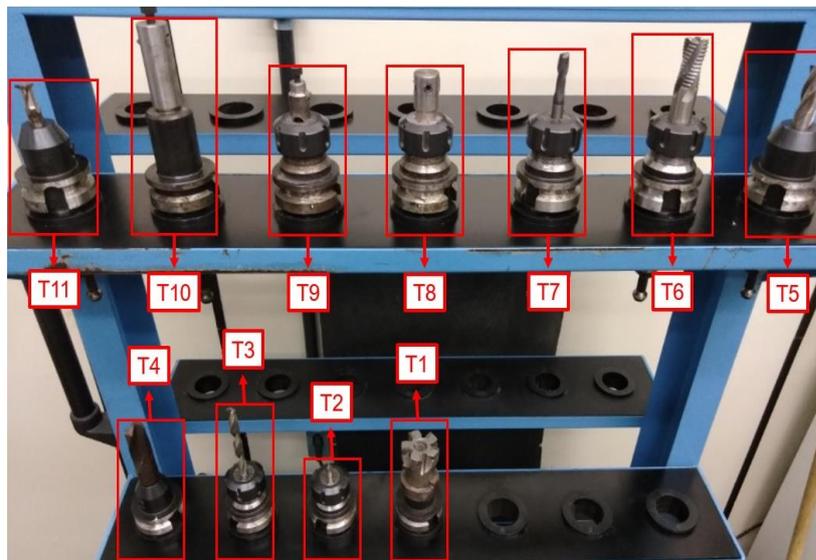
Continuação

10	T10	Ferramenta de mandrilar com raio de 13 mm, em aço rápido
11	T11	Fresa T, em aço rápido, com diâmetro de 15 mm e espessura de 2,5 mm

Fonte: O autor, 2019.

A Figura 4.5 apresenta o conjunto das onze (11) ferramentas, em seus respectivos suportes, utilizadas na fabricação das peças-teste.

Figura 4.5 – Conjunto de ferramentas utilizadas nos centros de usinagem



Fonte: O autor, 2017.

No Anexo C cada ferramenta é descrita em detalhes acerca de suas características e utilização na fabricação das peças-teste.

Visando estabelecer uma padronização dos parâmetros de corte a serem utilizados, e atendendo ao que é estabelecido no item 9.4 da NBR NM-ISO 10791-7: 1999, foram adotados os valores conforme indicados no Anexo D.

4.3 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS-TESTE CONFORME NBR NM-ISO 10791-7: 1999

As etapas de fabricação foram realizadas no laboratório de usinagem CNC pertencente a empresa A, e nas empresas B e C.

As Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 apresentam os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3, respectivamente.

Figura 4.6 – Centro de usinagem ROMI D 600 (MC-1) pertencente a empresa A



Fonte: O autor, 2018.

Figura 4.7 – Centro de usinagem ROMI D 600 (MC-2) pertencente a empresa B



Fonte: O autor, 2018.

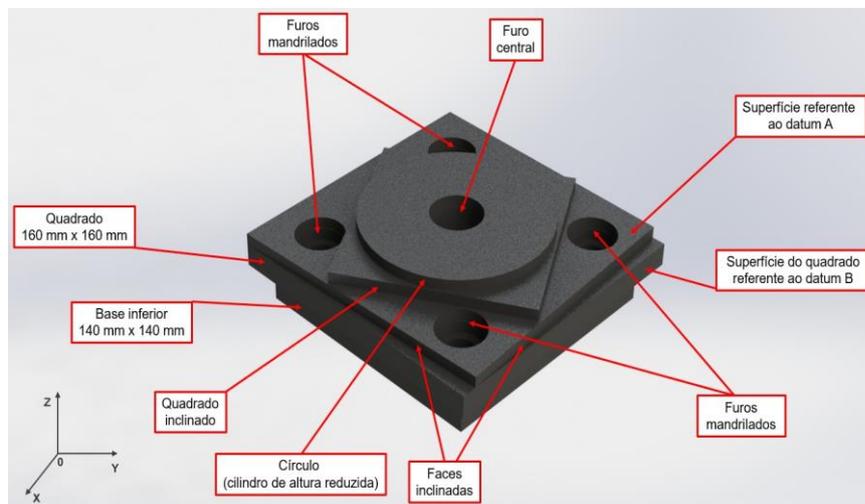
Figura 4.8 – Centro de usinagem ROMI D 600 (MC-3) pertencente a empresa C



Fonte: O autor, 2018.

A Figura 4.9, mostra o desenho da peça-teste do tipo A desenvolvido com auxílio de um *software* de CAD, contendo as legendas e indicações dos principais componentes geométricos.

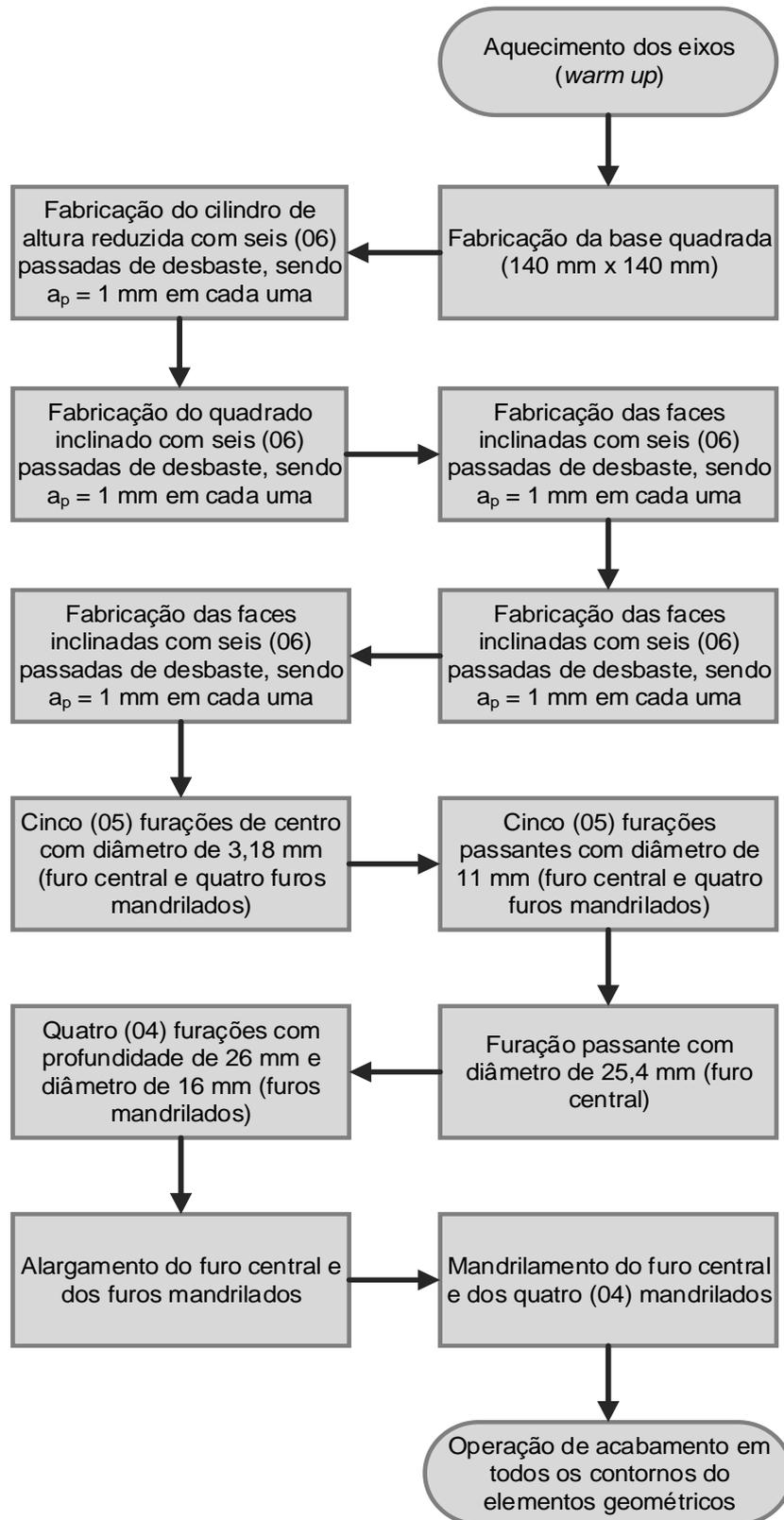
Figura 4.9 – Peça-teste Tipo A com legendas e indicações dos principais componentes geométricos



Fonte: O autor, 2017.

Foi estabelecida uma instrução de trabalho para fabricação das peças, a fim de garantir a reprodutibilidade do processo em todas as máquinas utilizadas. A Figura 4.10 apresenta um fluxograma simplificado para auxiliar no entendimento da sequência das etapas.

Figura 4.10 – Fluxograma simplificado das etapas de fabricação das peças-teste



Fonte: O autor, 2017.

Seguindo as etapas de fabricação descritas no fluxograma apresentado na Figura 4.10, foram obtidas seis (06) peças-teste. A Figura 4.11 mostra uma das peças fabricadas fixada à mesa no centro de usinagem MC-1.

Figura 4.11 – Peça-teste fabricada no centro de usinagem MC-1



Fonte: O autor, 2018.

Concluídas as etapas de fabricação, foi realizada em cada uma das peças, aplicação de vaselina em pasta, identificação e cobertura por filme plástico, a fim de evitar oxidações e conservar as características superficiais até a etapa de medição. Isso pode ser visto na Figura 4.12.

Figura 4.12 – Aplicação de vaselina em pasta para proteção das superfícies e acondicionamento em filme plástico

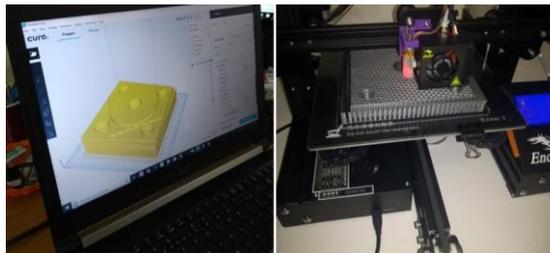


Fonte: O autor, 2018.

4.4 FABRICAÇÃO DO MODELO DA PEÇA-TESTE ATRAVÉS DE MANUFATURA ADITIVA

Através de uma impressora 3D da marca *CREALITY* modelo *Ender 3*, juntamente com o *software CURA*, foi realizada a manufatura de um modelo da peça-teste em PLA, com fator de escala de 1:1, para utilização na Máquina de Medição por Coordenadas, com o intuito de estabelecer uma estratégia padrão de medição a ser adotada na verificação das peças-teste, de forma a garantir condições de reprodutibilidade e minimizar erros. Para tanto, não foram avaliados os parâmetros geométricos do modelo e sim o estabelecimento do procedimento de medição. Na Figura 4.13 pode ser vista a impressora 3D utilizada na fabricação do modelo da peça-teste por manufatura aditiva.

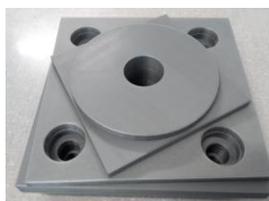
Figura 4.13 – Impressora 3D utilizada na fabricação do modelo da peça-teste



Fonte: O autor, 2018.

A Figura 4.14 apresenta o modelo da peça-teste pronto, cujas características dimensionais e geométricas são próximas às indicadas na NBR NM-ISO 10791-7: 1999.

Figura 4.14 – Modelo da peça-teste com escala de 1:1



Fonte: O autor, 2018.

4.5 MEDIÇÃO DAS PEÇAS NA MMC

Utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC) da marca *Mitutoyo* modelo *Beyond – Crysta C574* (Figura 4.15), pertencente ao Laboratório de Medição por Coordenadas do Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE,

com faixa nominal de 500 mm x 700 mm x 400 mm, resolução de 0,0002 mm e certificado de calibração número 03206/13 (RBC), foram realizadas medições de cilindricidade, perpendicularidade, retitude, paralelismo, angularidade, circularidade, concentricidade e posicionamento em elementos geométricos do modelo da peça-teste e das fabricadas nos centros de usinagem já citados.

Figura 4.15 – MMC *Mitutoyo Beyond – Crysta C574*



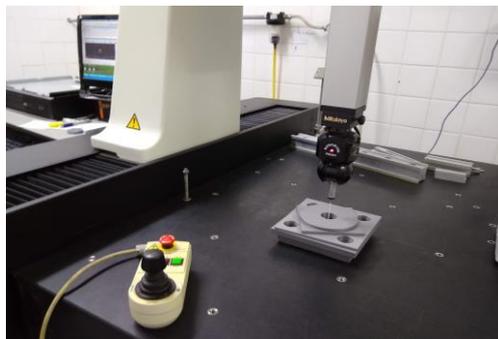
Fonte: O autor, 2018.

4.5.1 Medição do modelo da peça-teste

Realizou-se medições de todos os elementos geométricos do modelo, conforme indicados na Tabela 3 da NBR NM-ISO 10791-7:1999, observando-se a melhor estratégia a ser adotada, com o intuito de desenvolver um procedimento padrão que conferisse confiabilidade e condições de reprodutibilidade. Para tanto, estabeleceu-se o sentido anti-horário para captação de pontos coordenados pelo apalpador da máquina de medir.

Na Figura 4.16 está sendo mostrada uma das etapas de medição do modelo da peça-teste.

Figura 4.16 – Medição do modelo da peça-teste



Fonte: O autor, 2018.

Na Tabela 5 são apresentados os itens a serem verificados em cada elemento geométrico, onde aqueles que não estão na norma NBR NM-ISO 10791-7: 1999, mas são imprescindíveis para a plena caracterização da verificação, estão destacados com um asterisco (*).

Tabela 5 – Itens a serem verificados por elemento geométrico

Elemento geométrico	Parâmetro tolerado	Tolerâncias (mm)		Plano de referência
		320mm	160mm	
Furo central	Cilindricidade	0,015	0,010	*XY
	Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A	0,015	0,010	*YZ *ZX
Quadrado	Retitude dos lados	0,015	0,010	*XY
	Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	0,020	0,010	*XY
	Paralelismo do lado oposto à base B	0,020	0,010	*XY
Quadrado inclinado	Retitude dos lados	0,015	0,010	*XY
	Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B	0,020	0,010	*XY
	*Perpendicularidade entre os lados	*0,020	*0,010	*XY
Faces inclinadas	Circularidade	0,020	0,015	*XY
		0,025	0,025	*XY
	Retitude das faces	0,015	0,010	*XY
	Angularidade dos ângulos em relação à base B	0,020	0,010	*XY
Furos mandrilados	Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C	0,050	0,050	*XY
	Concentricidade do furo interno com o furo externo D	0,020	0,020	*XY
	*Perpendicularidade das diagonais entre furos	*0,020	*0,010	*XY

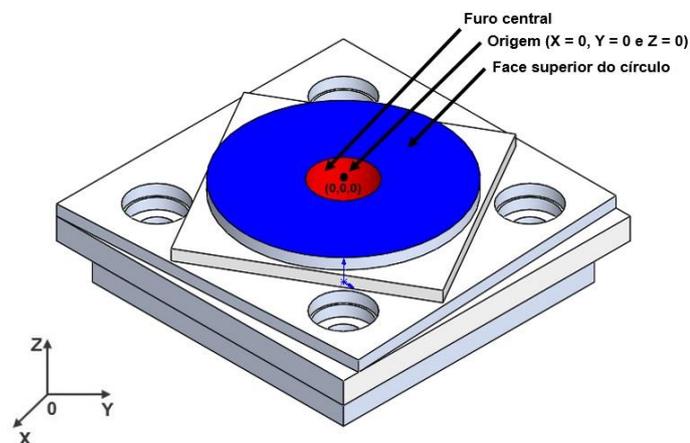
4.5.1.1 Medição dos elementos tolerados

Uma vez definidas as características toleradas em relação a forma, posição e orientação, bem como os planos adotados como referência, foi desenvolvido um método de medição, conforme detalhado abaixo.

4.5.1.1.1 Determinação da origem na peça

A origem foi determinada entre o furo central e o plano XY na face superior do círculo (cilindro de altura reduzida), conforme mostrado na Figura 4.17.

Figura 4.17 – Origem na peça



Fonte: O autor, 2018.

Nesta etapa, foram seguidos os seguintes passos:

- Medição de plano (plano de origem) na face superior do círculo, contendo oito (08) pontos coordenados;
- Medição de cilindro (cilindro de origem) no furo central, contendo oito (08) pontos coordenados, sendo quatro (04) pontos medidos em sentido anti-horário na coordenada $Z = -40$ mm e os outros quatro (04) pontos medidos em sentido anti-horário na coordenada $Z = -4$ mm;
- Seleção da opção “Nivela Plano” e determinação da origem entre “plano de origem” e “cilindro de origem”.

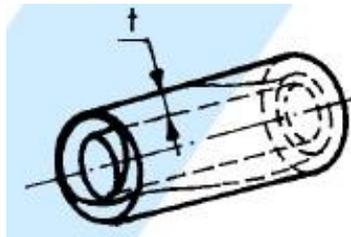
4.5.1.1.2 Medição dos parâmetros tolerados do furo central

Nesta seção apresenta-se a medição dos parâmetros tolerados do furo central.

4.5.1.1.2.1 Cilindricidade

A tolerância de cilindridade faz referência ao afastamento aceitável da superfície cilíndrica efetiva, quando comparada à ideal. Dois cilindros coaxiais, afastados de uma distância “t” (tolerância) compõem o campo de tolerância (NBR 6409: 1997; ISO 1101:2017). A Figura 4.18 ilustra esse tipo de tolerância.

Figura 4.18 – Campo de tolerância de cilindridade



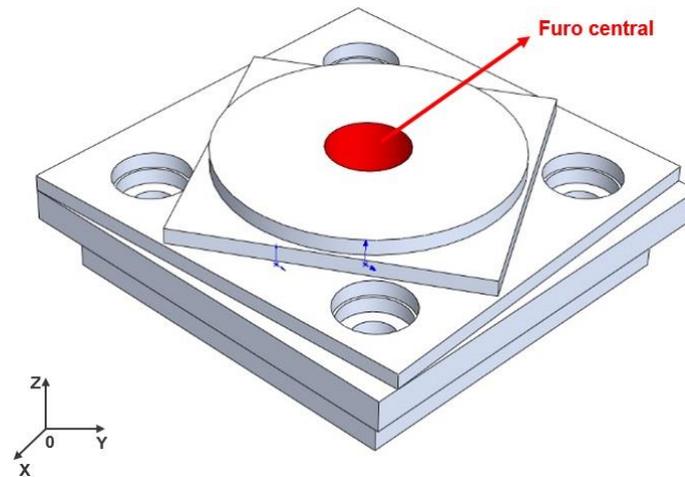
Fonte: NBR 6409:1997, 2018.

Esse parâmetro abrange desvios de forma ao longo da seção longitudinal do cilindro, incluindo erros de conicidade, concavidade e convexidade. Nesse caso, tais afastamentos podem ser verificados por medições de várias seções transversais ao longo da peça, sendo obtidos pela metade de cada uma das amplitudes registradas (SENAI, 2015).

Devido ao *software* GEOPAK – MCOSMOS pertencente à MMC não fornecer resultados desse parâmetro, os valores de cilindridade foram obtidos pela medição de seis (06) diâmetros ao longo da seção transversal do furo central, cuja coordenada Z de cada um deles ao longo do comprimento do cilindro foi de – 40 mm, -35 mm, -30 mm, -25 mm, -18 mm e -4 mm, respectivamente.

Na Figura 4.19, o furo central é apresentado em destaque para identificação de sua posição na peça.

Figura 4.19 – Furo central na peça-teste



Fonte: O autor, 2018.

Para cada uma das seis (06) seções circulares, determinou-se o desvio de cilindricidade como sendo a maior amplitude registrada dentre os valores medidos, tomando como referência o diâmetro nominal do furo central (30 mm) estabelecido na NBR NM-ISO 10791-7: 1999.

4.5.1.1.2 Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A

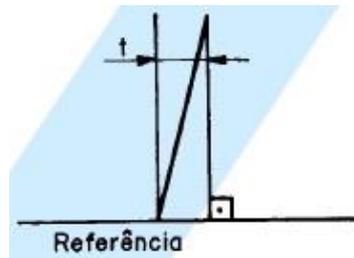
A tolerância de perpendicularidade faz referência ao afastamento máximo aceitável de inclinação entre o elemento tolerado e o elemento de referência, sendo expressa em unidade de comprimento (NBR 6409: 1997; ISO 1101:2017).

Esse parâmetro tolerado pode ser medido entre:

- Uma linha em relação a uma linha de referência;
- uma linha em relação a uma superfície de referência;
- uma superfície em relação a uma linha de referência;
- uma superfície em relação a uma superfície de referência.

A Figura 4.20 ilustra a tolerância de perpendicularidade de uma linha em relação a uma linha de referência, que foi adotada para verificação dos parâmetros de ortogonalidade indicados na NBR NM-ISO 10791-7: 1999.

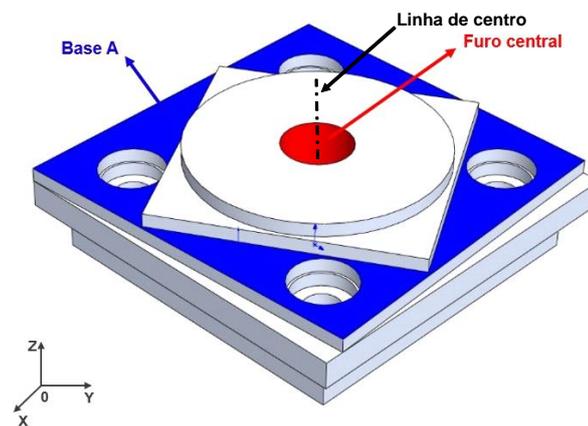
Figura 4.20 - Campo de tolerância de perpendicularidade de uma linha em relação a uma linha de referência



Fonte: NBR 6409:1997, 2018.

A perpendicularidade foi verificada entre a linha de centro do furo central e a base A, ambos representados na Figura 4.21.

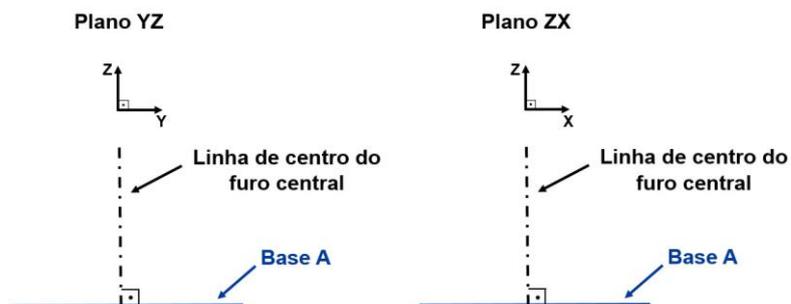
Figura 4.21 – Linha de centro do furo central e base A



Fonte: O autor, 2018.

Conforme pode ser observado, há possibilidade de ortogonalidade entre as entidades geométricas nos planos YZ e ZX como ilustrado na Figura 4.22.

Figura 4.22 – Planos de referência para medição de perpendicularidade



Fonte: O autor, 2018.

Para obtenção dos valores dessa variável, realizou-se os seguintes passos:

- Construção de cilindro com oito (08) pontos coordenados, na região do “furo central”, sendo composto por dois círculos de coordenadas Z iguais a – 40 mm e – 4 mm, respectivamente. Cada círculo foi obtido a partir de quatro (04) pontos coordenados, medidos no sentido anti-horário;
- Construção de plano na superfície da base B, formado por oito (08) pontos coordenados e medidos no sentido anti-horário;
- Utilização da ferramenta “perpendicularidade” pertencente ao *software GEOPAK – MCOSMOS*, para verificação desse parâmetro nos planos YZ e ZX;

Vale ressaltar que a NBR NM-ISO 10791-7: 1999 não especifica o plano a ser adotado, o que gera dúvidas durante o processo de medição. Contudo, a padronização adotada neste método, vem a ser uma contribuição à norma, de modo a facilitar o entendimento dos usuários.

4.5.1.1.3 Medição dos parâmetros tolerados do quadrado

Nesta seção apresenta-se a medição dos parâmetros tolerados do quadrado.

4.5.1.1.3.1 Retitude dos lados

A tolerância de retitude faz referência ao afastamento aceitável da forma do elemento tolerado, na peça pronta, em relação a uma linha reta ideal. Esse tipo de tolerância só é aplicado a elementos isolados, como eixos de simetria, linhas contidas nas faces das peças, linhas de centro ou geratrizes de sólidos de revolução. Conforme as normas NBR 6409: 1997 e ISO 1101:2017, o campo de tolerância limita-se a duas linhas paralelas separadas por uma distância “t” (tolerância), podendo estar contido em:

- Um único plano;
- um paralelepípedo com seção transversal “ $t_1 \times t_2$ ”, se a tolerância for especificada em dois planos perpendiculares entre si;
- um cilindro com diâmetro “t”.

A Figura 4.23 ilustra a tolerância de retitude num único plano, na qual foi adotada para verificação dos parâmetros indicados na NBR NM-ISO 10791-7: 1999.

Figura 4.23 – Campo de tolerância de retitude num único plano

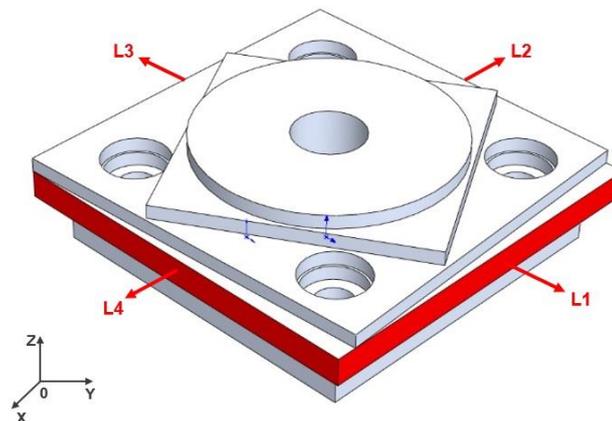


Fonte: NBR 6409:1997, 2018.

Foram obtidas linhas formadas por dez (10) pontos coordenados em cada um dos quatro (04) lados, denominados L1, L2, L3 e L4, de modo a utilizar todo comprimento útil (160 mm) de cada segmento. Os valores desse parâmetro foram obtidos com a ferramenta *GEOPAK – MCOSMOS*. A coordenada Z adotada foi de – 24 mm a partir da origem e constante para todas as medições dessa variável.

A Figura 4.24 apresenta em destaque os lados L1, L2, L3 e L4 pertencentes ao elemento geométrico quadrado.

Figura 4.24 – Lados L1, L2, L3 e L4 do quadrado

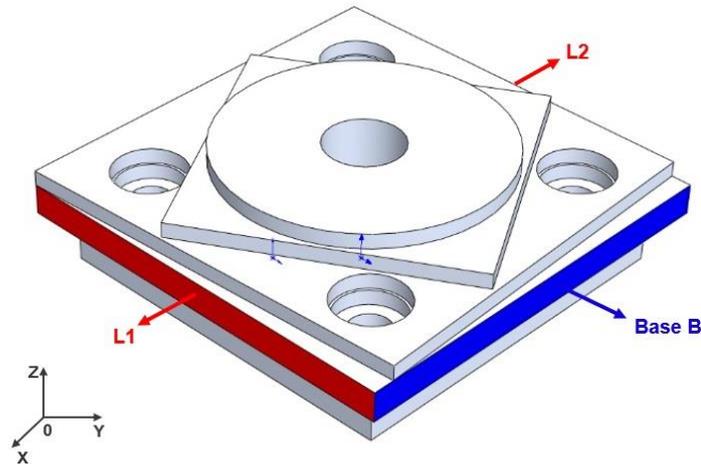


Fonte: O autor, 2018.

4.5.1.1.3.2 Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação a base B

Os lados adjacentes à base B estão representados por L1 e L2 na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Lados L1 e L2 adjacentes à base B



Fonte: O autor, 2018.

Com as linhas obtidas nas medições de retitude, bastou verificar a perpendicularidade (utilizando o *software GEOPAK – MCOSMOS*) entre as retas correspondentes. Nesse caso, foram obtidos resultados de ortogonalidade entre cada um dos lados (L1 e L2) e a base B.

4.5.1.1.3.3 Paralelismo do lado oposto à base B

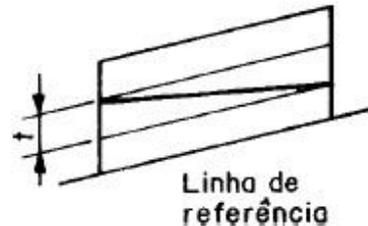
A tolerância de paralelismo faz referência ao afastamento aceitável de equidistâncias entre dois elementos, sendo um tolerado e o outro adotado como de referência (NBR 6409: 1997; ISO 1101:2017).

Esse parâmetro tolerado pode ser medido entre:

- Uma linha em relação a uma linha de referência;
- uma linha em relação a uma superfície de referência;
- uma superfície em relação a uma linha de referência;
- uma superfície em relação a uma superfície de referência.

A Figura 4.26 ilustra a tolerância de paralelismo de uma linha em relação a uma linha de referência, na qual foi adotada para verificação dos parâmetros de ortogonalidade indicados na NBR NM-ISO 10791-7: 1999.

Figura 4.26 – Campo de tolerância de paralelismo de uma linha em relação a uma linha de referência

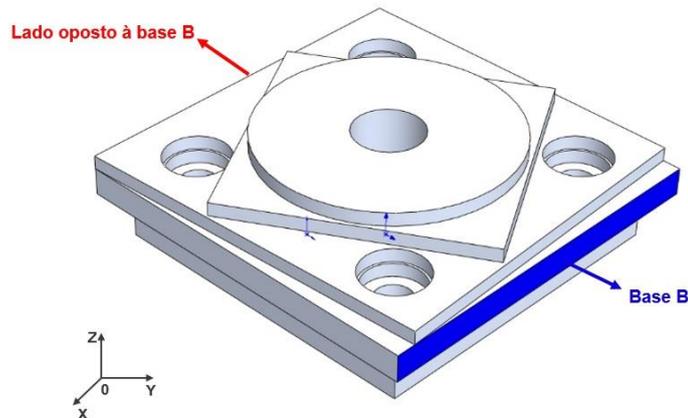


Fonte: NBR 6409:1997, 2018.

Seguindo o mesmo raciocínio do item anterior, foi medido o paralelismo (utilizando o *software GEOPAK – MCOSMOS*) entre o lado oposto e a base B.

A Figura 4.27 ilustra o lado oposto à base B.

Figura 4.27 – Lado oposto à base B



Fonte: O autor, 2018.

4.5.1.1.4 Medição dos parâmetros tolerados do quadrado inclinado

Nesta seção apresenta-se a medição dos parâmetros tolerados do quadrado inclinado.

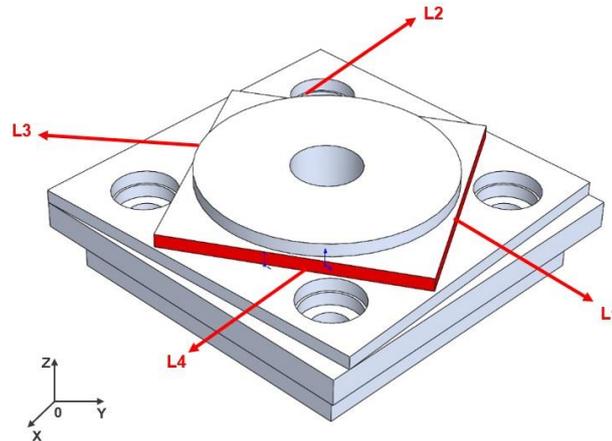
4.5.1.1.4.1 Retitude dos lados

Seguindo o mesmo princípio adotado no item 4.5.1.1.3.1, foram obtidas linhas a partir de dez (10) pontos coordenados em cada um dos quatro (04) lados, denominados L1, L2, L3 e L4, de modo que se utilizou todo comprimento útil (156,98 mm) de cada segmento. Os valores desse parâmetro foram obtidos com o *software*

GEOPAK – MCOSMOS. A coordenada Z adotada foi de – 8,5 mm a partir da origem e constante para todas as medições dessa variável.

A Figura 4.28 apresenta em destaque os lados L1, L2, L3 e L4 pertencentes ao elemento geométrico quadrado.

Figura 4.28 – Lados do quadrado inclinado

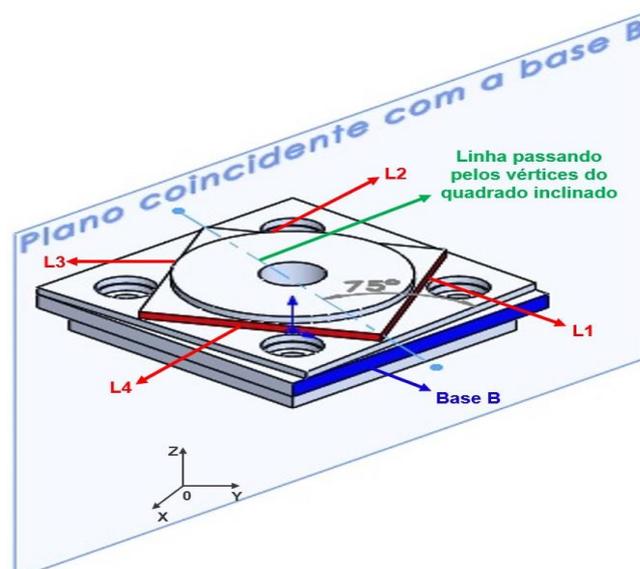


Fonte: O autor, 2018.

4.5.1.1.4.2 Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B

O item “g” da Tabela 3 pertencente à NBR NM-ISO 10791-7: 1999 descreve como “Exatidão dos ângulos de 75° em relação à base B”, porém percebe-se na Figura 4.29 que só há um (01) ângulo com esse valor, formado por uma linha imaginária que intercepta dois dos vértices do quadrado inclinado e a base B.

Figura 4.29 – Ângulo de 75° formado por linha imaginária e a base B



Fonte: O autor, 2018.

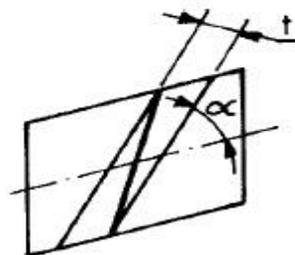
Além disso, a norma referente a tolerâncias geométricas NBR 6409: 1997 não faz referência ao parâmetro tolerado “exatidão” e sim “inclinação”. Por outro lado, a ISO 1101:2017 que também trata de tolerâncias geométricas e serve de base para a norma brasileira, classifica tal parâmetro como “angularidade”, e sendo esta última a versão mais atual, será adotado nesse trabalho de pesquisa essa última denominação.

A tolerância de angularidade diz respeito ao afastamento aceitável de duas retas paralelas, separadas por uma distância “ t ” (tolerância) e inclinadas em relação à:

- Uma linha em relação a uma linha de referência, podendo ser no mesmo plano ou em planos distintos;
- uma linha em relação a uma superfície de referência;
- uma superfície em relação a uma linha de referência;
- uma superfície em relação a uma superfície de referência.

A Figura 4.30 ilustra a tolerância de angularidade de uma linha em relação a uma linha de referência no mesmo plano, na qual foi adotada para verificação dos parâmetros indicados na NBR NM-ISO 10791-7: 1999.

Figura 4.30 – Campo de tolerância de angularidade de uma linha em relação a uma linha de referência no mesmo plano



Fonte: NBR 6409:1997, 2018.

Para obtenção dos valores dessa variável, realizou-se os seguintes passos:

- Criação de dois pontos pela conexão de elementos, ou seja, ponto 1 formado pela interseção das linhas L2 e L3, e ponto 2 formado pela interseção das linhas L1 e L4;

- Construção de linha (linha diagonal) que intercepta os pontos 1 e 2;
- Geração de plano que intercepta a base B;
- Medição do ângulo entre a linha e o plano;
- Utilização da ferramenta “angularidade” pertencente ao *software* *GEOPAK – MCOSMOS*, para verificação da exatidão.

4.5.1.1.4.3 Perpendicularidade entre os lados

Apesar desse parâmetro não constar na norma, verificou-se a importância de verificar a capacidade da máquina em reproduzir lados ortogonais de um quadrado inclinado.

Com as linhas obtidas para medição de retitude, bastou utilizar a ferramenta de perpendicularidade, e fazer a verificação entre as retas “L1 e L2”, “L2 e L3”, “L3 e L4” e “L4 e L1”.

4.5.1.1.5 Medição dos parâmetros tolerados do círculo

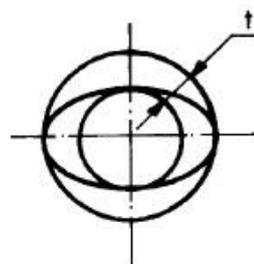
Nesta seção apresenta-se a medição dos parâmetros tolerados do círculo.

4.5.1.1.5.1 Circularidade

A tolerância de circularidade faz referência ao afastamento aceitável da forma geométrica circular. Esse parâmetro é tolerado principalmente em componentes cilíndricos e cônicos.

Dois círculos concêntricos, afastados de uma distância “t” (tolerância), compõem o campo de tolerância na seção de medição (NBR 6409: 1997; ISO 1101:2017). Na Figura 4.31 é ilustrado esse campo tolerado.

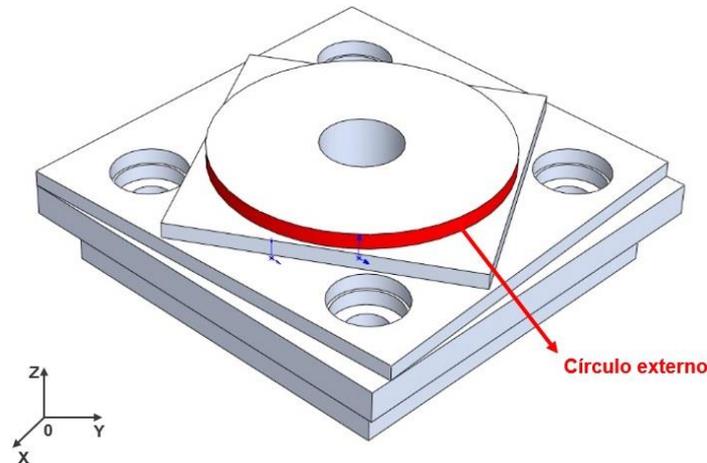
Figura 4.31 – Campo de tolerância de circularidade



Fonte: NBR 6409:1997, 2018.

Para medição desse parâmetro, foram obtidos círculos com vinte (20) pontos coordenados cada, ao longo da região denominada “círculo externo”, cujo diâmetro nominal é de 108 mm e que está representada na Figura 4.32.

Figura 4.32 – Representação do círculo externo (cilindro de altura reduzida)



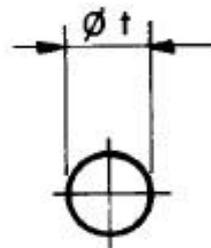
Fonte: O autor, 2018.

A coordenada Z adotada foi de -3 mm para toda a região circular, e utilizando o *software* *GEOPAK – MCOSMOS*, foram obtidos os valores de cilindricidade.

4.5.1.1.5.2 Concentricidade do círculo externo e do furo mandrilado C

Dois elementos são concêntricos quando seus centros se encontram na mesma posição no plano. A tolerância de concentricidade diz respeito ao afastamento aceitável “t” na posição do centro de um círculo em relação ao centro de outro círculo tomado como referência (NBR 6409: 1997; ISO 1101:2017). Na Figura 4.33 é ilustrado esse campo tolerado.

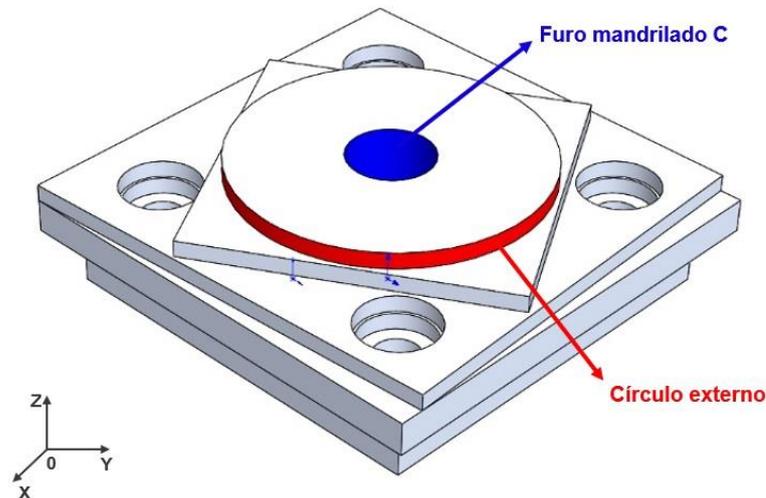
Figura 4.33 – Campo de tolerância de concentricidade



Fonte: NBR 6409:1997, 2018.

O furo mandrilado C é o furo central verificado nos itens anteriores, e os elementos a serem medidos estão representados na Figura 4.34.

Figura 4.34 – Círculo externo e furo mandrilado C



Fonte: O autor, 2018.

Para obtenção dos valores de concentricidade, foram medidos círculos formados por oito (08) pontos na região do furo central, cuja coordenada Z adotada foi de -3 mm, e com auxílio do *software* *GEOPAK – MCOSMOS*, verificou-se a concentricidade entre os círculos do furo central e do círculo externo (obtidos no item anterior).

4.5.1.1.6 Medição dos parâmetros tolerados das faces inclinadas

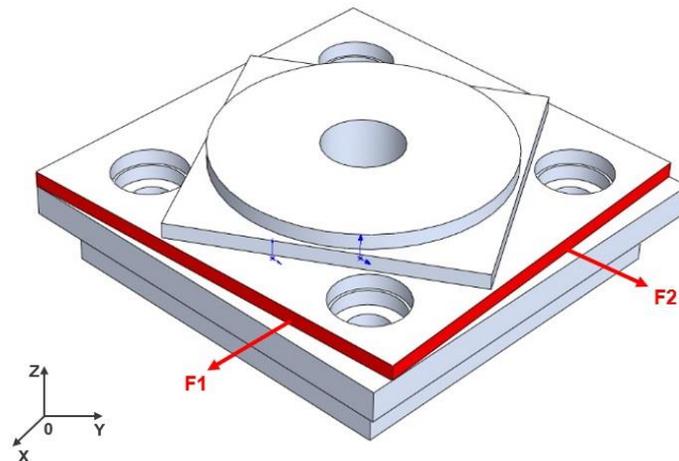
Nesta seção apresenta-se a medição dos parâmetros tolerados das faces inclinadas.

4.5.1.1.6.1 Retitude das faces

Seguindo o mesmo princípio adotado nos itens 4.5.1.1.3.1 e 4.5.1.1.4.1, foram obtidas linhas a partir de dez (10) pontos coordenados em cada uma das duas (02) faces, denominadas F1 e F2, de modo que se utilizou todo comprimento útil (160,22 mm) de cada segmento. Os valores desse parâmetro foram obtidos com o *software* *GEOPAK – MCOSMOS*. A coordenada Z adotada foi de -14 mm, a partir da origem e constante para todas as medições dessa variável.

A Figura 4.35 apresenta em destaque as faces F1 e F2 pertencentes ao elemento geométrico face inclinada.

Figura 4.35 – Faces inclinadas F1 e F2



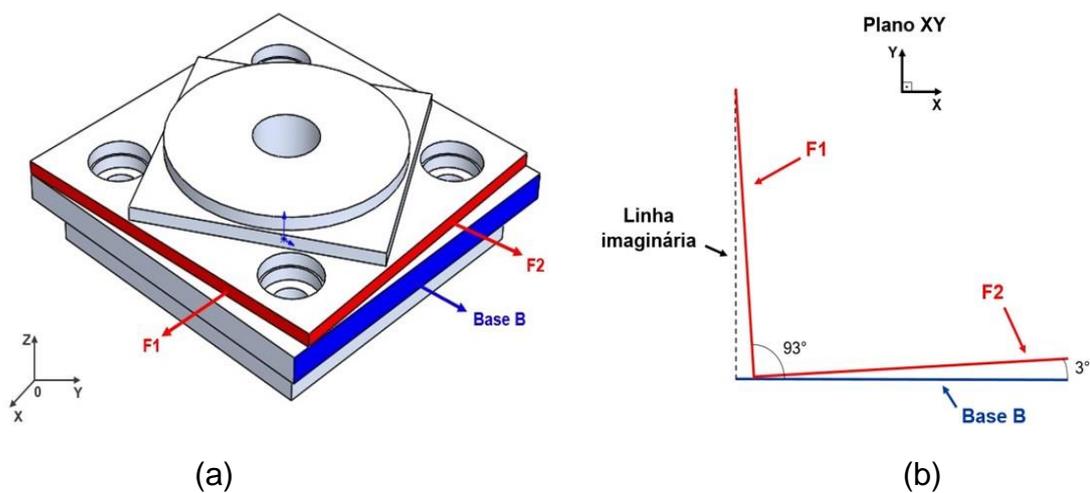
Fonte: O autor, 2018.

4.5.1.1.6.2 Angularidade dos ângulos em relação à base B

Seguindo o mesmo critério do item 4.5.1.1.4.2, foi estabelecido que o parâmetro indicado no item “k” da Tabela 3 pertencente à NBR NM-ISO 10791-7: 1999 deveria ser alterado de “Exatidão dos ângulos em relação à base B” para “Angularidade dos ângulos em relação à base B”,

As faces inclinadas F1 e F2 formam com a base B ângulos de 93° e 3° , respectivamente, conforme apresentado nas Figuras 4.36 (a) e (b).

Figura 4.36 – (a) Faces inclinadas (F1 e F2) e base B e (b) ângulos formados pelas faces inclinadas (F1 e F2) e a base B



Fonte: O autor, 2018.

Com as linhas obtidas nas medições de retitude do item anterior, bastou verificar a inclinação através da ferramenta “angularidade” (utilizando o *software* GEOPAK – MCOSMOS) entre as retas correspondentes.

4.5.1.1.7 Medição dos parâmetros tolerados dos furos mandrilados

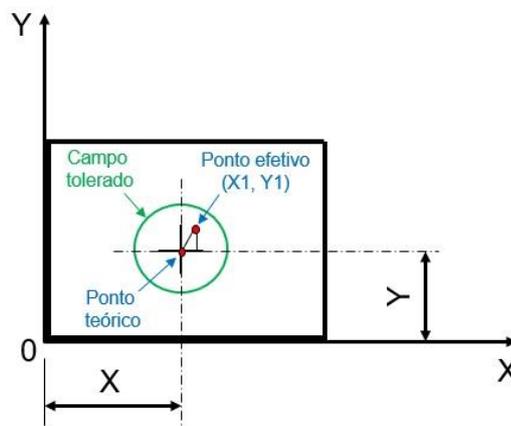
Nesta seção apresenta-se a medição dos parâmetros tolerados dos furos mandrilados.

4.5.1.1.7.1 Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C

A tolerância de posição diz respeito aos afastamentos de posição de um ponto, uma linha ou um plano em relação à sua posição hipoteticamente correta, e seu campo tolerado correspondente é disposto simetricamente em torno da posição teoricamente exata (NBR 6409: 1997; ISO 1101:2017).

Neste estudo foi considerada a tolerância de posição de um ponto, cuja localização efetiva é dada pelas coordenadas X_1 e Y_1 , podendo ser obtidas por projetores de perfil, microscópios de medição e máquinas de medição por coordenadas, por exemplo. O desvio de posição, que equivale à distância do ponto teórico ao ponto real, não pode ser medido diretamente. No entanto, sabe-se que essa distância corresponde à hipotenusa de um triângulo retângulo cujos catetos são iguais às diferenças entre as cotas básicas e as respectivas medidas X_1 e Y_1 , como ilustrado na Figura 4.37.

Figura 4.37 – Representação das posições teórica e efetiva



Fonte: O autor, 2018.

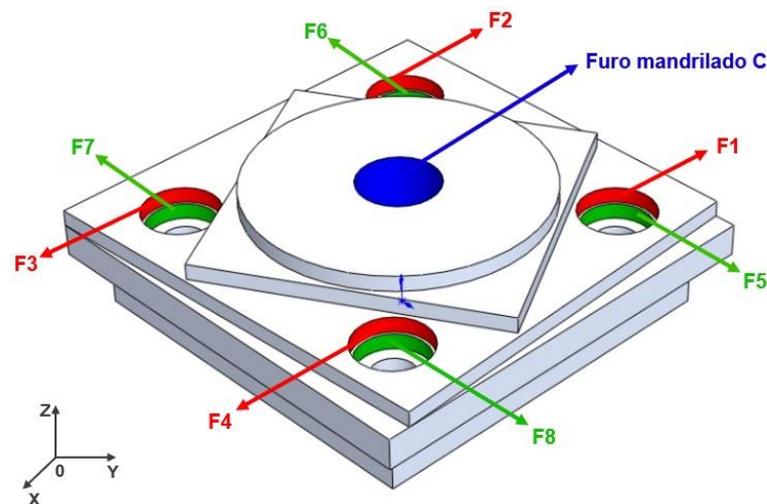
Portanto, calcula-se o desvio de posição (D_p) utilizando o Teorema de Pitágoras, conforme equação 4.1.

$$D_p = \sqrt{(X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2} \quad (4.1)$$

Considera-se aceitável quando D_p não ultrapassa metade do valor da tolerância de posição especificada (SENAI, 2015).

Conforme ilustrado na figura 4.38, existem oito (08) furos mandrilados (de F1 a F8), além do central denominado “furo mandrilado C”.

Figura 4.38 – Furos mandrilados



Fonte: O autor, 2018.

Para obtenção dos valores dessa variável, realizou-se os seguintes passos:

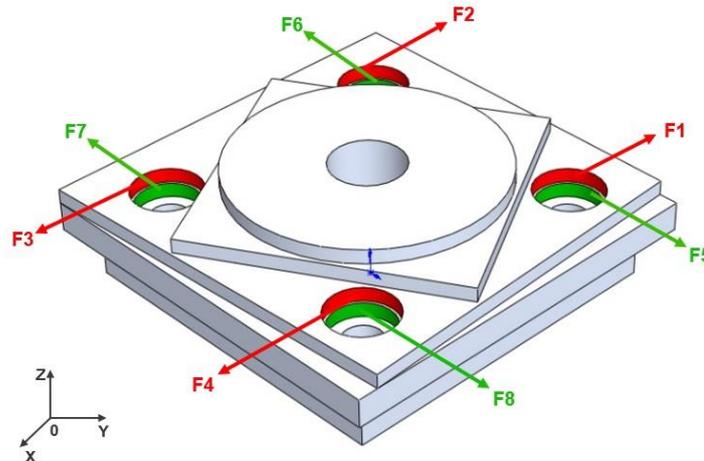
- Medição de círculos com (08) pontos coordenados, no sentido anti-horário e com coordenada Z igual a – 14 mm, em cada um dos quatro (04) furos mandrilados com diâmetro nominal de 28 mm (F1, F2, F3 e F4);
- Medição de círculos com oito (08) pontos coordenados, no sentido anti-horário e com coordenada Z igual a – 20 mm, em cada um dos quatro (04) furos mandrilados com diâmetro nominal de 26 mm (F5, F6, F7 e F8);
- Utilização da ferramenta “posicionamento” pertencente ao *software* GEOPAK – MCOSMOS, para verificação da tolerância de posição de cada um dos furos mandrilados com relação ao furo central medido no

item 5.4.1.1.5.2 (concentricidade do círculo externo e do furo mandrilado C);

4.5.1.1.7.2 Concentricidade do furo interno com o furo externo D

Os “furos internos” são os quatro (04) mandrilados com diâmetro de 26 mm (F5, F6, F7 e F8) e os “furos externos D”, são os mandrilados com diâmetro de 28 mm (F1, F2, F3 e F4), ambos apresentados na Figura 4.39.

Figura 4.39 – Furos mandrilados



Fonte: O autor, 2018.

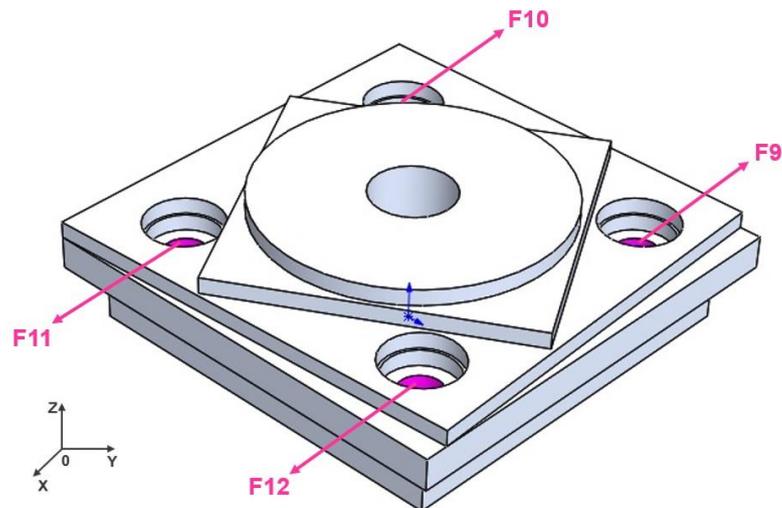
Seguindo o mesmo princípio adotado no item 4.5.1.1.5.2, bastou utilizar a ferramenta “concentricidade” pertencente ao *software* GEOPAK – MCOSMOS, e analisar os elementos correspondentes “F1 e F5”, “F2 e F6”, “F3 e F7” e “F4 e F8”.

4.5.1.1.7.3 Perpendicularidade das diagonais entre furos

Apesar desse item não constar na norma, foi decidido adicioná-lo para obter informações acerca da ortogonalidade entre as diagonais dos furos, que por sua vez está diretamente relacionada ao posicionamento da ferramenta de corte em relação às coordenadas estabelecidas no CNC da máquina.

Para tanto, foram considerados os furos com diâmetro nominal de 16 mm, denominados de F9, F10, F11 e F12, conforme apresentados na Figura 4.40.

Figura 4.40 – Furos com diâmetro nominal de 16 mm



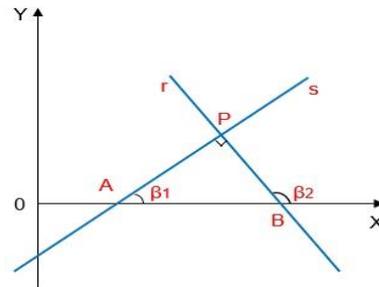
Fonte: O autor, 2018.

Para obtenção dos valores dessa variável, realizou-se os seguintes passos:

- Medição de círculos com oito (08) pontos coordenados, no sentido anti-horário e com coordenada Z igual a -27 mm, em cada um dos quatro (04) furos com diâmetro nominal de 16 mm (F9, F10, F11 e F12);
- Construção de duas linhas diagonais (diagonal 1 e diagonal 2), interceptando os centros dos furos “F9 e F11” e “F10 e F12”, respectivamente, através do comando “conexão de elementos”;
- Utilização da ferramenta “perpendicularidade” pertencente ao *software* GEOPAK – MCOSMOS, para verificação desse parâmetro entre as diagonais;

Outra maneira de se obter o valor desse parâmetro é através da condição de ortogonalidade de duas retas (STEINBRUCH, 1995). A Figura 4.41 ilustra duas retas denominadas de “r” e “s”, satisfazendo a condição de ortogonalidade.

Figura 4.41 – Condição de ortogonalidade entre duas retas



Fonte: O autor, 2018.

Sejam as equações 4.2 e 4.3 correspondentes às retas r e s , respectivamente.

$$r: y = m_r x + c \quad (4.2)$$

$$s: y = m_s x + d \quad (4.3)$$

Onde $m_s = \operatorname{tg} \beta_1$ e $m_r = \operatorname{tg} \beta_2$ representam os coeficientes angulares das respectivas retas.

Haverá ortogonalidade entre ambas, caso seja obedecida a condição estabelecida na equação 4.4.

$$r \perp s \leftrightarrow m_r \cdot m_s = -1 \quad (4.4)$$

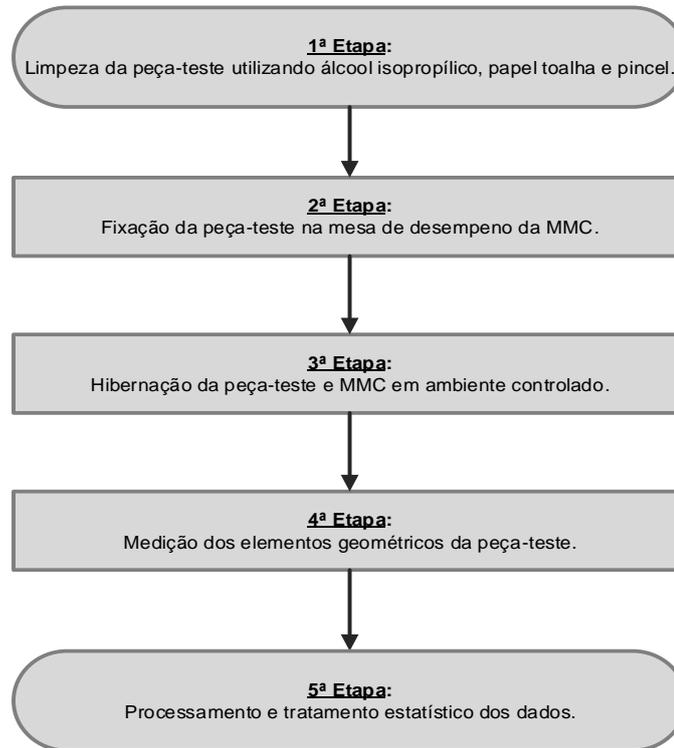
4.5.1.2 Procedimento padrão de medição

A partir do método utilizado para medição dos elementos tolerados, foi desenvolvido um procedimento padrão de medição (Anexo E), a ser utilizado no estudo da peça-teste tipo A com medida nominal de 160 mm, sendo possível utilizá-lo para análise da peça-teste maior, uma vez considerados os valores de tolerância correspondentes (presentes na Tabela 3 da NBR NM-ISO 10791-7: 1999).

4.5.2 Medição das peças-teste

Antes de realizar as medições de cada peça-teste, foram efetuadas algumas etapas, como: limpeza para retirada da camada de vaselina em pasta (utilizada para proteger contra oxidação), fixação e hibernação. A Figura 4.42 apresenta um fluxograma com os principais passos realizados.

Figura 4.42 – Fluxograma contendo as principais etapas para medição



Fonte: O autor, 2018.

Para estimar o tamanho da amostra (N) foi utilizada a distribuição t Student, e a equação 4.5, que é função do coeficiente de Student (t), do desvio padrão amostral (s) e do erro de estimativa (e_e) (NETO, 2007).

$$N \geq \left(\frac{t \cdot s}{e_e}\right)^2 \quad (4.5)$$

Com isso, foi estabelecido um número de cinco (05) medições para cada parâmetro avaliado, sendo maior do que o indicado pela equação 4.5, de modo a se obter uma quantidade suficiente de dados a um tratamento estatístico confiável, onde os valores coletados foram inseridos em uma planilha (Anexo F) para posterior análise.

Utilizando o procedimento de medição desenvolvido, foram verificados todos os elementos geométricos das seis (06) peças-teste, sob temperatura controlada de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ e umidade relativa de $(50 \pm 10)\% \text{UR}$, sendo as mesmas, as condições ambientais padrão para medições mecânicas em laboratório (NASA, 2010; BRUNELLI, 2017). Para tanto, foi utilizado no monitoramento, um termo higrômetro da marca MINIPA modelo MTH-1380, com certificado de calibração nº 6285/14 (REMESP). Na Figura 4.43, é apresentada uma das etapas de medição da peça-

teste, com utilização do termo higrômetro para monitoramento das condições ambientais.

Figura 4.43 – Medição da peça-teste e monitoramento das condições ambientais



Fonte: O autor, 2018.

4.5.2.1 Tratamento estatístico dos dados de medição

Em posse dos dados de medição, foi realizado um tratamento estatístico com base no *ISO GUM 2008*, de modo que todos os resultados foram expressos com as devidas correções e correspondentes incertezas de medição.

As fontes de incerteza consideradas são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Fontes de incerteza consideradas

Fonte de Incerteza	Tipo	Distribuição	Divisor	Incerteza Padrão	Graus de Liberdade
Repetibilidade	A	Normal	1	$S(x_i)$	$n-1$
Resolução	B	Retangular	$2 \cdot \sqrt{3}$	$u_r / (2 \cdot \sqrt{3})$	∞
Máquina	B	Normal	k	u_m / k	∞
Comprimento da peça devido ao termômetro	B	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{pe\c{c}a/term\hat{o}metro} / \sqrt{3}$	∞
Comprimento da escala da MMC devido ao termômetro	B	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{MMC/term\hat{o}metro} / \sqrt{3}$	∞
Afastamento da temperatura de referência	B	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_t / \sqrt{3}$	∞
Comprimento da peça devido à diferença de temperatura	B	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_d / \sqrt{3}$	∞

Fonte: O autor, 2019.

Para determinação do resultado de medição de cada parâmetro avaliado, foram realizados cálculos matemáticos considerando as equações de 4.6 a 4.21, conforme segue abaixo.

- Variação de comprimento - Δ_L

$$\Delta_L = L_0 \cdot \alpha \cdot \Delta_t \quad (4.6)$$

Onde,

Δ_L = Variação de comprimento (mm).

L_0 = Comprimento inicial (mm).

α = Coeficiente de dilatação linear ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

Δ_t = Variação de temperatura ($^{\circ}\text{C}$).

- Média Aritmética Amostral - \bar{X}

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad [\text{mm}] \quad (4.7)$$

Onde,

\bar{X} = Média aritmética amostral de n medições (mm).

n = Número de medições realizadas.

x_i = i -ésimo valor individual da medição (mm).

- Desvio Padrão Amostral – $S(x_i)$

$$S(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2} \quad [\text{mm}] \quad (4.8)$$

Onde,

$S(x_i)$ = Desvio padrão amostral (mm).

- Incerteza referente a um desvio padrão (Tipo A) – $S(\bar{X})$

$$S(\bar{X}) = \frac{S(x_i)}{\sqrt{n}} \quad [\text{mm}] \quad (4.9)$$

- Determinação das fontes de incerteza Tipo B
 - Resolução da Máquina de Medição por Coordenadas (MMC)

$$u_r = \frac{(\text{Resolução da MMC})/2}{\sqrt{3}} \quad [\text{mm}] \quad (4.10)$$

- Incerteza da Máquina de Medição por Coordenadas (MMC)

$$u_m = \frac{\left(0,7 + \frac{\bar{X}}{1300}\right)}{k} \quad [\text{mm}] \quad (4.11)$$

Onde,

k = Fator de abrangência fornecido no certificado de calibração da MMC.

É importante salientar que a equação 4.11 é obtida diretamente do certificado de calibração da MMC, podendo a mesma sofrer alteração a cada nova calibração da MMC.

- Incerteza do comprimento da peça devido ao termômetro.

$$u_{\text{peça/termômetro}} = \frac{(\alpha_{\text{peça}} \cdot \bar{X} \cdot u_{\text{termômetro}})}{\sqrt{3}} \quad [\text{mm}] \quad (4.12)$$

Onde,

$\alpha_{\text{peça}}$ = Coeficiente de dilatação linear da peça, Al ou fofo ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).

$u_{termômetro}$ = Incerteza padrão do termômetro (incerteza fornecida no certificado de calibração, dividida pelo fator de abrangência k).

- Incerteza do comprimento da escala da MMC devido ao termômetro.

$$u_{MMC/termômetro} = \frac{\alpha_{escala\ MMC} \cdot \bar{X} \cdot u_{termômetro}}{\frac{1000}{\sqrt{3}}} \quad [\text{mm}] \quad (4.13)$$

Onde,

$\alpha_{escala\ MMC}$ = Coeficiente de dilatação linear da escala da MMC.

- Incerteza associada ao afastamento da temperatura de referência

$$u_t = \frac{\bar{X} \cdot (\alpha_{peça} \cdot \alpha_{escala\ MMC}) \cdot (\text{Temp. de medição} - 20)}{\frac{1000}{\sqrt{3}}} \quad [\text{mm}] \quad (4.14)$$

Onde,

Temp. de medição = Temperatura média de medição (°C).

- Incerteza do comprimento da peça devido a diferença de temperatura

$$u_d = \frac{\bar{X} \cdot [(\alpha_{médio}) \cdot 0,2]}{\frac{1000}{\sqrt{3}}} \quad [\text{mm}] \quad (4.15)$$

Onde,

$$\alpha_{médio} = \frac{(\alpha_{peça} + \alpha_{escala\ MMC})}{2}$$

Vale ressaltar que na equação 4.15, a constante com de valor 0,2, pode ser substituída por 0,3 (LINK, 2000).

- Cálculo da Incerteza Combinada - u_c

$$u_c = \sqrt{(S(\bar{X}))^2 + (u_r)^2 + (u_m)^2 + (u_{peça/terômetro})^2 + (u_{MMC/terômetro})^2 + (u_t)^2 + (u_d)^2} \quad (4.16)$$

- Determinação do Número de Graus de Liberdade Efetivos - γ_{eff}

$$\gamma_{eff} = \frac{(u_c)^4}{\frac{(S(\bar{X}))^4}{n-1}} \quad (4.17)$$

- Determinação da incerteza expandida - U

$$U = k \cdot u_c \quad (4.18)$$

- Determinação do Resultado Corrigido – R_C

$$RC = \bar{X} + C \quad (4.19)$$

Onde,

$$C = \text{Correção (mm)}$$

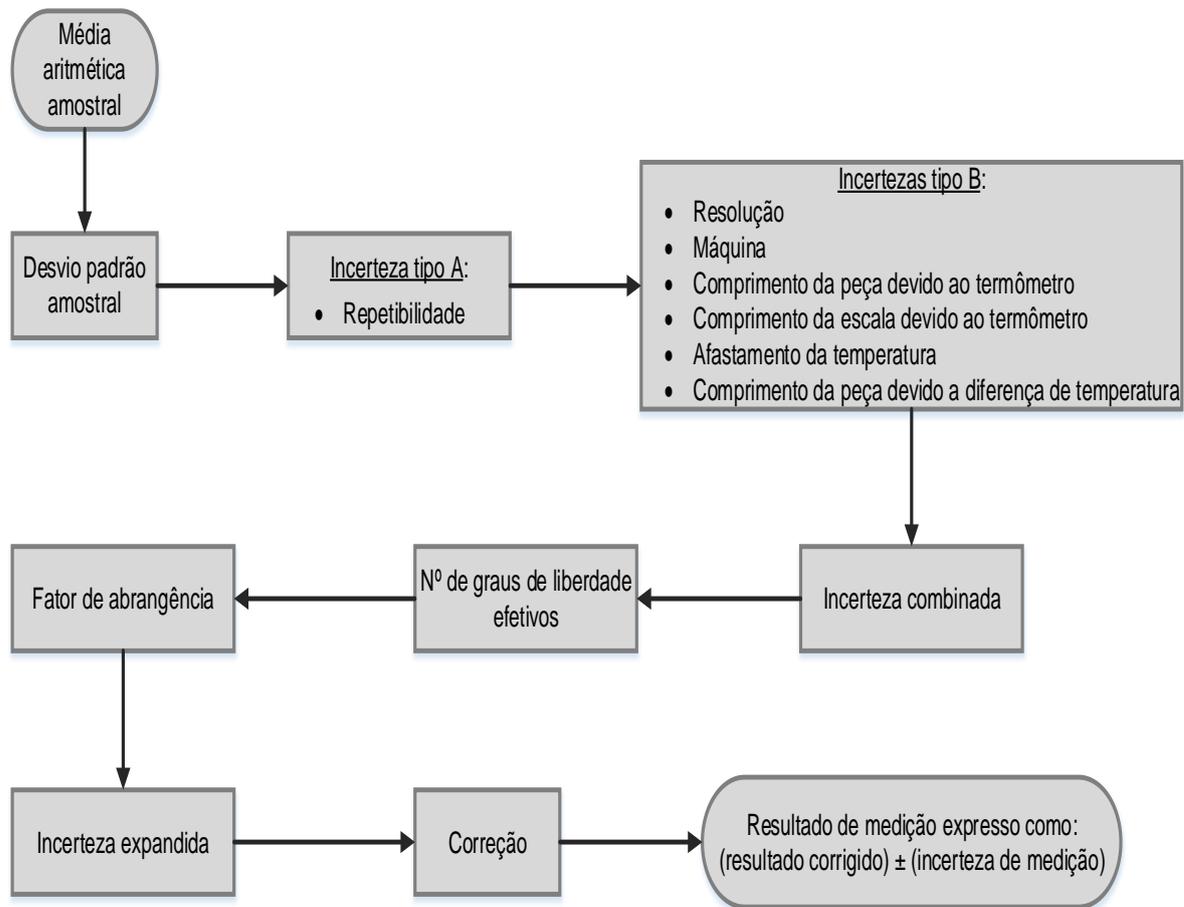
A correção assume o valor do erro sistemático informado no certificado de calibração, porém com sinal trocado.

- Determinação do Resultado de Medição – R_M

$$R_M = R_C \pm U \quad (4.20)$$

Na Figura 4.44 é apresentado um fluxograma contendo a sequência utilizada para obtenção do resultado de medição.

Figura 4.44 – Fluxograma com a sequência de cálculos para obtenção do resultado de medição



Fonte: O autor, 2018.

Com auxílio do Microsoft Excel 2010, foram criadas planilhas contendo as funções matemáticas necessárias à obtenção do resultado de medição de cada parâmetro medido, cujo intervalo de confiança adotado foi de 95,45%, tomando como base o ISO GUM 2008. A Figura 4.45 mostra parte da planilha utilizada para cálculos de paralelismo.

Figura 4.45 – Planilha utilizada para cálculos de paralelismo

Paralelismo	
Medição 1 (mm)	= 0,0095
Medição 2 (mm)	= 0,0097
Medição 3 (mm)	= 0,0097
Medição 4 (mm)	= 0,0096
Medição 5 (mm)	= 0,0097
Média (mm)	= 0,00964
Desvio Padrão (mm)	= 0,00008944
Incerteza Tipo A (mm)	
Repetibilidade - $S(x_i)$	= 4E-05
Incertezas Tipo B (mm)	
Resolução - u_r	= 5,7735E-05
Máquina - u_m	= 0,000348262
Comp. da peça devido ao termômetro - $u_{peça/termômetro}$	= 1,30236E-11
Comp. da escala da MMC devido ao termômetro - $u_{MMC/termômetro}$	= 3,33939E-13
Afastamento da temperatura - u_t	= 4,56829E-11
Comprimento da peça devido a diferença de temperatura - u_d	= 6,67879E-12
Incerteza Combinada - U_c	= 0,000355275
Número de Graus de Liberdade Efetivos - γ_{eff}	= 24892,9623
Fator de Abrangência k para Confiabilidade de 95,45%	= 2,000102883
Resultado de Medição com Conf. de 95,45% (mm) = 0,00964 ± 0,00071	

Fonte: O autor, 2018.

Para cada elemento toleranciado, utilizou-se algoritmos dedicados à execução dos cálculos (seguindo a sequência do fluxograma apresentado na Figura 4.44), sendo possível analisar cada parâmetro individualmente.

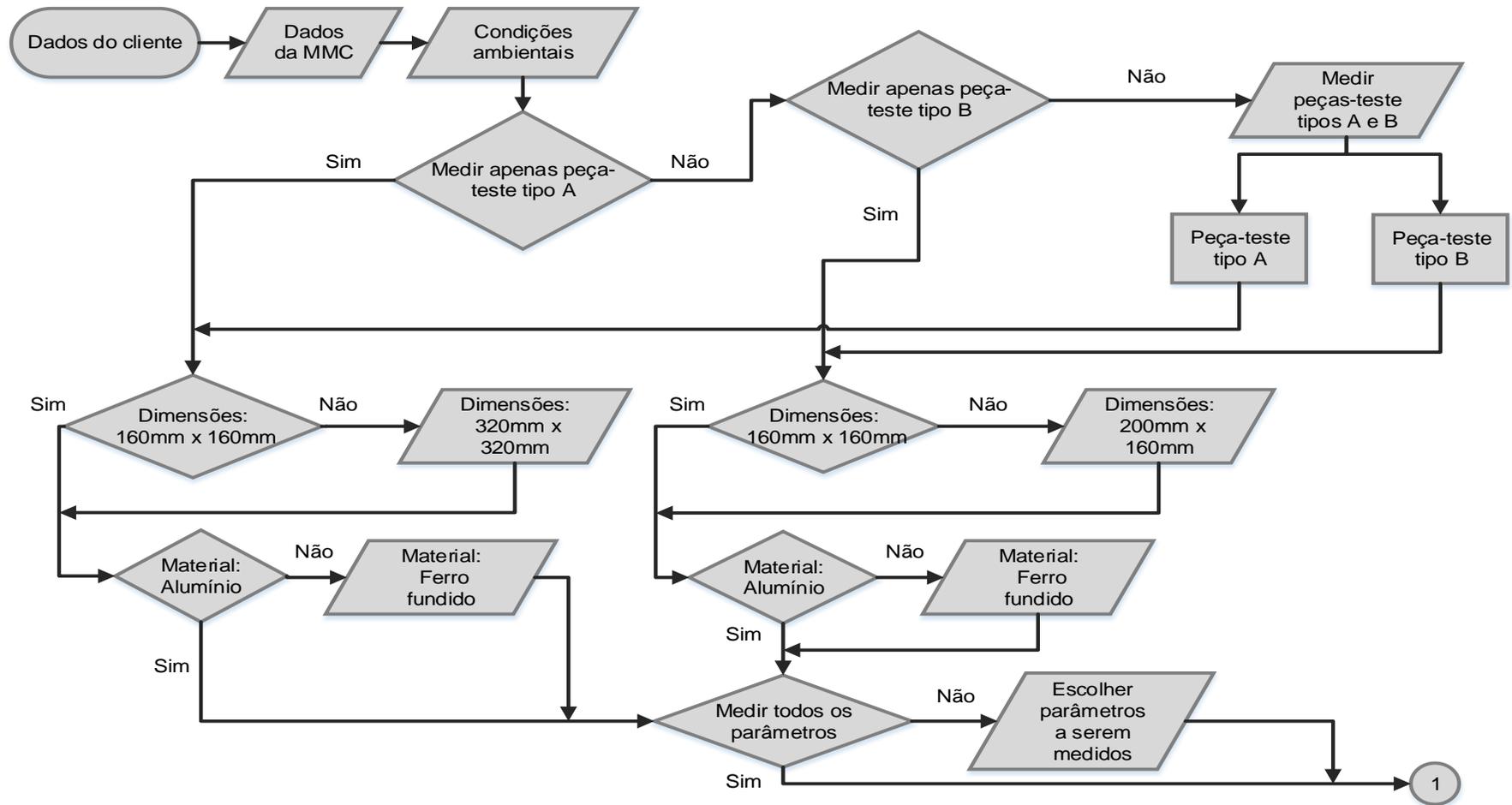
Além de auxiliar no tratamento estatístico dos dados de medição, as planilhas também foram utilizadas para validar os resultados fornecidos pelo programa computacional desenvolvido no presente trabalho de pesquisa, de modo que foram confrontados os valores de ambas as fontes para posterior comparação.

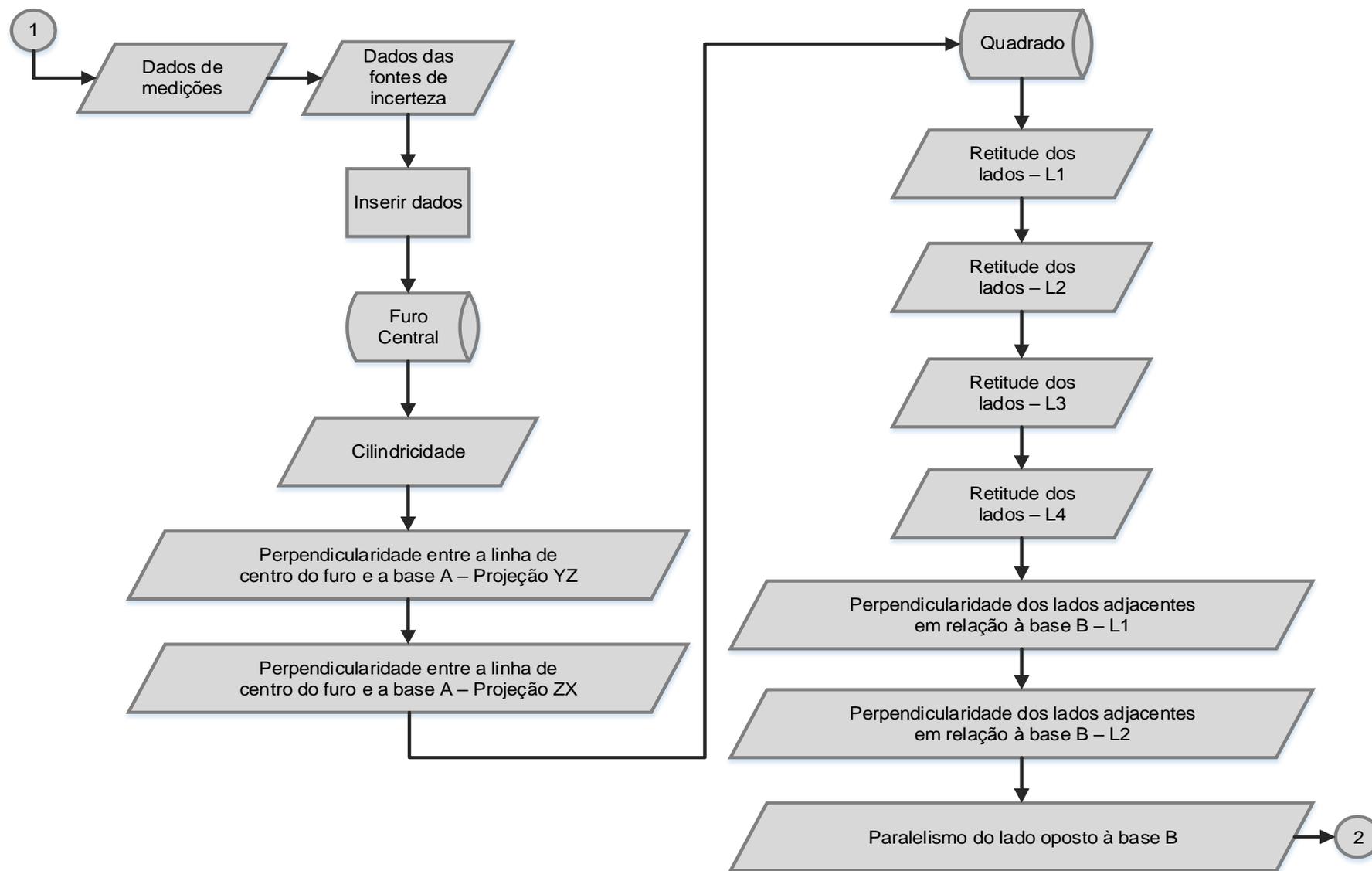
4.6 DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL *MACHINING CENTRES ANALYSER - MCA*

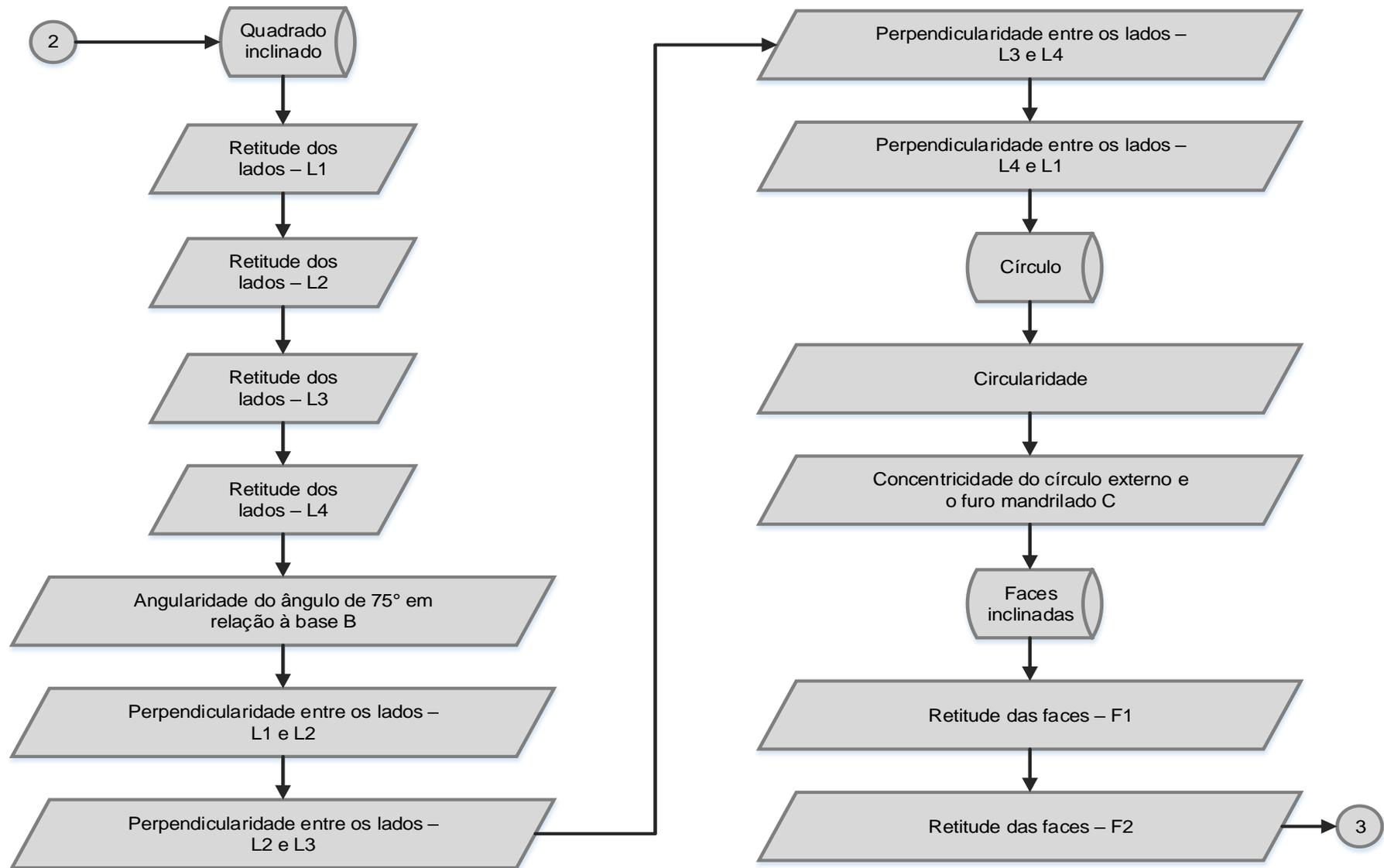
Utilizando a linguagem Java *version 1.8.0_201*, foi desenvolvido um programa computacional denominado *Machining Centres Analyser _ MCA*, para auxiliar na verificação de erros geométricos em centros de usinagem, baseado nas normas NBR NM-ISO 10791-7:1999 e ISO GUM 2008. O programa computacional surgiu com a proposta de se tornar uma ferramenta essencial para o controle de qualidade no ramo da manufatura, facilitando o trabalho de verificação de erros geométricos em centros de usinagem, contribuindo para a confiabilidade metrológica dos resultados e auxiliando na tomada de decisão para escolha de um método mais sofisticado de ensaio geométrico.

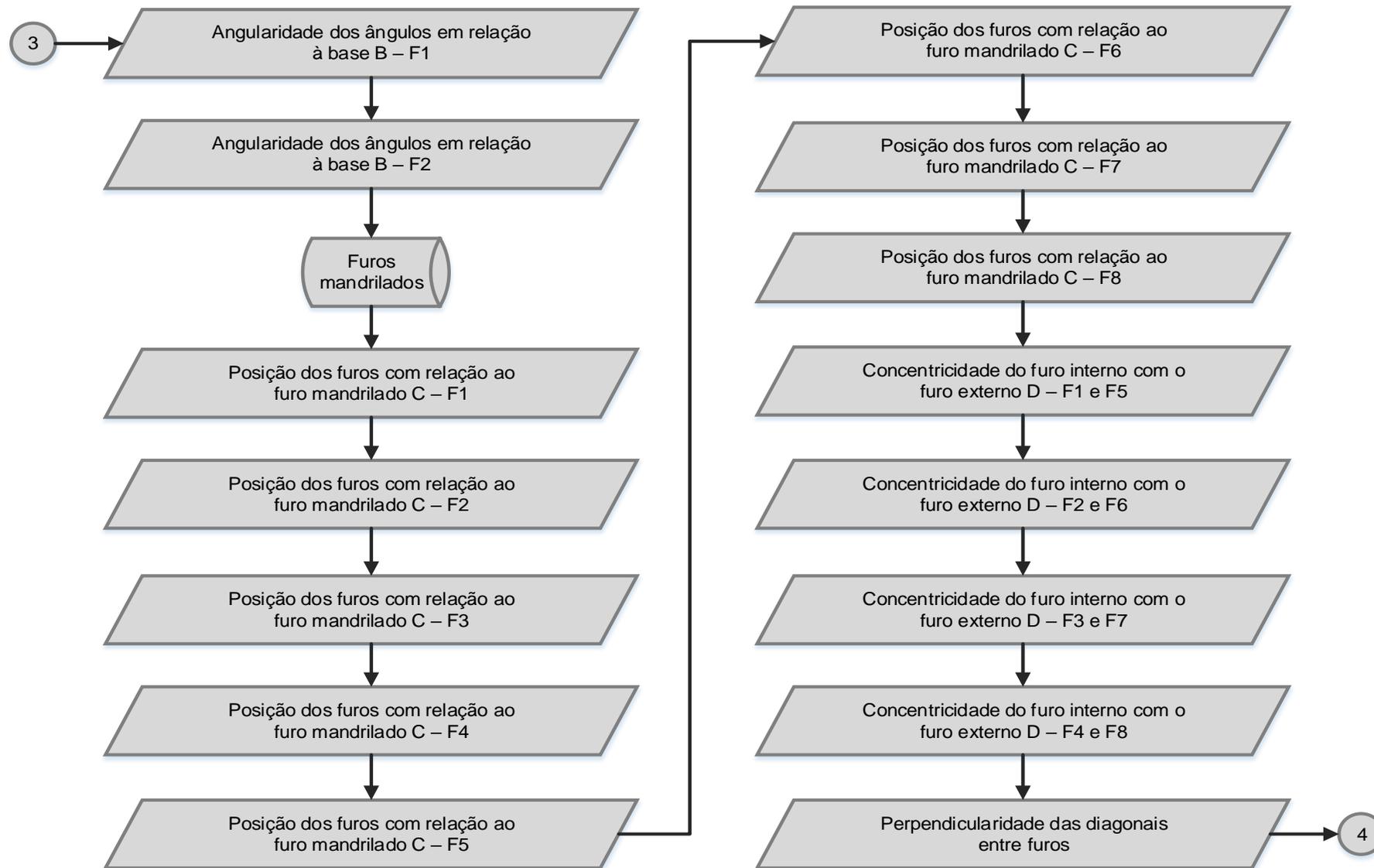
Um fluxograma contendo o algoritmo de funcionamento é apresentado na Figura 4.46.

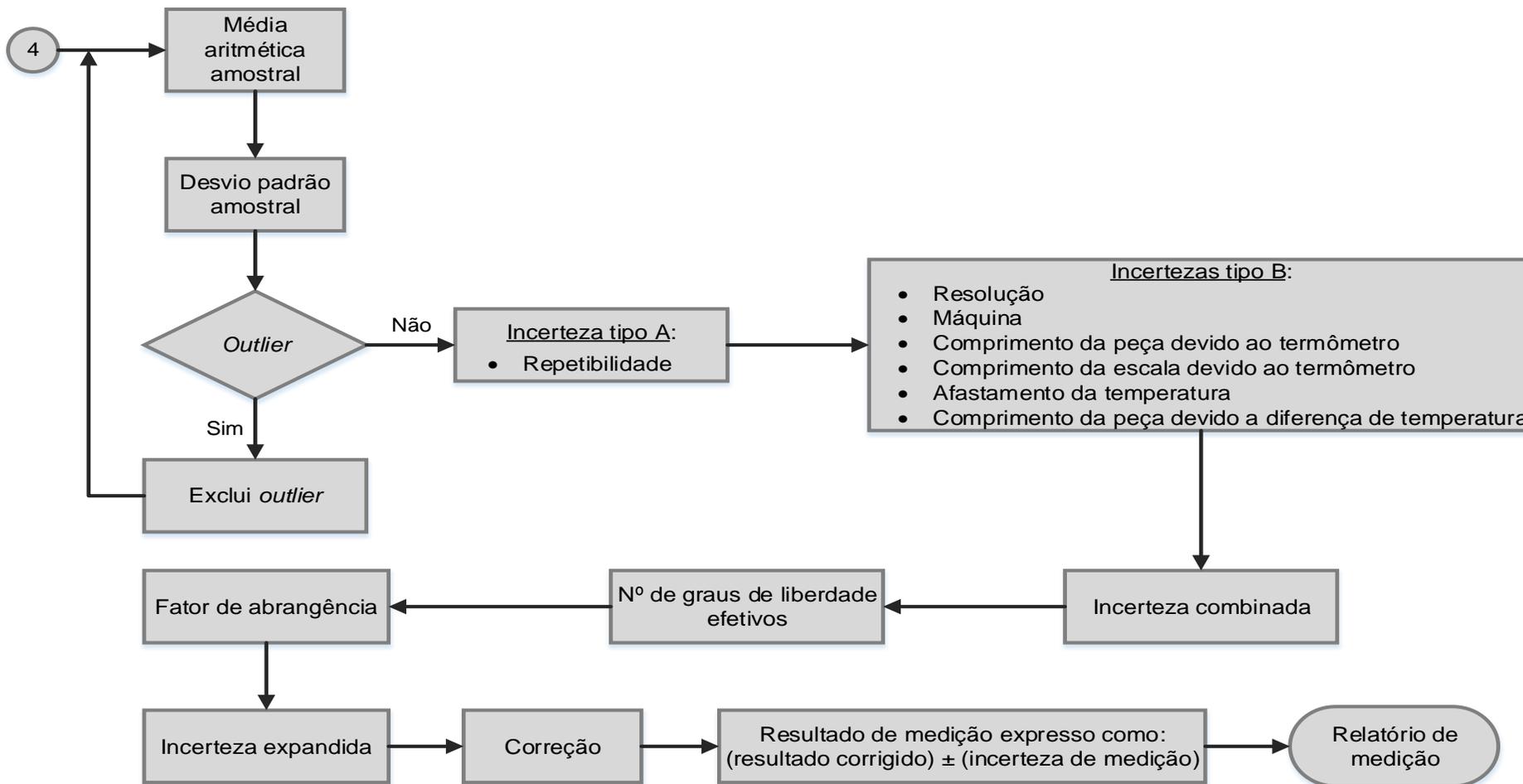
Figura 4.46 – Algoritmo de funcionamento do programa computacional *Machining Centres Analyser – MCA* (continua...)











Fonte: O autor, 2018.

Na etapa de compilação dos dados, são realizados cálculos matemáticos de cada um dos parâmetros avaliados, com o intuito de fornecer resultados tratados estatisticamente e conseqüentemente confiáveis. Também é feita uma análise para detecção de possíveis *outliers*, utilizando o teste de *Chauvenet*, de modo a só considerar valores oriundos das medições, que sejam aceitáveis diante de critérios estabelecidos por tal método (LINK, 2000).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os principais resultados e discussão.

5.1 FABRICAÇÃO DAS PEÇAS-TESTE

A NBR NM-ISO 10791-7: 1999 não especifica se as ferramentas a serem utilizadas têm de ser novas. Apesar de ser intuitivo o fato de que as mesmas devam estar em perfeito estado e sem uso, se faz necessário um controle de qualidade, pois os resultados do comportamento geométrico podem ser mascarados em virtude de má qualidade destas.

A força e a potência de corte têm grande influência nas características das peças-teste fabricadas, como por exemplo, desvios dimensionais e geométricos oriundos de deflexões causadas na peça e na ferramenta de corte. Estas variáveis por sua vez não são consideradas na norma. Caso se deseje fabricar mais de uma peça por máquina, com o controle dessas variáveis, há possibilidade de estabelecer condições similares de fabricação e maior confiabilidade das respostas obtidas.

Segundo Josef (2014), uma das fontes de erros mais importantes em usinagem de precisão são os erros induzidos termicamente nas máquinas ferramentas, podendo representar aproximadamente 75% dos desvios geométricos nas peças fabricadas. Essa característica também não é levada em consideração na avaliação dos centros de usinagem segundo a NBR NM-ISO 10791-7: 1999.

Com isso, verifica-se a necessidade de atualização da norma, de forma a acrescentar itens a serem verificados, objetivando a obtenção de resultados mais fundamentados para posteriores conclusões sobre o estado da máquina.

5.2 MEDIÇÃO DO MODELO DA PEÇA-TESTE

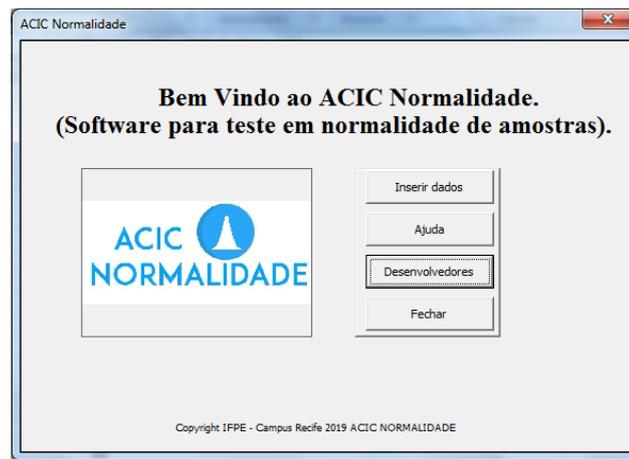
Foi possível identificar parâmetros até então não apontados na NBR NM-ISO 10791-7: 1999 como itens a serem mensurados, e que enriquecem de forma substancial o estudo acerca do comportamento geométrico da máquina ferramenta. Com isso, novos tópicos foram inclusos na lista de entidades a serem analisadas, com suas respectivas tolerâncias, bem como os planos a serem adotados como referência (não indicados na norma). No Anexo E, encontra-se o procedimento

padrão de medição que foi desenvolvido após realização de estudos e testes feitos com o modelo da peça-teste.

5.3 VERIFICAÇÃO DE NORMALIDADE DOS DADOS DE MEDIÇÃO

Utilizando o *software* ACIC Normalidade, o qual o autor deste trabalho também participou do seu desenvolvimento, foi realizada uma verificação de normalidade dos dados obtidos na etapa de medição, onde pôde-se comprovar com uma confiabilidade de 95%, que através dos testes de *Cramer Von Mises*, *Kolmogorov-Smirnov* e *Shapiro-Wilk*, as amostras provinham de populações com distribuições normais. A Figura 5.1 apresenta uma imagem da tela inicial do software ACIC Normalidade.

Figura 5.1 – Tela inicial do software ACIC Normalidade



Fonte: IFPE, 2019.

5.4 MEDIÇÃO DAS PEÇAS-TESTE

A partir dos valores de medição tratados estatisticamente, foram plotados gráficos, de modo a facilitar a visualização do comportamento quanto às tolerâncias geométricas das peças fabricadas em cada equipamento. Assim, foi possível representar os valores médios com as respectivas incertezas de medição de cada parâmetro medido nas peças-teste, sendo possível realizar comparações e análises quantitativas e qualitativas dos três centros de usinagem avaliados, MC-1, MC-2 e MC-3.

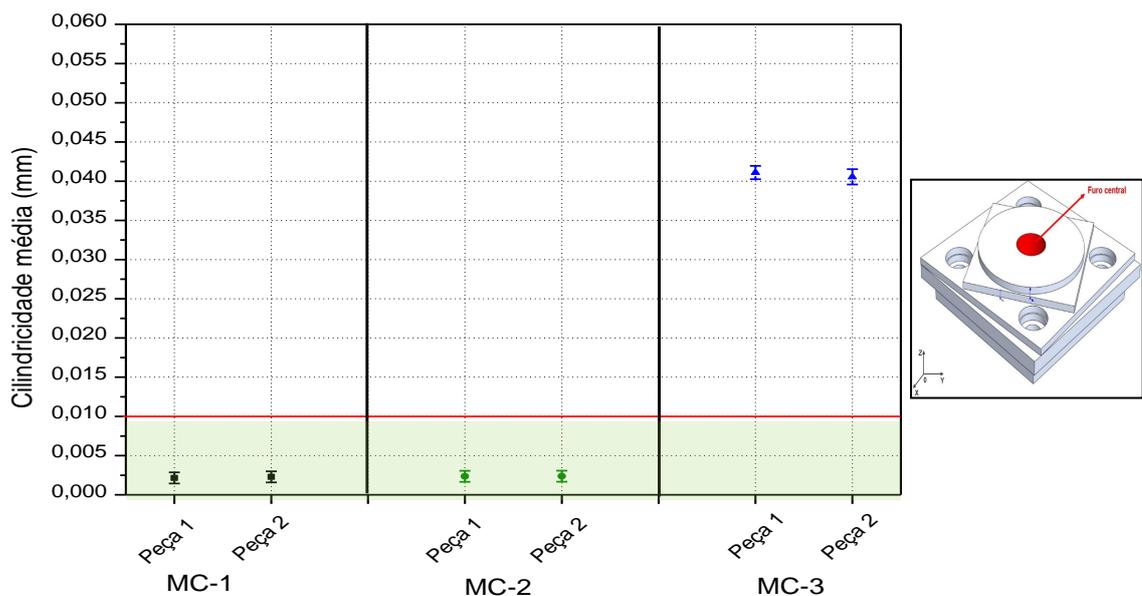
5.4.1 Furo Central

Nesta seção são apresentados os resultados e discussão acerca do furo central.

5.4.1.1 Cilindricidade

A Figura 5.2 mostra um gráfico com resultados de cilindridade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.2 – Gráfico dos valores médios de cilindridade com as respectivas incertezas de medição



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-2 estão em conformidade com os limites aceitáveis, enquanto que o MC-3 apresentou valores acima dos toleráveis, sendo $(0,0411 \pm 0,0009)$ mm para a peça 1 e $(0,0405 \pm 0,0010)$ mm para a peça 2, o que indica não atender a tolerância geométrica de cilindridade.

Observa-se ainda que a incerteza de medição é aproximadamente 1/10 da tolerância, obtendo-se assim uma condição ideal de utilização.

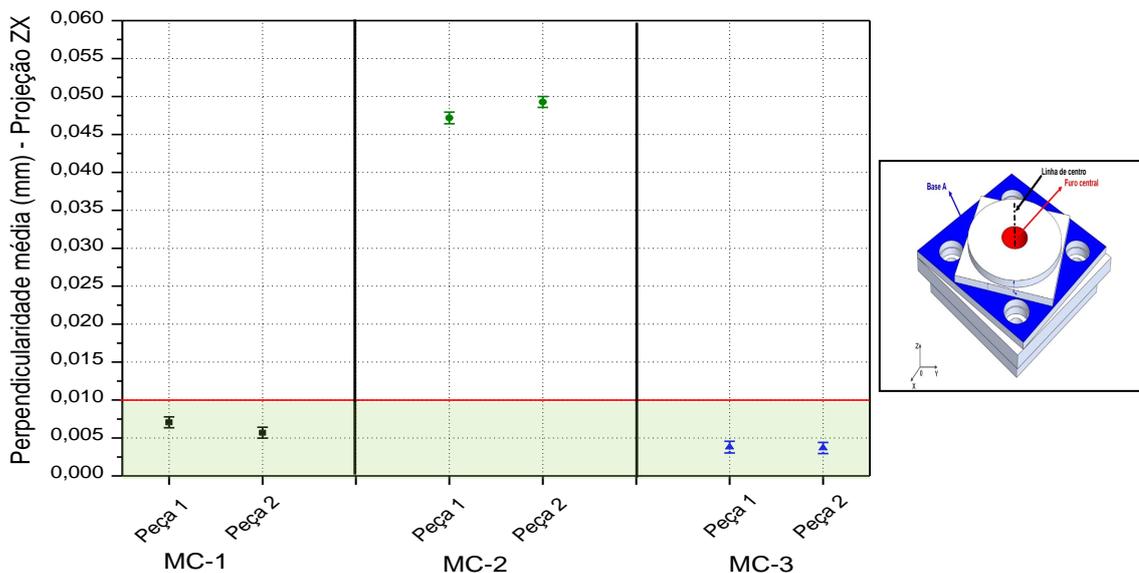
5.4.1.2 Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A

Nesta seção são apresentados os resultados e discussão acerca da perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A.

5.4.1.2.1 *Projeção YZ*

A Figura 5.3 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média na projeção YZ em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.3 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Projeção YZ



Fonte: O autor, 2019.

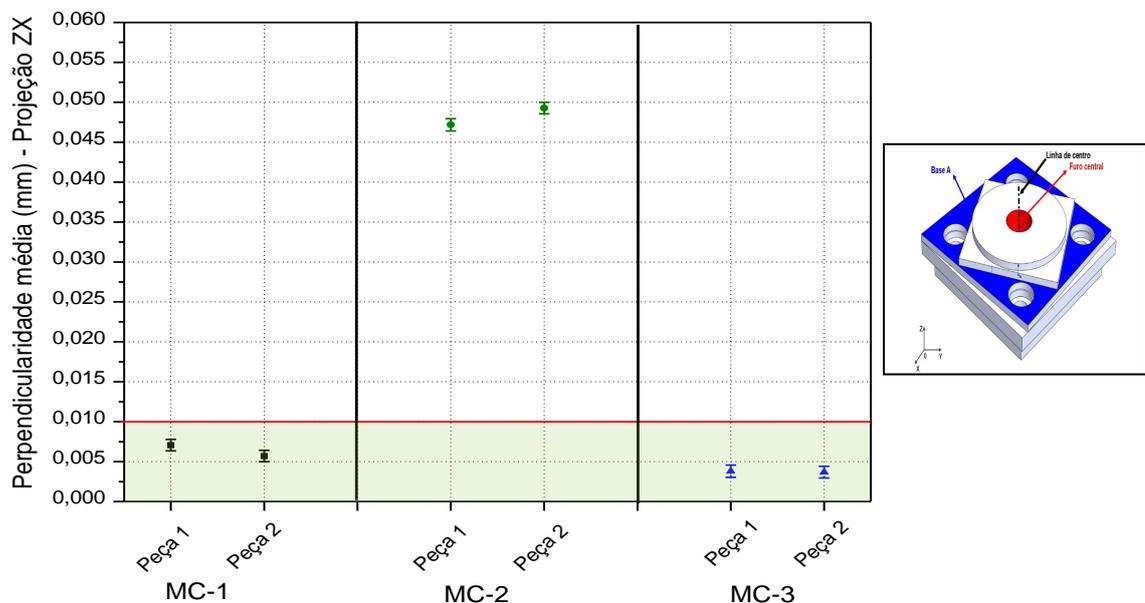
Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, enquanto que o MC-2 apresentou valores acima dos toleráveis, sendo $(0,0385 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0374 \pm$

0,0007) mm para a peça 2, o que indica não ser capaz de atender a tolerância geométrica de perpendicularidade na projeção YZ.

5.4.1.2.2 Projeção ZX

A Figura 5.4 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média na projeção ZX em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.4 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Projeção ZX



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, enquanto que o MC-2 apresentou valores acima dos toleráveis, sendo $(0,0472 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0493 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2, o que indica não ser capaz de atender a tolerância geométrica de perpendicularidade na projeção ZX.

5.4.2 Quadrado

Nesta seção são apresentados os resultados e discussão acerca do quadrado.

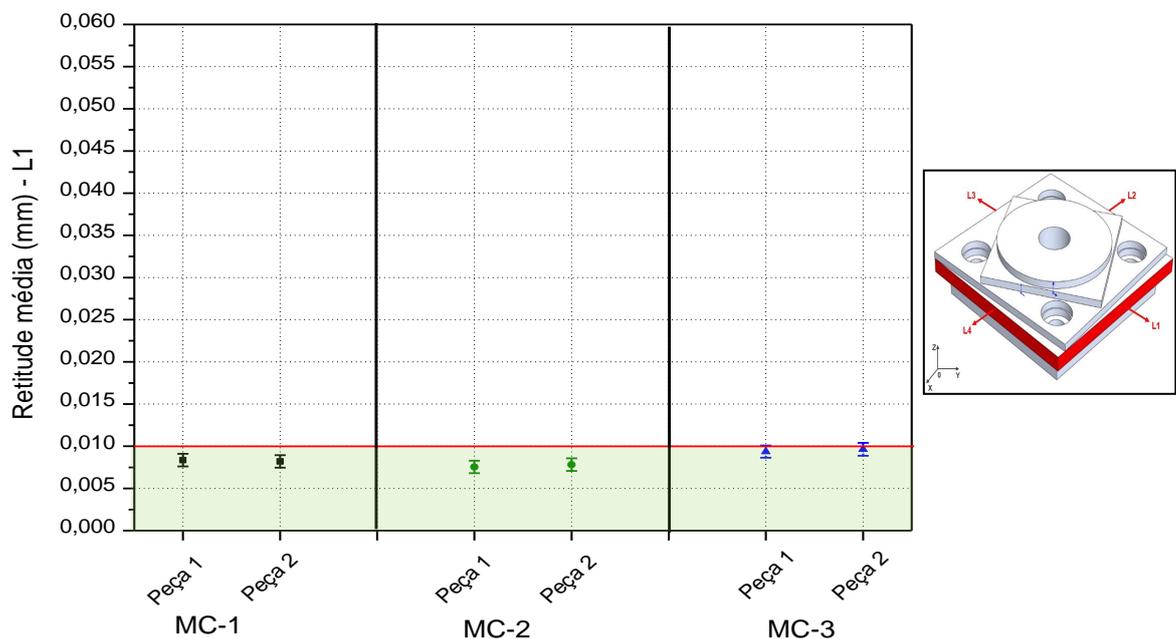
5.4.2.1 Retitude dos lados

Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da retitude dos lados.

5.4.2.1.1 Lado 1

A Figura 5.5 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.5 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 1



Fonte: O autor, 2019.

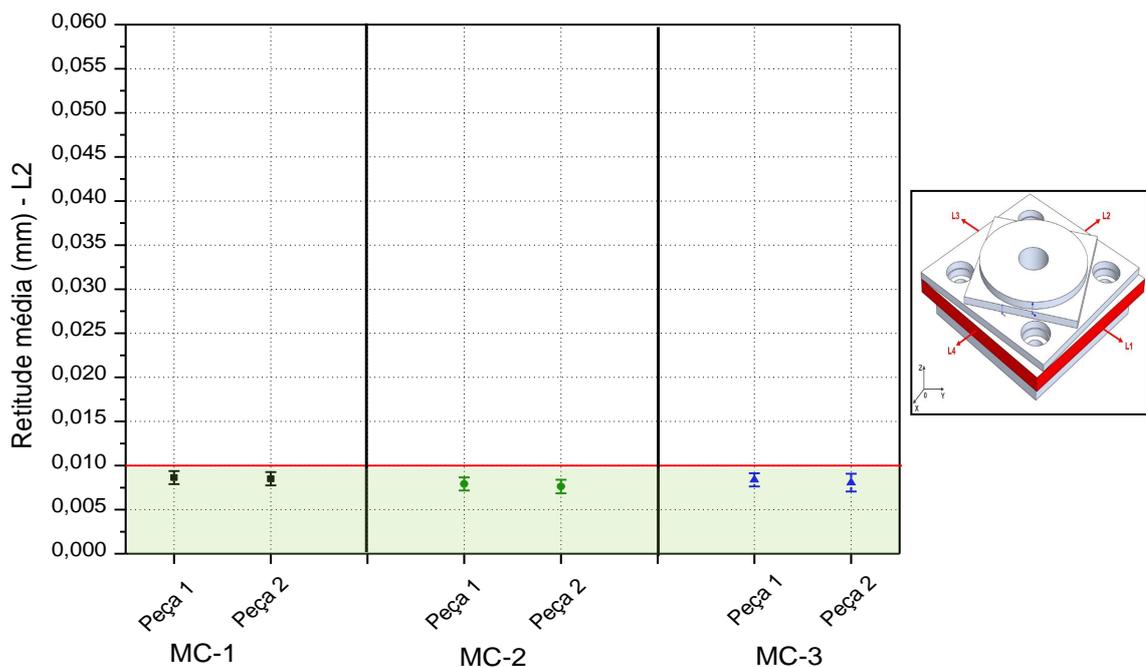
Os valores médios de retitude das peças produzidas no centro de usinagem MC-3 se apresentaram muito próximos do limite tolerado, sendo $(0,0094 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0096 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2. Considerando-se a

incerteza de medição, os valores obtidos de ambas as peças poderão se apresentar acima do aceitável. Faz-se, portanto, necessário o estabelecimento de uma zona de conformidade.

5.4.2.1.2 Lado 2

A Figura 5.6 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.6 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 2



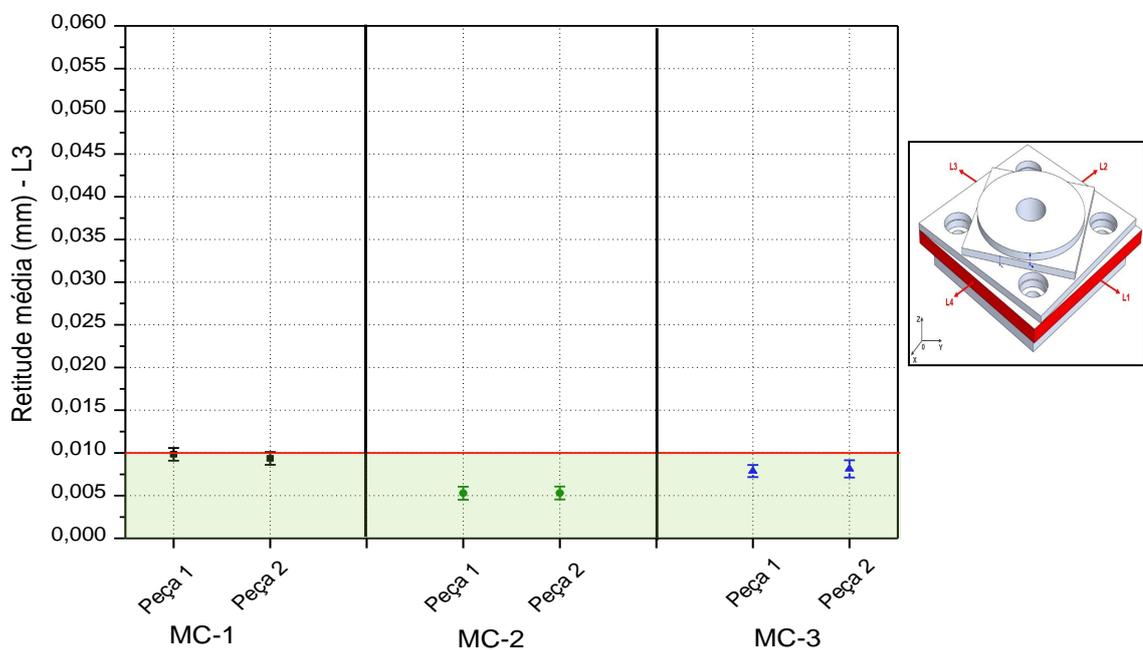
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que todos os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, mesmo apresentando resultados próximos do valor tolerado, apresentam-se de acordo e capazes de atender a tolerância geométrica de retitude.

5.4.2.1.3 Lado 3

A Figura 5.7 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.7 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 3



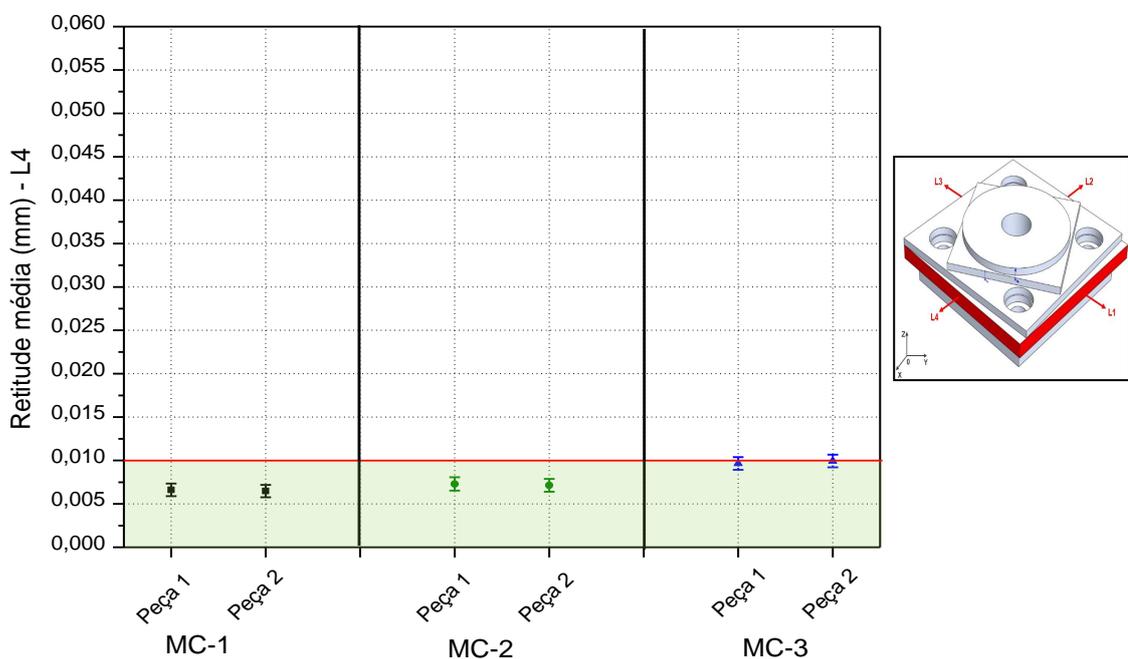
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, enquanto que o MC-1 apresentou valores muito próximos do tolerável, sendo $(0,0098 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0094 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2. Considerando-se a incerteza de medição, os valores obtidos de ambas as peças poderão se apresentar acima do aceitável. Faz-se, portanto, necessário o estabelecimento de uma zona de conformidade.

5.4.2.1.4 Lado 4

A Figura 5.8 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.8 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 4



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-2 estão em conformidade com os limites aceitáveis, enquanto que o MC-3 apresentou valores muito próximos do tolerável, sendo $(0,0097 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0099 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2. Considerando-se a incerteza de medição, os valores obtidos de ambas as peças poderão se apresentar acima do aceitável. Faz-se, portanto, necessário o estabelecimento de uma zona de conformidade.

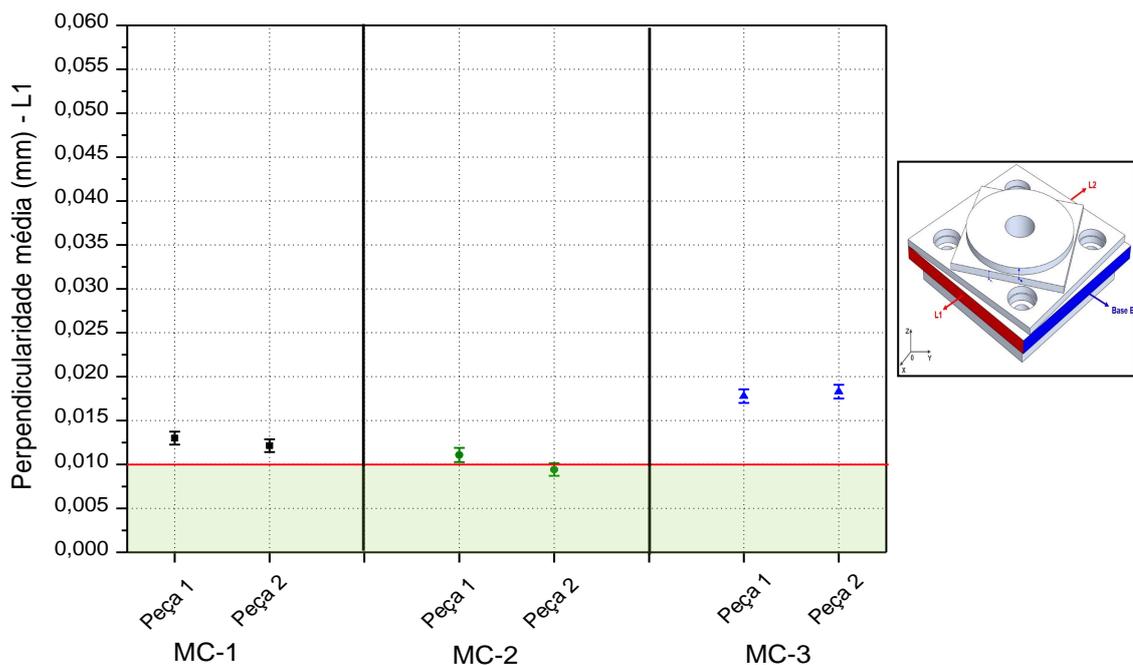
5.4.2.2 Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B

Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B.

5.4.2.2.1 Lado 1

A Figura 5.9 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.9 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Lado 1



Fonte: O autor, 2019.

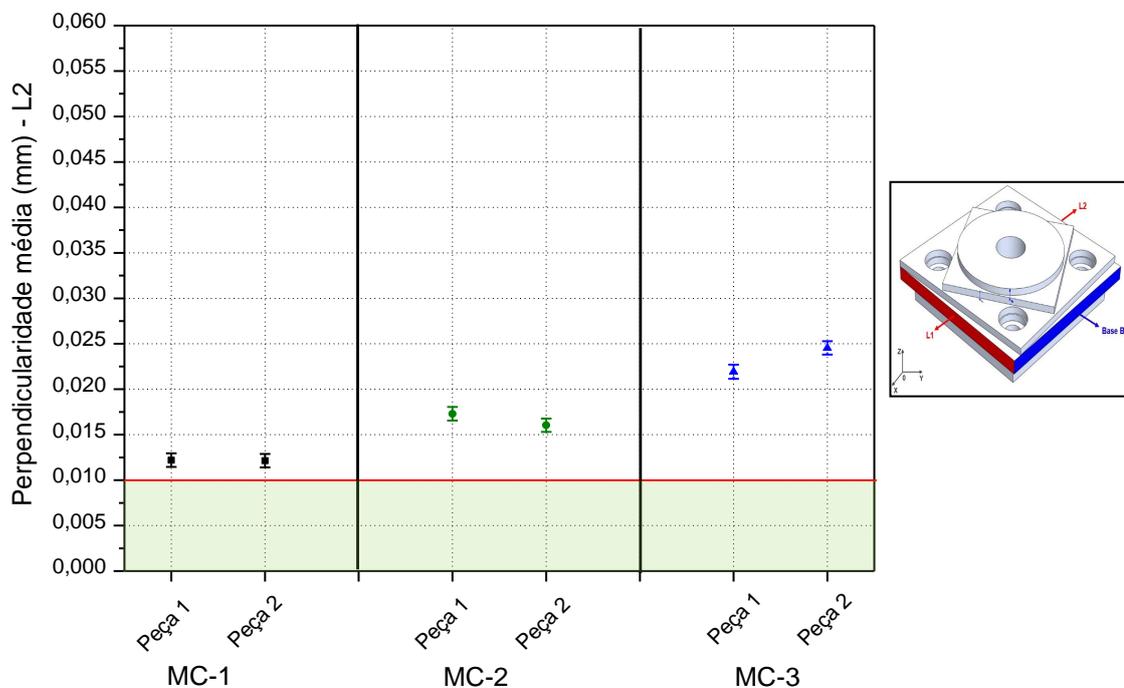
Verifica-se na Figura acima que os valores médios de perpendicularidade para as peças 1 e 2 dos equipamentos MC-1 e MC-3 estão acima do limite aceitável, indicando não conformidade acerca do parâmetro medido. Com relação à MC-2, foram obtidos os valores de $(0,0111 \pm 0,0008)$ mm e $(0,0094 \pm 0,0007)$ mm para as peças 1 e 2 respectivamente, e apesar de uma delas possuir um valor médio inferior

ao limite de tolerância, considera-se não capaz para atendimento aos requisitos estabelecidos em norma com relação à perpendicularidade.

5.4.2.2.2 Lado 2

A Figura 5.10 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.10 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Lado 2



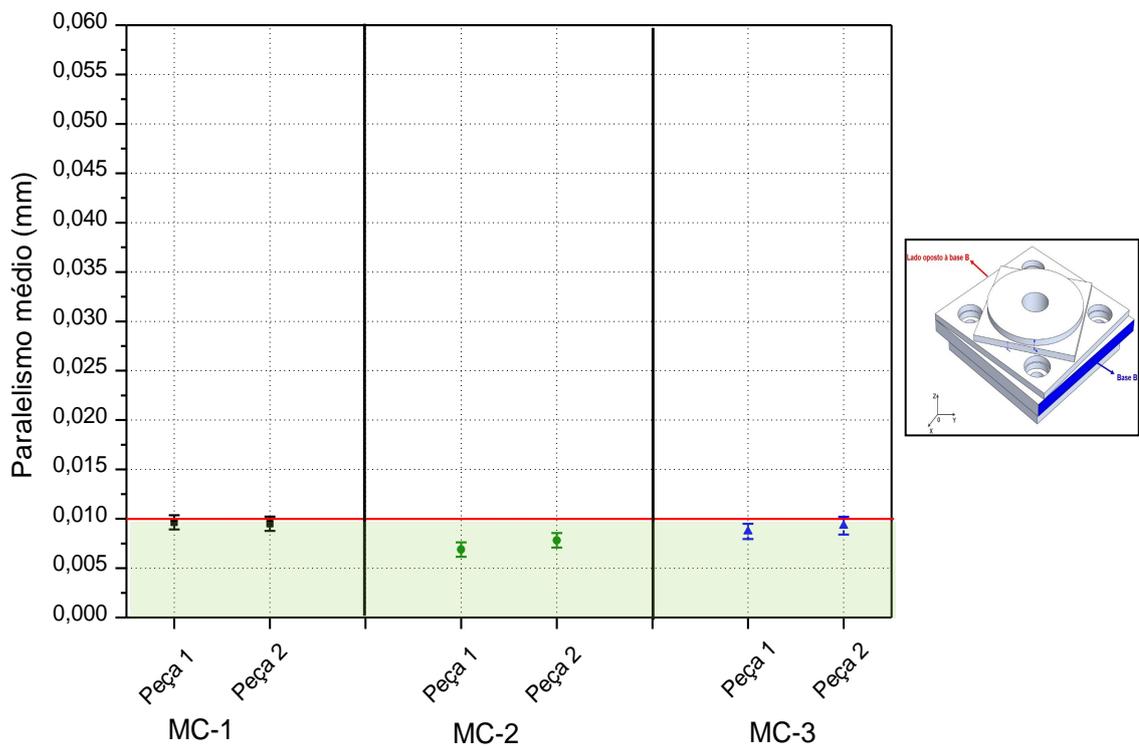
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os valores médios de perpendicularidade para as peças 1 e 2 dos três (03) equipamentos MC-1, MC-2 e MC-3 estão acima do limite aceitável, indicando não conformidade acerca do parâmetro medido e com isso são considerados não capazes para atendimento aos requisitos estabelecidos em norma com relação à perpendicularidade.

5.4.2.3 Paralelismo do lado oposto à base B

A Figura 5.11 mostra um gráfico com resultados de paralelismo médio em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.11 – Gráfico dos valores médios de paralelismo com as respectivas incertezas de medição



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os valores médios de paralelismo para as peças 1 e 2 dos três (03) centros de usinagem, MC-1, MC-2 e MC-3 estão abaixo do limite aceitável, indicando conformidade acerca do parâmetro medido. Considerando-se a incerteza de medição, os valores obtidos de ambas as peças do MC-1 e da peça 2 do MC-3, poderão se apresentar acima do aceitável. Faz-se, portanto, necessário o estabelecimento de uma zona de conformidade.

5.4.3 Quadrado inclinado

Nesta seção são apresentados os resultados e discussão acerca do quadrado inclinado.

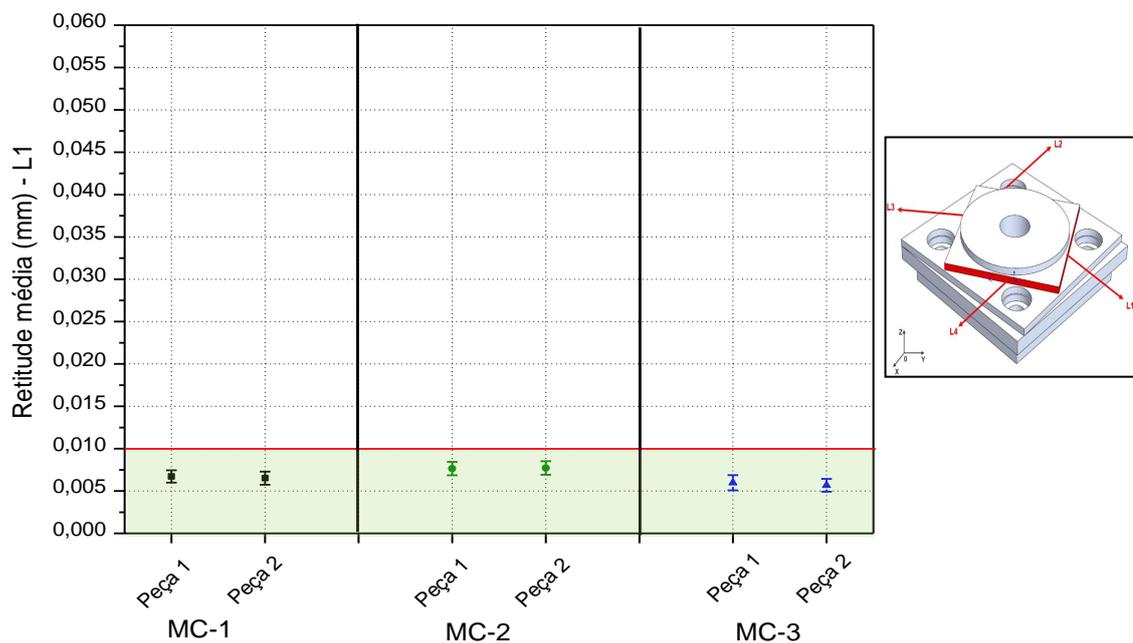
5.4.3.1 Retitude dos lados

Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da retitude dos lados.

5.4.3.1.1 Lado 1

A Figura 5.12 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.12 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 1



Fonte: O autor, 2019.

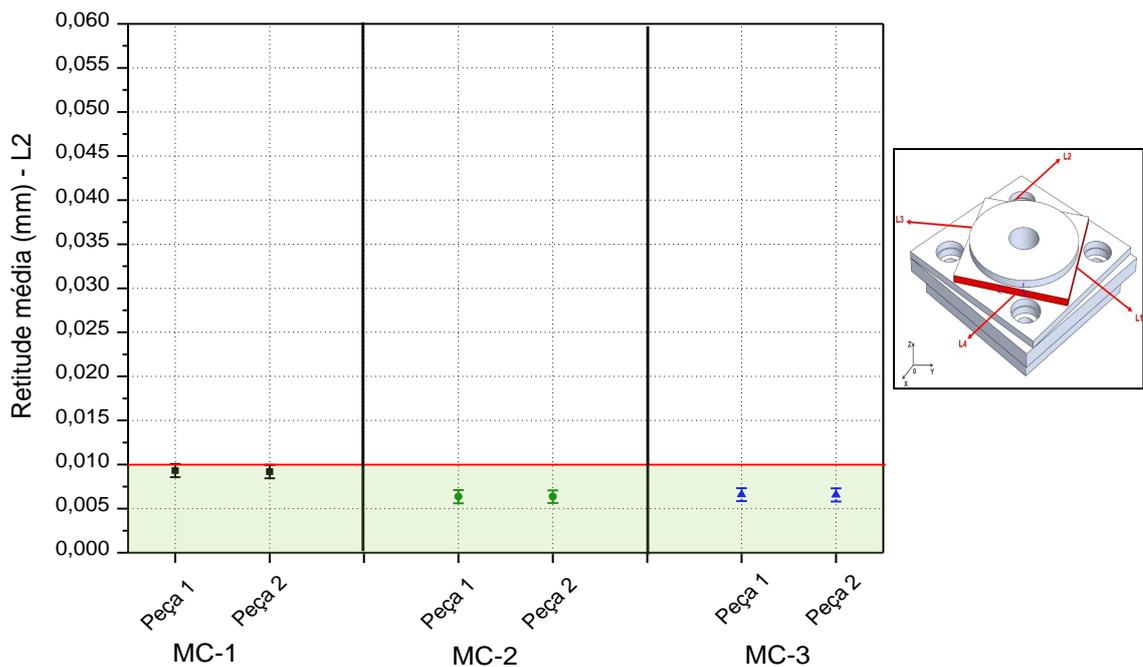
Verifica-se na Figura acima que todos os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, porém o MC-3 apresentou

valores muito próximos do tolerado, sendo $(0,0094 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0096 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2. Considerando-se a incerteza de medição, os valores obtidos de ambas as peças poderão se apresentar acima do aceitável. Faz-se, portanto, necessário o estabelecimento de uma zona de conformidade.

5.4.3.1.2 Lado 2

A Figura 5.13 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.13 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 2



Fonte: O autor, 2019.

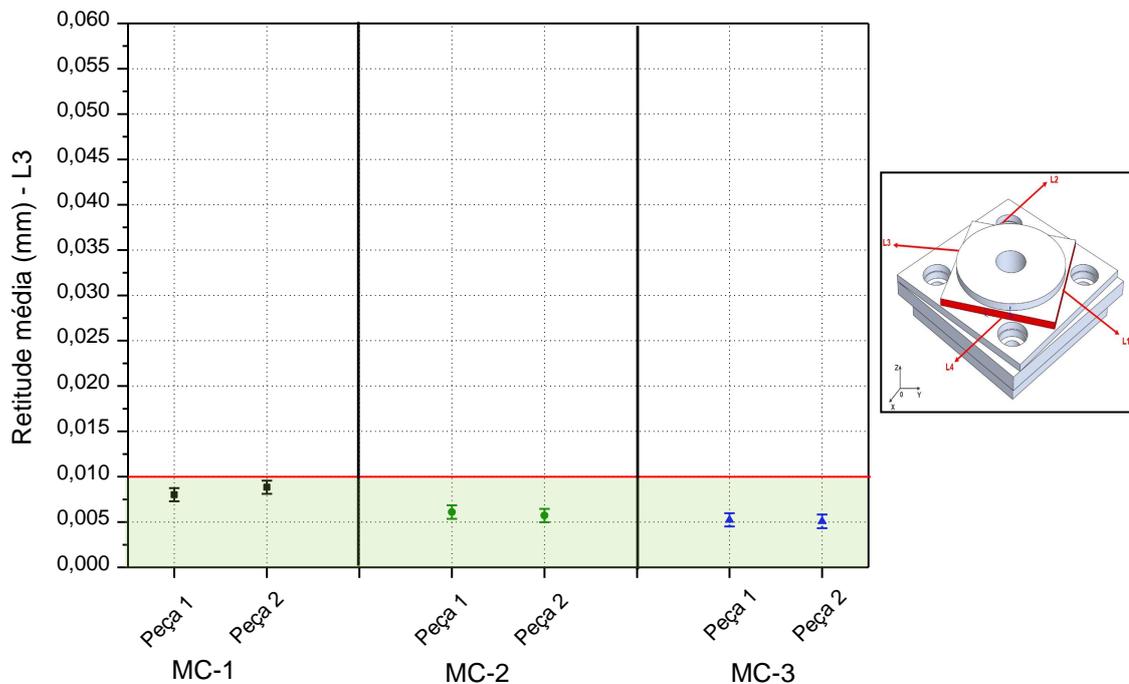
Verifica-se na Figura acima que todos os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, porém o MC-1 apresentou valores muito próximos do tolerado, sendo $(0,0093 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0092 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2. Considerando-se a incerteza de medição, os

valores obtidos de ambas as peças poderão se apresentar acima do aceitável. Faz-se, portanto, necessário o estabelecimento de uma zona de conformidade.

5.4.3.1.3 Lado 3

A Figura 5.14 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.14 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 3



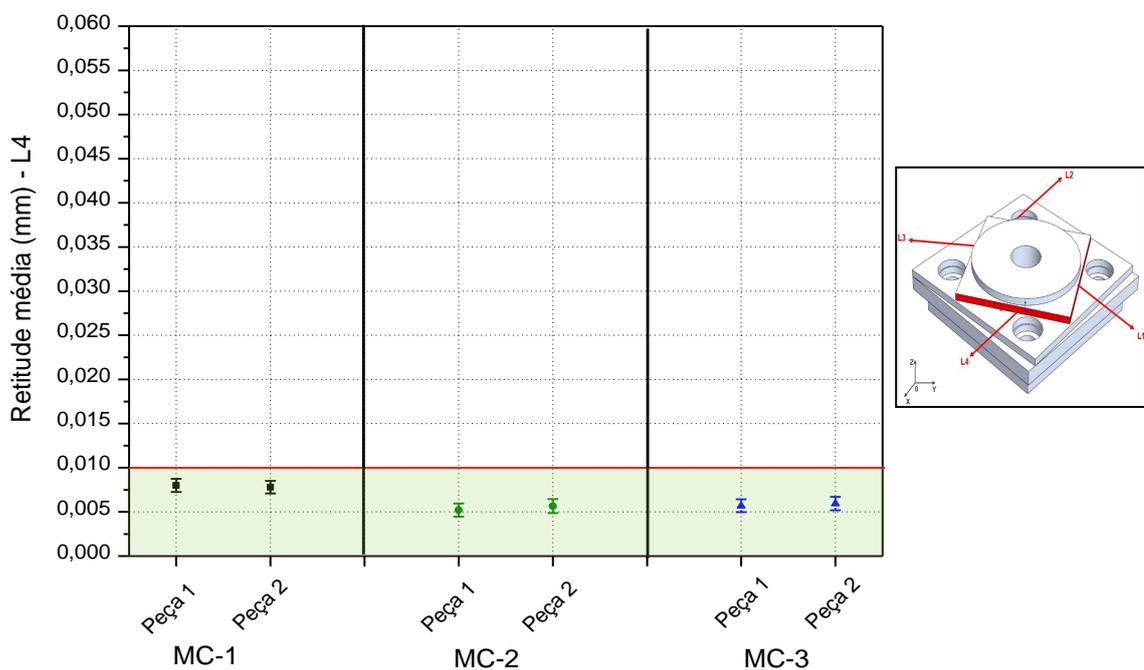
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que todos os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, e que o maior valor obtido foi para a peça 2 fabricada no equipamento MC-1, apresentando o valor de retitude igual a $(0,0088 \pm 0,0007)$ mm, o que é abaixo do limite de tolerância.

5.4.3.1.4 Lado 4

A Figura 5.15 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.15 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Lado 4



Fonte: O autor, 2019.

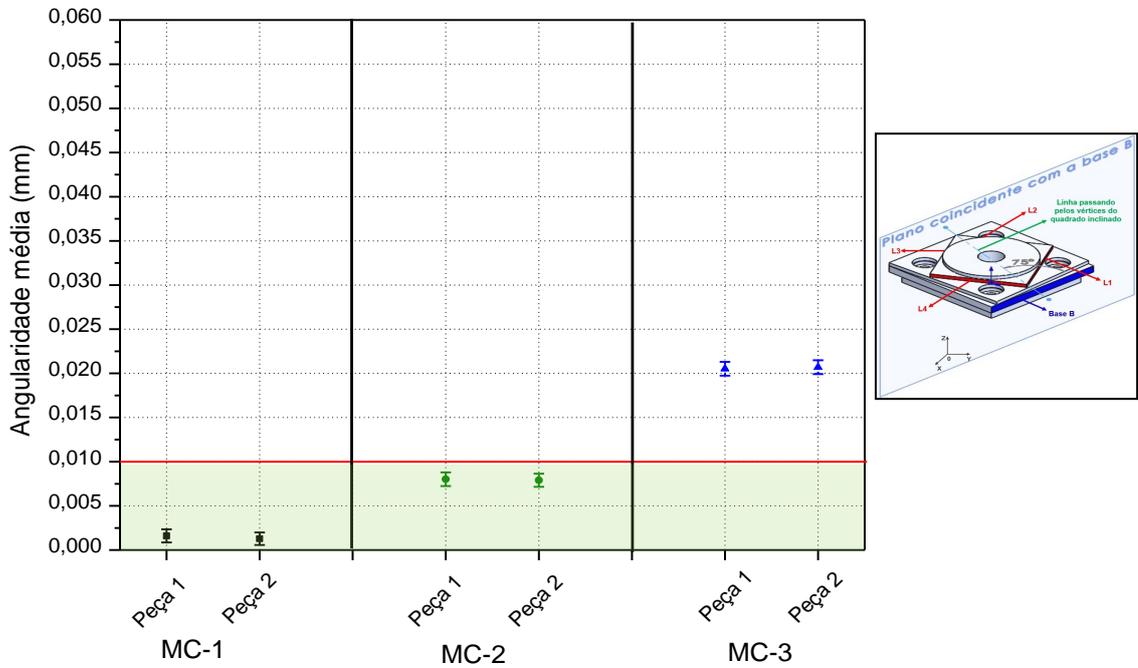
Verifica-se na Figura acima que todos os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, indicando serem capazes de atender a tolerância geométrica de retitude.

5.4.3.2 Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B

A Figura 5.16 mostra um gráfico com resultados de angularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha

vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.16 – Gráfico dos valores médios de angularidade com as respectivas incertezas de medição



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-2 estão em conformidade com os limites aceitáveis, porém o MC-3 apresentou valores acima do tolerado, sendo $(0,0205 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0207 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2, indicando não conformidade com a tolerância geométrica de angularidade.

5.4.3.3 Perpendicularidade entre lados

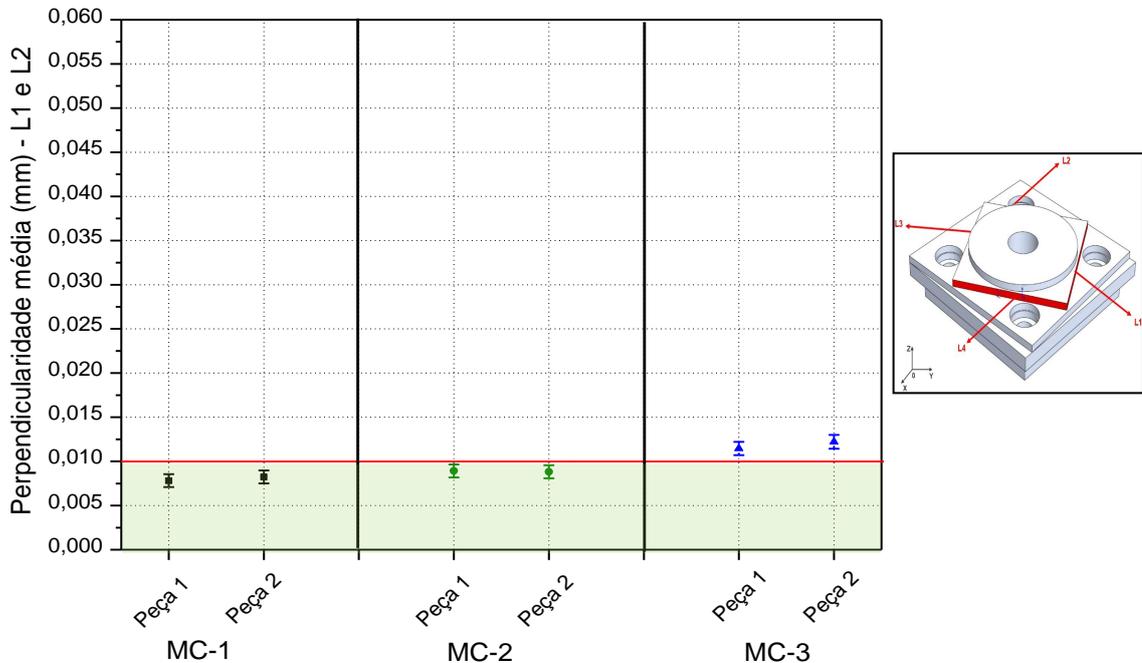
Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da perpendicularidade entre lados.

5.4.3.3.1 Lados 1 e 2

A Figura 5.17 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A

linha vermelha representa a tolerância estabelecida com base na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.17 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Lados 1 e 2



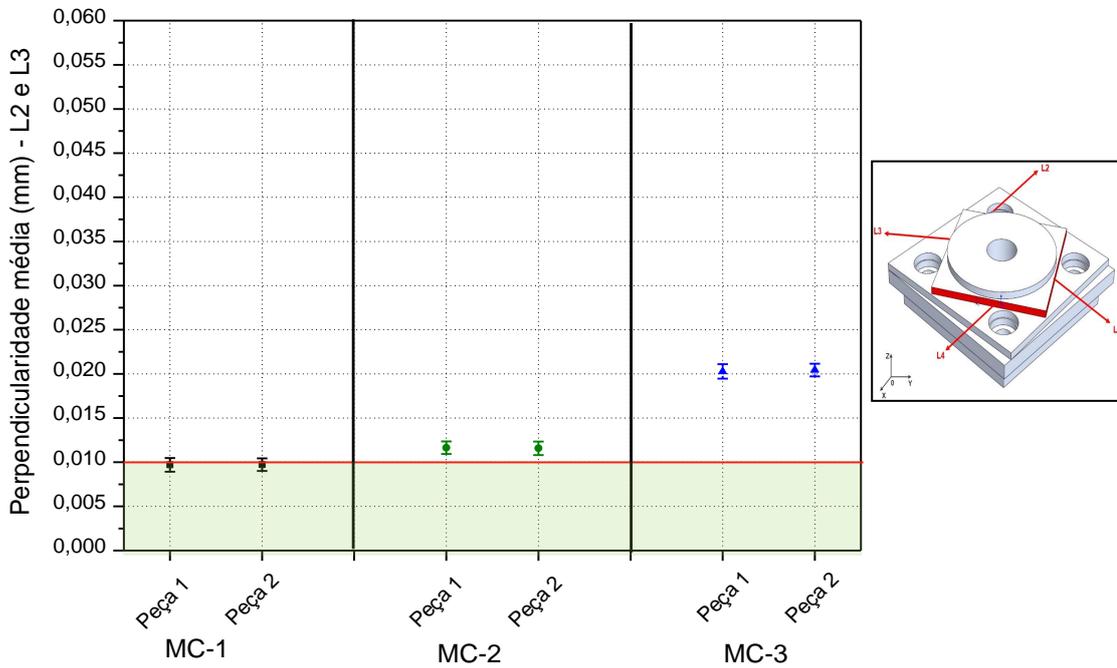
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-2 estão em conformidade com os limites aceitáveis, porém o MC-3 apresentou valores acima do tolerado, sendo $(0,0114 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0122 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2, indicando não conformidade com a tolerância geométrica de perpendicularidade.

5.4.3.3.2 Lados 2 e 3

A Figura 5.18 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância estabelecida com base na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.18 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Lados 2 e 3



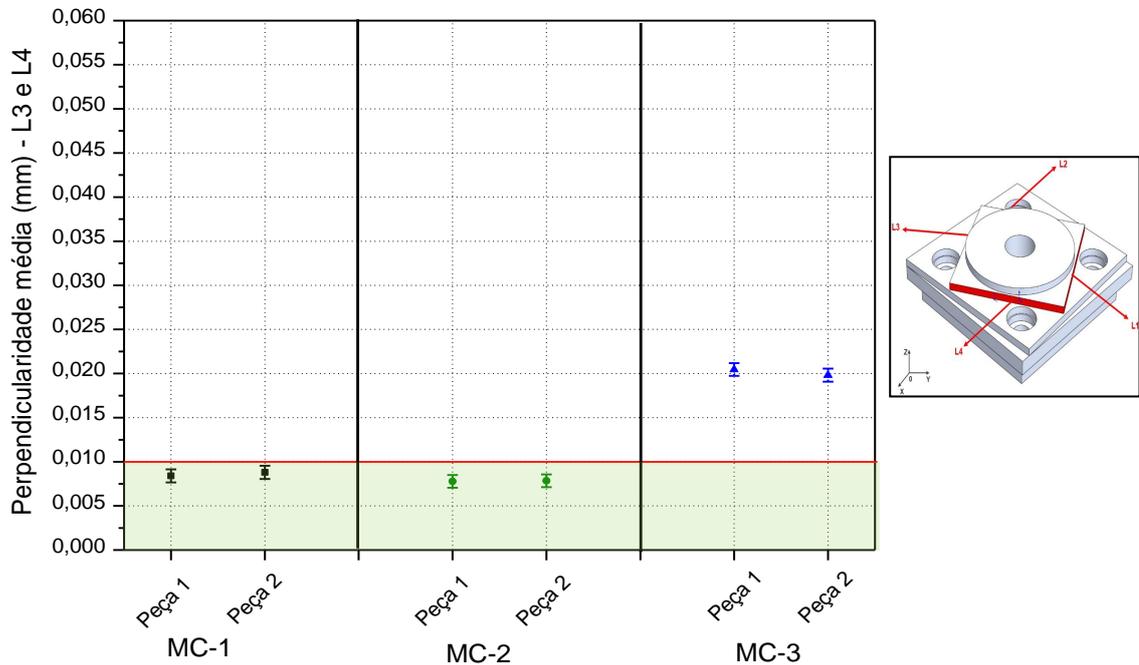
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os valores médios obtidos das peças fabricadas no centro de usinagem MC-1 estão em conformidade com o limite aceitável, porém considerando as incertezas de medição constata-se que os resultados estão acima da faixa de aceitação, com os valores de $(0,0097 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0097 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2. Já os resultados correspondentes à MC-2 e MC-3 estão acima do admissível, apontando não conformidade com a tolerância geométrica de perpendicularidade.

5.4.3.3.3 Lados 3 e 4

A Figura 5.19 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância estabelecida com base na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.19 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Lados 3 e 4



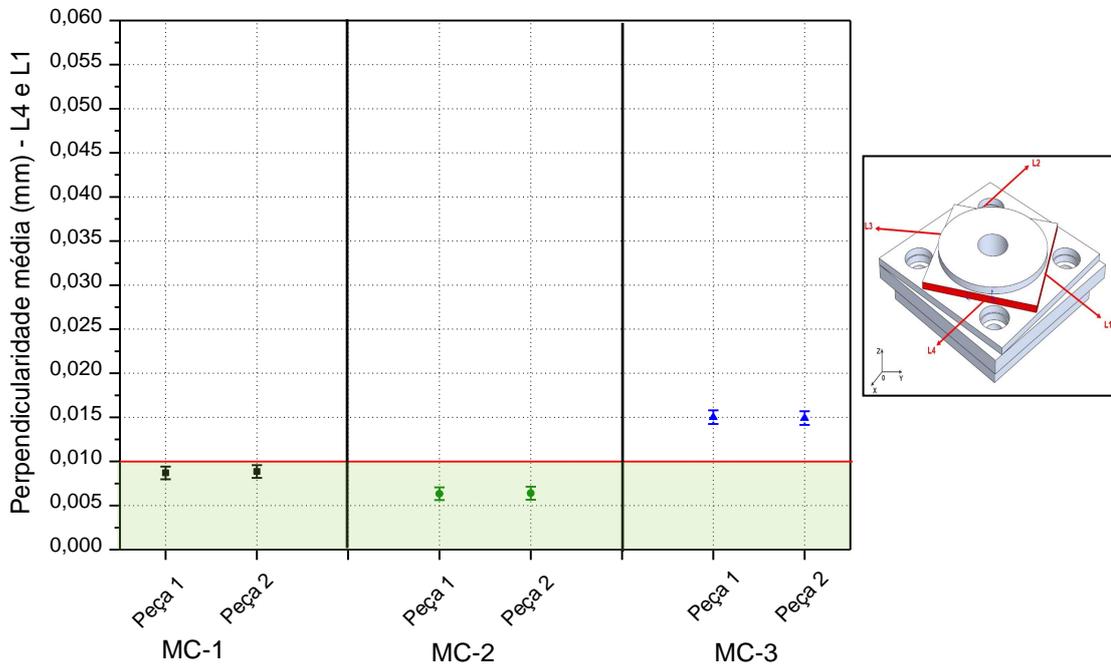
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-2 estão atendendo os limites aceitáveis, porém o MC-3 apresentou valores acima do tolerado, sendo $(0,0205 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0198 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2, indicando não conformidade com a tolerância geométrica de perpendicularidade.

5.4.3.3.4 Lados 4 e 1

A Figura 5.20 mostra um gráfico com resultados de perpendicularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância estabelecida com base na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.20 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição – Lados 4 e 1



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-1 e MC-2 estão atendendo os limites aceitáveis, porém o MC-3 apresentou valores acima do tolerado, sendo $(0,0150 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0149 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2, indicando não conformidade com a tolerância geométrica de perpendicularidade.

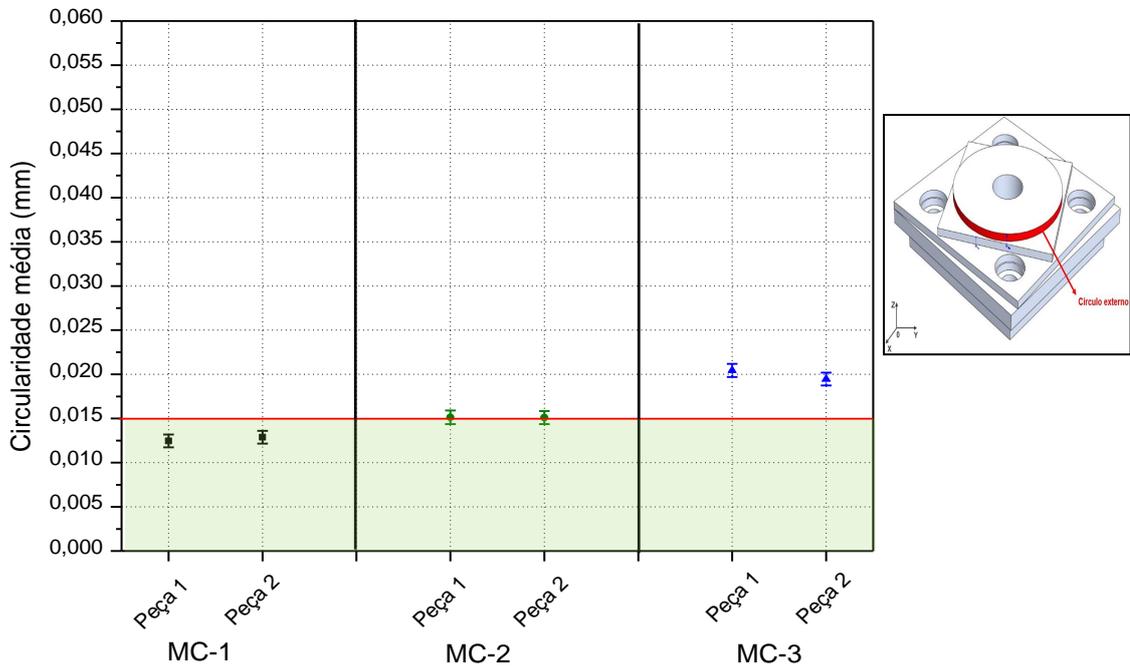
5.4.4 Círculo

Nesta seção são apresentados os resultados e discussão acerca do círculo.

5.4.4.1 Circularidade

A Figura 5.21 mostra um gráfico com resultados de circularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,015 mm.

Figura 5.21 – Gráfico dos valores médios de circularidade com as respectivas incertezas de medição



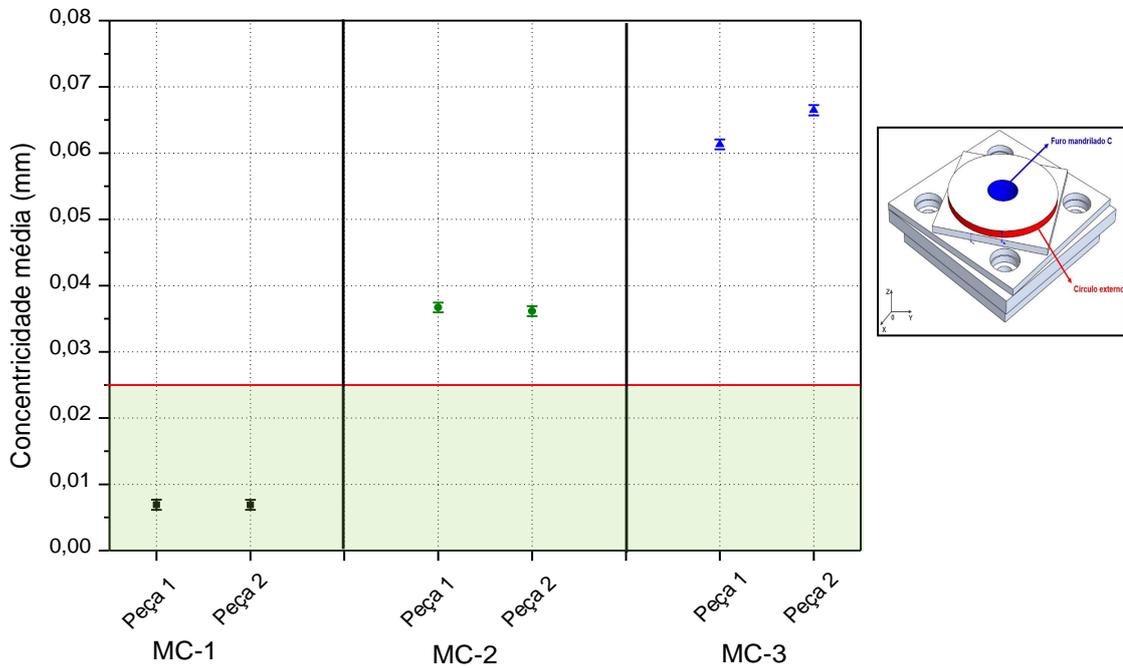
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que as peças produzidas no centro de usinagem MC-1 apresentaram valores abaixo do limite de tolerância, estando em conformidade. O MC-2 resultou em $(0,0151 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0151 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2, estando em desacordo com o aceitável, principalmente ao considerar as respectivas incertezas de medição. E dentre os três (03) equipamentos, o MC-3 foi o que apresentou os maiores valores de circularidade, $(0,0204 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0195 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2.

5.4.4.2 Concentricidade do círculo externo e do furo mandrilado C

A Figura 5.22 mostra um gráfico com resultados de concentricidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,025 mm.

Figura 5.22 – Gráfico dos valores médios de concentricidade com as respectivas incertezas de medição



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que as peças produzidas no centro de usinagem MC-1 apresentaram valores abaixo do limite de tolerância, estando em conformidade. O MC-2 resultou em $(0,0367 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0361 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2, estando em desacordo com o aceitável. E dentre os três (03) equipamentos, o MC-3 foi o que apresentou os maiores valores de concentricidade, $(0,0613 \pm 0,00075)$ mm para a peça 1 e $(0,0665 \pm 0,00077)$ mm.

5.4.5 Faces Inclinadas

Nesta seção são apresentados os resultados e discussão acerca das faces inclinadas.

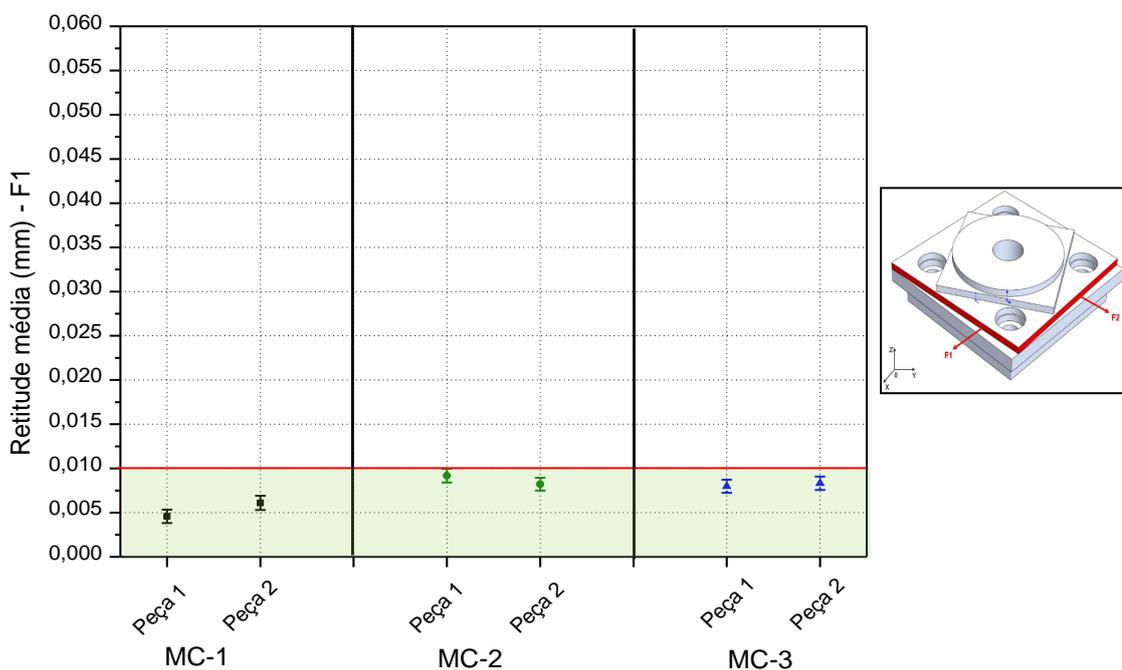
5.4.5.1 Retitude das faces

Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da retitude das faces.

5.4.5.1.1 Face 1

A Figura 5.23 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.23 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Face 1



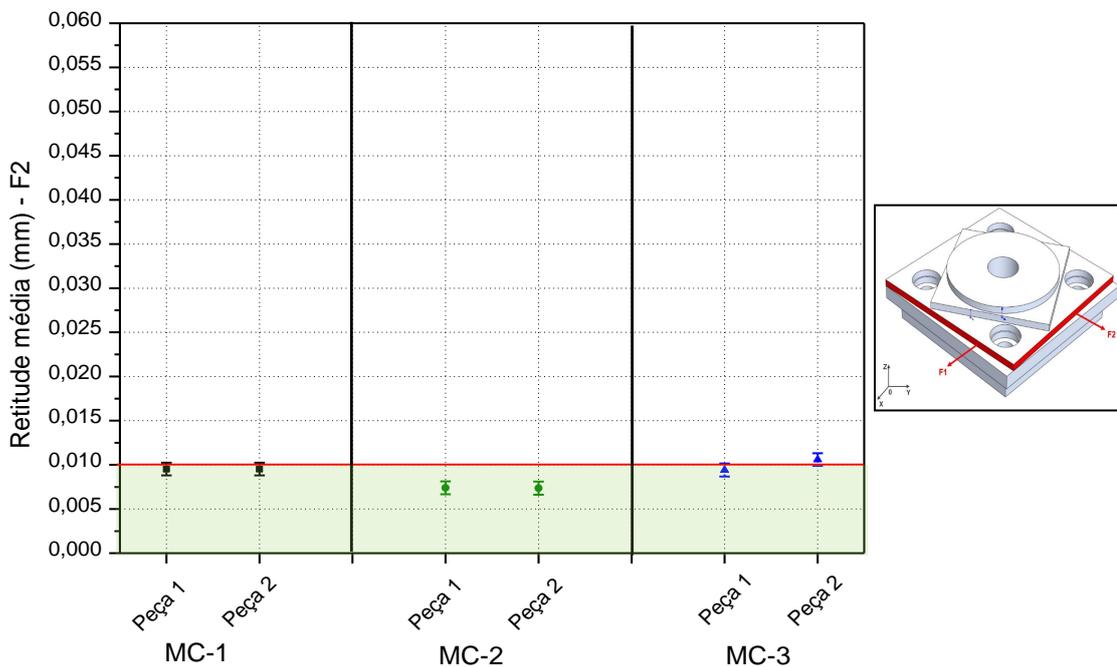
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que todos os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, indicando serem capazes de atender a tolerância geométrica de retitude. Porém, o valor médio de retitude da peça fabricada no MC-2 ficou muito próximo do tolerado sendo $(0,0104 \pm 0,0008)$ mm, onde ao considerar a incerteza de medição, o valor obtido poderá se apresentar acima do aceitável.

5.4.5.1.2 Face 2

A Figura 5.24 mostra um gráfico com resultados de retitude média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.24 – Gráfico dos valores médios de retitude com as respectivas incertezas de medição – Face 2



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os valores médios de retitude obtidos das peças produzidas nos três (03) centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis, apesar do primeiro e terceiro terem dados muito próximos do tolerado. Considerando-se a incerteza de medição, os valores obtidos de ambas as peças de MC-1 e MC-3, poderão se apresentar acima do aceitável. Faz-se, portanto, necessário o estabelecimento de uma zona de conformidade.

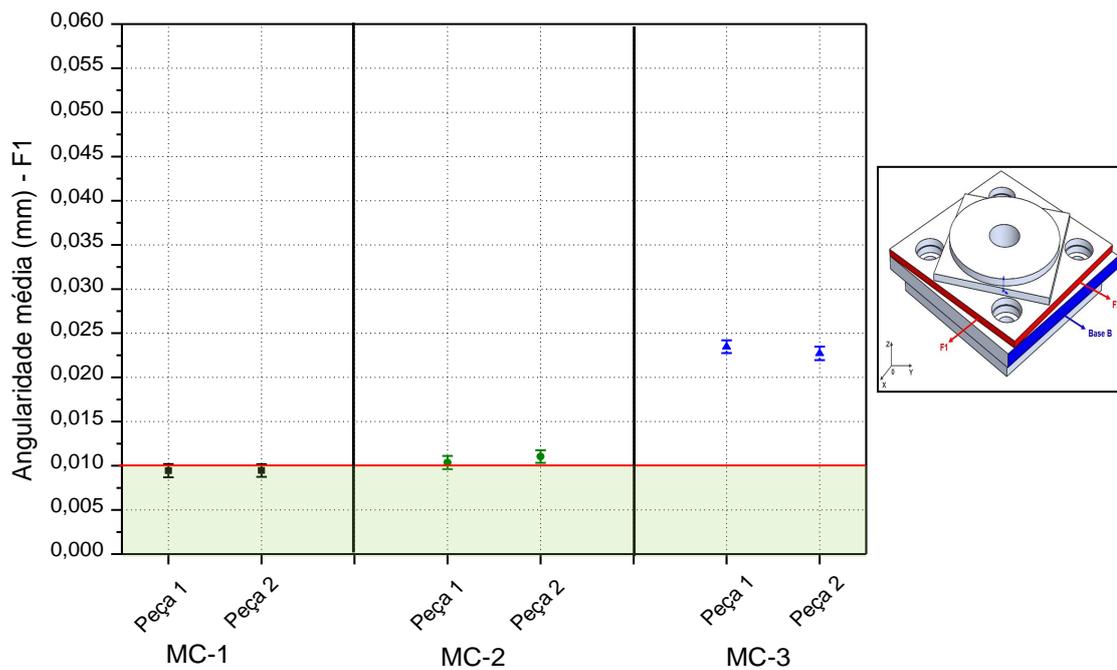
5.4.5.2 Angularidade dos ângulos em relação à base B

Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da angularidade dos ângulos em relação à base B.

5.4.5.2.1 Face 1

A Figura 5.25 mostra um gráfico com resultados de angularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.25 – Gráfico dos valores médios de angularidade com as respectivas incertezas de medição – Face 1



Fonte: O autor, 2019.

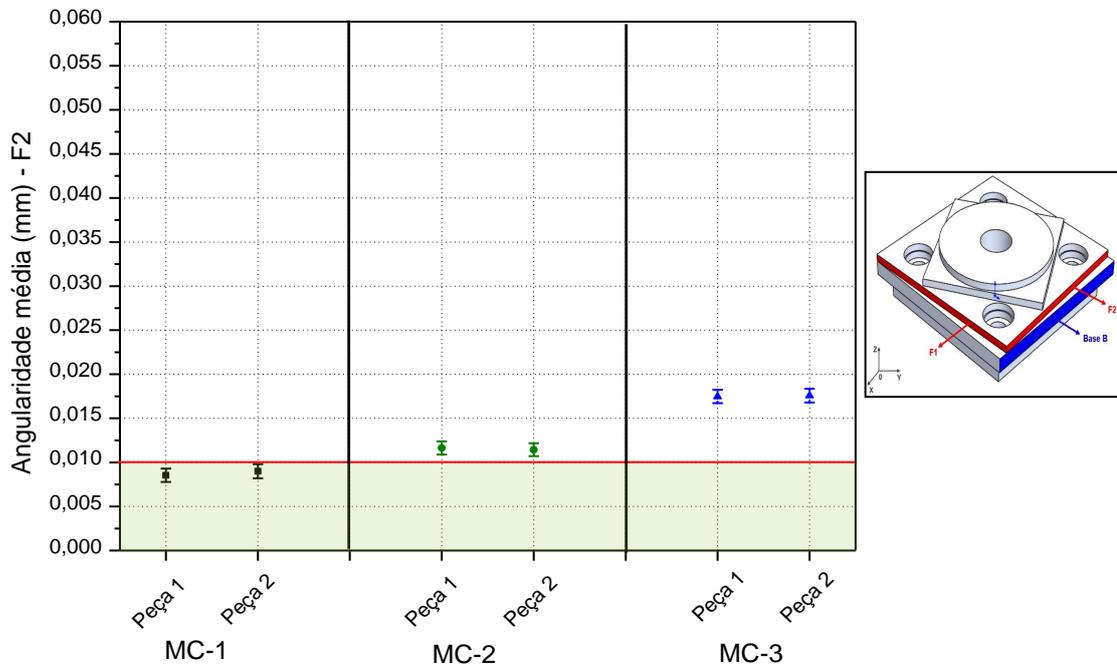
Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-2, e MC-3 não estão em conformidade com os limites aceitáveis, indicando não serem capazes de atender a tolerância geométrica de angularidade. Porém, os valores médios de angularidade das peças fabricadas no MC-1 ficaram muito próximos do tolerado sendo (0,0094 ± 0,0008) mm da peça 1 e (0,0095 ± 0,0007) mm da peça 2, e ao

considerar as incertezas de medição, estarão em não conformidade com a tolerância.

5.4.5.2.2 Face 2

A Figura 5.26 mostra um gráfico com resultados de angularidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.26 – Gráfico dos valores médios de angularidade com as respectivas incertezas de medição – Face 2



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que os centros de usinagem MC-2, e MC-3 não estão em conformidade com os limites aceitáveis, indicando não serem capazes de atender a tolerância geométrica de angularidade. Porém, os valores médios de angularidade das peças fabricadas no MC-1 ficaram muito próximos do tolerado sendo $(0,0085 \pm 0,0007)$ mm da peça 1 e $(0,0090 \pm 0,0008)$ mm da peça 2, mas ainda assim atendendo os requisitos referentes à angularidade.

5.4.6 Furos Mandrilados

Nesta seção são apresentados os resultados e discussão acerca dos furos mandrilados.

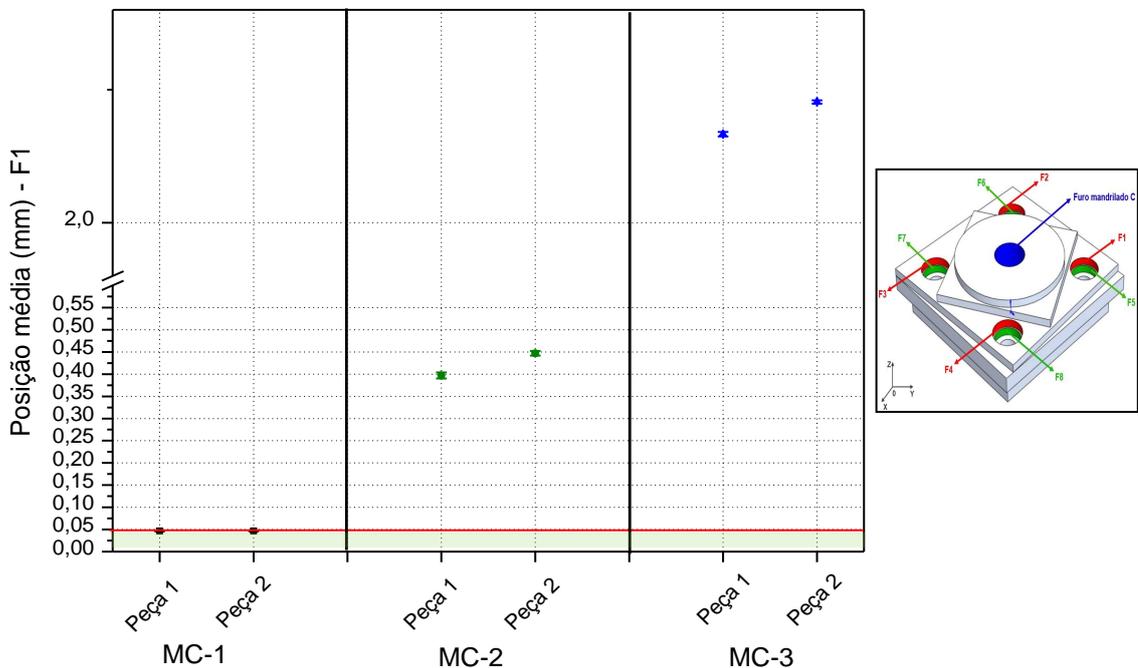
5.4.6.1 Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C

Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da posição dos furos com relação ao furo mandrilado C.

5.4.6.1.1 Furo 1

A Figura 5.27 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.27 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 1



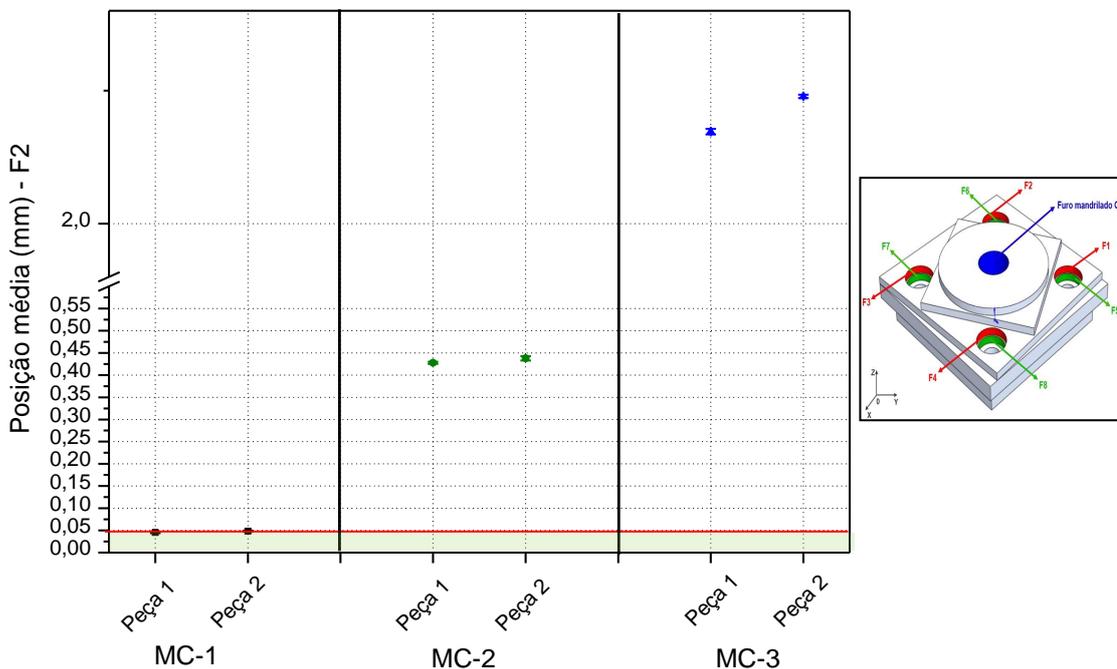
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 abaixo do limite de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3 ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,1663 \pm 0,0042)$ mm para a peça 1 e $(2,2269 \pm 0,0031)$ mm para a peça 2.

5.4.6.1.2 Furo 2

A Figura 5.28 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.28 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 2



Fonte: O autor, 2019.

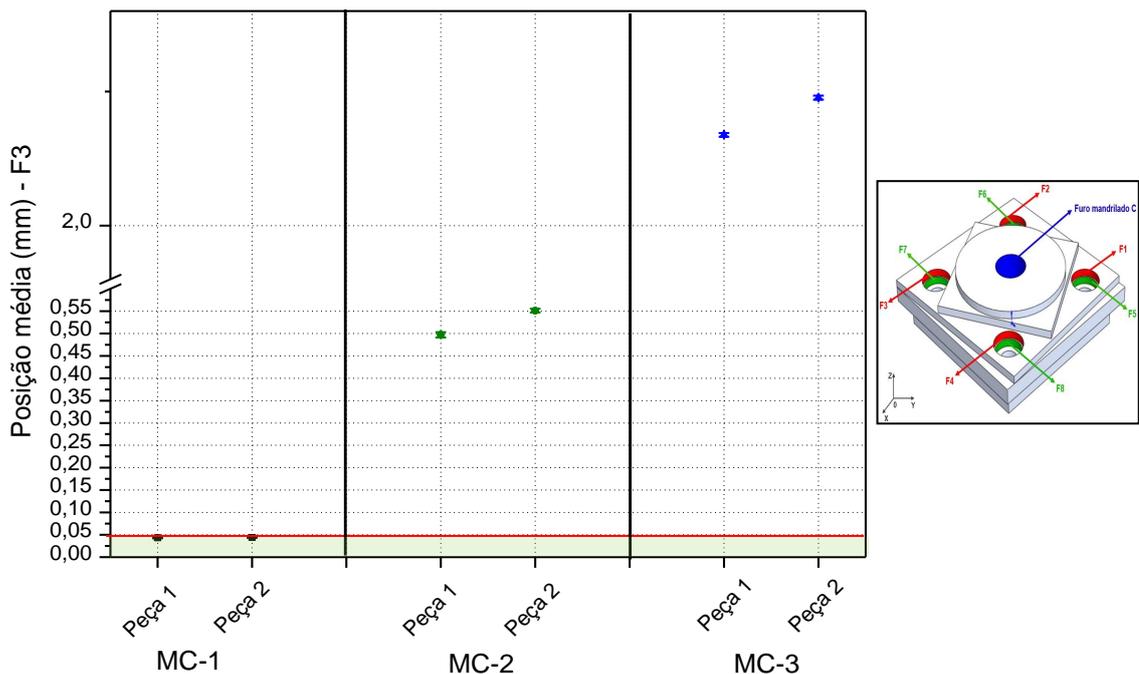
Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 nas proximidades do limite

de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3 ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,1728 \pm 0,0051)$ mm para a peça 1 e $(2,2391 \pm 0,0048)$ mm para a peça 2.

5.4.6.1.3 Furo 3

A Figura 5.29 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.29 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 3



Fonte: O autor, 2019.

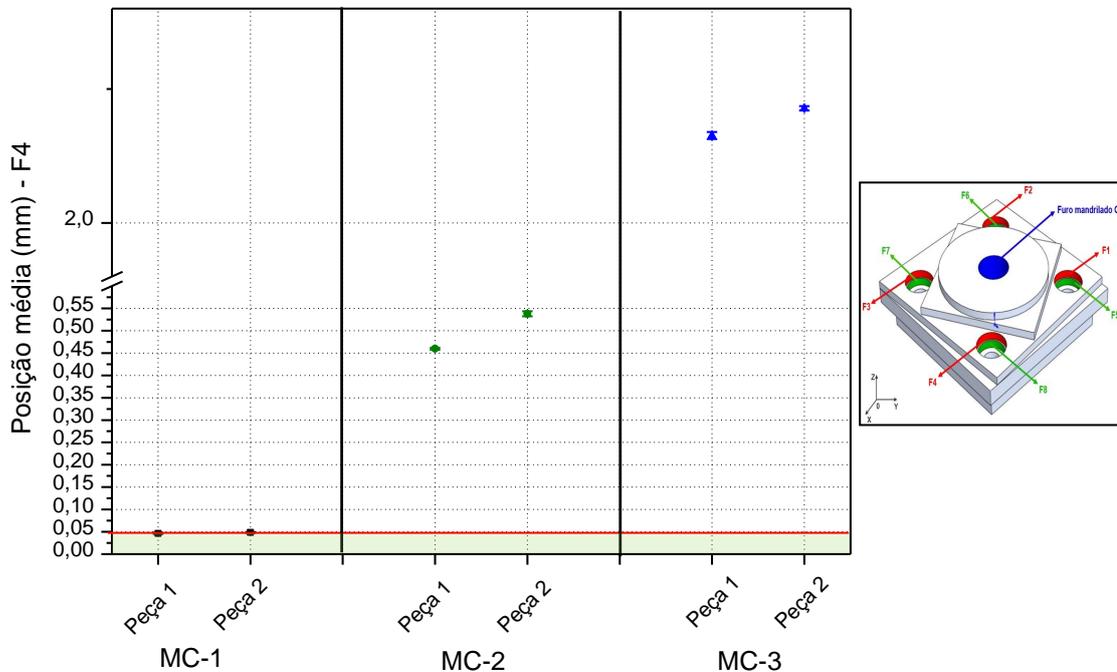
Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 nas proximidades do limite de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3

ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,1690 \pm 0,0035)$ mm para a peça 1 e $(2,2385 \pm 0,0037)$ mm para a peça 2.

5.4.6.1.4 Furo 4

A Figura 5.30 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.30 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 4



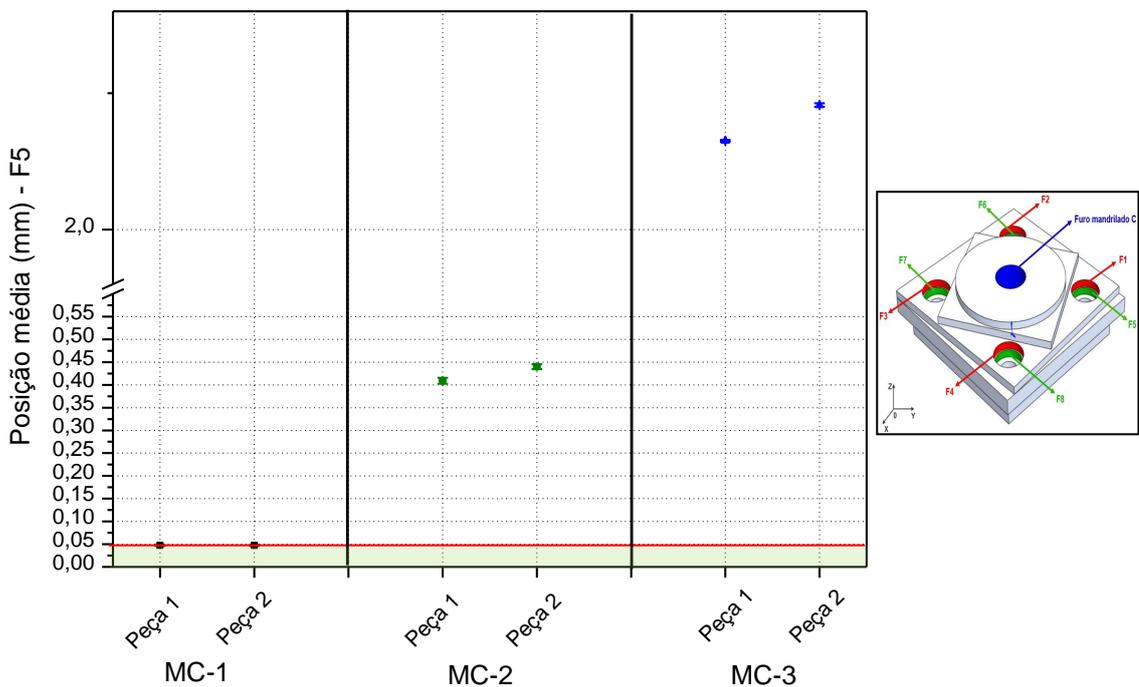
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 nas proximidades do limite de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3 ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,1631 \pm 0,0066)$ mm para a peça 1 e $(2,2140 \pm 0,0042)$ mm para a peça 2.

5.4.6.1.5 Furo 5

A Figura 5.31 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.31 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 5



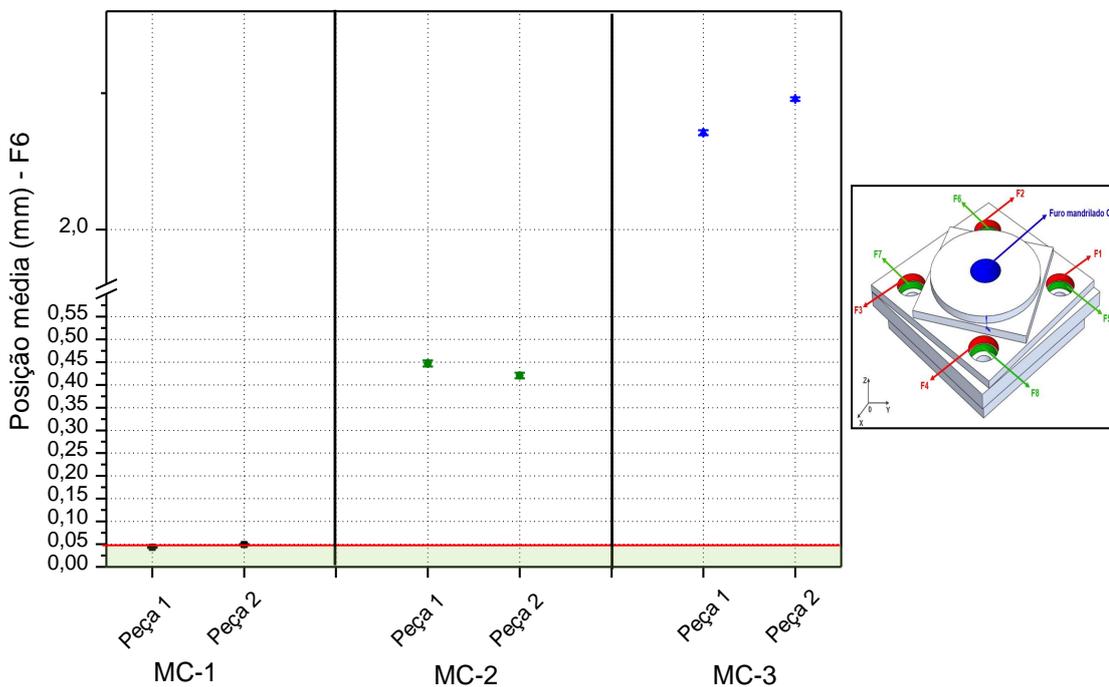
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 nas proximidades do limite de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3 ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,1625 \pm 0,0017)$ mm para a peça 1 e $(2,2281 \pm 0,0032)$ mm para a peça 2.

5.4.6.1.6 Furo 6

A Figura 5.32 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.32 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 6



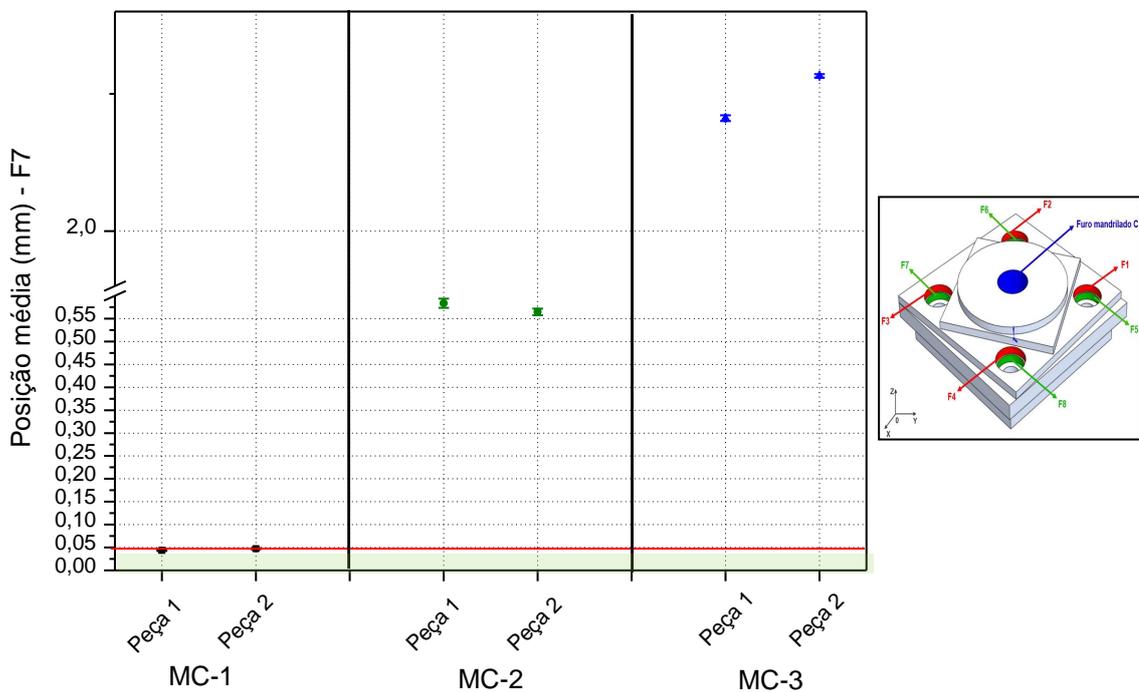
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 nas proximidades do limite de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3 ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,1773 \pm 0,0046)$ mm para a peça 1 e $(2,2390 \pm 0,0033)$ mm para a peça 2.

5.4.6.1.7 Furo 7

A Figura 5.33 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.33 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 7



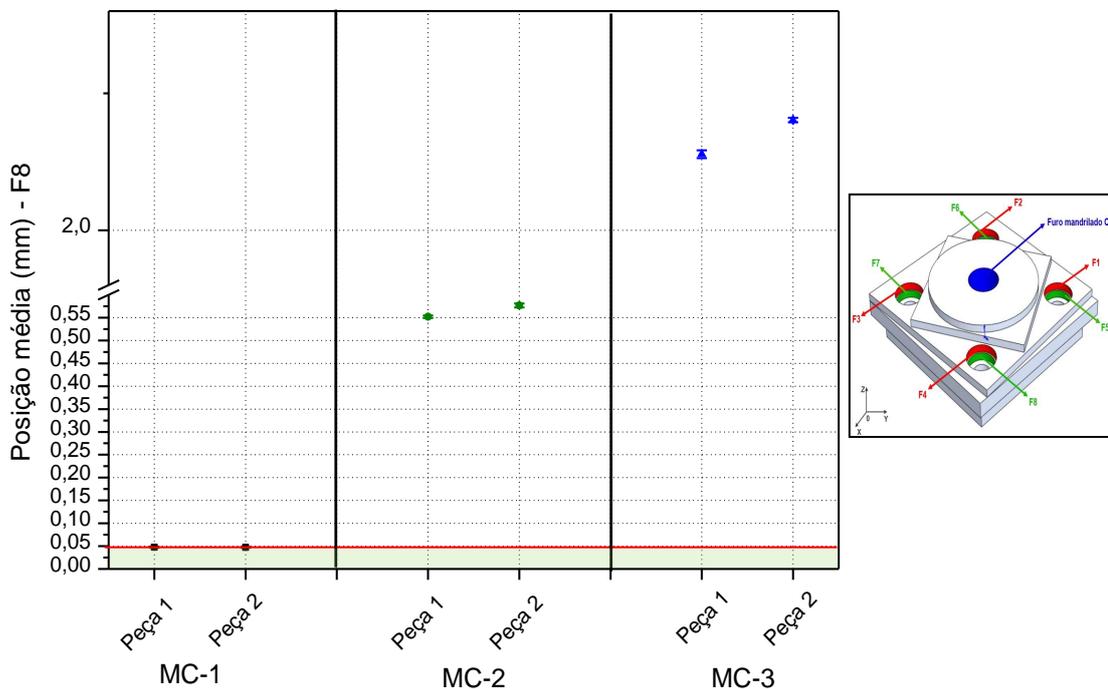
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 nas proximidades do limite de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3 ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,2058 \pm 0,0053)$ mm para a peça 1 e $(2,2829 \pm 0,0033)$ mm para a peça 2.

5.4.6.1.8 Furo 8

A Figura 5.34 mostra um gráfico com resultados de posição média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,050 mm.

Figura 5.34 – Gráfico dos valores médios de posição com as respectivas incertezas de medição – Furo 8



Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de posição das peças 1 e 2 nas proximidades do limite de tolerância, porém ao considerar as incertezas de medição estarão em não conformidade. Também é importante observar que os resultados oriundos do MC-3 ficaram muito acima do admissível, sendo $(2,1389 \pm 0,0072)$ mm para a peça 1 e $(2,2012 \pm 0,0041)$ mm para a peça 2.

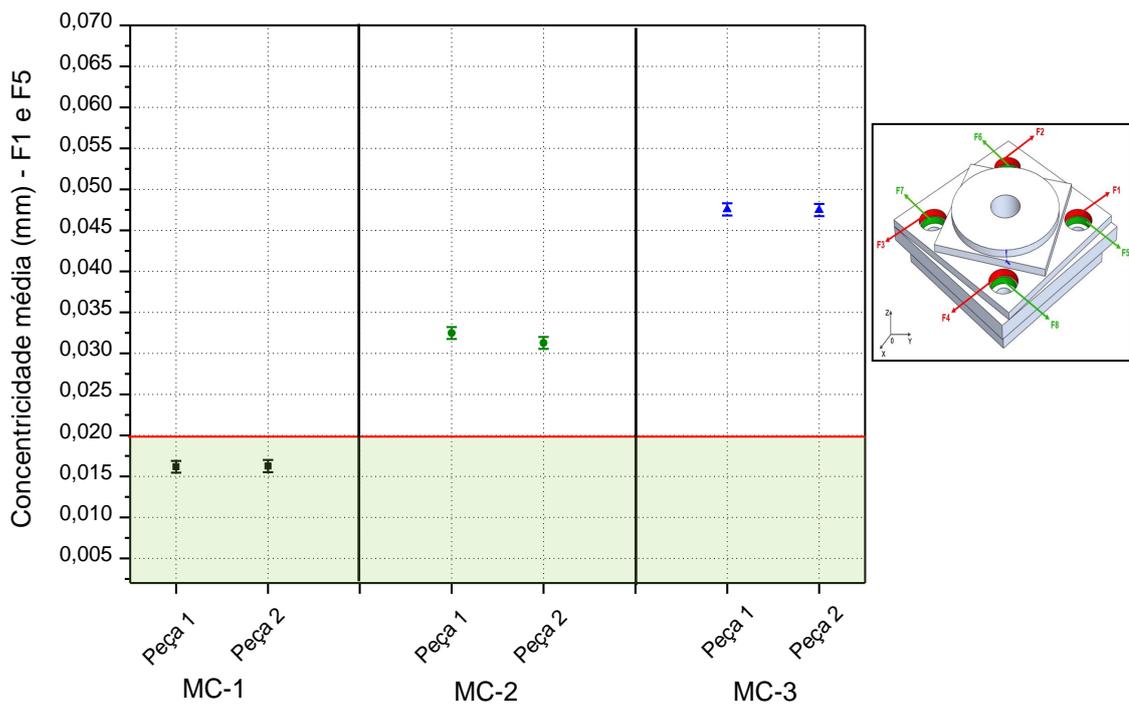
5.4.6.2 Concentricidade do furo interno com o furo externo D

Esta seção aborda os resultados e discussão acerca da concentricidade do furo interno com o furo externo D.

5.4.6.2.1 Furos 1 e 5

A Figura 5.35 mostra um gráfico com resultados de concentricidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,020 mm.

Figura 5.35 – Gráfico dos valores médios de concentricidade com as respectivas incertezas de medição – Furos 1 e 5



Fonte: O autor, 2019.

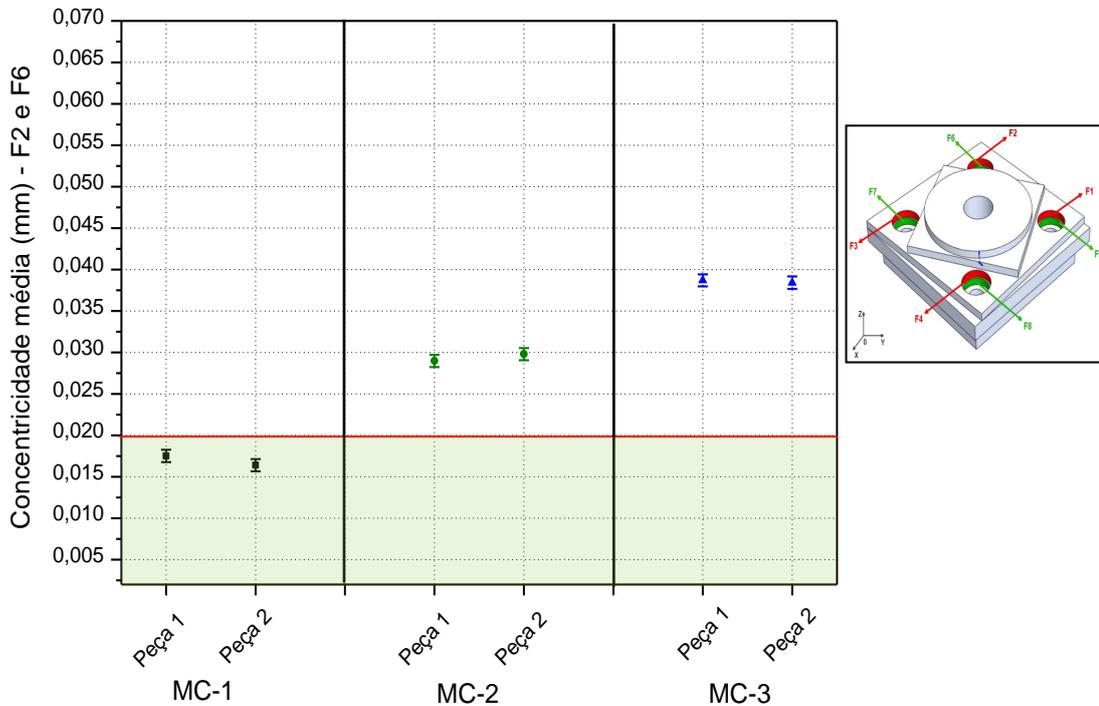
Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de concentricidade das peças 1 e 2 abaixo do limite de tolerância, sendo $(0,0162 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0163 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2. Também é importante observar que dos equipamentos que apresentaram

resultados não conformes, os oriundos do MC-3 foram os maiores, com $(0,0476 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0475 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2.

5.4.6.2.2 Furos 2 e 6

A Figura 5.36 mostra um gráfico com resultados de concentricidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,020 mm.

Figura 5.36 – Gráfico dos valores médios de concentricidade com as respectivas incertezas de medição – Furos 2 e 6



Fonte: O autor, 2019.

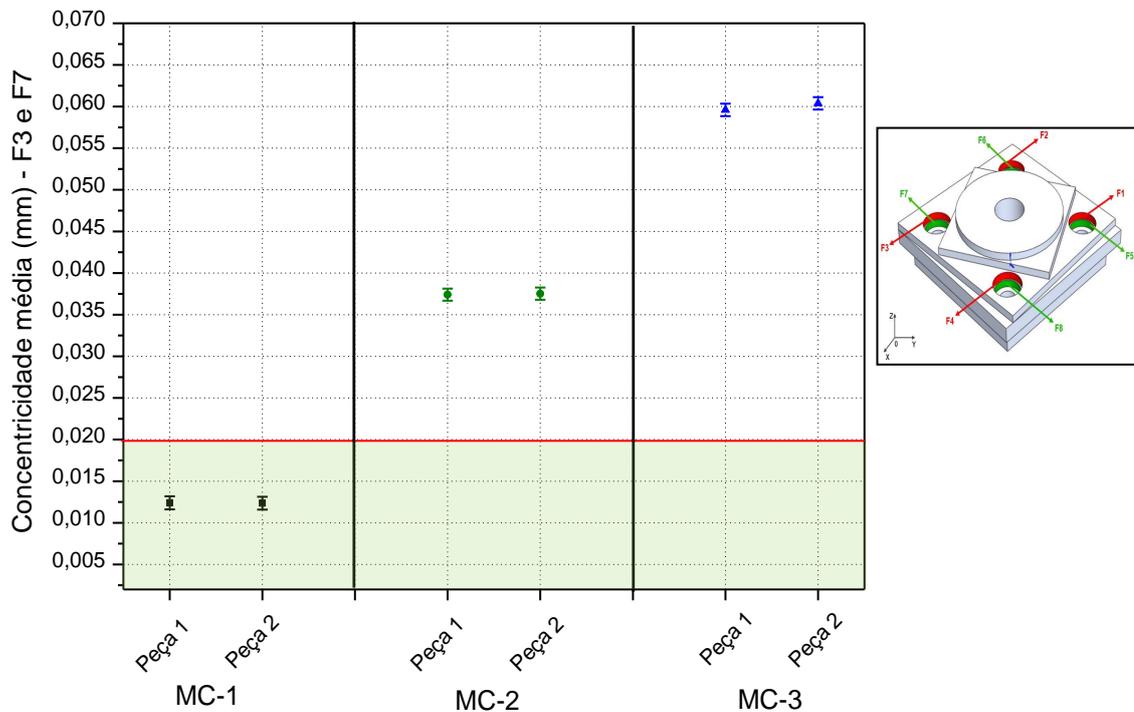
Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de concentricidade das peças 1 e 2 abaixo do limite de tolerância, sendo $(0,0175 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0164 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2. Também é importante observar que dos equipamentos que apresentaram

resultados não conformes, os oriundos do MC-3 foram os maiores, com $(0,0387 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0384 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2.

5.4.6.2.3 Furos 3 e 7

A Figura 5.37 mostra um gráfico com resultados de concentricidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,020 mm.

Figura 5.37 – Gráfico dos valores médios de concentricidade com as respectivas incertezas de medição – Furos 3 e 7



Fonte: O autor, 2019.

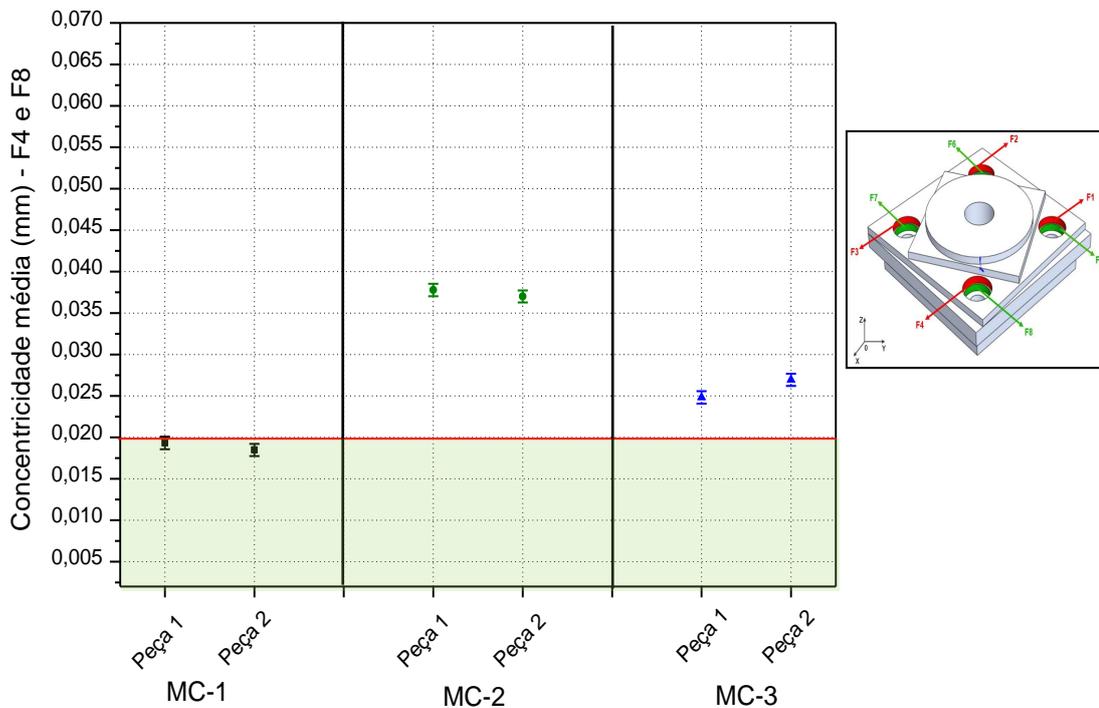
Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de concentricidade das peças 1 e 2 abaixo do limite de tolerância, sendo $(0,0124 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0124 \pm 0,0008)$ mm para a peça 2. Também é importante observar que dos equipamentos que apresentaram

resultados não conformes, os oriundos do MC-3 foram os maiores, com $(0,0596 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0604 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2.

5.4.6.2.4 Furos 4 e 8

A Figura 5.38 mostra um gráfico com resultados de concentricidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância indicada na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,020 mm.

Figura 5.38 – Gráfico dos valores médios de concentricidade com as respectivas incertezas de medição – Furos 4 e 8



Fonte: O autor, 2019.

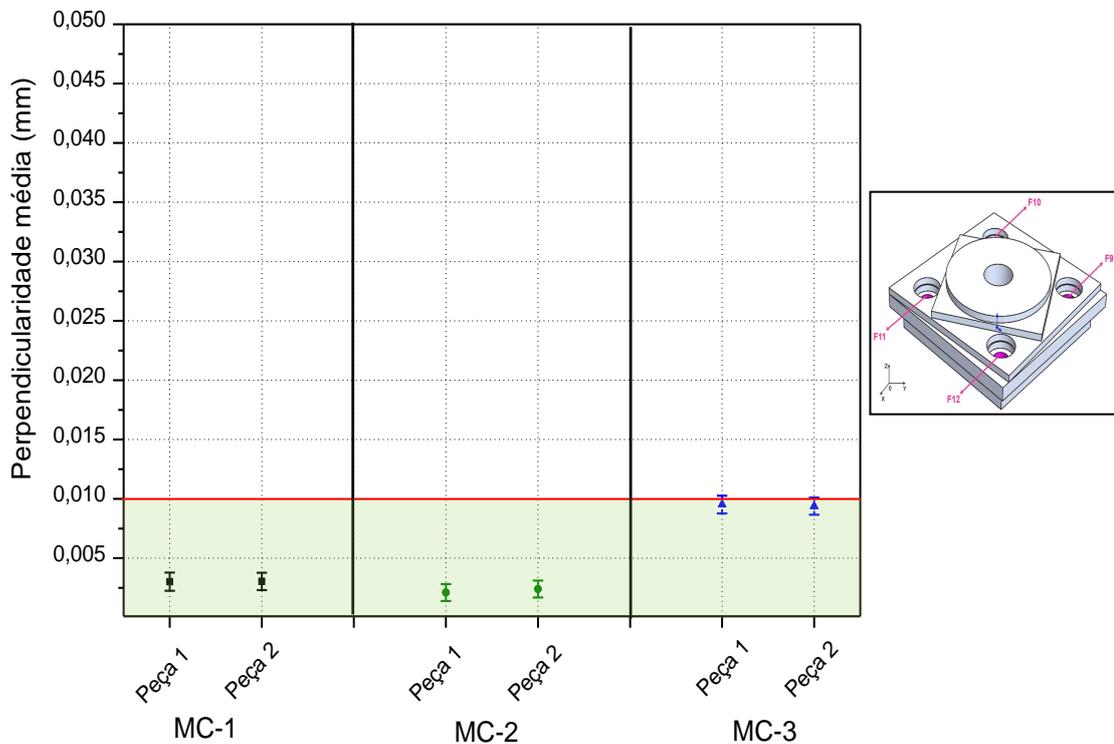
Verifica-se na Figura acima que o centro de usinagem MC-1 foi o único que apresentou valores médios de concentricidade das peças 1 e 2 abaixo do limite de tolerância, sendo $(0,0193 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0185 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2, porém ao considerar as incertezas de medição, a peça 1 estará em não conformidade. Também é importante observar que dos equipamentos que

apresentaram resultados não conformes, os oriundos do MC-2 foram os maiores, com $(0,0378 \pm 0,0008)$ mm para a peça 1 e $(0,0370 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2.

5.4.6.3 Perpendicularidade das diagonais entre furos

A Figura 5.39 mostra um gráfico com resultados de concentricidade média em função das duas peças de cada fabricante, sendo apresentados os valores médios e as respectivas incertezas de medição com confiabilidade de 95,45%. A linha vermelha representa a tolerância estabelecida com base na NBR NM-ISO 10791-7:1999, que para este parâmetro é de 0,010 mm.

Figura 5.39 – Gráfico dos valores médios de perpendicularidade com as respectivas incertezas de medição



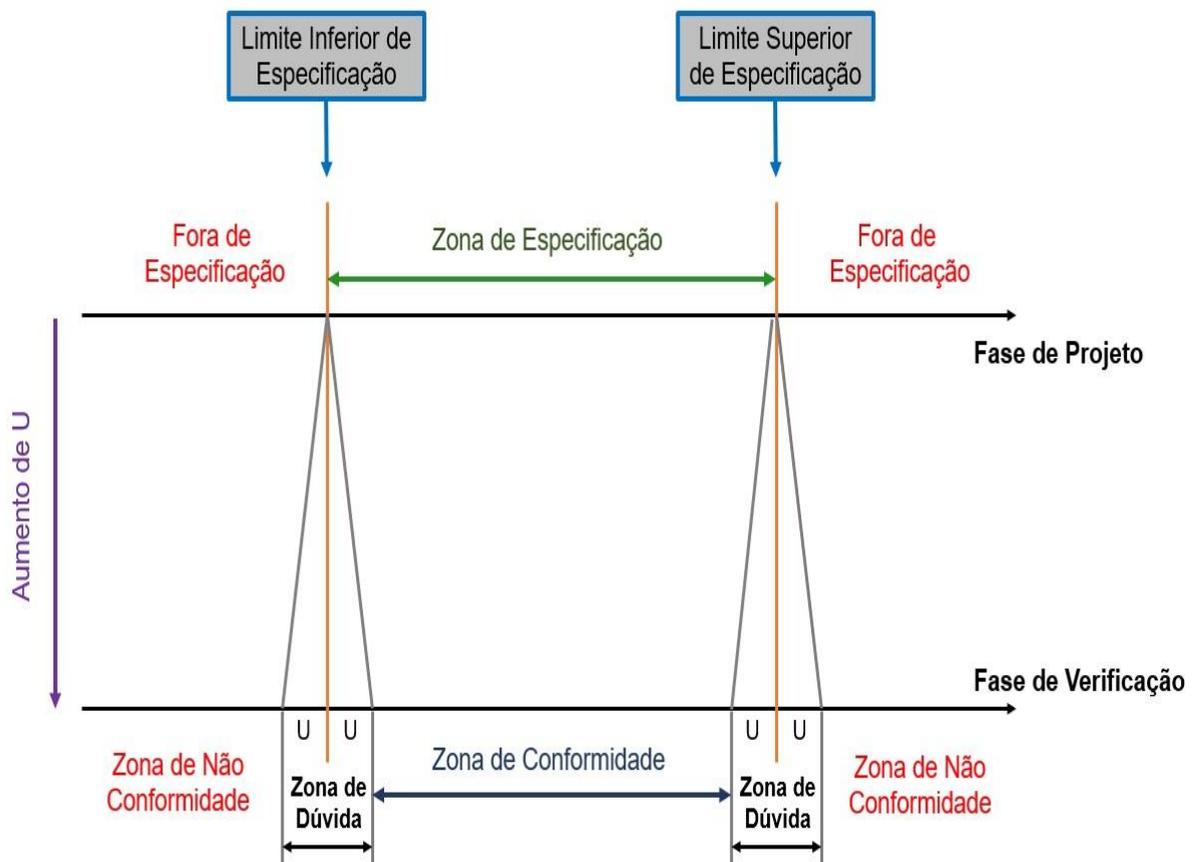
Fonte: O autor, 2019.

Verifica-se na Figura acima que todos os centros de usinagem MC-1, MC-2 e MC-3 estão em conformidade com os limites aceitáveis de acordo com os valores médios, porém o MC-3 apresentou valores muito próximos do tolerado, sendo $(0,0095 \pm 0,0007)$ mm para a peça 1 e $(0,0094 \pm 0,0007)$ mm para a peça 2, e ao

considerar as incertezas de medição, observa-se que os valores oriundos de ambas as peças estarão em não conformidade.

Na fabricação de um produto são consideradas duas fases, a de projeto, onde são definidas as dimensões nominais e as tolerâncias, e a de verificação, pela qual são realizadas medições e definição de três zonas distintas: conformidade, não conformidade e dúvida, sendo a última relacionada a faixa de incerteza de medição (OLIVEIRA, 2008; ISO 14253-2, 2017). A Figura 5.40 apresenta um modelo de comparação entre incerteza de medição e tolerância de processo.

Figura 5.40 – Modelo de comparação entre incerteza de medição e tolerância de processo



Fonte: Adaptado de ISO, 2019.

Os produtos que possuem os resultados base situados dentro das zonas de dúvidas podem ou não obedecer à tolerância, logo não poderão ser aceitos pelo controle de qualidade (ALBERTAZZI, 2008).

De acordo com os resultados gráficos mostrados nas Figuras de 5.2 a 5.39, foi possível observar quais parâmetros medidos estão em conformidade (C) e não conformidade (NC) com as tolerâncias estabelecidas na NBR NM-ISO 10791-7:1999. A Tabela 7 apresenta a situação de cada centro de usinagem em função do parâmetro tolerado. Também foi adicionado um asterisco (*) nos itens que estão em conformidade sem serem consideradas as incertezas de medição, porém ao considerá-las, o valor verdadeiro do mensurando poderá ultrapassar o limite aceitável.

Tabela 7 – Situação de conformidade do centro de usinagem (continua...)

Elemento geométrico	Parâmetro tolerado	Situação do centro de usinagem			
		MC-1	MC-2	MC-3	
Furo central	Cilindricidade	C	C	NC	
	Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A	Projeção YZ	C	NC	C
		Projeção ZX	C	NC	C
	Retitude dos lados	L1	C	C	*C
		L2	C	C	C
		L3	*C	C	C
L4		C	C	*C	
Quadrado	Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	L1	NC	NC	
		L2	NC	NC	
	Paralelismo do lado oposto à base B	L1	*C	C	*C
		L2	C	C	*C
		L3	*C	C	C
		L4	C	C	C
	Quadrado inclinado	Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B	L1	C	C
			L2	C	C
*Perpendicularidade		L1 e L2	C	C	NC
		L2 e L3	*C	NC	NC
		L3 e L4	C	C	NC

Continuação					
	entre os lados	L4 e L1	C	C	NC
Círculo	Circularidade		C	*C	NC
	Concentricidade do círculo externo e do furo mandrilado C		C	NC	NC
FACES inclinadas	Retitude das faces	F1	C	C	C
		F2	*C	NC	*C
	Angularidade dos ângulos em relação à base B	F1	*C	NC	NC
		F2	C	NC	NC
Furos mandrilados	Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C	F1	*C	NC	NC
		F2	*C	NC	NC
		F3	*C	NC	NC
		F4	*C	NC	NC
		F5	*C	NC	NC
		F6	*C	NC	NC
		F7	*C	NC	NC
		F8	*C	NC	NC
	Concentricidade do furo interno com o furo externo D	F1 e F5	C	NC	NC
		F2 e F6	C	NC	NC
		F3 e F7	C	NC	NC
		F4 e F8	C	NC	NC
	*Perpendicularidade das diagonais entre furos		C	C	C

Fonte: O autor, 2019.

O total de parâmetros geométricos medidos em cada peça fabricada nos centros de usinagem foi de 38 (trinta e oito). Na Tabela 8 consta o número de itens conformes e não conformes por equipamento em duas situações distintas: sem considerar as incertezas de medição (S/ IM) e considerando as incertezas de medição (C/ IM).

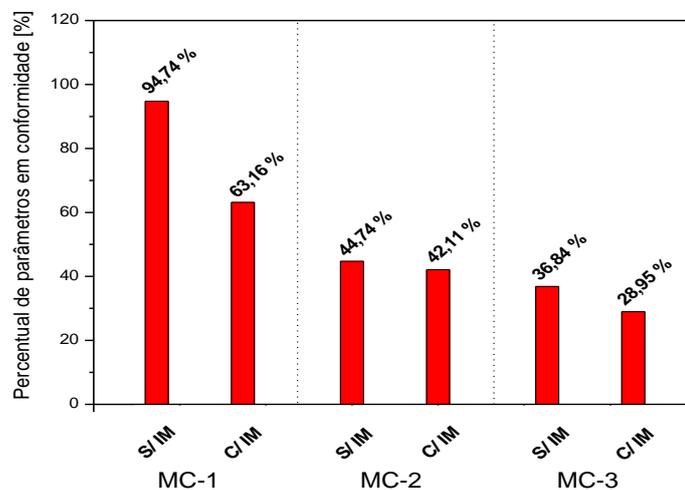
Tabela 8 – Quantidade de parâmetros conformes e não conformes por centro de usinagem

Centro de usinagem	Sem Incerteza de medição (S/ IM)		Com Incerteza de medição (C/ IM)	
	Conforme (C)	Não conforme (NC)	Conforme (C)	Não conforme (NC)
MC-1	36	2	24	14
MC-2	17	21	16	22
MC-3	14	24	11	27

Fonte: O autor, 2019.

Com os dados da Tabela 7 foi plotado um gráfico (Figura 5.41) do percentual dos parâmetros em conformidade *versus* centro de usinagem, onde são apresentados os diferentes valores para as condições em que se considera as incertezas de medição (C/ IM) e para as que não às consideram (S/ IM).

Figura 5.41 – Gráfico do percentual de parâmetros em conformidade *versus* centro de usinagem com e sem incerteza de medição



Fonte: O autor, 2019.

Analisando a Figura acima, percebe-se a influência da incerteza de medição na confiabilidade dos resultados, bem como o quanto o diagnóstico do equipamento pode ser mascarado caso a mesma não seja considerada.

Mesmo a NBR NM-ISO 10791-7:1999 não especificando a necessidade de incluir incerteza de medição aos resultados medidos, o *software* desenvolvido nesse trabalho de pesquisa leva em conta essa variável, tomando como base o *ISO GUM* 2008, a fim de fornecer respostas confiáveis e auxiliar nas tomadas de decisões durante a avaliação do desempenho geométrico da máquina ferramenta.

Uma observação importante a ser feita, é que o equipamento MC-1 é o mais novo dentre os centros de usinagem analisados, sendo fabricado no ano de 2013, enquanto que os outros (MC-2 e MC-3) foram fabricados no ano de 2009, e apresentou a menor quantidade de desvios geométricos, condizendo com o esperado, uma vez que possui menos horas de utilização. Outro ponto relevante a ser destacado, é que até o equipamento mais novo não está isento de erros geométricos, reforçando a importância em realizar verificações periódicas através dos ensaios geométricos a fim de conhecer o comportamento da máquina ferramenta. Também pode-se observar a correlação entre os erros de posição e concentricidade, estando ambos em não conformidade nas máquinas MC-1 e MC-2.

5.5 ESTIMATIVA DE CUSTOS

Adotando como referência uma peça-teste, foi elaborada uma planilha de custos aproximados, considerando desde a aquisição da matéria-prima até a etapa de medição na MMC, conforme apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 – Planilha de estimativa de custos

Item	Descrição	Tempo (horas)	Valor unitário (R\$)	Valor total (R\$)
1	Matéria-prima em ferro fundido	-----	150,00	150,00
2	Fabricação da peça-teste no centro de usinagem	3	150,00	450,00
3	Medição da peça-teste na MMC	2	250,00	500,00
4	Jogo com 11 ferramentas de corte	-----	1190,00	1190,00
			Custo total (R\$)	2290,00

Fonte: O autor, 2019.

Na aplicação do procedimento proposto neste trabalho, haverá utilização do *software* MCA, que no caso de prestação de serviços para empresas, poderá ser cobrado um valor referente à trabalho de consultoria, gerando recursos para a Universidade Federal de Pernambuco, uma vez que o programa computacional foi registrado em nome da referida instituição.

5.6 PROGRAMA COMPUTACIONAL MACHINING CENTRES ANALYSER - MCA

De acordo com o algoritmo apresentado na Figura 4.46, foi possível desenvolver o *software* proposto no presente trabalho, cuja solicitação de registro junto ao INPI foi realizada à POSITIVA – Diretoria de Inovação da UFPE no dia 02 de agosto de 2019. A tela inicial do referido programa computacional é apresentada na Figura 5.42.

Figura 5.42 – Tela inicial do software *Machining Centres Analyser (MCA)*

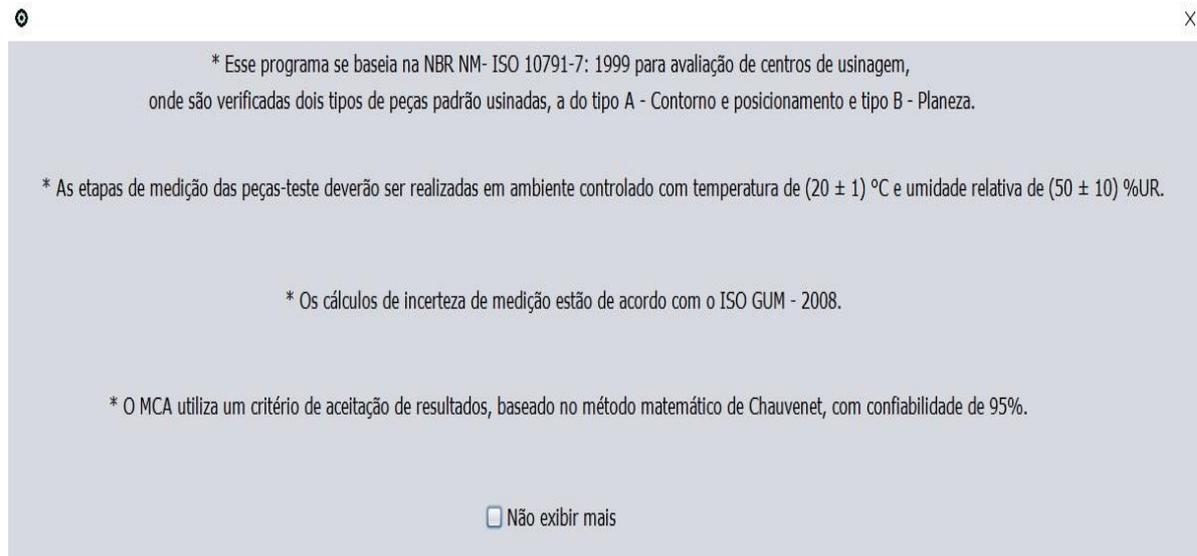


Fonte: O autor, 2019.

Nesta tela é possível localizar três (03) botões de comando, na parte superior esquerda da tela, “Iniciar Medição”, “Relatórios” e “Configurações”. Clicando em “Configurações”, é possível determinar se aparecerá ou não uma caixa de texto no

início do programa, com informações sobre o *software* e condições ambientais para medição das peças-teste. Além disso, na própria caixa de texto é possível optar por não mais exibir tais informações como pode ser visto na Figura 5.43.

Figura 5.43 – Caixa de texto contendo informações sobre o *software*



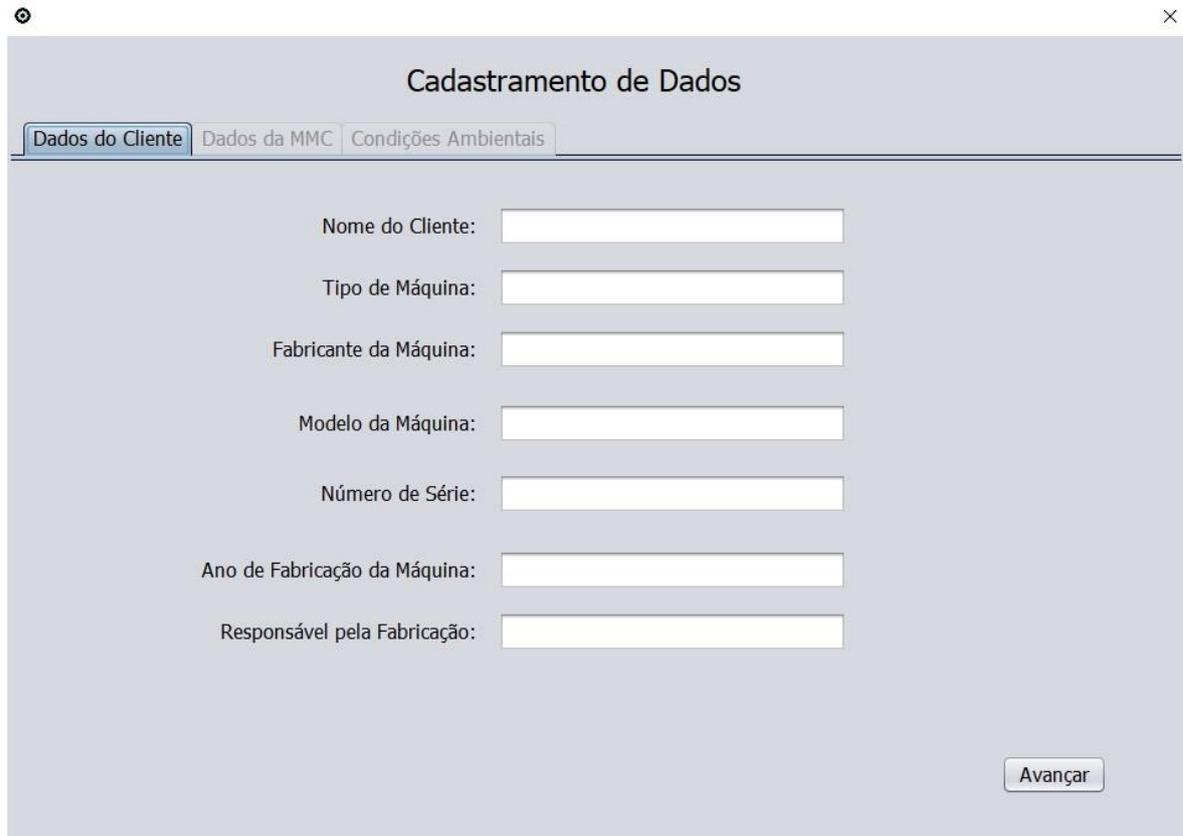
Fonte: O autor, 2019.

Através do botão “Relatórios”, é possível visualizar e imprimir relatórios de medição gerados e armazenados no banco de dados do programa. O usuário tem a opção de realizar a busca através de numeração específica ou data de emissão.

Ao selecionar o botão “Iniciar Medição”, dá-se início ao processo de inserção de informações para posterior compilação e apresentação de resultados. Para isso, ocorre um direcionamento a uma tela denominada “Cadastramento de Dados”, de modo a permitir que sejam adicionados dados do cliente, da MMC e das condições ambientais, conforme selecionada a aba correspondente no canto superior esquerdo da tela.

Selecionada a aba “Dados do Cliente” será necessário inserir as seguintes informações: nome do cliente, tipo de máquina, fabricante da máquina, modelo da máquina, número de série da máquina, ano de fabricação da máquina e responsável pela fabricação. A Figura 5.44 apresenta uma imagem dessa tela.

Figura 5.44 – Tela de cadastramento de dados com a aba “Dados do Cliente” selecionada



The image shows a software window titled "Cadastramento de Dados" with a close button (X) in the top right corner. At the top, there are three tabs: "Dados do Cliente" (selected), "Dados da MMC", and "Condições Ambientais". Below the tabs, the form contains the following fields:

- Nome do Cliente:
- Tipo de Máquina:
- Fabricante da Máquina:
- Modelo da Máquina:
- Número de Série:
- Ano de Fabricação da Máquina:
- Responsável pela Fabricação:

An "Avançar" button is located in the bottom right corner of the form area.

Fonte: O autor, 2019.

Acerca de “Dados da MMC” deverão ser adicionados os seguintes dados: fabricante da MMC, modelo, número de série, ano de fabricação, resolução, número do certificado de calibração, incerteza herdada, erro sistemático, fator de abrangência e responsável pela medição.

Na Figura 5.45 é possível visualizar uma imagem da tela com os respectivos campos para preenchimento.

Figura 5.45 – Tela de cadastramento de dados com a aba “Dados da MMC” selecionada



The image shows a software window titled "Cadastro de Dados" with three tabs: "Dados do Cliente", "Dados da MMC" (selected), and "Condições Ambientais". The form contains the following fields:

- Fabricante da Máquina:
- Modelo:
- Número de Série:
- Ano de Fabricação:
- Resolução (μm):
- Certificado de Calibração N°:
- Incerteza Herdada (μm): + $\frac{L}{\quad}$
- Erro Sistemático (μm):
- Fator de Abrangência k:
- Responsável pela Medição:

Buttons "Voltar" and "Avançar" are located at the bottom right of the form.

Fonte: O autor, 2019.

Sobre “Condições Ambientais” os seguintes dados são solicitados: tipo do termo higrômetro, fabricante do termo higrômetro, modelo, resolução, nº do certificado de calibração, incerteza herdada, fator de abrangência, temperatura média e umidade relativa média.

A Figura 5.46 é apresenta uma imagem da tela com os respectivos campos para preenchimento.

Figura 5.46 – Tela de cadastramento de dados com a aba “Condições Ambientais” selecionada

The screenshot shows a software window titled "Cadastramento de Dados" with three tabs: "Dados do Cliente", "Dados da MMC", and "Condições Ambientais". The "Condições Ambientais" tab is active. The form contains the following fields:

Tipo do Termo Higrômetro:	<input type="text"/>	Incerteza herdada (°C):	<input type="text"/>
Fabricante do Termo Higrômetro:	<input type="text"/>	Fator de Abrangência K:	<input type="text"/>
Modelo:	<input type="text"/>	Temperatura Média (°C):	<input type="text"/>
Nº de Série:	<input type="text"/>	Umidade Relativa Média (% UR):	<input type="text"/>
Resolução (°C):	<input type="text"/>		
Certificado de Calibração Nº:	<input type="text"/>		

At the bottom right, there are two buttons: "Voltar" and "Avançar".

Fonte: O autor, 2019.

As informações adicionadas nas telas de “Cadastramento de Dados” irão compor o cabeçalho do “Relatório de Medição” fornecido pelo *software* ao final do processamento dos dados. Também é importante salientar que caso algum dos campos não seja completado, aparecerá uma mensagem informando ao usuário que estão faltando dados, e só será possível passar para próxima etapa quando satisfeitas as condições de preenchimento. Na Figura 5.47 é apresentado um exemplo em que não foi inserido o valor de resolução da MMC e após tentativa de avançar para a próxima tela, exibiu-se uma mensagem de campo vazio.

Figura 5.47 – Exemplo de apresentação de mensagem por falta de inserção de dados

The image shows a software window titled "Cadastramento de Dados" with three tabs: "Dados do Cliente", "Dados da MMC", and "Condições Ambientais". The "Dados da MMC" tab is active. The form contains the following fields and values:

- Fabricante da Máquina: Exemplo
- Modelo: A
- Número de Série: 123
- Ano de Fabricação: 2019
- Resolução (μm): (empty)
- Certificado de Calibração N°: (empty)
- Incerteza herdada (μm): (empty)
- Fator de Abrangência k: (empty)
- Responsável pela Medição: (empty)

A validation error message box is overlaid on the "Resolução (μm)" field, displaying a red warning icon and the text "Campo Resolução (μm) vazio". An "OK" button is present in the message box. At the bottom right of the form, there are two buttons: "Voltar" and "Avançar".

Fonte: O autor, 2019.

A próxima fase é referente ao cadastramento das peças e medições, contendo as seguintes abas: “Dados da Peça-Teste”, “Parâmetros de Medição”, “Dados de Medições” e “Dados das Fontes de Incerteza”.

Em “Dados da Peça-Teste” é necessário selecionar o tipo da peça-teste, que pode ser do tipo A, B ou ambas. As dimensões correspondentes a cada um dos tipos da peça e o material, que pode ser alumínio ou ferro fundido cinzento, conforme mostrado na Figura 5.48.

Figura 5.48 – Tela de cadastramento das peças e medições com a aba “Dados da Peça-Teste” selecionada

Cadastramento das Peças e Medições

Dados da Peça-Teste | Parâmetros de Medição | Dados de Medições | Dados das Fontes de Incerteza de Medição

Tipo da peça-teste

Tipo A Tipo B Tipo A e Tipo B

*Tipo A - Contorno e Posicionamento
*Tipo B - Faceamento

Dimensão da peça-teste

160 mm x 160 mm 100 mm x 80 mm
 320 mm x 320 mm 200 mm x 160 mm

Material da peça Tipo A

Alumínio Ferro Fundido Cinzento

Material da peça Tipo B

Alumínio Ferro Fundido Cinzento

Voltar Avançar

Fonte: O autor, 2019.

Em função do tipo de peça e dimensões escolhidas, o *software* irá tomar como referência para posterior comparação com os dados medidos, os respectivos valores de tolerância contidos na Tabela 3 da NBM NM ISO 10791-7 para a peça tipo A, e os indicados no item 10.6 da mesma norma para a peça do tipo B. Acerca do tipo de material escolhido, será atribuído ao coeficiente de dilatação linear da peça, o valor de $0,0000230 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o alumínio e $0,0000117 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para o ferro fundido cinzento (GUESSER, 2009). A utilização desses dados se dá nos cálculos de incerteza de medição.

Com relação a aba “Parâmetros de Medição”, o usuário tem a opção de escolher quais parâmetros geométricos e elementos tolerados deseja verificar na peça-teste, sendo possível optar por “Todos os Indicados na NBR NM ISO 10791-7:1999” ou “Escolher Parâmetros”, onde este último permite ao usuário verificar apenas aqueles que lhe interessarem. A Figura 5.49 mostra a tela cuja aba “Parâmetros de Medição” está selecionada.

Figura 5.49 – Tela de cadastramento das peças e medições com a aba “Parâmetros de Medição” selecionada

The screenshot shows a software window titled "Cadastramento das Peças e Medições" with four tabs: "Dados da Peça-Teste", "Parâmetros de Medição" (selected), "Dados de Medições", and "Dados das Fontes de Incerteza de Medição". The "Parâmetros de Medição" tab contains the following sections:

- Definição de Parâmetros:**
 - Todos os indicados na NBR NM-ISO 10791-7:1999
 - Escolher Parametros
- Furo Central:**
 - Cilindricidade
 - Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A (mm)
- Quadrado:**
 - Retitude dos lados (mm)
 - Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação a base B (mm)
 - Paralelismo do lado oposto à base B (mm)
- Quadrado Inclinado:**
 - Retitude dos lados (mm)
 - Angularidade do ângulo de 75° em relação a base B (mm)
 - Perpendicularidade entre os lados (mm)
- Círculo:**
 - Circularidade (mm):
 - Concentricidade do círculo externo e o furo mandrilado C (mm)
- Faces Inclínadas:**
 - Retitude das faces (mm)
 - Angularidade dos ângulos em relação à base B (mm)
- Furos Mandrilados:**
 - Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C (mm)
 - Concentricidade do furo interno com o furo externo D (mm)
 - Perpendicularidade das diagonais entre os furos com $\varnothing = 16$ mm (mm)

At the bottom right, there are two buttons: "Voltar" and "Avançar".

Fonte: O autor, 2019.

A seguir é necessário fornecer informações acerca do quantitativo de peças, pois o usuário tem a opção de avaliar toda a área de trabalho de máquina e com isso será necessário produzir mais de uma peça-teste. Além disso tem que informar o quantitativo de medições a serem realizadas por peça, cuja aba correspondente no *software* é “Dados de Medições”, como mostra a Figura 5.50.

Figura 5.50 – Tela de cadastramento das peças e medições com a aba “Dados de Medições” selecionada

The screenshot shows the same software window with the "Dados de Medições" tab selected. The main area contains two input fields:

- Quantidade de peças a serem medidas:
- Quantidade de medições a serem realizadas por peça:

At the bottom right, there are two buttons: "Voltar" and "Avançar".

Fonte: O autor, 2019.

Ainda na parte de cadastramento das peças e medições, selecionando a aba “Dados das Fontes de Incerteza de Medição”, é exibida uma tela com informações acerca das principais fontes de incerteza consideradas, sendo necessário selecionar o intervalo de confiança pretendido 95,45% ou 99,73%, como pode ser visto na Figura 5.51.

Figura 5.51 – Tela de cadastramento das peças e medições com a aba “Dados das Fontes de Incerteza de Medição” selecionada

Cadastramento das Peças e Medições

Dados da Peça-Teste | Parâmetros de Medição | Dados de Medições | **Dados das Fontes de Incerteza de Medição**

Dados Considerados para Realização dos Cálculos Conforme o ISO GUM - 2008

Fonte de Incerteza	Tipo	Representação	Distribuição	Divisor	Incerteza Padrão	Graus de Liberdade
Repetibilidade	A	$S(x_i)$	Normal	1	$S(x_i)$	$n-1$
Resolução	B	u_r	Retangular	$2 \cdot \sqrt{3}$	$u_r / (2 \cdot \sqrt{3})$	∞
Máquina	B	u_m	Normal	k	u_m / k	∞
Comprimento da peça devido ao termômetro	B	$u_{peça/termômetro}$	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{peça/termômetro} / \sqrt{3}$	∞
Comprimento da escala da MMC devido ao termômetro	B	$u_{MMC/termômetro}$	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_{MMC/termômetro} / \sqrt{3}$	∞
Afastamento da temperatura	B	u_t	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_t / \sqrt{3}$	∞
Comprimento da peça devido a diferença de temperatura	B	u_d	Retangular	$\sqrt{3}$	$u_d / \sqrt{3}$	∞

Intervalo de Confiança da Incerteza de Medição Expandida

95,45 % 99,73 %

Fonte: O autor, 2019.

A próxima etapa consiste na importação dos dados de medição através de um arquivo em formato “csv” que deve ser inserido no *software*. Para isso, na tela denominada “Lista de Peças-Teste” seleciona-se o botão de comando “Caminho Arquivo”, onde será possível acessar o “Internet Explorer” do computador em utilização, e com isso é possível localizar o arquivo pretendido. Uma vez selecionado o arquivo a qual se deseja importar, clica-se em “Carregar Dados” para efetivar a transferência de dados ao *software*. A Figura 5.52 apresenta um exemplo de importação de dados utilizando a referida tela.

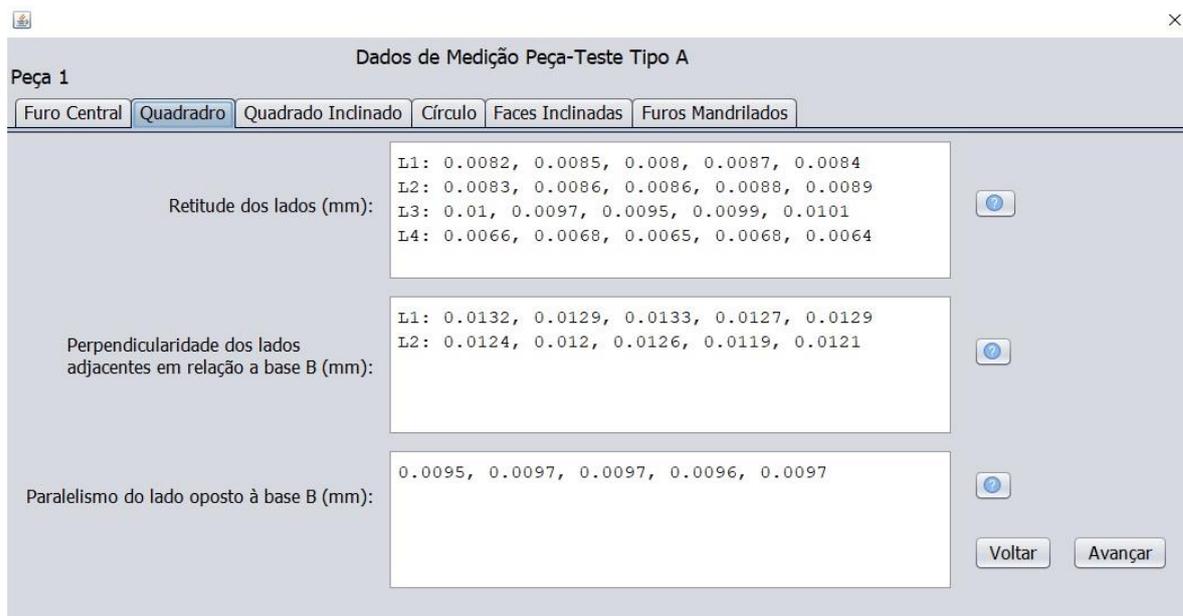
Figura 5.52 – Tela utilizada para importação de dados de medição



Fonte: O autor, 2019.

Ainda é possível verificar os dados que foram inseridos em cada um dos parâmetros geométricos clicando no botão de comando “Visualizar Dados”, que por sua vez abrirá uma tela com abas que correspondem a cada um dos elementos geométricos e seus respectivos parâmetros tolerados. Na Figura 5.53 está sendo mostrada uma imagem de uma dessas telas, onde foi selecionada a aba “Quadrado”.

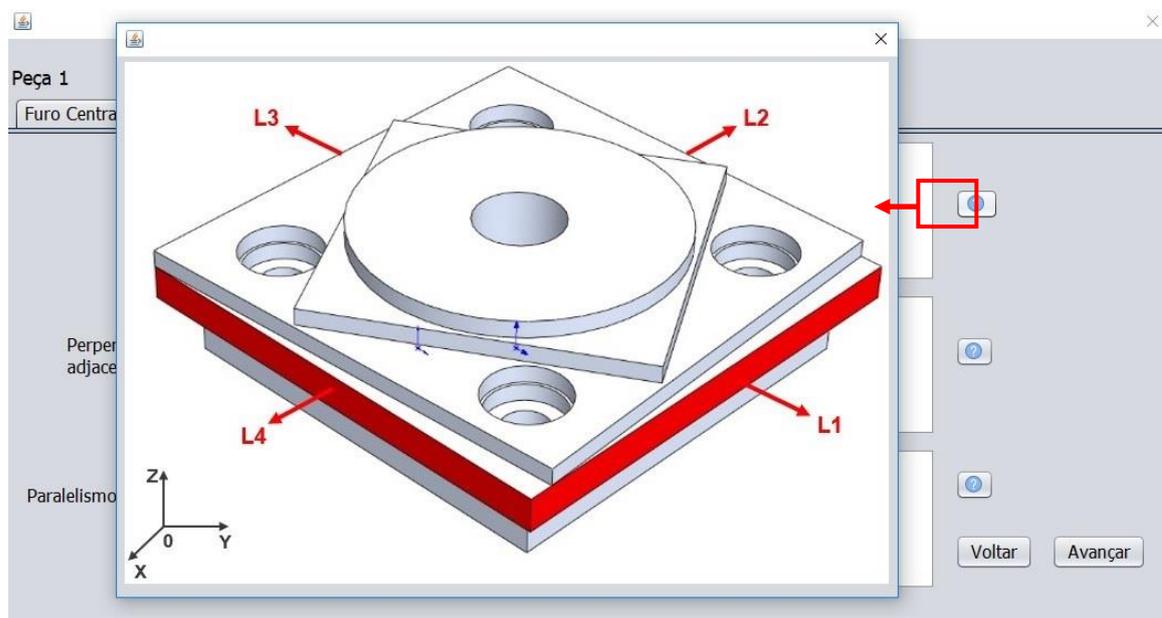
Figura 5.53 – Tela contendo informações sobre os parâmetros tolerados do quadrado



Fonte: O autor, 2019.

Na Figura 5.53 pode-se observar que do lado direito de cada caixa de dados tolerado contém um símbolo de interrogação. Este tem por objetivo orientar o usuário acerca de quais partes da peça-teste devem ser medidas, cuja identificação é realizada por um desenho que contém representação de cores e códigos para cada setor em destaque. Na Figura 5.54 é mostrado um exemplo em que aparece um desenho com as respectivas indicações das regiões que deverão ser avaliadas, após o símbolo de interrogação correspondente ter sido selecionado.

Figura 5.54 – Tela com representação gráfica dos elementos a serem medidos



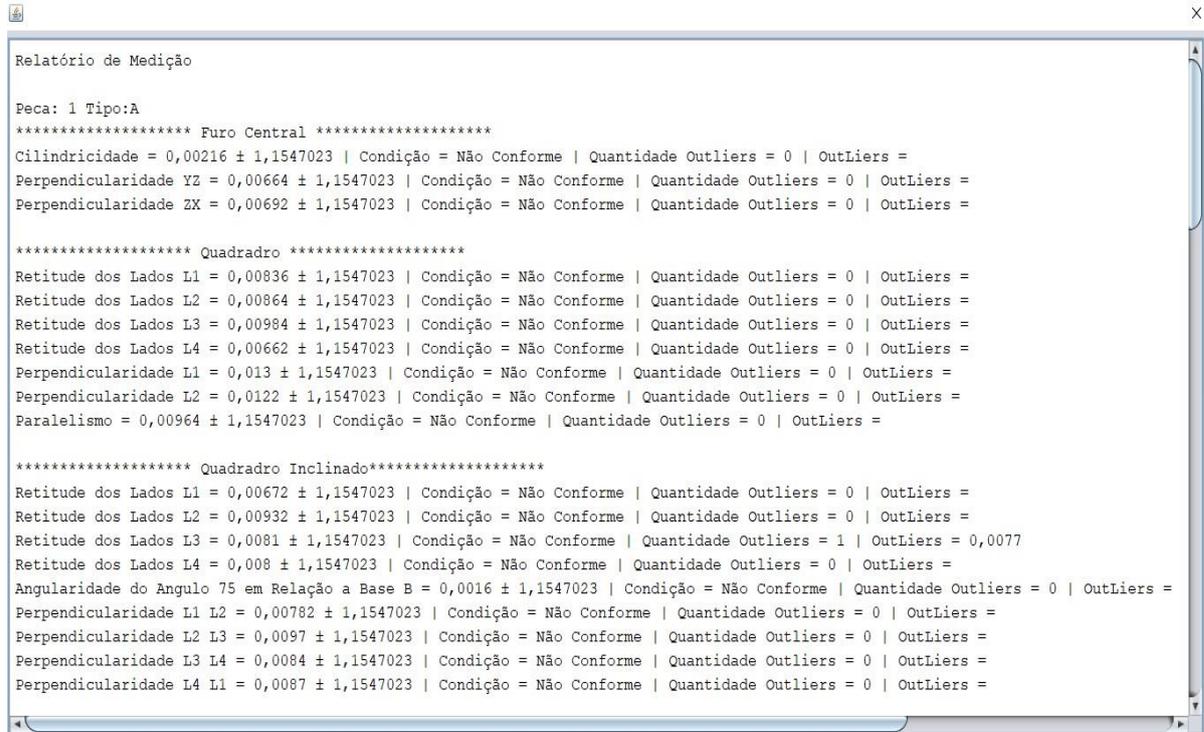
Fonte: O autor, 2019.

Com os dados de medição inseridos, há uma compilação de dados, onde o *software* realiza além dos cálculos matemáticos já mencionados acerca do resultado de medição, uma verificação de possíveis *outliers* com base no teste de *Chauvenet*, que através de interações, realiza verificações até que sejam eliminados tais valores da amostra.

Ainda na tela “Lista de Peças-Teste” (Figura 5.52) é possível observar no canto inferior direito, a existência de três (03) botões de comando, “Visualizar”, “Salvar” e “Gerar Relatório”. Selecionando o botão “Visualizar”, será apresentado um relatório de medição contendo todos os resultados corrigidos com as respectivas incertezas de medição, condição de conformidade ou não com relação à norma,

além de quantidade e valores detectados como *outliers*. Isso se dá para cada parâmetro avaliado, conforme exemplo apresentado na figura 5.55.

Figura 5.55 – Exemplo do relatório de medição



```

Relatório de Medição

Peca: 1 Tipo:A
***** Furo Central *****
Cilindricidade = 0,00216 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade YZ = 0,00664 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade ZX = 0,00692 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =

***** Quadrado *****
Retitude dos Lados L1 = 0,00836 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Retitude dos Lados L2 = 0,00864 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Retitude dos Lados L3 = 0,00984 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Retitude dos Lados L4 = 0,00662 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade L1 = 0,013 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade L2 = 0,0122 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Paralelismo = 0,00964 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =

***** Quadrado Inclinado*****
Retitude dos Lados L1 = 0,00672 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Retitude dos Lados L2 = 0,00932 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Retitude dos Lados L3 = 0,0081 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 1 | OutLiers = 0,0077
Retitude dos Lados L4 = 0,008 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Angularidade do Angulo 75 em Relação a Base B = 0,0016 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade L1 L2 = 0,00782 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade L2 L3 = 0,0097 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade L3 L4 = 0,0084 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =
Perpendicularidade L4 L1 = 0,0087 ± 1,1547023 | Condição = Não Conforme | Quantidade Outliers = 0 | OutLiers =

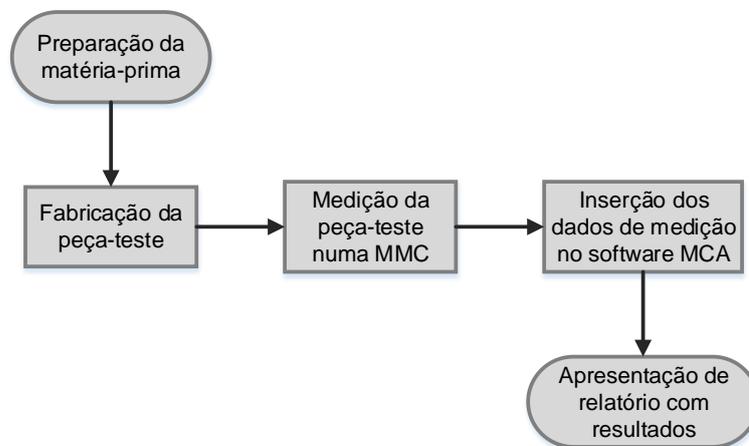
```

Fonte: O autor, 2019.

A visualização do relatório de medição é importante e necessária antes da emissão do relatório final, pois permite verificar a existência de possíveis erros ou dados inconsistentes. Uma vez constatada a consistência dos dados, é necessário clicar em “Salvar” para que os dados sejam processados e que seja habilitado o botão de comando “Gerar Relatório”, que por sua vez emitirá um relatório no formato PDF, sendo possível salvar ou imprimir. No anexo G encontra-se um modelo do “Relatório de Medição” emitido pelo *software Machining Centres Analyser – MCA*.

A Figura 5.56 apresenta um fluxograma contendo as principais etapas a serem realizadas para obtenção do relatório final, utilizando o programa computacional *Machining Centres Analyser – MCA*.

Figura 5.56 – Fluxograma contendo as principais etapas para obtenção do relatório final fornecido pelo programa computacional *Machining Centres Analyser - MCA*



Fonte: O autor, 2019.

6 CONCLUSÃO

O procedimento proposto para verificação de erros geométricos em centros de usinagem através da fabricação e medição das peças-teste, mostrou-se eficaz e permite condições de reprodutibilidade. Com isso é possível avaliar máquinas distintas e compará-las, afim de estabelecer quais apresentam melhor desempenho geométrico.

Pôde-se constatar que a NBR NM-ISO 10791-7:1999 necessita de revisão, pois apresenta erros em relação à denominação de algumas tolerâncias geométricas, além de não ser esclarecedora no que diz respeito a alguns elementos geométricos a serem medidos. Também não especifica que as ferramentas a serem utilizadas na fabricação das peças-teste terão que ser novas, o que pode contribuir para resultados distorcidos caso as ferramentas estejam com o estado de afiação comprometido.

O programa computacional *Machining Centres Analyser – MCA* se mostrou como uma excelente alternativa de baixo custo e fácil aplicação para usuários de centros de usinagem que pretendem realizar uma verificação do comportamento geométrico de suas máquinas antes da tomada de decisão para aplicar ensaios mais caros e sofisticados.

A metodologia proposta neste estudo adicionou ao leque de verificações, a análise de parâmetros que tornam o ensaio geométrico mais completo;

A implementação dos cálculos de incerteza de medição, com base no ISO GUM 2008, bem como verificação de possíveis *outliers*, através do teste de *Chauvenet*, garante confiabilidade dos resultados apresentados e contribui para um diagnóstico mais fiel acerca do centro de usinagem, pois a NBR NM-ISO 10791-7:1999 só especifica os valores nominais das tolerâncias, o que pode comprometer a avaliação da máquina.

Com este estudo, tem-se, portanto, uma referência para o estabelecimento dos cálculos da incerteza de medição pelo método analítico, gerando, portanto, uma base para comparação de resultados.

Em diversas situações, considerando-se a incerteza de medição, uma peça que seria aprovada considerando-se apenas o desvio médio passa a ser reprovada.

Portanto, a utilização de um cálculo de incerteza realístico é fundamental para a eficácia do método proposto neste trabalho.

As peças-teste fabricadas no centro de usinagem MC-1, que é mais novo que os demais (MC-2 e MC-3), apresentou uma menor quantidade de não conformidades, porém, ainda assim, não esteve isento de erros, o que caracteriza a importância de verificações periódicas acerca do desempenho geométrico da máquina.

Com o procedimento proposto, torna-se possível realizar comparações de desempenho entre centros de usinagem, onde pôde-se constatar que das três máquinas avaliadas, a MC-3 foi a que apresentou mais itens fora de especificação nas peças fabricadas.

O desenvolvimento do *software* proposto permitiu apresentar uma ferramenta que pode ser utilizada no chão de fábrica de empresas, contribuindo na garantia de qualidade dos produtos fabricados, tornando-as competitivas frente aos concorrentes, além de ser um produto gerado e registrado junto ao INPI em nome da Universidade Federal de Pernambuco.

Este estudo também fornece dados para que uma organização possa decidir em quais máquinas realizar a fabricação de cada tipo de peça em função das tolerâncias obtidas.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estabelecer a periodicidade de verificação dos centros de usinagem utilizando técnicas estatísticas.
- Confrontar os parâmetros de fabricação sugeridos pela norma com os parâmetros ótimos calculados.
- Adicionar ao procedimento a verificação das tolerâncias dimensionais das peças-teste.

REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, A.; SOUZA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. São Paulo: Manole, 2008. v. 1.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. **Dimensioning and tolerancing**. New York: ASME, 2018.

API AUTOMATED PRECISION. Equipamentos de medição. Disponível em: <https://apisensor.com/pt/>. Acesso em: 13 ago. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. **Anuário ABIMAQ 2019**. São Paulo: Public; ABIMAQ, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409**. Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM ISO 10791-7**. Condições de ensaio para centros de usinagem – Parte 7: exatidão da peça-teste acabada. Rio de Janeiro: ABNT, 1999.

AVALIAÇÃO de Dados de Medição: guia para a Expressão de Incerteza de Medição – GUM 2008. 1ª ed. Rio de Janeiro: INMETRO, 2008.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 3. ed. São Paulo: Editora Unicamp, 2007.

BRUNELLI, A. **Calibration handbook of measuring instruments**. 1. ed. Carolina do Norte: ISA, 2017.

CAMARGO, R.; LINK, W. Calibração direta dos 21 erros geométricos da MM3C. **Sinergia**, São Paulo, v. 5, n. 2, jul./dez., 2004, p. 147-155.

CAMPOS, R. J. C. **Introdução à engenharia de precisão**: projeto e fabricação de precisão. Apostila da disciplina: curso EMA 887 U., v. 1. Belo Horizonte: UFMG, 2010.

DI GIACOMO, B. **Computer aided calibration and hybrid compensation on geometric errors in coordinate measuring machines**. 1986. Thesis (PhD.) - Institute of Science and Technology, University of Manchester, England, May., 1986. 418 p.

ECKHARDT, M.; RIBEIRO, L. F. M.; SCHWINGEL, F. P.; PELLIN, A.; SACKSER G.; DUARTE, L. C. DA S. Avaliação geométrica de máquinas-ferramenta CNC através do método de padrões corporificados. **Máquinas e Metais**, fev., p. 120-129, 2008. FARAGO, F. T.; CURTIS, M. A. **Handbook of dimensional measurement**. 3. ed. New York: Industrial Press, 1994.

FLORUSSEN, G. H. J.; DELBRESSINE, F. L. M.; VAN DE MOLENGRAFT, M. J. G.; SCHELLEKENS, P. H. J. Assessing geometrical errors of multi-axis machines by three-dimensional length measurements. **Measurement**, v. 30, p. 241-255, 2001.

GUERRERO, G. A. **Trajectoria e aprendizado tecnológico do setor de máquinas ferramenta no Brasil**. 2013. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

GUESSER, W. L. **Propriedades mecânicas dos ferros fundidos**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

GUNAY, M.; ASLAN, E.; KORKUT, I.; SEKER, U. Investigation of the effect of rake angle on main cutting force. **Int J Mach Tool Manuf**, p. 44-953, 2004.

HEIDENHAIN. **Grid encoder**. Disponível em: <http://www.heidenhain.com/products/toolinspection/kgm.htm>. Acesso em: 25 abr. 2019.

IBARAKI, S.; YOSHIDA, I.; ASANO, T. A machining test to identify rotary axis geometric errors on a five-axis machine tool with a swiveling rotary table for turning operations. **Precision Engineering**, v. 55, p. 22-32, Jan. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Vocabulário Internacional de Metrologia – conceitos fundamentais e gerais e termos associados**. 1. ed. Rio de Janeiro: INMETRO, 2012.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 1101**. Geometrical product specifications (GPS) – geometrical tolerancing – tolerances of form, orientation, location and run-out. Genebra: ISO, 2017.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 14253-1**. Geometrical product specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for verifying conformity or nonconformity with specifications. 3th ed. Genebra: ISO, 2017.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. **ISO 7083**. Technical drawings – Symbols for geometrical tolerancing – Proportions and dimensions. Genebra: ISO, 1983.

JOSEF M.; MICHAEL G.; BENJAMIN B. M.; SASCHA W.; KONRAD W. Cutting fluid influence on thermal behavior of 5-axis machine tools. **Procedia CIRP** 14, 2014, p. 395-400.

KISHAWY, H. A., DUMITRESCU, E. G., ELBESTAWI, M. A. Effect of cooling strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. **Int J Mach Tools Manuf**, 2004, p. 45-219.

LACALLE, L. N. L. DE; LAMIKIZ, A. **Machine tools for high performance machining**. New York: Springer, 2009.

LASPAS, T. **Modeling and measurement of geometric error of machine tools – Methodology and implementation**. 2014. Thesis (Master), Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2014.

LEITE, W. DE O. N., MÜLLER, E.; OLIVEIRA, E. M. DE; ABRÃO, A. M.; RUBIO, J. C. C. Projeto orientado para manufatura: compensação dos desvios geométricos de máquinas-ferramenta por meio de seu produto acabado. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 6., 2011, Caxias do Sul, RS. **Anais [...]**. Caxias do Sul, RS: COBEF, 2011.

LINK W. **Tópicos avançados de metrologia mecânica – Confiabilidade metrológica e suas aplicações**. Rio de Janeiro: INMETRO, 2000. v. 1.

LIU, Y.; WAN, M.; XING, W. J.; ZHANG, W. H. Identification of position independent geometric errors of rotary axes for five-axis machine tools with structural restrictions. **Robot. Comput. Integr. Manuf.**, v. 53, p. 45–57, 2018.

MAAS, G. A. **A tecnologia de medição por coordenadas na solução de problemas da indústria: sistematização de informações e do processo metrológico do laboratório prestador de serviços**. 2001. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

MAYR, J.; JEDRZEJEWSKI, J.; UHIMANN, E.; DONMEZ, M. A.; KNAPP, W.; HÄRTIG, F.; WENDT, K.; MORIWAKI, T.; SHORE, P.; SCHMITT, R.; BRECHER, C.; WÜRZ, T.; WEGENER, K. Thermal issues in machine tools. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 61, p. 771-791, 2012.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **Measurement Uncertainty Analysis Principles and Methods - NASA Measurement Quality Assurance Handbook – ANNEX 3**. Washington, DC: NASA, 2010.

OKAFOR, A. C.; ERTEKIN, Y. M. Derivation of machine tool error models and error compensation procedure for three axes vertical machining center using rigid body kinematics. **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, v. 40, p. 1199 -1213, 2000.

OLIVEIRA, J. E. F. DE. **A metrologia aplicada aos setores industrial e de serviços – principais aspectos a serem compreendidos e praticados no ambiente organizacional**. Brasília: SEBRAE, 2008. v. 1.

OLIVEIRA, J. E. F. DE. **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. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

ORREGO, R. M. M.; DI GIACOMO, B.; ABACKERLI, A. J. Fontes de erros em metrologia a três coordenadas: considerações gerais. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 8, n. 16, p. 43-56, dez. 2000.

PAHK, H. J.; KIM, Y. S.; MOON, J. H. A new technique for volumetric error assessment of CNC machine tools incorporating ball bar measurement and 3D volumetric error model. **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, v. 37, n. 11, p. 1583-1596, 1997.

RENISHAW. **Ball bar**. Disponível em: <https://www.renishaw.com.br/pt/sistema-ballbar-qc20-w--11075>. Acesso em: 25 abr. 2019.

ROLIM, T. L. **Sistemática indicadora de método para calibração de máquina de medição por coordenadas**. 2003. Tese (Doutorado), Universidade Federal Paraíba, João Pessoa-PB, 2003.

SAIKAEW, C. An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. **Measurement**, v. 118, p. 246-252, March 2018.

SCHWENKE, H.; KNAPP, W.; HAITJEMA, H.; WECKENMANN, A.; SCHMITT, R.; DELBRESSINE, F. Geometric error measurement and compensation of machines – An update. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 57, p. 660-675, 2008.

SENAI. **Mecânica dimensional - tolerância geométrica**. 1. ed. São Paulo: SENAI, 2015.

SILVA NETO, J. C. **Metrologia e controle dimensional - conceitos, normas e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

SMITH, G. T. **Machine Tool Metrology – an industrial handbook**. New York: Springer, 2016.

SOUZA, A. R. DE; SCHNEIDER, C. A. Melhoria das peças usinadas através da qualificação geométrica da máquina-ferramenta. *In*: CONGRESSO NORTE-NORDESTE DE ENGENHARIA MECÂNICA, 5., 1998, Fortaleza-CE. **Anais [...]**. Fortaleza, 1998.

SOUZA, A. R. **Padrões corporificados e a tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de centros de usinagem**. 2000. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

STEINBRUCH A., WINTERLE P. **Geometria analítica**, São Paulo: MAKRON, 1995. v. 1.

THEUWS, F. **Enhancement of machine tool accuracy: theory and implementation**. Publication of Eindhoven University of Technology, 1997.

TRAPET, E.; WÄLDELE, F. A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines and machines tool. **Measurement**, v. 9, n. 1, p. 17-21, 1991.

UENO, S. A máquina da próxima geração tem múltiplas funções e é rápida e precisa. **Máquinas e Metais**, p. 42-53, jan. 1996.

VIEIRA, A. D. **Calibração indireta de máquina de medir por coordenadas utilizando esquadro mecânico de esferas**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

WANG, J; GUO, J. Algorithm for detecting volumetric geometric accuracy of NC machine tool by laser tracker. **Chin. J. Mech. Eng.**, v. 26, p. 166-175, 2013.

WECK, M. **Handbook of machine tools** – Metrological analysis and performance tests. New Jersey: John Wiley and Sons, 1984. v. 4.

XIA, C.; WANG, S.; SUN, S.; MA, C.; LIN, X.; HUANG X. **An identification method for crucial geometric errors of gear form grinding** machine tools based on tooth surface posture error model. **Mechanism and Machine Theory**, v. 138, p. 76-94, 2019.

ZHONG, X.; LIU, H.; MAO, X.; LI, B.; HE, S. Influence and error transfer in assembly process of geometric errors of a translational axis on volumetric error in machine tools. **Measurement**, v. 140, p. 450-451, 2019.

ZHU, S.; DING, G.; QIN, S.; LEI, J.; ZHUANG, L.; YAN, K. Integrated geometric error modeling, identification and compensation of CNC machine tools. **Int. J. F. Mach. Tools Manuf.** 52, 2012, pp. 24–29.

**ANEXO A - Programas e sub-programas para fabricação da parte inferior da
peça-teste tipo A conforme NBR NM-ISO 10791-7: 1999**

- **4002 – PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS (WARM UP)**
- **4003 – SUB-PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS**
- **299 - PROG. PRINCIPAL - ESQUADRO DO QUADRADO**
- **300 - SUB.PROG ESQUADREJAMENTO**
- **301 – SUB.PROG. FACEAMENTO QUADRADO**

4002 – PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS (WARM UP)

04002 (PROG. AQUEC. EIXOS);

G17 G21 G90 G94;

G53 G0 Z-110 H0 M5;

/ T1;

/ M6;

G54 S500 M3;

G0 X0 Y0;

G43 G0 Z300 H1 D1;

M98 P4003 L22;

G53 G0 Z-110 H0 M5;

M30;

%

4003 – SUB-PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS

04003 (SUB. PROG);

G90 G1 X-200 Y-200 Z100 F1500;

X200 Y200 Z300;

X200 Y-200 Z100;

X-200 Y200 Z300;

X0 Y0;
M99;
%

299 - PROG. PRINCIPAL - ESQUADRO DO QUADRADO

%
O0299(QUADRADO)
N10G17G21G90G94
N20G53Z-116H0
N30T19(FRESA D25)
N40M6
N50S1200M3
N60G54X-130Y-120
N70G43Z5H19D19
N72Z0M98P300L12
N81G0Z5M9
N82M5
N83T1(CABECOTE FRESADOR D80)
N90M6
N100S800M3
N110G54X-135Y-85
N120G43Z5H1D1
N130Z0M98P301L6
N140G0Z5M9
N150G53Z-116M5
N160G53X-570Y0
N170M30
%

300 - SUB.PROG ESQUADREJAMENTO

%

O0300(SUB QUADRADO)

N06G0X-126Y-115F2000

N10G91G1Z-2F100G90

N11G41G1X-70Y-110F1000

N20G1Y70

N40G1X70

N60G1Y-70

N62G1X-110

N82G40G0X-126Y-115

N80N80M99

%

301 – SUB.PROG. FACEAMENTO QUADRADO

%

O0301(SUB QUADRADO)

N10G91G1Z-.47G90F5000

N11G1X135F600

N12G0Y85

N13G1X-135F600

N21G0Y-85

N60M99

N70%

**ANEXO B - Programas e sub-programas para fabricação da parte superior da
peça-teste tipo A conforme NBR NM-ISO 10791-7: 1999**

- **4002 – PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS (WARM UP);**
- **4003 – SUB-PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS;**
- **4004 – PROGRAMA PRINCIPAL**
- **4005 – SUB-PROG. CÍRCULO**
- **4006 – SUB-PROG. QUAD. INCLINADO**
- **4007 – SUB-PROG. REBAIXO LATERAL**
- **4008 – SUB-PROG. QUAD. EXTERNO**
- **4009 – SUB-PROG. FURO D28**

4002 – PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS (WARM UP)

04002 (PROG. AQUEC. EIXOS);

G17 G21 G90 G94;

G53 G0 Z-110 H0 M5;

/ T1;

/ M6;

G54 S500 M3;

G0 X0 Y0;

G43 G0 Z300 H1 D1;

M98 P4003 L22;

G53 G0 Z-110 H0 M5;

M30;

%

4003 – SUB-PROG. DE AQUECIMENTO DOS EIXOS

04003 (SUB. PROG);

G90 G1 X-200 Y-200 Z100 F1500;

X200 Y200 Z300;
X200 Y-200 Z100;
X-200 Y200 Z300;
X0 Y0;
M99;
%

4004 – PROGRAMA PRINCIPAL

04004 (PROG. FAB);
G17 G21 G90 G94;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
;
M00;
;
/ T1 (FACEAR. D50);
/ M6;
G54 S1500 M3;
G0 X125 Y-70;
G43 G0 Z10 H1 D1;
G1 Z.5 F1000;
X-125;
Y-25;
X125;
Y20;
X-125;
Y65;
X125;
Z0;
X-125;
Y20;
X125;

Y-25;
X-125;
Y-70;
X125;
Y0;
;
M98 P4005 L6 (SUB. CIRCULO);
;
G0 X150 Y20;
;
M98 P4006 L6 (SUB. QUAD. INCLINADO);
;
G0 X150 Y20;
;
M98 P4007 L6 (SUB. REB. LATERAL);
;
G0 X125 Y0;
Z-12;
;
M98 P4008 L6 (SUB. QUAD. EXTERNO);
;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
;
M00;
;
/ T2 (BROCA. DE. CENTRO);
/ M6;
G54 S1200 M3;
G0 X0 Y0;
G43 G0 Z5 H2 D2;
G1 Z-5 F120;
Z10 F1000;

G98 G81 X-52 Y-52 Z-18 R-10 F120;
X-52 Y52;
X52 Y52;
X52 Y-52;
G80;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
;
M00;
;
/ T3 (BROCA. D11);
/ M6;
G54 S500 M3;
G0 X0 Y0;
G43 G0 Z10 H3 D3;
G99 G83 Z-55 R10 Q10 F100;
X-52 Y-52;
X-52 Y52;
X52 Y52;
X52 Y-52;
G80;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
;
M00;
;
/ T4 (BROCA. D25.4);
/ M6;
G54 S200 M3;
G43 G0 Z10 H4 D4;
G99 G81 X0 Y0 Z-60 R10 F40;
G80;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
;

```
M00;  
;  
/ T5 (FRESA. TOPO. D16);  
/ M6;  
G54 S400 M3;  
G43 G0 Z10 H5 D5;  
G98 G81 X-52 Y-52 Z-38 R-10 F60;  
X-52 Y52;  
X52 Y52;  
X52 Y-52;  
G80;  
G53 G0 Z-110 H0 M5;  
;  
M00;  
;  
/ T6 (FRESA. DESBASTE. D20);  
/ M6;  
G54 S350 M3;  
G0 X0 Y0;  
G43 G0 Z10 H6 D6;  
G1 Z-25 F1000;  
G41 G1 X14.5 Y0 F70;  
G3 X-14.5 Y0 R14.5;  
G3 X14.5 Y0 R14.5;  
G40 G1 X0 Y0;  
Z-50 F1000;  
G41 G1 X14.5 Y0 F70;  
G3 X-14.5 Y0 R14.5;  
G3 X14.5 Y0 R14.5;  
G40 G1 X0 Y0;  
Z10 F1000;  
;
```

G0;
X-52 Y-52;
G1 Z0 F1000;
M98 P4009 L1 (SUB. FURO. D28);
;
G0 X-52 Y52;
G1 Z0 F1000;
M98 P4009 L1 (SUB.FURO. D28);
;
G0 X52 Y52;
G1 Z0 F1000;
M98 P4009 L1 (SUB.FURO. D28);
;
G0 X52 Y-52;
G1 Z0 F1000;
M98 P4009 L1 (SUB.FURO. D28);
;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
;
M00;
;
/ T10;
/ M6;
G54 S300 M3;
G0 X0 Y0;
G43 G0 Z5 H10 D10;
G1 Z-52 F15;
M5;
M19;
G1 X-1 F100;
G0 Z10;
G53 G0 Z-110 H0 M5;

```
;
M00;
;
/ T8;
/ M6;
G54 S300 M3;
G0 X52 Y52;
G43 G0 Z10 H8 D8;
G1 Z-10 F1000;
G1 Z-18 F15;
M5;
Z-10 F100;
G0 Z10;
;
S300 M3;
X52 Y-52;
G1 Z-10 F1000;
G1 Z-18 F15;
M5;
Z-10 F100;
G0 Z10;
;
S300 M3;
G0 X-52 Y-52;
G1 Z-10 F1000;
G1 Z-18 F15;
M5;
Z-10 F100;
G0 Z10;
;
S300 M3;
X-52 Y52;
```

```
G1 Z-10 F1000;  
G1 Z-18 F15;  
M5;  
Z-10 F100;  
G0 Z10;  
;  
G53 G0 Z-110 HO M5;  
;  
M00;  
;  
/ T11;  
/ M6;  
G54 S450 M3;  
G0 X52 Y52;  
G43 G0 Z10 H11 D11;  
G1 Z0 F1000;  
;  
M98 P4010 L1;  
;  
G0 X-52 Y52;  
G1 Z0 F1000;  
M98 P4010 L1;  
;  
;  
G0 X-52 Y-52;  
G1 Z0 F1000;  
M98 P4010 L1;  
;  
G0 X52 Y-52;  
G1 Z0 F1000;  
M98 P4010 L1;  
;  
;
```

```
G53 G0 Z-110 H0 M5;  
;  
M00;  
;  
/ T9;  
/ M6;  
G54 X52 Y52;  
G43 G0 Z30 H9 D9;  
G1 Z0 F1000;  
M5;  
M19;  
G91 G1 X-1 F100;  
G90 Z-24;  
G1 X52 Y52;  
S300 M4;  
G1 Z-18 F15;  
G1 Z30 F1000;  
;  
G0 X52 Y-52;  
M5;  
M19;  
G91 G1 X-1 F100;  
G90 Z-24;  
G1 X52 Y-52;  
S300 M4;  
G1 Z-18 F15;  
G1 Z30 F1000;  
;  
G0 X-52 Y-52;  
M5;  
M19;  
G91 G1 X-1 F100;
```

G90 Z-24;
G1 X-52 Y-52;
S300 M4;
G1 Z-18 F15;
G1 Z30 F1000;
;
G0 X-52 Y52;
M5;
M19;
G91 G1 X-1 F100;
G90 Z-24;
G1 X-52 Y52;
S300 M4;
G1 Z-18 F15;
G1 Z30 F1000;
;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
;
M00;
;
/ T7;
/ M6;
G54 S5000 M3;
G0 X120 Y0;
G43 G0 Z10 H7 D7;
G1 Z-6 F1000;
G41 G1 X54 Y0;
G2 X-54 Y0 R54;
G2 X54 Y0 R54;
G1 G40 X120 Y0;
;
G0 X150 Y20;

G1 Z-12 F1000;
G41 G1 X102.868 Y-5.602;
X-20.602 Y-76.887;
X-76.887 Y20.602;
X20.602 Y76.887;
X91.887 Y-46.583;
G40 G0 X150 Y20;
;
G0 X150 Y20;
G1 Z-18 F1000;
G41 G1 X110 Y-70.672;
X-71.615 Y-80;
X-80 Y80;
Y130;
G40 G0 X150;
Y20;
;
G0 X120 Y0;
G1 Z-35 F1000;
G90 G41 G1 X80 Y0;
Y-80;
X-80;
Y80;
X80;
Y0;
G40 G1 X120 Y0;
G53 G0 Z-110 H0 M5;
M30;
%

4005 – SUB-PROG. CÍRCULO

04005 (SUB. CÍRCULO);

G91 G1 Z-1;
G90;
G41 G1 X54 Y0 F1000;
G2 X-54 Y0 R54;
G2 X54 Y0 R54;
G1 G40 X120 Y0;
M99;
%

4006 – SUB-PROG. QUAD. INCLINADO

04006 (SUB. QUAD. INCLINADO);
G91 G1 Z-1;
G90;
G41 G1 X102.868 Y-5.602 F1000;
X-20.602 Y-76.887;
X-76.887 Y20.602;
X20.602 Y76.887;
X91.887 Y-46.583;
G40 G0 X150 Y20;
M99;
%

4007 – SUB-PROG. REBAIXO LATERAL

04007 (SUB. REB. LATERAL);
G91 G1 Z-1;
G90;
G41 G1 X110 Y-70.672 F1000;
X-71.615 Y-80;
X-80 Y80;
Y130;
G40 G0 X150;
Y20;
M99;

%

4008 – SUB-PROG. QUAD. EXTERNO

04008 (SUB. QUAD. EXTERNO);

G91 G1 Z-3 F1000;

G90 G41 G1 X80 Y0;

Y-80;

X-80;

Y80;

X80;

Y0;

G40 G1 X120 Y0;

M99;

%

4009 – SUB-PROG. FURO D28

04009 (SUB. FURO. D28);

G91 G1 Z-18 F100;

G41 G1 X13.5 Y0;

G3 X-27 Y0 R13.5;

G3 X27 Y0 R13.5;

G40 G1 X-13.5 Y0;

Z-6;

G41 G1 X12.5 Y0;

G3 X-25 Y0 R12.5;

G3 X25 Y0 R12.5;

G40 G1 X-12.5 Y0;

G90 Z10 F1000;

M99;

%

ANEXO C - Descrição das ferramentas e suas principais aplicações

Segue abaixo uma breve descrição de cada uma das onze (11) ferramentas e suas principais aplicações.

- **T1 - Cabeçote fresador com diâmetro de 50 mm e 5 insertos de metal duro (Figura 1):** utilizado para fabricação da base inferior, bem como faceamento da parte superior e desbaste dos elementos geométricos da parte superior (círculo, quadrado inclinado, faces inclinadas e quadrado). Nesse cabeçote foram utilizados cinco (05) insertos intercambiáveis de metal duro revestidos, da marca ISENR modelo SPMT 100408R-HQ-M, conforme Figura 2.

Figura 1 – Cabeçote fresador com diâmetro de 50 mm e 5 insertos de metal duro revestidos



Fonte: O autor, 2017.

Figura 2 – insertos de metal duro marca ISENR modelo SPMT 100408R-HQ-M



Fonte: O autor, 2017.

- **T2 - Broca de centro de aço rápido com diâmetro de 1/8" (Figura 3):** utilizada para realização de pré-furos nas posições dos furos central e mandrilados, a fim de guiar as ferramentas utilizadas posteriormente para realização de furações passantes.

Figura 3 – Broca de centro de aço rápido com diâmetro de 1/8"



Fonte: O autor, 2017.

- **T3 - Broca de aço rápido com diâmetro de 11 mm (Figura 4):** utilizada para realização cinco (05) furos passantes nas posições dos furos central e mandrilados.

Figura 4 – Broca de aço rápido com diâmetro de 11 mm



Fonte: O autor, 2017.

- **T4 - Broca de aço rápido com diâmetro de 1" (Figura 5):** utilizada para realização de furação passante na posição do furo central.

Figura 5 – Broca de aço rápido com diâmetro de 1"



Fonte: O autor, 2017.

- **T5 - Fresa de topo, de aço rápido, com 4 arestas principais e diâmetro de 16 mm (Figura 6):** utilizada para realização de quatro (04) furações com profundidade de 26 mm nas posições dos furos mandrilados.

Figura 6 – Fresa de topo, de aço rápido, com 4 arestas principais e diâmetro de 16 mm



Fonte: O autor, 2017.

- **T6 - Fresa de topo para desbaste, de aço rápido, com 4 arestas principais e diâmetro de 16 mm (Figura 7):** utilizada para realização alargamento de através de interpolação circular, deixando o furo central com diâmetro igual a 29 mm ao longo de todo o seu comprimento e em cada posição dos furos mandrilados, realização de dois alargamentos, sendo um com altura de 6 mm e diâmetro de 27 mm e o outro logo abaixo com altura também de 6 mm e diâmetro de 25 mm. As operações realizadas com essa ferramenta, serviram para deixar os furos com diâmetros 1 mm menor da dimensão final, contribuindo para pequenos esforços e bom acabamento superficial durante as operações de mandrilhamento.

Figura 7 – Fresa de topo para desbaste, de aço rápido, com 4 arestas principais e diâmetro de 16 mm.



Fonte: O autor, 2017

- **T7 - Fresa de topo de metal duro com 2 arestas principais e diâmetro de 10 mm (Figura 8):** utilizada para realização de operações de acabamento nos contornos do círculo, quadrado inclinado, faces inclinadas e quadrado.

Figura 8 – Fresa de topo de metal duro com 2 arestas principais e diâmetro de 10 mm



Fonte: O autor, 2017.

- **T8 - Ferramenta de mandrilar com raio de 14 mm (Figura 9):** utilizada para realização de quatro (04) operações de mandrilamento no sentido negativo do eixo z, deixando os furos com diâmetro de 28 mm e altura de 6 mm.

Figura 9 – Ferramenta de mandrilar com raio de 14 mm



Fonte: O autor, 2017.

- **T9 - Ferramenta de mandrilar com raio de 13 mm (Figura 10):** utilizada para realização de quatro (04) operações de mandrilhamento no sentido negativo do eixo z, deixando os furos com diâmetro de 26 mm e altura de 6 mm.

Figura 10 – Ferramenta de mandrilar com raio de 13 mm



Fonte: O autor, 2017.

- **T10 - Ferramenta de mandrilar com raio de 15 mm (Figura 11):** utilizada para realização de operação de mandrilhamento passante do furo central, no sentido negativo do eixo z, deixando o diâmetro igual a 30 mm.

Figura 11 – Ferramenta de mandrilar com raio de 15 mm



Fonte: O autor, 2017.

- **T11 - Fresa T, de aço rápido, com diâmetro de 15 mm e espessura de 2,5 mm (Figura 12):** utilizada para realização de canal na parede do furo mandrilado de 26 mm, a fim de permitir a entrada da ferramenta e posterior mandrilhamento no sentido positivo do eixo z.

Figura 12 – Fresa T, de aço rápido, com diâmetro de 15 mm e espessura de 2,5 mm



Fonte: O autor, 2017.

ANEXO D - Parâmetros de corte utilizados na fabricação das peças-teste

Tabela 1 – Parâmetros de corte utilizados na fabricação das peças-teste

(continua...)

Elemento geométrico	Operação	Código da ferramenta	Nº de passadas	Parâmetros
Círculo	Desbaste	T1	6	n = 1500 rpm f = 0,67 mm/rot a _p = 1 mm
	Acabamento	T7	1	n = 3500 rpm f = 0,14 mm/rot a _p = 0,3 mm
Quadrado inclinado	Desbaste	T1	6	n = 1500 rpm f = 0,67 mm/rot a _p = 1 mm
	Acabamento	T7	1	n = 3500 rpm f = 0,14 mm/rot a _p = 0,3 mm
FACES INCLINADAS	Desbaste	T1	6	n = 1500 rpm f = 0,67 mm/rot a _p = 1 mm
	Acabamento	T7	1	n = 3500 rpm f = 0,14 mm/rot a _p = 0,3 mm
Quadrado	Desbaste	T1	6	n = 1500 rpm f = 0,67 mm/rot a _p = 1 mm
	Acabamento	T7	1	n = 3500 rpm f = 0,14 mm/rot a _p = 0,3 mm
Furo central	Furação de centro	T2	1	n = 1000 rpm f = 0,12 mm/rot a _p = 1,59 mm
	Furação (Ø 11 mm)	T3	1	n = 500 rpm f = 0,2 mm/rot a _p = 5,5 mm
				n = 200 rpm f = 0,2 mm/rot a _p = 12,7 mm
	Furação (Ø 25,4 mm)	T4	1	

Continuação

	Interpolação circular (Ø 29 mm)	T6	14	n = 1000 rpm f = 0,07 mm/rot a _p = 1,8 mm
	Mandrilamento (Ø 30 mm)	T10	1	n = 300 rpm f = 0,05 mm/rot a _p = 0,5 mm
	Furação de centro	T2	1	n = 1000 rpm f = 0,12 mm/rot a _p = 1,59 mm
	Furação (Ø 11 mm)	T3	1	n = 500 rpm f = 0,2 mm/rot a _p = 5,5 mm
	Furação (Ø 16 mm)	T5	1	n = 400 rpm f = 0,15 mm/rot a _p = 2,5 mm
Furos mandrilados	Interpolação circular (Ø 27 mm)	T6	1	n = 1000 rpm f = 0,1 mm/rot a _p = 5,5 mm
	Interpolação circular (Ø 25 mm)	T6	1	n = 1000 rpm f = 0,1 mm/rot a _p = 4,5 mm
	Mandrilamento (Ø 28 mm)	T8	1	n = 300 rpm f = 0,05 mm/rot a _p = 0,5 mm
	Abertura de canal	T11	1	n = 300 rpm f = 0,05 mm/rot a _p = 0,5 mm
	Mandrilamento (Ø 26 mm)	T9	1	n = 450 rpm f = 0,67 mm/rot a _p = 0,5 mm

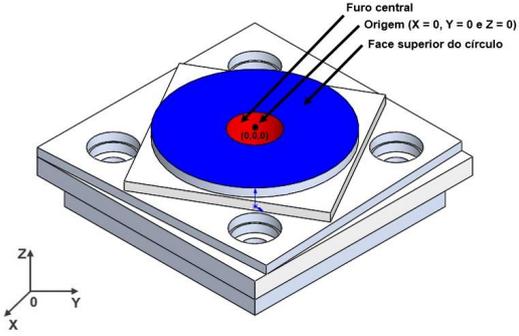
Fonte: O autor, 2018.

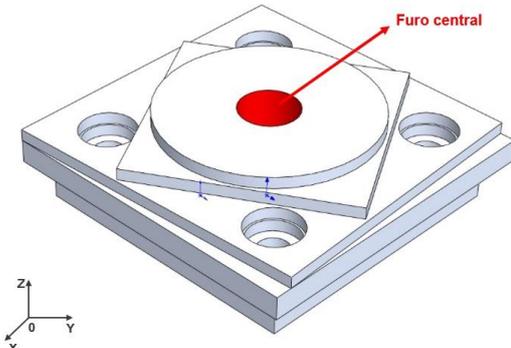
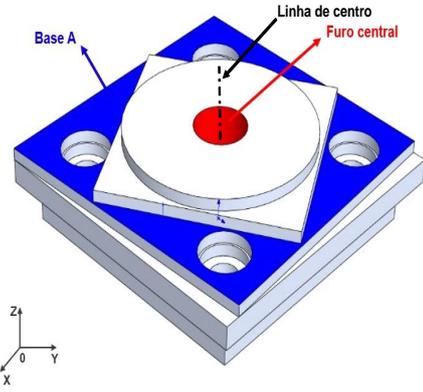
ANEXO E - Procedimento de medição padrão da peça-teste tipo A

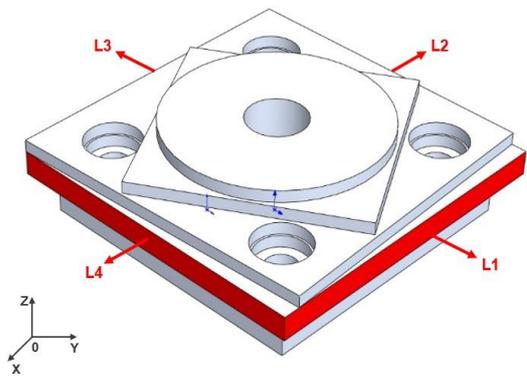
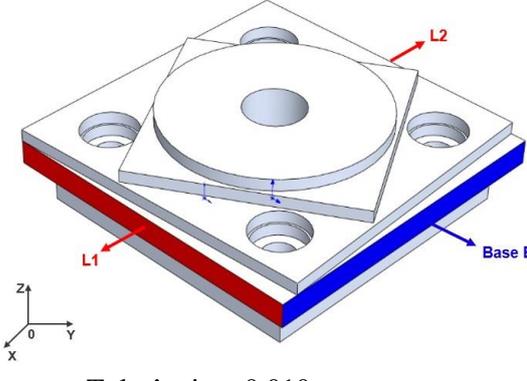
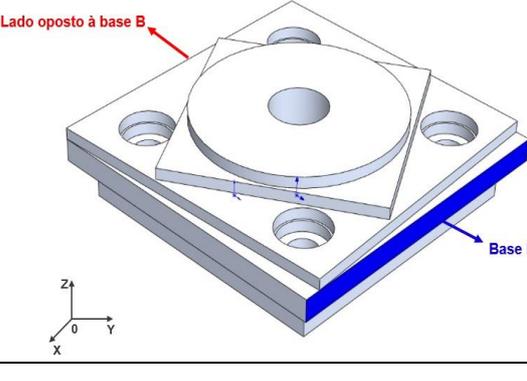
OBS 1: Para realização das medições deve-se dispor de ambiente controlado com temperatura e umidade relativa de $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ e $(50 \pm 10) \text{ \%UR}$, respectivamente.

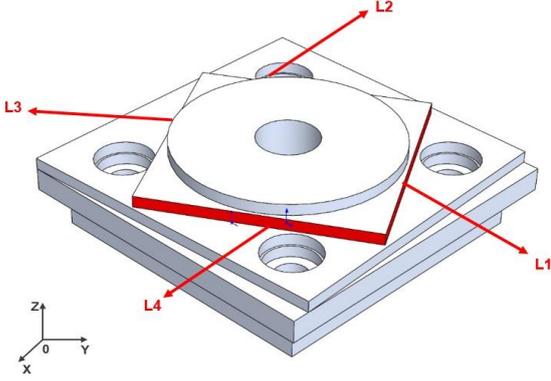
OBS 2: Todo o procedimento de medição deve ser realizado no sentido anti-horário, tanto na obtenção dos pontos coordenados de cada elemento, quanto na sequência dos itens medidos.

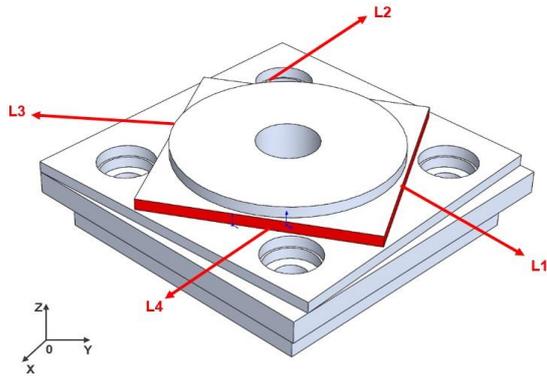
OBS 3: O número de medições a serem realizadas por elemento deve ser maior ou igual a três (≥ 3).

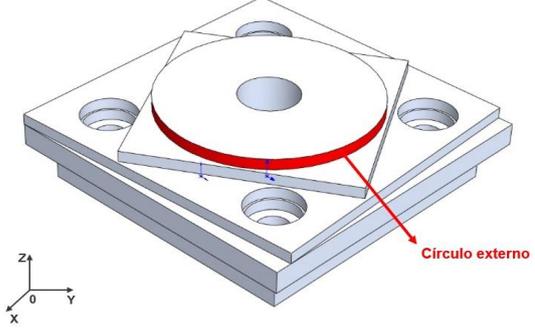
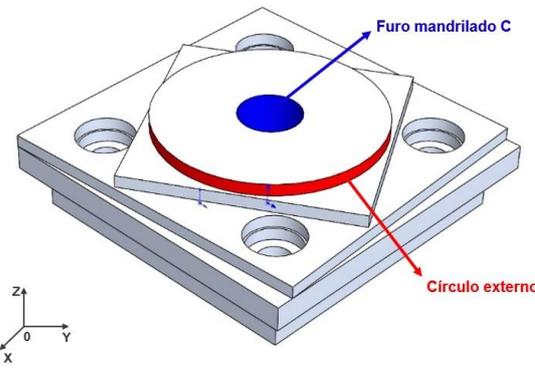
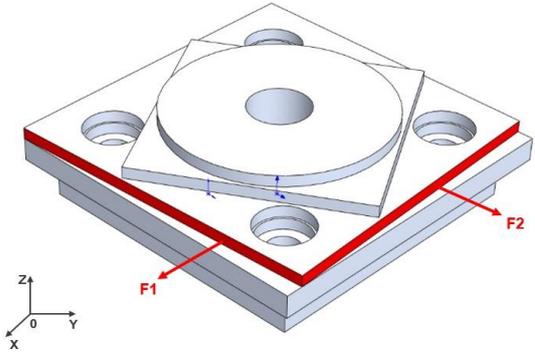
Determinação da origem na peça	
Elemento	Etapas
<p style="text-align: center;"><u>Origem</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir plano (plano de origem) na face superior do círculo, a partir oito (08) pontos coordenados; 2- Construir cilindro (cilindro de origem) no furo central, a partir de oito (08) pontos coordenados, sendo quatro (04) na coordenada $Z = -40 \text{ mm}$ e os outros quatro (04) na coordenada $Z = -4 \text{ mm}$; 3- Selecionar a opção “Nivela Plano” e determinar a origem entre “plano de origem” e “cilindro de origem”.

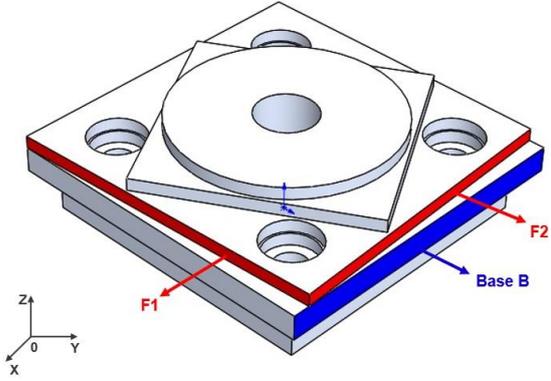
Furo Central	
Elemento Tolerado	Etapas
<p style="text-align: center;">a) <u>Cilindricidade</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 40 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir círculos, com oito (08) pontos coordenados cada, ao longo da seção transversal do furo central, com as respectivas coordenadas Z: - 40 mm, - 35 mm, - 30 mm, - 25 mm, - 18 mm e - 4 mm; 2- Determinar o desvio de cilindridade como sendo a maior amplitude registrada dentre os valores medidos, tomando como referência o diâmetro nominal do furo central (30 mm) estabelecido na NBR NM-ISO 10791-7: 1999; 3- Fornecer o resultado de cilindridade como a média aritmética dos valores de n medições.
<p style="text-align: center;">b) <u>Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 40 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir cilindro, com oito (08) pontos coordenados, na região do “furo central”, sendo composto por dois círculos de coordenadas Z iguais a - 40 mm e - 4 mm, respectivamente. Cada círculo deve ser obtido a partir de quatro (04) pontos coordenados, medidos no sentido anti-horário; 2- Construir plano na superfície da base B, formado por oito (08) pontos coordenados e medidos no sentido anti-horário; 3- Determinar o desvio de perpendicularidade nos planos YZ e ZX, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 4- Fornecer os resultados de perpendicularidade pertencentes aos planos YZ e ZX, como a média aritmética dos valores de n medições.

Quadrado	
Elemento Tolerado	Etapas
<p style="text-align: center;">c) <u>Retitude dos lados</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 160 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir linhas com dez (10) pontos coordenados, ao longo dos lados L1, L2, L3 e L4, com coordenada Z = - 24 mm em ambos; 2- Determinar o desvio de retitude de cada lado, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer os resultados de retitude (de cada lado) como a média aritmética dos valores de n medições.
<p style="text-align: center;">d) <u>Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação a base B</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 160 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Utilizar linhas construídas no item “c”, assumindo “L1 = L4”, “L2 = L2” e “base B = L1”; 2- Determinar os desvios de perpendicularidade entre “L1 e base B” e “L2 e base B”, ambos no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer os resultados de perpendicularidade (de cada lado), como a média aritmética dos valores de n medições.
<p style="text-align: center;">e) <u>Paralelismo do lado oposto à base B</u></p> 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Utilizar linhas construídas no item “c”, assumindo “lado oposto à base B = L3” e “base B = L1”; 2- Determinar o desvio de paralelismo, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer o resultado de paralelismo como a média aritmética dos valores de n medições.

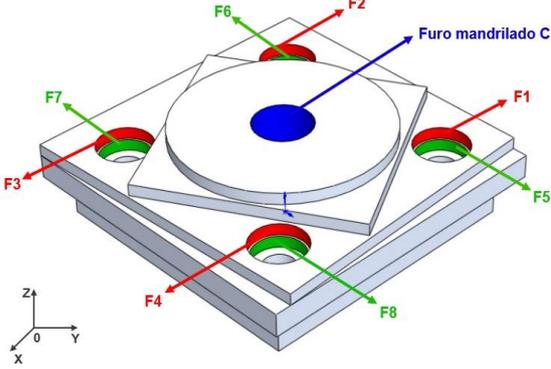
<ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 160 mm. 	
Quadrado Inclinado	
Elemento Tolerado	Etapas
<p style="text-align: center;">f) <u>Retitude dos lados</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 156,98 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir linhas com dez (10) pontos coordenados, ao longo dos lados L1, L2, L3 e L4, com coordenada $Z = -8,5$ mm em ambos; 2- Determinar o desvio de retitude de cada lado, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer os resultados de retitude (de cada lado) como a média aritmética dos valores de n medições.
<p style="text-align: center;">g) <u>Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B</u></p>	<ol style="list-style-type: none"> 1- Criar dois pontos pela conexão de elementos, ou seja, ponto 1 formado pela interseção das linhas L2 e L3, e ponto 2 formado pela interseção das linhas L1 e L4; 2- Construir linha que intercepta os pontos 1 e 2; 3- Gerar plano que intercepta a base B; 4- Medir ângulo entre a linha e o plano; 5- Determinar o desvio de angularidade, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da

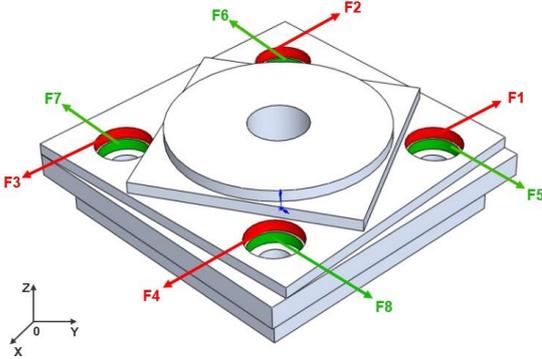
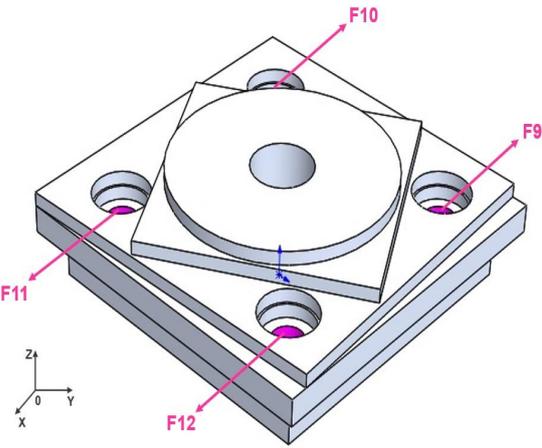
 <p>Piano coincidente com a base B</p> <p>Linha passando pelos vértices do quadrado inclinado</p> <p>75°</p> <p>Base B</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 156,98 mm. 	<p>MMC;</p> <p>6- Fornecer o resultado de angularidade como a média aritmética dos valores de n medições.</p>
<p>h) Perpendicularidade entre os lados</p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 156,98 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Utilizar linhas construídas no item “f”, assumindo “L1 = L1”, “L2 = L2”, “L3 = L3” e “L4 = L4”; 2- Determinar os desvios de perpendicularidade entre “L1 e L2”, “L2 e L3”, “L3 e L4” e “L4 e L1”, ambos no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer os resultados de perpendicularidade (entre cada par de lados) como a média aritmética dos valores de n medições.
Círculo	
Elemento Tolerado	Etapas
<p>i) Circularidade</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir círculo (círculo maior), através de vinte (20) pontos coordenados, na face do círculo externo, com coordenada Z = - 3 mm; 2- Determinar o desvio de circularidade, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer o resultado de circularidade

 <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,015 mm; • Diâmetro de referência = 108 mm. 	<p>como a média aritmética dos valores de n medições.</p>
<p>j) <u>Concentricidade do círculo externo e o furo mandrilado C</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,025 mm; • Diâmetro de referência = 108 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir círculo (círculo menor), com oito (08) pontos coordenados, na região do “furo central”, com coordenada Z = - 3 mm; 2- Determinar o desvio de concentricidade entre os círculos maior e menor, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer o resultado de concentricidade como a média aritmética dos valores de n medições.
<p>Faces Inclinadas</p>	
<p>Elemento Tolerado</p>	<p>Etapas</p>
<p>k) <u>Retitude das faces</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 160,22 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir linhas com dez (10) pontos coordenados, ao longo das faces F1 e F2, com coordenada Z = - 14 mm em ambas; 2- Determinar o desvio de retitude de cada face, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 3- Fornecer os resultados de retitude (de cada face) como a média aritmética dos valores de n medições.

<p>I) <u>Angularidade dos ângulos em relação à base B</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência F1 = 160,22 mm. • Comp. de referência F2 = 151,82 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Determinar o desvio de angularidade entre “F1 e base B”, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC, e assumindo o valor do ângulo de referência igual a 93°; 2- Determinar o desvio de angularidade entre “F2 e base B”, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC, e assumindo o valor do ângulo de referência igual a 3°; 3- Fornecer os resultados de angularidade (de cada face) como a média aritmética dos valores de n medições.
---	--

Furos Mandrilados

Elemento Tolerado	Etapas
<p>m) <u>Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,05 mm; • Comp. de referência = 73,54 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir círculos com oito (08) pontos coordenados e coordenada Z igual a – 14 mm, em cada um dos quatro (04) furos mandrilados com diâmetro nominal de 28 mm (F1, F2, F3 e F4); 2- Construir círculos com oito (08) pontos coordenados e coordenada Z igual a – 20 mm, em cada um dos quatro (04) furos mandrilados com diâmetro nominal de 26 mm (F5, F6, F7 e F8); 3- Determinar o desvio de posicionamento de cada círculo em relação ao “círculo menor” (construído no item “j”), no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 4- Fornecer os resultados de posicionamento (de cada furo) como a média aritmética dos valores de n medições.

<p>n) <u>Concentricidade do furo interno com o furo externo D</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,02 mm; 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Determinar o desvio de concentricidade entre “F1 e F5”, “F2 e F6”, “F3 e F7” e “F4 e F8”, no plano XY, através dos círculos criados no item “m”, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 2- Fornecer os resultados de concentricidade (de cada par de furos) como a média aritmética dos valores de n medições.
<p>o) <u>Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C</u></p>  <ul style="list-style-type: none"> • Tolerância = 0,010 mm; • Comp. de referência = 147,08 mm. 	<ol style="list-style-type: none"> 1- Construir círculos com oito (08) pontos coordenados e coordenada Z igual a – 27 mm, em cada um dos quatro (04) furos mandrilados com diâmetro nominal de 16 mm (F9, F10, F11 e F12); 2- Construir duas linhas (diagonal 1 e diagonal 2), interceptando os centros dos furos “F9 e F11” e “F10 e F12”, respectivamente, através do comando “conexão de elementos”; 3- Determinar o desvio de perpendicularidade entre as diagonais, no plano XY, utilizando ferramenta específica pertencente ao <i>software</i> da MMC; 4- Fornecer o resultado de perpendicularidade como a média aritmética dos valores de n medições.

ANEXO F - Planilha para inserção de dados de medição



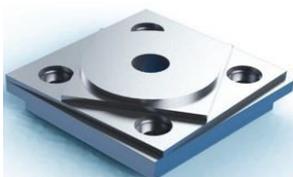
Machining Centres Analyser – MCA *Planilha de Medição*

Dados do Cliente e Máquina		Cliente:			
		Máquina:			
		Marca:			
		Modelo:			
		Nº de Séri:			
Dados de a Peça-Teste e Medições		Ano de Fabricação:			
		Identificação da Peça-Teste Fabricada:			
		Data de Fabricação:			
		Data de Medição:			
		Nº de Medições por Elemento Geométrico:			
		Responsável pela Medição:			
Furo Central					
Cilindricidade (mm)					
Z = - 40mm	Z = - 35mm	Z = - 30mm	Z = - 25mm	Z = - 18mm	Z = - 4mm
$\emptyset_1 =$	$\emptyset_1 =$	$\emptyset_1 =$	$\emptyset_1 =$	$\emptyset_1 =$	$\emptyset_1 =$
$\emptyset_2 =$	$\emptyset_2 =$	$\emptyset_2 =$	$\emptyset_2 =$	$\emptyset_2 =$	$\emptyset_2 =$
$\emptyset_3 =$	$\emptyset_3 =$	$\emptyset_3 =$	$\emptyset_3 =$	$\emptyset_3 =$	$\emptyset_3 =$
$\emptyset_4 =$	$\emptyset_4 =$	$\emptyset_4 =$	$\emptyset_4 =$	$\emptyset_4 =$	$\emptyset_4 =$
$\emptyset_5 =$	$\emptyset_5 =$	$\emptyset_5 =$	$\emptyset_5 =$	$\emptyset_5 =$	$\emptyset_5 =$
Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A (mm)					
Plano YZ			Plano ZX		
Medição 1 =			Medição 1 =		
Medição 2 =			Medição 2 =		
Medição 3 =			Medição 3 =		
Medição 4 =			Medição 4 =		
Medição 5 =			Medição 5 =		
Quadrado					
Retitude dos lados (mm)					
Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4		
Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =		
Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =		
Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =		
Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =		
Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =		
Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B (mm)					
Lado 1			Lado 2		
Medição 1 =			Medição 1 =		
Medição 2 =			Medição 2 =		
Medição 3 =			Medição 3 =		
Medição 4 =			Medição 4 =		

Medição 5 =	Medição 5 =		
Paralelismo do lado oposto à base B (mm)			
Medição 1 =			
Medição 2 =			
Medição 3 =			
Medição 4 =			
Medição 5 =			
Quadrado Inclinado			
Retitude dos lados (mm)			
Lado 1	Lado 2	Lado 3	Lado 4
Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =
Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =
Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =
Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =
Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =
Angularidade do ângulo de 75° em relação à base B (mm)			
Medição 1 =			
Medição 2 =			
Medição 3 =			
Medição 4 =			
Medição 5 =			
Perpendicularidade entre os lados (mm)			
Lados 1 e 2	Lados 2 e 3	Lados 3 e 4	Lados 4 e 1
Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =
Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =
Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =
Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =
Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =
Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B (mm)			
Lado 1		Lado 2	
Medição 1 =		Medição 1 =	
Medição 2 =		Medição 2 =	
Medição 3 =		Medição 3 =	
Medição 4 =		Medição 4 =	
Medição 5 =		Medição 5 =	
Paralelismo do lado oposto à base B (mm)			
Medição 1 =			
Medição 2 =			
Medição 3 =			
Medição 4 =			
Medição 5 =			
Círculo			
Circularidade (mm)			
Medição 1 =			
Medição 2 =			
Medição 3 =			
Medição 4 =			
Medição 5 =			

Concentricidade (mm)			
Medição 1 =			
Medição 2 =			
Medição 3 =			
Medição 4 =			
Medição 5 =			
Faces Inclinadas			
Retitude das faces (mm)			
Face 1		Face 2	
Medição 1 =		Medição 1 =	
Medição 2 =		Medição 2 =	
Medição 3 =		Medição 3 =	
Medição 4 =		Medição 4 =	
Medição 5 =		Medição 5 =	
Angularidade dos ângulos em relação à base B (mm)			
Face 1 e base B		Face 2 e base B	
Medição 1 =		Medição 1 =	
Medição 2 =		Medição 2 =	
Medição 3 =		Medição 3 =	
Medição 4 =		Medição 4 =	
Medição 5 =		Medição 5 =	
Furos Mandrilados			
Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C (mm)			
Furo 1	Furo 2	Furo 3	Furo 4
Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =
Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =
Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =
Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =
Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =
Furo 5	Furo 6	Furo 7	Furo 8
Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =
Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =
Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =
Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =
Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =
Concentricidade do furo interno com o furo externo D (mm)			
Furos 1 e 5	Furos 2 e 6	Furos 3 e 7	Furos 4 e 8
Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =	Medição 1 =
Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =	Medição 2 =
Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =	Medição 3 =
Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =	Medição 4 =
Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =	Medição 5 =
Perpendicularidade das diagonais entre furos (mm)			
Medição 1 =			
Medição 2 =			
Medição 3 =			
Medição 4 =			
Medição 5 =			

ANEXO G - Modelo de relatório emitido pelo software *Machining Centres Analyser - MCA*



Machining Centres Analyser – MCA
Relatório de Medição

Relatório N° 000001

05/08/2019

Dados do Cliente

Nome do Cliente: Empresa A
Tipo de Máquina: Centro de usinagem de 3 eixos
Fabricante da Máquina: ROMI
Modelo: D600
N° de Série: 016-009427-450
Ano de Fabricação: 2009
Responsável pela Fabricação: Rogério Pontes de Araújo

Dados da Máquina de Medição por Coordenadas (MMC)

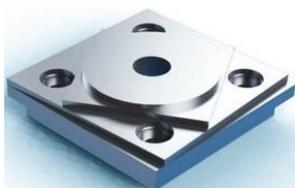
Fabricante da Máquina: Mitutoyo
Modelo: Beyond Crysta C 574
N° de Série: BF000153
Resolução (µm): 0,0002
Certificado de Calibração N°: 03206/13
Erro Sistemático (µm): 0,9

Dados do Termo Higrômetro

Fabricante do Termo Higrômetro: MINIPA
Modelo: MTH-1362
N° de Série: T000500000180
Resolução (°C; %UR): 0,1
Certificado de Calibração N°: RC0259/13

Dados de Medição

Temperatura Média de Medição (°C): 20,4
Umidade Relativa Média (%UR): 58,9
Tipo de Peça Medida: A
Dimensões da Peça Medida: 160 mm x 160 mm
Material da Peça Medida: Ferro Fundido
Quantidade de Peças Medidas: 1
Quantidade de Medições por Peça: 3
Intervalo de Confiança Adotado: 95,45 %



Machining Centres Analyser – MCA *Relatório de Medição*

Relatório N° 000001

05/08/2019

Peça 1 – Tipo A

Furo Central				
Parâmetro	Resultado de Medição	Condição	Quant. de Outliers	Outliers
Cilindricidade	0,00501 ± 0,00013	Conforme	1	0,12345
Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A	Projeção YZ	0,02103 ± 0,00469	Não conforme	0
	Projeção ZX	0,02103 ± 0,00469	Não conforme	0

QUADRADO					
Parâmetro	Resultado de Medição	Condição	Quant. de Outliers	Outliers	
Retitude dos lados	L1	0,00501 ± 0,00013	Conforme	2	0,12345; 0,456546
	L2	0,00501 ± 0,00013	Conforme	1	0,12345
	L3	0,00501 ± 0,00013	Conforme	1	0,12345
	L4	0,00501 ± 0,00013	Conforme	1	0,12345
Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	L1	0,02103 ± 0,00469	Não conforme	1	0,12345
	L2	0,02103 ± 0,00469	Não conforme	1	0,12345
Paralelismo do lado oposto à base B		0,02103 ± 0,00469	Não conforme	1	0,12345

Rogério Pontes de Araújo