



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Doutorado

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
ANÁLISE DA INCERTEZA DE UMA MÁQUINA DE
MEDIÇÃO POR COORDENADAS COM SENSOR A LASER**

por

Pedro Valentim Dantas Júnior

Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal da Paraíba
para obtenção do título de Doutor

PEDRO VALENTIM DANTAS JUNIOR

**DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA
ANÁLISE DA INCERTEZA DE UMA MÁQUINA DE
MEDIÇÃO POR COORDENADAS COM SENSOR A LASER**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Título de Doutor.

Orientador: Professor Dr. João Bosco de Aquino Silva

D192d Dantas Júnior, Pedro Valentim.

Desenvolvimento de uma metodologia para análise da incerteza de uma máquina de medição por coordenadas com sensor a laser / Pedro Valentim Dantas Júnior. – João Pessoa, 2017.

112 f. : il.

Orientador: João Bosco de Aquino Silva.

Tese (Doutorado) – UFPB/CT

1. Engenharia mecânica. 2. MMC. 3. Sensor à laser. 4. Digitalização. 5. Avaliação da incerteza. 6. Fontes de erros. I. Título.

UFPB/BC

CDU –

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA ANÁLISE DA INCERTEZA DE UMA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS COM SENSOR A LASER

por

Pedro Valentim Dantas Júnior

Tese aprovada em 23 de fevereiro de 2017

Período letivo 2017.1



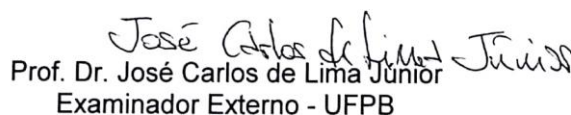
Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva
Orientador - UFPB



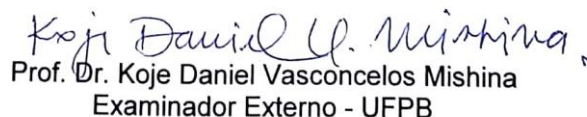
Prof. Dr. Josinaldo Pereira Leite
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior
Examinador Externo - UFPB



Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina
Examinador Externo - UFPB

Aos meus pais, Pedro Valentim Dantas e Norma Freire Valentim, exemplos de esforço, coragem e honra; a minha esposa Edlea Ferreira Gomes de Souza e aos meus filhos Luís Victor Gomes Valentim e Ana Luísa Gomes Valentim.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, todo, por ter permitido chegar aonde cheguei;

Aos meus pais, Pedro Valentim Dantas e Norma Freire Valentim, exemplos de esforço, coragem e honra;

A minha esposa, Edlea, muito obrigado pelo amor, apoio, encorajamento e compreensão;

Aos meus filhos Luís Victor e Ana Luísa, presentes de Deus, que me motivam e me fazem mais forte;

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva, sem cuja supervisão, inspiração e amizade, a conclusão oportuna deste trabalho não teria sido possível;

Ao meu grande amigo e Coorientador, Prof. Dr. José Carlos de Lima Júnior a quem admiro pela sua história de conquistas e superação, pela supervisão e amizade;

Aos membros da banca, Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina, Prof. Dr. Josinaldo Pereira Leite e Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues, pelas críticas, sugestões e atenção;

Aos professores que fazem parte do quadro docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM); pela dedicação, atenção, orientação e respeito;

Aos funcionários que compõem do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), servidora Mônica Rodrigues da Silva e ao servidor Noaldo Sales dos Santos pela atenção e profissionalismo;

Aos professores do Instituto Federal da Paraíba (IFPB): Prof. Dr. Laurivan da Silva Diniz e o Prof. Dr. Rafael Franklin Alves Silva por viabilizarem a utilização do Centro de Usinagem do IFPB para produção das peças para o desenvolvimento da Tese.

Aos alunos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) em especial aos “LEPIANOS”: Fábio de Andrade Barroso, Francisco Augusto Vieira da Silva, Joab Sobreira de Andrade, Julyana Maria de Medeiros Quirino, Luiz Henrique Melo Silva Nóbrega, Marlio Antônio da Silva, Rafael Franklin Alves Silva, Verílton Nunes da Silva e Wagner Correia Peixoto pelo companheirismo.

Ao técnico e amigo Manuel Fidelis Filho pela dedicação, atenção e no assessoramento das atividades de pesquisa.

A Capes pelo aporte financeiro (bolsa).

Finalmente, ao demais que, de forma direta ou indireta, no anonimato ou não, contribuíram para a realização deste sonho.

Agradeço

“Quer avaliar alguma coisa, meça-a; se não conseguir medir, esqueça-a!”

Lord Kelvin (William Thomson)

RESUMO

No processo de digitalização existem limitações inerentes e dificuldades operacionais que influenciam a aquisição de dados. Segundo VÁRADY (1997), as principais são: calibração, precisão, acessibilidade, oclusão, fixação, múltiplas vistas, ruídos, modelo de distribuição estatística e revestimento de superfície. Este trabalho de tese de doutorado apresenta uma metodologia de estudo capaz de contribuir para a análise da incerteza de medição de máquinas de medição por coordenadas que incorporam sensores a laser com a avaliação da influência de parâmetros (geometria, natureza do material e cor da peça) e fatores (número de digitalizações da mesma superfície e a orientação do sensor). Na avaliação da influência da geometria foram utilizados dois padrões de referência: um bloco padrão e uma esfera de referência, já para: natureza do material e cor, quatro peças com idêntica geometria e dimensões nominais foram usinadas: uma é de alumínio, duas de nylon nas cores preta e branca e uma de madeira. No tocante a digitalização foram aplicadas duas sistemáticas (orientações do sensor), variando o número de passes de 1 a 10, ou seja, número de vezes que o feixe de laser passará sobre a peça no processo de digitalização. Os resultados obtidos evidenciam a influência dos parâmetros e fatores aplicados.

Palavras chave – MMC, Sensor à laser, Digitalização, Avaliação da incerteza, Fonte de erros.

ABSTRACT

In the scanning process there are inherent limitations and operational difficulties that influence the acquisition of data. According to VARADY (1997), the main are: calibration, precision, accessibility, occlusion, fixation, multiple frame, sound, statistical distribution model and surface covering. This work of doctorate degree thesis displays a methodology of study able to contribute to the uncertainty analyze of measurement from measurement machines by coordinates that include laser sensors with the evaluation of the influence parameters (geometry, nature of the material and color of the piece) and factors (numbers of scanning from the same surface and the sensor orientation). In the evaluation of the geometry influence it was used two patterns of reference: a pattern block and one sphere of reference, for the nature of material and color, four pieces with identical geometry and nominal dimensions were machined: one is aluminum, two of nylon in black and white colors and another one in wood. In relation to the scanning it was applied two systematics (sensor orientation), varying the number of passes from 1 to 10, that is, the number of times that the laser beam passes by the piece in the scanning process. The obtained results evidence the influence of parameters and applied factors.

Keywords - MMC, Laser sensor, Scanning, Uncertainty assessment, Sources of errors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Ilustração do processo de modelagem da geométrica de uma peça (HOCKEN & PERREIRA, Coordinate Measuring Machines and Systems, 2012).....	23
Figura 2. 2 - Composição de uma MMC Mitutoyo modelo Crysta-Apex S 7106 CNC.	25
Figura 2. 3 - Algumas configurações de MMCS. (a) braço horizontal (b) ponte móvel (c) pórtico (d) tipo em balanço (NÓBREGA L. H., 2011).	26
Figura 2. 4 - Fontes de erros mais relevantes nas medições com MMCS convencional (NÓBREGA L. H., 2011).....	27
Figura 2. 5 - Placas de esferas (GENTA, MINETOLA, & BARBATO, 2016).....	30
Figura 2. 6 – Diagonal do espaço de uma medição de CMM usando o interferômetro pulsado. adaptado (SUDATHAM, H., TAKAHASHI, & TAKAMASU, 2015).....	31
Figura 2. 7 – Ilustração sistema telescópico Ballbar.	32
Figura 2. 8 - Set-up teste para uma máquina ferramenta de 5 eixos. (a) A-eixo teste sem barra de extensão. (b) A-eixo teste com uma barra de extensão. (c) eixo C teste sem barra de extensão. (d) eixo C-teste com uma barra de extensão (JIANG & CRIPPS, A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar, 2015).	33
Figura 2. 9 - Principais técnicas de medições sem e com contato de peças com geometrias complexas (PIRATELLI FILHO, 2007).	34
Figura 2. 10 – Sensor de contato.	35
Figura 2. 11 - Sensor visão de máquina inspecionando placas de circuito impresso.	36
Figura 2. 12 - – Inspeção utilizando sensor laser	36
Figura 2. 13 - Princípio da varredura a laser (a) e a resultante campo de visão de um scanner (b) do laser (GESTEL N. V., CUYPERS, BLEYS, & KRUTH, 2008).....	38
Figura 2. 14 – Esquema de um sistema a laser baseado na triangulação, (FERNANDES, 2005).....	39
Figura 2. 15 - Máquina de medição por coordenadas utilizada é uma Mitutoyo modelo Crysta-Apex S 7106 CNC, do Laboratório de Engenharia de Precisão da UFPB – CT.	45
Figura 2. 16 - Magazine ACR3, equipado com os sensores: Sensor do tipo visão de máquina QVP modelo IDR-70/39W-JA e Sensor a laser – LINE LASER PROBE (Surface Measure 606).....	45
Figura 2. 17 – Aplicação do sensor laser no desenvolvimento e otimização do projeto (Surface Measure 606).....	47
Figura 2. 18 – Aplicação do laser na fase de prototipagem (Surface Measure 606).	47
Figura 2. 19 - Aplicação do laser na fase de produção permite que os dados obtidos possam ser usados para a correção (Surface Measure 606).....	48
Figura 2. 20 – Ilustração da integração das fases (Surface Measure 606).....	48
Figura 2. 21 - Sensores laser, modelos 606, 610 e 1010 (Surface Measure 606).....	49
Figura 2. 22 – Faixa de medição do sensor laser.....	50
Figura 2. 23 – Ilustração da faixa de medição do sensor.....	51
Figura 3. 1 - Diagrama de fluxo da metodologia do trabalho.	53

Figura 3. 2 - Criando Qualificação de sensor (orientação).....	54
Figura 3. 3 - Qualificação de sensor laser (A = 90 e B = 45).....	54
Figura 4. 1 - Primeira peça digitalizada no estudo.	56
Figura 4. 2 – Definição do sistema de coordenadas local.	57
Figura 4. 3 – Caixa de diálogo para definição do novo plano de referência.	58
Figura 4. 4 - Caixa de diálogo para definição dos eixos X e Y.	58
Figura 4. 5 - Caixa de diálogo para definição da origem do novo sistema de coordenadas.	59
Figura 4. 6 - Caixa de diálogo para alinhamento de plano.	59
Figura 4. 7 - Caixa de diálogo para definição da origem.	60
Figura 4. 8 – Salvando sistema de coordenadas.	60
Figura 4. 9 – Digitalizando a primeira peça.	61
Figura 4. 10 - Caixa de diálogo para troca de sensor.	61
Figura 4. 11 – Ativação do sensor laser com abertura automática do Msurf.	62
Figura 4. 12 – Seleção das qualificações.	63
Figura 4. 13 – Escolha da posição de segurança.	63
Figura 4. 14 – Definição da área de digitalização.	64
Figura 4. 15 - Malha gerada pela digitalização da peça de trabalho.	65
Figura 4. 16 - Sólido gerado após a digitalização da peça de trabalho.....	66
Figura 4. 17 – Modelo CAD da primeira peça de estudo construído no NX.	66
Figura 4. 18 – Padrões de referência utilizados no estudo da influência da geometria na digitalização com o sensor laser.	67
Figura 4. 19 - Deslocamento do sensor laser sobre a superfície, (a) em uma direção e (b) em duas direções.....	68
Figura 4. 20 – Digitalização dos padrões de referências utilizados no estudo.	68
Figura 4. 21 – Modelo da superfície simples para comparação do bloco padrão.....	69
Figura 4. 22– Modelo da superfície complexa para comparação da esfera de referência.	70
Figura 4. 23 – Fase do processo para comparação: resultado da digitalização (a), criação do sólido (b), modelo CAD (c) e comparação sólido oriundo da digitalização /modelo CAD (d) (superfície simples).	70
Figura 4. 24 – Exemplo de relatório de comparação superfície simples.	71
Figura 4. 25 – Número de pontos válidos por número de passos da superfície simples.	73
Figura 4. 26 – Influência do número de passos no erro da superfície simples.....	74
Figura 4. 27 - Influência do número de passos na incerteza da superfície simples.....	75
Figura 4. 28 - Fase do processo para comparação: resultado da digitalização (a), criação do sólido (b), modelo CAD (c) e comparação sólido oriundo da digitalização /modelo CAD (d) (superfície complexa).	76
Figura 4. 29 - Exemplo de relatório de comparação superfície complexa.	77
Figura 4. 30 - Número de pontos válidos por número de passos da superfície complexa.	78
Figura 4. 31 - Influência do número de passos no erro médio da superfície complexa.	79
Figura 4. 32 - Influência do número de passos na incerteza da superfície complexa. ...	80

Figura 4. 33 – Comparativo do número de pontos válidos por números de passos da geometria e sistemática aplicada.	81
Figura 4. 34 - Comparativo do erro médio em função do número de passos aplicado as duas superfícies.	82
Figura 4. 35 - Comparativo da influência do número de passos na incerteza em função da geometria e sistemáticas aplicadas.	83
Figura 4. 36 – Peças produzidas para avaliação da influência da cor e natureza do material.	84
Figura 4. 37 - Modelos (a) alumínio, (b) madeira, (b) nylon preto e (b) nylon branco..	85
Figura 4. 38 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de alumínio. .	86
Figura 4. 39 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de alumínio.	87
Figura 4. 40 - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de alumínio	87
Figura 4. 41 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de madeira....	89
Figura 4. 42 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de madeira.	89
Figura 4. 43 - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de madeira.	90
Figura 4. 44 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de nylon branco.	91
Figura 4. 45 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de nylon branco.	92
Figura 4. 46 - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de nylon branco.	92
Figura 4. 47 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de nylon preto.	94
Figura 4. 48 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de nylon preto.	94
Figura 4. 49 - - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de nylon preto.	95
Figura 4. 50 - Comparativo da influência da cor no número de pontos válidos por números de passos.	96
Figura 4. 51 - Comparativo da influência da cor no erro médio por números de passos.	97
Figura 4. 52 - Comparativo da influência da cor na incerteza por números de passos. .	98
Figura 4. 53 - Comparativo da influência do material no número de pontos válidos por números de passos.	99
Figura 4. 54 - Comparativo da influência do material no erro médio por números de passos.	100
Figura 4. 55 - Comparativo da influência do material na incerteza por números de passos	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Especificações dos sensores a laser (Surface Measure 606).	50
Tabela 2. 2 - Características e aplicações do sensor 606.....	50
 Tabela 4. 1 – Resultados do deslocamento do sensor na direção X para superfície simples (Bloco Padrão).....	72
Tabela 4. 2 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para superfície simples (Bloco Padrão).....	72
Tabela 4. 3 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para superfície complexa.....	77
Tabela 4. 4 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para superfície complexa.....	77
Tabela 4. 5 – Número de pontos válidos para área das superfícies equiparadas.....	81
Tabela 4. 6 – Erro médio em função do número de passos aplicado as duas superfícies.	82
Tabela 4. 7 – Incerteza em função do número de passos aplicado as duas superfícies..	83
Tabela 4. 8 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de alumínio.	86
Tabela 4. 9 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de alumínio.....	86
Tabela 4. 10 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de madeira.	88
Tabela 4. 11 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de madeira.	88
Tabela 4. 12 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de nylon branco.	91
Tabela 4. 13 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de nylon branco.....	91
Tabela 4. 14 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de nylon preto.....	93
Tabela 4. 15 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de nylon preto.....	93
Tabela 4. 16 – Dados para avaliação da influência da cor no número dos pontos válidos.	96
Tabela 4. 17 – Dados para avaliação da influência da cor no erro médio.....	97
Tabela 4. 18 - Dados para avaliação da influência da cor na incerteza.....	98
Tabela 4. 19 - Dados para avaliação da influência do material no número dos pontos válidos.....	99
Tabela 4. 20 - Dados para avaliação da influência do material no erro médio.	100
Tabela 4. 21 - Dados para avaliação da influência do material na incerteza.....	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MMC - Máquina de Medição Por Coordenadas

MMCS - Máquinas de Medição Por Coordenadas

IFPB - Instituto Federal da Paraíba

CAD - Computer Aided Design

CNC – Comando Numérico Computadorizado

3D – Tridimensional

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	17
APRESENTAÇÃO	17
1.1 INTRODUÇÃO	17
1.2 OBJETIVO GERAL	19
1.3 OBJETVOS ESPECÍFICOS	19
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO DE TESE	20
CAPÍTULO II	21
FUNDAMENTOS DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS E PRINCIPAIS TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO	21
2.1 FUNDAMENTOS DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	21
2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MMCS	24
2.3 PRINCIPAIS FONTES DE ERROS E TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS MMCS.	26
2.3.1 FONTES DE ERROS	27
2.3.2 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS MMCS	29
2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO	34
2.4.1 Medição com contato	35
2.4.2 Medição sem contato.	36
2.5 LIMITAÇÕES E DIFICULDADES NA DIGITALIZAÇÃO	40
2.6 ESTUDOS QUE CONTEMPLA A AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE SISTEMAS DE MMC'S QUE USAM LASER	42
2.7 A MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS	44
2.7.1 SISTEMA DE CONTROLE MODULAR	46
2.7.2 Scanner a laser	46
CAPÍTULO III METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA PARA O DESENVOLVIMENTO DA TESE	52

3.1 INFRAESTRUTURA.....	52
3.2 METODOLOGIA.....	52
CAPÍTULO IV	56
PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
4.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL DA PEÇA A SER DIGITALIZADA	56
4.2 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA PEÇA A SER DIGITALIZADA (ESCANEADA) COM LASER.....	67
4.2.1 BLOCO PADRÃO.....	70
4.2.2 ESFERA DE REFERÊNCIA	76
4.2.3 COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS PARA AS SUPERFÍCIES	80
4.3 MEDIÇÕES DAS PEÇAS USINADAS.....	84
4.3.1 PEÇA DE ALUMÍNIO	86
4.3.2 PEÇA DE MADEIRA	88
4.3.3 PEÇA DE NYLON BRANCO	91
4.3.4 PEÇA DE NYLON PRETO	93
4.4 INFLUÊNCIA DA COR	96
4.5 INFLUÊNCIA DO MATERIAL.....	99
CAPÍTULO V	102
CONCLUSÃO FINAL E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	102
5.1 CONCLUSÃO FINAL	102
5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	105
ANEXO A.....	109
A.1 PEÇA DE MADEIRA	109
A.2 PEÇA DE NYLON PRETO.....	110
A.3 PEÇA DE NYLON BRANCO	111
A.4 PEÇA DE ALUMÍNIO	112

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

Em um ambiente produtivo globalizado e altamente competitivo, a garantia da conformidade geométrica - atender as especificações definidas no projeto - dos produtos é condição indispensável para assegurar a intercambiabilidade e funcionalidade. Para que as perdas e o retrabalho sejam minimizados, o processo de medição exerce uma grande responsabilidade, pois além de inspecionar a conformidade geométrica das peças, em determinados casos, deve-se corrigir desvios e variações no comportamento do processo de fabricação (OLIVEIRA, 2003).

As máquinas de medição por coordenadas e as máquinas-ferramenta com múltiplos eixos apresentam alta produtividade com grande exatidão. Os métodos utilizados para medição de peças se dividem em dois, com e sem contato (PIRATELLI FILHO, 2007). Nas Máquinas de Medição Por Coordenadas (MMC) o método com contato consiste na interação direta (toque) entre o sensor que irá realizar a medição e a peça. Já na medição sem contato, não existe o toque do sensor de medição com a peça a ser medida.

Da necessidade de medir, que surgiu naturalmente ao longo do caminho evolutivo da humanidade (ALBERTAZZI, 2008), do crescimento da complexidade das superfícies e formas geométricas, das exigências de projetos dos produtos destinados às indústrias; em especial: aeronáutica, automotiva, da produção de energia e de moldes e matrizes; surgiram desafios e exigências na criação e produção equipamentos e manufaturas, destinados à produção e consumo obrigaram a indústria de fabricação a avançar, criando e desenvolvendo instrumentos, ferramentas, mecanismos ou máquinas com alta exatidão.

A Engenharia Reversa é um processo que a partir de um modelo, já existente, se reconstrói modelos virtuais em escala. As técnicas de Engenharia Reversa, na atualidade, apresentam duas vertentes principais de aplicações: a Engenharia Reversa de Projeto e a Engenharia Reversa de Produto. A primeira citada auxilia na criação de novas máquinas e equipamentos a partir da desmontagem e análise, para melhoria das situações já existentes. Enquanto a segunda direciona as ações para o desenvolvimento do produto, que é iniciado na digitalização da forma, geometria, do modelo físico, que pode ser concebido em gesso ou argila por designers, ou até mesmo algum componente com avaria ou desgaste mecânico (GESTEL, 2009). Esse processo já é utilizado há muitos anos dentro da engenharia, principalmente na área militar, nas indústrias automobilísticas, aeroespaciais (JATOBÁ, 2011).

No que diz respeito a Máquinas de medição por coordenadas, na literatura encontram-se diversos trabalhos referentes à: verificação e correções de erros, avaliação de incerteza e repetitividade, e calibração com técnicas, padrões e normas; para as máquinas que utilizam a medição com sensor por contato. Constata-se assim uma lacuna na literatura no que tange as que utilizam a medição sem contato. Fato natural, pois segundo SILVA, et al (2011), o que se tem com maior frequência nas indústrias brasileiras são as MMCS que utilizam medições por contato.

A medição com laser de superfícies tem penetrado por quase todos os campos da atividade humana, da indústria, arquitetura e medicina, nos últimos anos. Além disso, com o desenvolvimento computacional, cada vez mais, está tornando a tecnologia mais acessível. No entanto, apesar deste desenvolvimento, os problemas relativos à precisão e a confiabilidade das medições permanecem os mesmos (VUKASINOVIC, 2012).

TALÓN (2013), afirma que nem todos os pontos coordenados coletados por uma MMC são igualmente importantes, uma maior densidade de pontos coordenados é necessária onde às zonas de curvatura são maiores, em contraste com as zonas onde as curvaturas são menores. Esse inconveniente pode ser resolvido quando se utiliza a medição sem contato, utilizando o cabeçote laser, por exemplo. Estes sistemas são responsáveis por fazer uma varredura na peça a ser inspecionada, coletando uma grande quantidade de pontos de controle.

No processo de medição sem contato, destacam-se dois tipos de equipamentos capazes de capturar informações do mensurando. São os sistemas do tipo visão de máquina (leitura óptica) e os sistemas de leitura a laser (NÓBREGA L. H., 2014). Estes

métodos de medição, comumente chamados por Digitalização Tridimensional, são amplamente utilizados na Engenharia Reversa.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia/estratégia, baseada na avaliação da influência de parâmetros da peça (geometria, natureza do material e cor) e número de digitalizações da mesma superfície e a orientação do sensor, usando como objetos de estudo: duas “peças” de referências (esfera e bloco padrão), quatro peças com mesmas características geométricas, produzidas no Centro de Usinagem Romi série D-600, com três eixos (um rotativo e dois lineares) do Instituto Federal da Paraíba – IFPB, e seus respectivos modelos CAD.

1.2 OBJETIVO GERAL

Este trabalho de tese de doutorado tem como objetivo geral desenvolver uma metodologia/estratégia para determinação e análise da incerteza no uso do sensor a laser em MMC, no sentido de contribuir para a rastreabilidade das medições por escaneamento a laser.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Adquirir domínio e habilidades para a medição com sensor laser em MMC;
- Desenvolver metodologia/estratégia de medição para o escaneamento da peça em função dos fatores:
 - Orientação do deslocamento do sensor;
 - Número de passos para digitalização da mesma superfície.
- Realizar estudos para determinação da influência na incerteza de medição em função dos seguintes parâmetros da peça:
 - Geometria;
 - Natureza do material;
 - Cor.
- Avaliar a incerteza da medição com sensor laser.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO DE TESE

Este trabalho de doutorado, consiste no desenvolvimento de metodologia/estratégia para a determinação e análise da incerteza no uso do sensor a laser em MMC que será apresentado em quatro capítulos.

No Capítulo II são apresentados: conceitos básicos para o desenvolvimento e compreensão da tese, os aspectos construtivos e elementos estruturais de MMC, as principais fontes de erros e técnicas de avaliação de desempenho das MMCS, os métodos de medição, as limitações e dificuldades na digitalização, estudos que contemplam a avaliação da incerteza de sistemas de MMCS que usam Laser.

O Capítulo III exibe a infraestrutura e recursos disponíveis a metodologia a ser desenvolvida para evolução e obtenção dos objetivos listados no capítulo I.

No Capítulo IV são expostos: preparação, aprendizado e adaptação à máquina, alguns de seus comandos, o procedimento para a determinação do sistema de coordenadas local da peça a ser digitalizada, os resultados oriundos das digitalizações e comparações do modelo nominal e do modelo medido com enfoque na avaliação da influência de fatores como: número de digitalizações da mesma superfície e orientação do sensor, e parâmetros como: geometria, cor e material da peça digitalizada no erro e na incerteza de medição. E no último, Capítulo V, as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS E PRINCIPAIS TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

2.1 FUNDAMENTOS DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

O intenso desenvolvimento tecnológico nos processos de transformações e produção de peças e equipamentos, proporcionou o surgimento dos centros de usinagem com comando numérico. Trazendo consigo as exigências relativas à conformidade geométrica dos componentes dos sistemas, das especificações mais elevadas dos projetos, para garantir alto desempenho funcional dos mesmos. E assim fez-se necessário o desenvolvimento de sistemas de medição e controle metrológico mais rígidos e exatos.

Segundo a Norma Britânica (BS 6808 parte 1, 1987) as MMCs são máquinas constituídas por uma série de elementos mecânicos móveis, um sensor/transdutor ou apalpador e uma mesa metrológica sobre a qual são fixadas as peças a serem medidas.

Uma MMC é definida como um dispositivo de medição com os meios para mover um sistema de sondagem e a capacidade de determinar coordenadas espaciais sobre a superfície de peça de trabalho (Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM), 2001).

A tecnologia de medição por coordenadas vem a cada dia aumentando seu campo de atuação nas operações de controle geométrico devido ao seu elevado nível de flexibilidade, universalidade, informatização, automação, bem como os seus baixos níveis de incerteza frente às tolerâncias dimensionais e geométricas de um grande número de peças da indústria (BRITO NETO, 2003).

Os métodos utilizados para medição de peças se dividem na medição com e sem contato (PIRATELLI FILHO, 2007). Nas MMCS o método com contato consiste na

interação direta (toque) entre o sensor que irá realizar a medição e a peça. Já na medição sem contato, não existe o toque do sensor de medição com a peça a ser medida. Estes métodos de medição, comumente chamados por Digitalização Tridimensional.

A base para a medição por coordenadas é o sistema cartesiano, utilizando a representação de cada ponto num sistema ortogonal de coordenadas (x, y, z). A partir desta informação de posição, registrada diretamente do componente, é possível avaliar as características dimensionais do projeto (MARTIN, 2010).

As MMCs são conhecidas como máquinas que dão localização de um sistema de coordenadas cartesianas retilíneas tridimensionais, com principal função de medir a forma real de uma peça de trabalho, compará-la com a forma desejada, e avaliar informações metrológicas, tais como: tamanho, forma, localização e orientação (HOCKEN & PERREIRA, 2012).

O desenvolvimento das MMCs foi favorecido ainda mais pela evolução dos sistemas de medição de deslocamento eletrônicos, que permitem elevar a sua qualidade e viabilizaram a sua integração com sistemas automatizados de fabricação. Tornando-se assim um dos mais poderosos e versáteis instrumentos metrológicos, MMCs são amplamente utilizadas na maioria das plantas de fabricação (HOCKEN & PERREIRA, 2012).

A figura 2.1 ilustra o processo de modelagem da geométrica de uma peça. O princípio da metrologia coordenada pode ser definido como:

- Criação dos conjuntos de dados, medindo-se a peça com uma MMC (figura 2.1.a).
- Cálculos dos elementos geométricos (matemática) substituto relevantes em termos de parâmetros que especificam o tamanho, forma, localização e orientação (figura 2.1.b);
- Avaliação da peça, combinando os elementos de substituição e comparando com o desenho de dimensões e tolerâncias (figura 2.1.c).

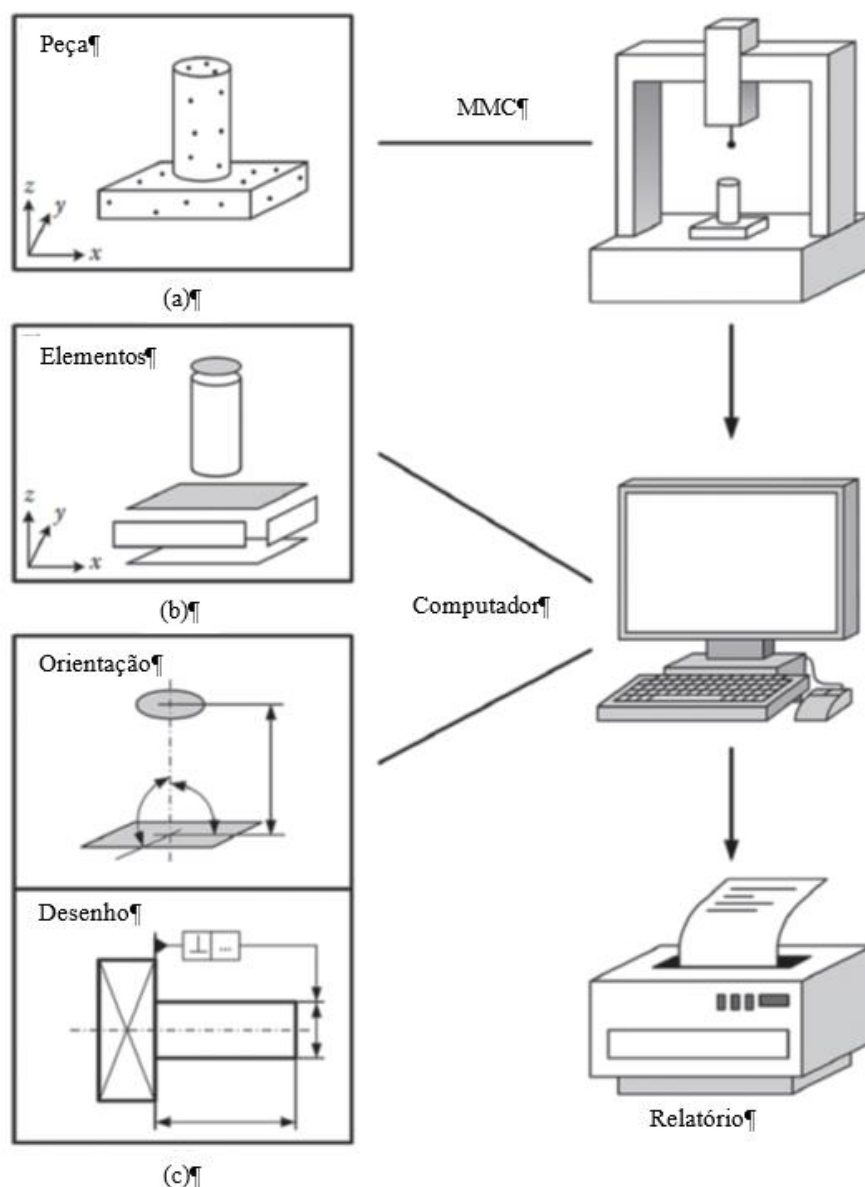


Figura 2. 1 – Ilustração do processo de modelagem da geométrica de uma peça (HOCKEN & PERREIRA, 2012).

A forma real de uma peça de trabalho é obtida através da coleta de dados sobre sua superfície em determinados pontos ou áreas. Esta coleta pode ser realizada através de vários sensores diferentes, de contato e ou sem contato, continuamente ou discretamente, cada ponto da medição é expresso em termos de suas coordenadas medidas. Alguns sensores também são capazes da coleta de vetores na direção dos pontos medidos, o que geralmente permite melhor precisão. No entanto, não é possível avaliar os parâmetros da peça de trabalho (diâmetro, distância, ângulo, forma e outros) diretamente das coordenadas dos pontos medidos, para isso é necessário um modelo analítico da peça de

trabalho para avaliar os parâmetros. Esse modelo geralmente consiste de elementos geométricos ideais, os chamados elementos geométricos substitutos (geometria substituta) (ISO 2004a, 2005b; ASME DE 2009). Tais elementos podem ser determinados através da aplicação de um algoritmo de ajuste apropriado elemento geométrico para o conjunto de dados medido (HOCKEN & PERREIRA, 2012).

2.2 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE MMCS

Enquanto a configuração de uma MMC tem um efeito definitivo sobre o seu desempenho, existem vários outros fatores que contribuem para a capacidade global de uma MMC, incluindo componentes de hardware. Os elementos estruturais, rolamento, suportes, sistemas de movimentação, deslocamento e sistemas de medição, sonda de cabeça, e sistemas de controle constituem os componentes de hardware principal (HOCKEN & PERREIRA, 2012).

As MMCS apresentam os seguintes elementos estruturais - colunas, guias e a mesa metrológica; e a estrutura lógica – funcionam como a espinha dorsal. Suas características afetam diretamente o desempenho geral da máquina medição. As propriedades mais importantes dos elementos estruturais são:

- Estabilidade dimensional;
- Alta rigidez;
- Baixo peso;
- Alta capacidade de amortecimento;
- Baixo coeficiente de expansão térmica;
- Alta condutividade térmica;

A figura 2.2 ilustra a composição da MMC de trabalho, na qual se destacam os seguintes componentes:

- Estrutura mecânica da Máquina de Medição por Coordenadas;
- Cabeçote: elemento em que são acoplados os sensores para medição;
- Mesa rotativa: fornece mais um grau de liberdade ao sistema;
- Unidade de controle: fornece ao usuário informações dos pontos coordenados apalpados e, dependendo da quantidade dos pontos de controle, determina a geometria substituta. Além disso, esta unidade orienta o operador da máquina no

processo de inicialização, qualificação da sonda a ser utilizada, entre outros. É nesta unidade que se encontra instalado o software da máquina.

- Magazine: armazena os sensores disponíveis para medição.
- Joystick: possibilita o deslocamento e aproximação manual dos sensores.
- Mesa metrológica: incorporada a MMC serve como base de referência. Sobre ela são fixadas as peças a serem medidas, em que erros de planeza da sua superfície podem afetar os resultados das medições;

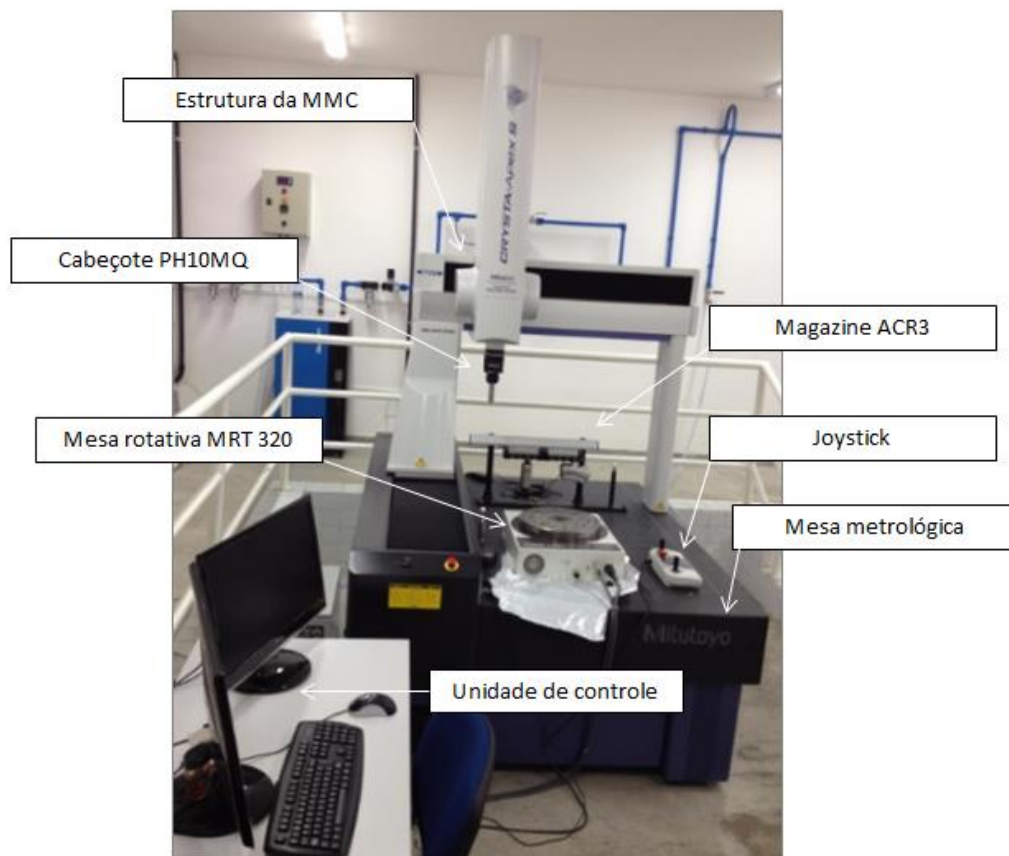


Figura 2. 2 - Composição de uma MMC Mitutoyo modelo Crysta-Apex S 7106 CNC.

Para atender as necessidades dos processos produtivos e proporcionar a manutenção de seus aspectos de desempenho, tais como ciclo de precisão, flexibilidade, tempo ou taxa de transferência e os custos de vida (inicial e operacional) (HOCKEN & PERREIRA, 2012) as MMCS apresentam diversas configurações, com uma variada de opções que combinam tipo, tamanho e características de funcionamento e metrológicas.

A figura 2.3 ilustra alguns dos diferentes modelos de MMCS que são bastante utilizadas na indústria manufatureira. De acordo com a norma Britânica (BS 6808 de 1987, parte 1) tais configurações se apresentam como as mais comuns a serem utilizadas.

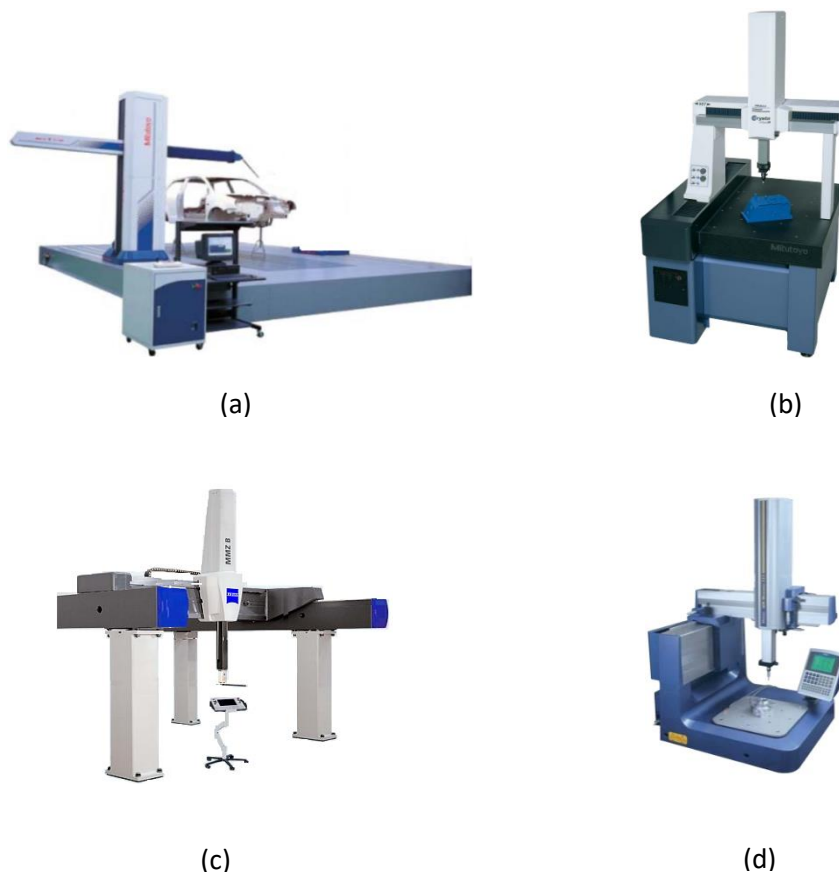


Figura 2. 3 - Algumas configurações de MMCS. (a) braço horizontal (b) ponte móvel (c) pórtico (d) tipo em balanço (NÓBREGA L. H., 2011).

2.3 PRINCIPAIS FONTES DE ERROS E TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS MMCS.

O advento da tecnologia de medição por coordenadas proporcionou ao campo da metrologia dimensional: significativa flexibilidade e versatilidade, principalmente a partir da década de 80 - com a introdução das primeiras máquinas que utilizam sistemas de controle automatizados (CNCs) – porém a complexidade desta tecnologia, em termos construtivos, operacionais e de processamento de dados, acarreta uma vasta gama de fatores que podem ter influência, positiva ou negativa, sobre o resultado de uma medição, exigindo o gerenciamento adequado para que se possa tirar o maior proveito da tecnologia (SANTOS, 2002).

2.3.1 FONTES DE ERROS

Independentemente de qual seja sua configuração, uma MMC é a representação física de um sistema de coordenadas cartesiano. A máquina define a geometria de uma peça através de pontos coordenados (X, Y, Z), dispersos discretamente sobre a sua superfície. Os eixos cartesianos são simulados, geralmente, por um conjunto de guias e mancais aerostáticos e com ajuda de escalas optoeletrônicas. Para obter os pontos sobre a superfície das peças é usado um apalpador de medição. No entanto, para avaliar os parâmetros das peças (diâmetros, distâncias, ângulos etc.) não é suficiente o conhecimento dos pontos coordenados, faz-se necessário a associação da máquina a um programa computacional com algoritmos matemáticos adequados para ajustar os pontos coordenados às geometrias - geometrias substitutas - que modelam a peça medida. Os parâmetros principais das geometrias substitutas ou suas combinações são comparados, às dimensões e tolerâncias do projeto da peça (LIMA Jr, 2007).

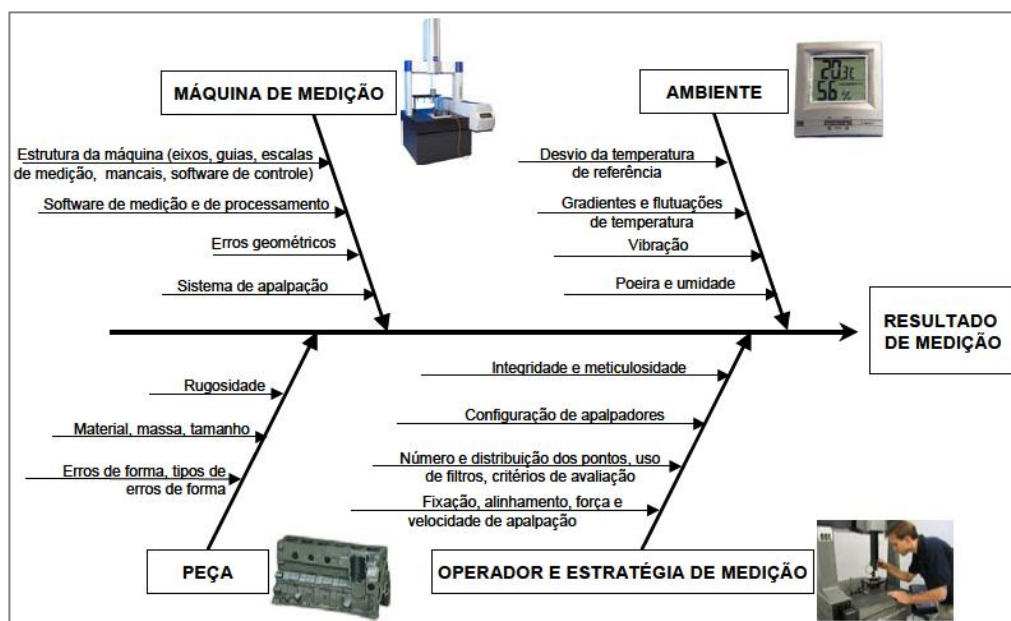


Figura 2. 4 - Fontes de erros mais relevantes nas medições com MMCS convencional (NÓBREGA L. H., 2011).

As MMCS podem apresentar erros de medição, os quais podem ser originados de diversas fontes. Os efeitos das possíveis diferentes fontes de erros em uma MMC se combinam das mais diversas formas e se refletem, diretamente, nos pontos coordenados que definem as geometrias substitutas. É exatamente essa particularidade que torna complexa a análise dos erros e da incerteza de medição de qualquer tipo de máquina de

medir, pois cada ponto coordenado é influenciado de forma diferente. As diversas fontes de erros são subdivididas em quatro grandes grupos: equipamento (características como resolução, *software* de medição, sensores, modo de operação, etc.), ambiente (essencialmente o controle das condições ambientais, particularmente temperatura), peça (a definição da grandeza avaliada, valores calibrados dos padrões de referência, efeitos de medições repetidas sob condições idênticas, material), e operador (erros humanos sobre a medição, leitura e interpretação dos dados, aproximações e hipóteses de contorno, boas práticas) e estratégia de medição (método, amostragem, algoritmos, fatores de correção dos resultados , podem ser observados na figura 2.4 (NÓBREGA L. H., 2014).

Na literatura, os erros de uma máquina de medição por coordenadas são agrupados geralmente nos seguintes grupos:

- Erros em função de imperfeições da geometria da máquina, resultantes da manufatura, da montagem e do desgaste de seus componentes, que introduzem graus de liberdade não desejados, e erros resultantes de forças estáticas, como o próprio peso dos componentes móveis das máquinas, que introduzem deformações elásticas;
- Erros do sistema de apalpação;
- Erros dinâmicos devido a vibrações.
- Erros relacionados com a estratégia de medição: número de pontos e dispersão destes sobre a superfície da peça a ser medida;
- Erros derivados da influência das propriedades da peça a ser medida: erros de forma, rugosidade e peso;
- Erros devidos às deformações induzidas na máquina pelas variações de temperaturas como também pelos gradientes de temperatura;
- Erros no sistema computacional, que definem as geometrias substitutas.

2.3.2 TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DAS MMCS

Para satisfazer as exigências da maioria dos sistemas de qualidade industrial, a MMC deve ser periodicamente avaliada. Esta é uma condição essencial para analisar se a mesma mantém as especificações do fabricante. A avaliação do desempenho da MMC é necessária para obtenção dos resultados corretos da medição. É importante destacar que esta avaliação é bastante complexa, devido ao fato que os dispositivos de medição das MMCS são mais complexos que a maioria dos instrumentos de medição convencional (SILVA & BURDEKIN, 1999).

Agregado ao desenvolvimento das MMCs muito métodos para avaliação do desempenho de MMCs tem sido propostos e aplicados. Estes métodos podem ser classificados em três grupos:

- Técnica de padrão de transferência;
- Técnica de calibração paramétrica ou método de síntese;
- Técnica de padrão de referência cinemática;

2.3.2.1 TÉCNICA DE PADRÃO DE TRANSFERÊNCIA

A técnica de padrão de transferência consiste em utilizar padrões – artefatos – com bom acabamento e parâmetros conhecidos (diâmetros, distâncias, ângulos, etc.) para serem medidos pela máquina a ser avaliada. O erro é definido como sendo a divergência entre o resultado da medida da máquina e o valor verdadeiro das dimensões do elemento padrão.

CLAVERLEY (A review of the existing performance verification infrastructure for micro-CMMs., 2014) discute técnicas de verificação disponíveis para micro-MMCS. Do seu estudo conclui que micro-MMCS ainda não podem ser verificados em conformidade com as normas de especificação existentes. Além disso, discute e relata de forma ampla vantagens e inconvenientes associados a utilização de artefatos, calibrados com geometria conhecidas para ensaios

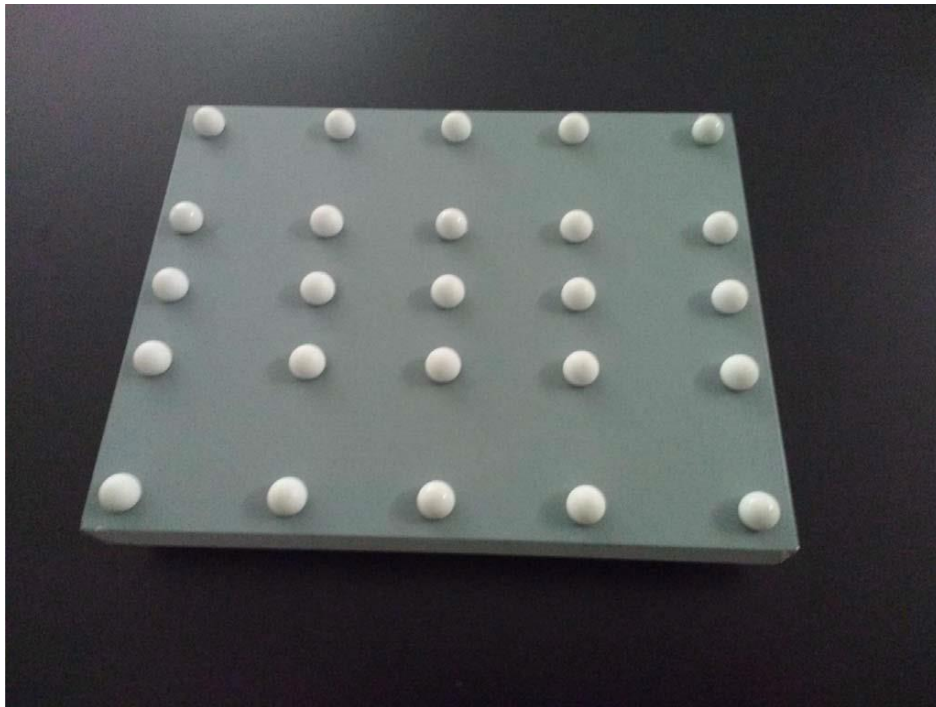


Figura 2. 5 - Placas de esferas (GENTA, 2016).

GENTA (Calibration procedure for a laser triangulation scanner with uncertainty evaluation, 2016) detalha uma metodologia completa para calibrar um scanner 3D e avaliar sua incerteza de medição. O procedimento proposto é baseado na utilização de uma placa de bola de referência (figura 2.5) e aplicado a um scanner a laser triangulação.

2.3.2.2 TÉCNICA DE CALIBRAÇÃO PARAMÉTRICA OU MÉTODO DE SÍNTESE

Nesta técnica usa-se a estrutura da máquina como modelo cinemático. Para modelar geometricamente a estrutura da máquina faz-se uso da teoria da cinemática dos corpos e a teoria da superposição dos efeitos, daí se escrever o modelo matemático da contribuição de cada componente individual de erro na expressão do erro volumétrico.

Utiliza-se a técnica geométrica estrutural verifica-se cada erro - guinada (yaw), rolamento (roll), tomamento (pitch), passo, retilineidade, perpendicularidade e erro de posicionamento - nas direções preferenciais das máquinas, fornecendo equações de sintetização com as expressões das componentes E_x , E_y e E_z do erro volumétrico.

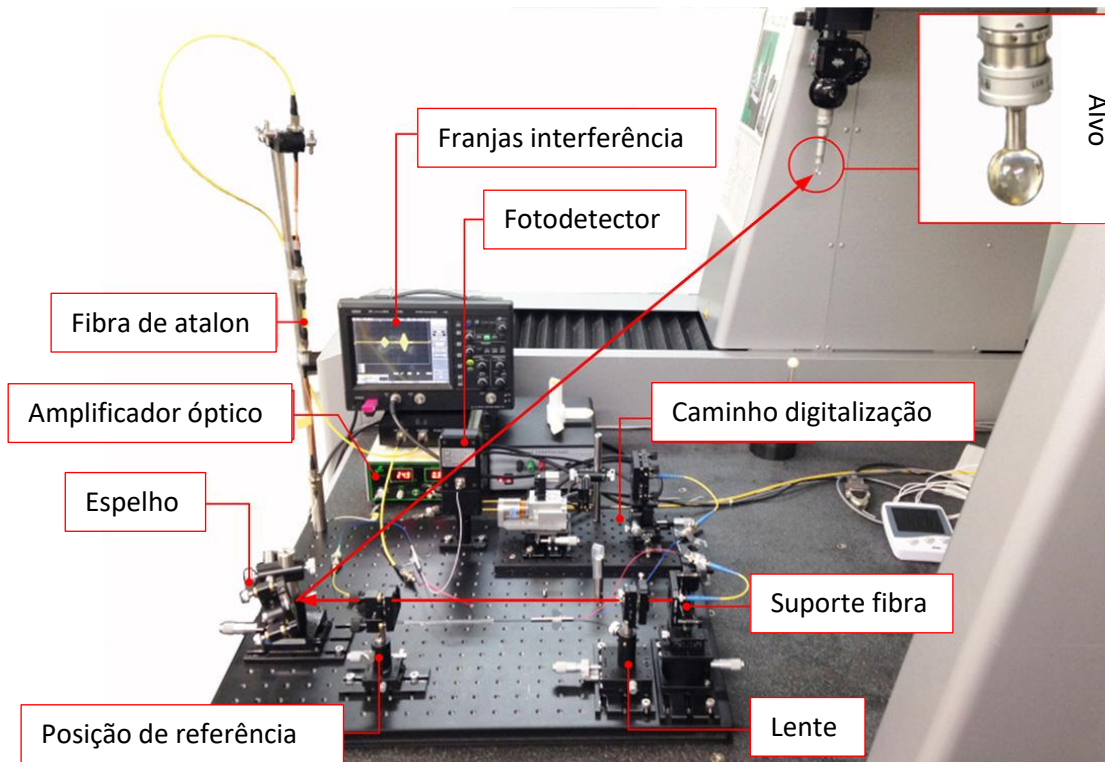


Figura 2. 6 – Diagonal do espaço de uma medição de CMM usando o interferômetro pulsado. Adaptado (SUDATHAM, 2015).

SUDATHAM (Diagonal in space of coordinate measuring machine verification using an optical-comb pulsed interferometer with a ball-lens target, 2015) apresenta um novo método óptico para verificação de máquinas medição por coordenadas. O sistema proposto (figura 2.6) tem como base um interferômetro óptico pulsado com uma lente esférica de índice de refração 2 empregada como destino (alvo). O alvo pode ser usado para medições de comprimento absoluto em todas as direções. As diagonais de uma MMC são mais fáceis de verificar pelo método proposto do que pelo método convencional de ensaio com artefato. A incerteza de medição do método proposto também é menor do que o método convencional, porque o sistema de medição proposto sofre menor influência da temperatura e do ar.

2.3.2.3 TÉCNICA DE PADRÃO DE REFERÊNCIA CINEMÁTICA

Esta técnica é baseada na medição de erros volumétrico utilizando padrões de referência cinemáticos. Os muitos trabalhos realizados neste campo de pesquisa têm utilizado exaustivamente o sistema telescópico *Ballbar* (figura 2.7) devido à facilidade e rentabilidade que o sistema proporciona.

TSUTSUMI (Enhancement of geometric accuracy of five-axis machining centers based on identification and compensation of geometric deviations., 2013) proporcionou o aumento da exatidão cinemática dos centros de usinagem de cinco eixos calculando os desvios geométricos/forma inerentes à máquina de cinco eixos por meio de duas configurações diferentes de um telescópio *Ballbar*.

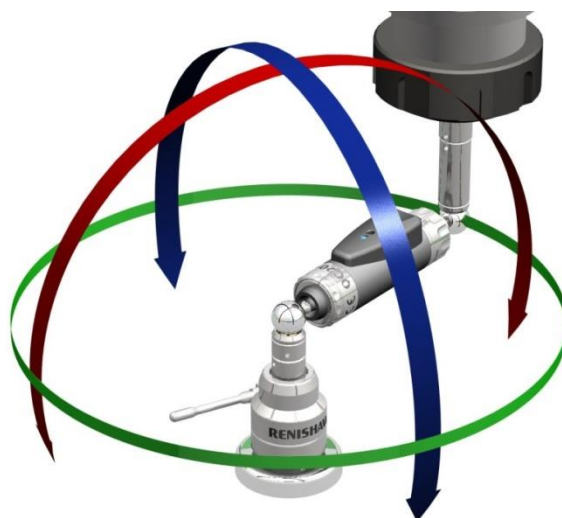


Figura 2. 7 – Ilustração sistema telescópico *Ballbar*.

Em seu artigo *Double Ballbar Measurement for Identifying Kinematic Errors of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tools*, WANG (Double Ballbar Measurement for Identifying Kinematic Errors of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tools, 2013) propõe um novo método que usa dupla medição, usando dois *Ballbar*, para inspecionar os erros cinemáticos dos eixos rotativos de máquinas-ferramentas que incorporam cinco eixos.

JIANG (International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2015) investiga o uso sistema *Ballbar* (figura 2.8) para identificar e caracterizar os erros geométricos independentes da posição dos eixos rotativos de uma ferramenta de máquina de 5 eixos.

O método proposto consiste em quatro testes para dois eixos rotativos; com e sem uma barra de extensão e os testes de eixo. Os resultados dos testes mostram que o novo método é uma boa abordagem para obter os erros geométricos em eixos rotativos, assim pode ser aplicado para uso prático, na montagem de processos, manutenção e verificação regular de vários eixos CNC máquinas-ferramentas.

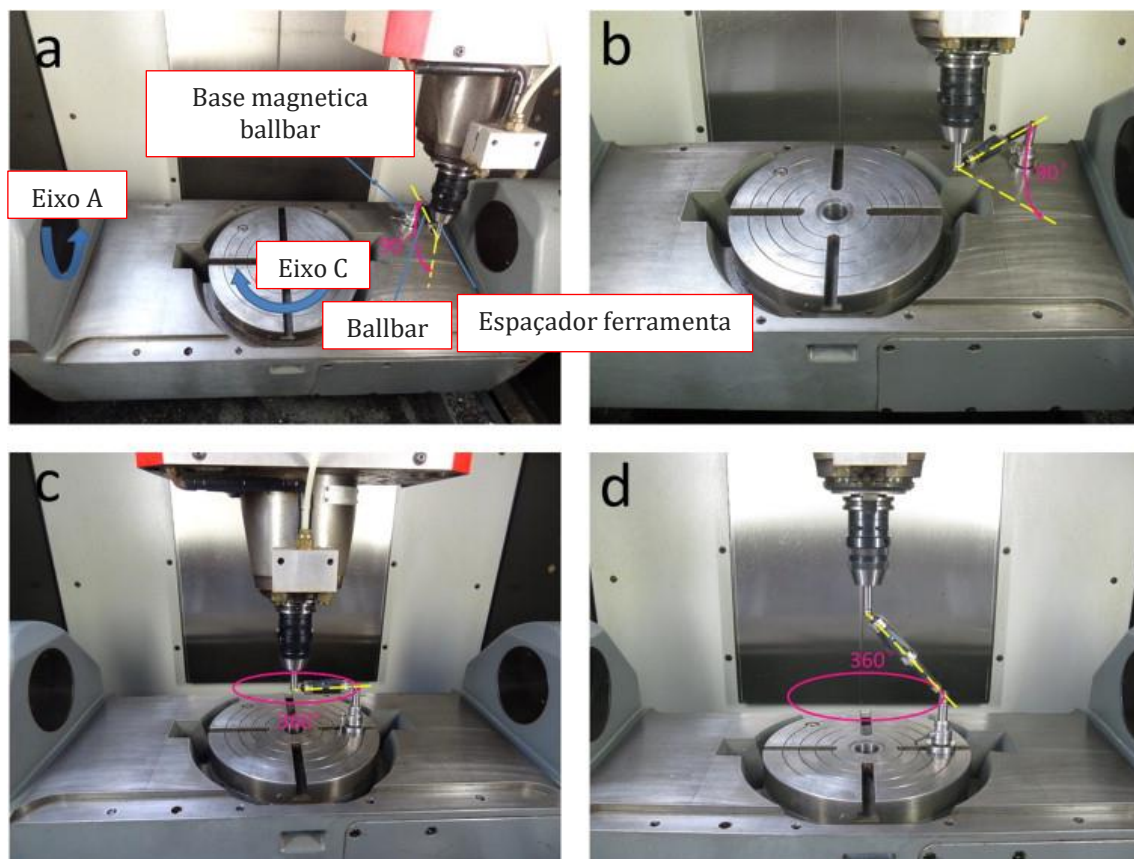


Figura 2. 8 - Set-up teste para uma máquina ferramenta de 5 eixos. (a) A-eixo teste sem barra de extensão. (b) A-eixo teste com uma barra de extensão. (c) eixo C teste sem barra de extensão. (d) eixo C-teste com uma barra de extensão (JIANG & CRIPPS, 2015).

2.4 MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Os métodos utilizados para medição de peças se dividem em com e sem contato (PIRATELLI FILHO, 2007). Nas MMCS o método com contato consiste na interação direta (toque) entre o sensor que irá realizar a medição e a peça. Já na medição sem contato, não existe o toque do sensor de medição com a peça a ser medida.

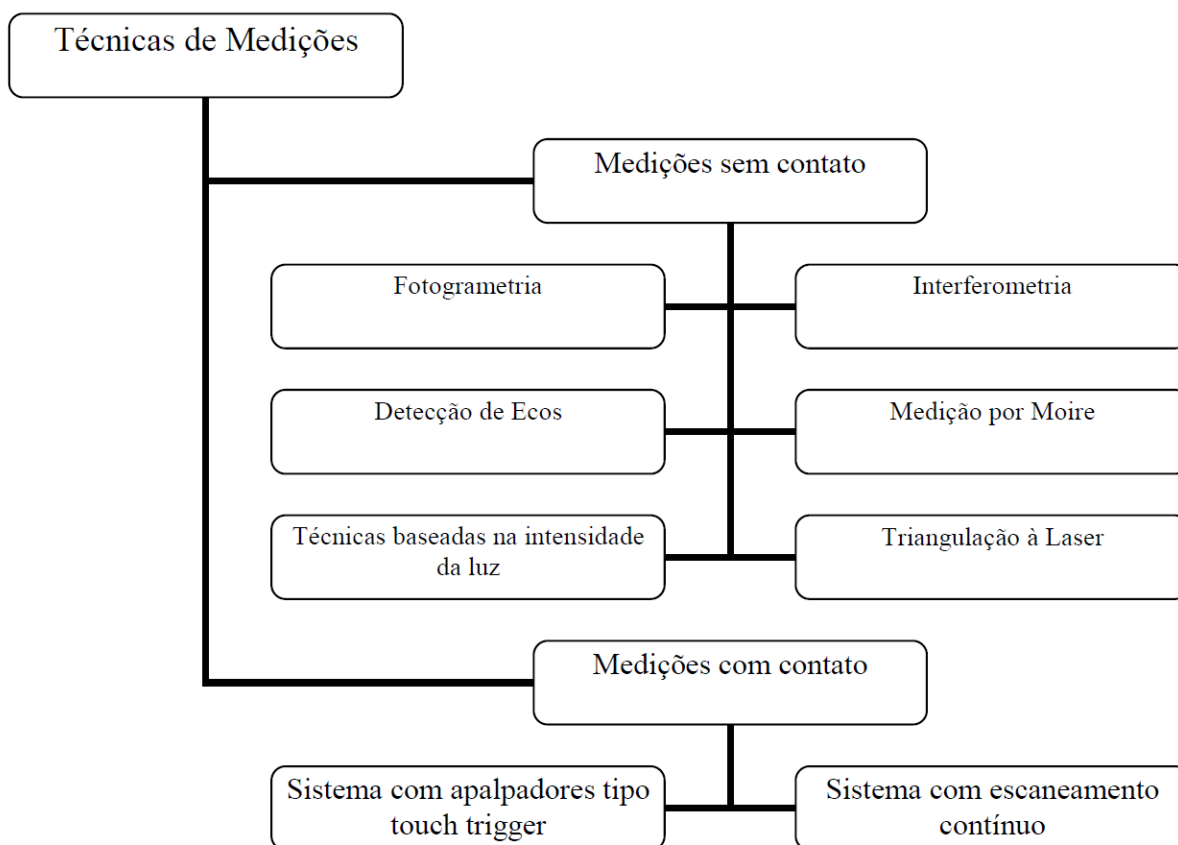


Figura 2. 9 - Principais técnicas de medições sem e com contato de peças com geometrias complexas (PIRATELLI FILHO, 2007).

Nas seções seguintes serão abordados aspectos das medições com e sem contato e dado destaque aos fundamentos da medição a laser triangular.

2.4.1 MEDIÇÃO COM CONTATO.

Para realização das medições por contato, duas técnicas para aquisição dos pontos coordenados podem ser utilizadas, a técnica conhecida como ponto a ponto e a de escaneamento contínuo, nas quais utilizam, respectivamente, os apalpadores *touch trigger* e *scanning probes*, sendo estes também conhecidos como *probes* de digitalização (NÓBREGA L. H., 2014).

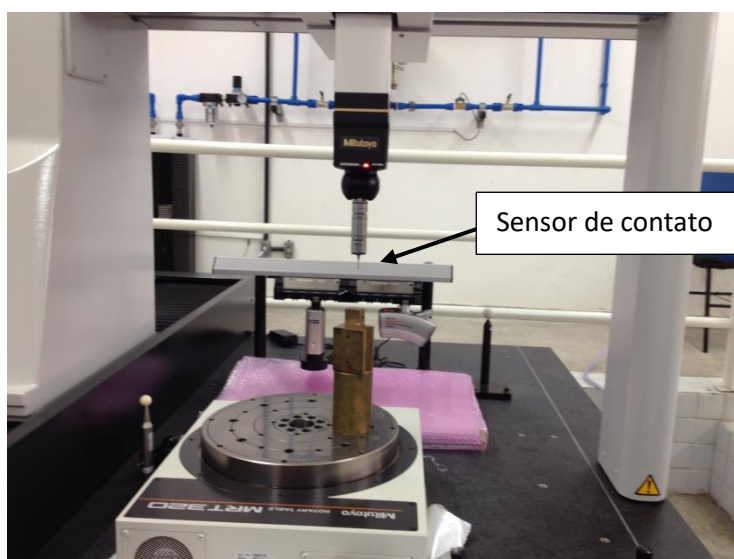


Figura 2. 10 – Sensor de contato.

Os sistemas com apalpadores são do tipo que fazem a coleta dos pontos amostrados ponto a ponto. O apalpador se aproxima da superfície da peça numa direção que pode ser normal à superfície da mesma ou que haja coincidência com um dos eixos coordenados da máquina. As coordenadas do ponto de contato sensor-peça são obtidas por correção do raio do sensor esférico, a partir das coordenadas adquiridas do centro. Nos sistemas por varredura ou escaneamento, o sensor permanece em contato com a superfície da peça e se desloca em uma direção pré-determinada. Durante essa trajetória, as coordenadas do centro do sensor são adquiridas sequencialmente e conseqüentemente, as coordenadas dos pontos de contato sensor-peça são obtidas por correção do raio do sensor na direção espacial apropriada, (LIMA, 2006).

Os sistemas equipados com apalpadores para escaneamento têm a vantagem de coletar um número maior de pontos coletados em um pequeno intervalo de tempo e conseqüentemente conseguir maior definição das formas inspecionadas.

2.4.2 MEDIÇÃO SEM CONTATO.

Além dos sensores de disparo por toque, outras tecnologias de sensores são utilizadas para inspeção de peças, mas sempre baseadas no princípio de converter uma grandeza física em um sinal elétrico que ordena ao controle da MMC a coleta das coordenadas X, Y e Z dos pontos “alvo”.

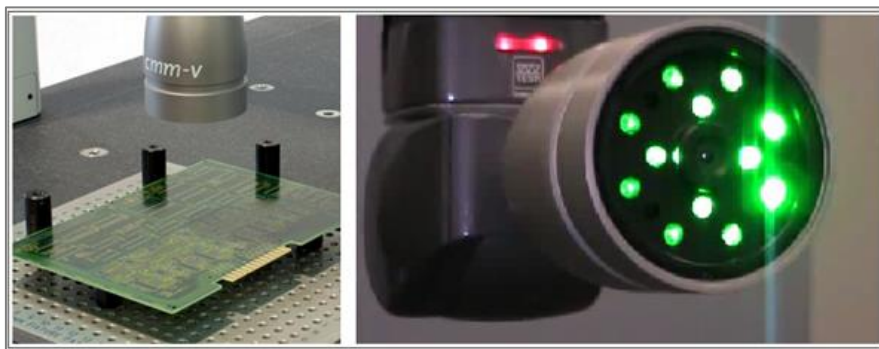


Figura 2. 11 - Sensor visão de máquina inspecionando placas de circuito impresso (NÓBREGA L. H., 2011).

Para realização das medições sem contato, estão disponíveis no mercado os sensores do tipo visão de máquina (figura 2.11) e de leitura a laser (figura 2.12). O objetivo deste sensor é dotar as MMCs de uma capacidade visual semelhante à dos seres humanos (NÓBREGA L. H., 2014).



Figura 2. 12 - – Inspeção utilizando sensor laser (NÓBREGA L. H., 2011).

Nos sistemas de medição a laser, os dados são coletados em dezenas de milhares de pontos por segundo, permitindo que a medição de pequenos furos e ranhuras seja feita com uma única varredura da linha laser sobre a peça, no qual com a utilização dos sensores por contato, várias varreduras seriam necessárias (NÓBREGA L. H., 2014).

2.4.2.1 SENSORES 3D

Durante a década de 1970 e 1980, o desenvolvimento de sensores ópticos 3D aconteceu principalmente em laboratórios de pesquisa, como o objetivo promover novas técnicas para explorar a utilização de feixes de luz, em vez de sondas com contato, visando a sua aplicação na indústria de transformação mecânica, na medição e controle de qualidade. Novos princípios de medição foram propostos, criados, desenvolvidos e caracterizados para testar seu desempenho. As técnicas 3D são baseadas na triangulação óptica, no intervalo de tempo, e na utilização de imagens monoculares. Estas técnicas podem ser divididas em técnicas diretas e indiretas; nas técnicas diretas a medida da distância resulta dos dados obtidos pela configuração da distância entre a superfície o objeto e do feixe incidente do sensor. Nas indiretas, as distâncias são inferidas a partir de imagens monoculares e do conhecimento prévio das propriedades do objeto (SANSONI, 2009).

Em geral os sensores de imagem 3D atuam pela projeção (método ativo) ou pela aquisição (método passivo) da energia eletromagnética transmitida ou refletida a partir de um objeto. O exemplo mais importante de medição a partir de energia transmitida é a tomografia computadorizada industrial, este instrumento de medição usa energia dos raios x e mede a radiação transmitida através do objeto. Os sensores de triangulação laser são baseados no princípio de triangulação ativa, fundamentada na iluminação do objeto por um padrão laser que pode ser uma linha, ou um ponto, ou um plano. A luz projetada da superfície do objeto produz um padrão único que depende da forma e das dimensões do corpo (ZÚÑIGA, 2013).

2.4.2.2 TRIANGULAÇÃO À LASER

Os sensores a laser trabalham com o princípio da triangulação a laser. Esses sensores são usados frequentemente como uma alternativa ao uso de apalpadores para determinar as coordenadas. Em vez de tocar a superfície para determinar as coordenadas, um plano de luz laser é projetado sobre uma superfície, e uma câmera digital está localizada de modo que capte a interseção entre a superfície em contato e a luz laser. As coordenadas dos pontos na superfície medida são determinadas por triangulação (GESTEL, 2008).

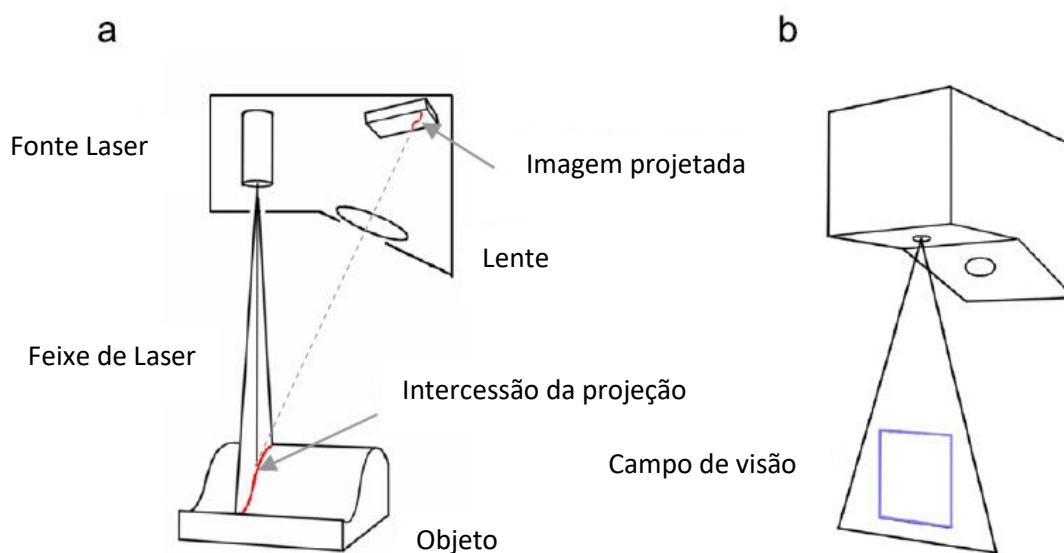


Figura 2. 13 - Princípio da varredura a laser (a) e a resultante campo de visão de um scanner (b) do laser adaptado (GESTEL, 2008).

As principais vantagens da digitalização a laser em comparação com a convencional são: a possibilidade de medir sem contacto e a captura de muitos pontos em um curto período de tempo. Isso os torna especialmente útil para digitalização de superfícies de forma livre.

As desvantagens mais importantes de scanners de laser, neste momento, estão a precisão limitada e a forte influência da qualidade de superfície sobre esta precisão. É muito difícil medir superfícies brilhantes, por exemplo, usinadas de aço ou alumínio,

porque a reflexão difusa é necessária a fim de capturar a linha de laser projetada com a câmera. Os scanners de linha de laser mais recentes estão mais bem equipados para lidar com este problema, mas a precisão para superfícies brilhantes será sempre inferior para difundir sobre uma superfície reflexiva.

Os sistemas de medição baseados na tecnologia sem contato de superfícies complexas e ou de formas livres, com o laser como o elemento responsável pela coleta de dados, normalmente utiliza o método da triangulação para realizar este tipo de medição.

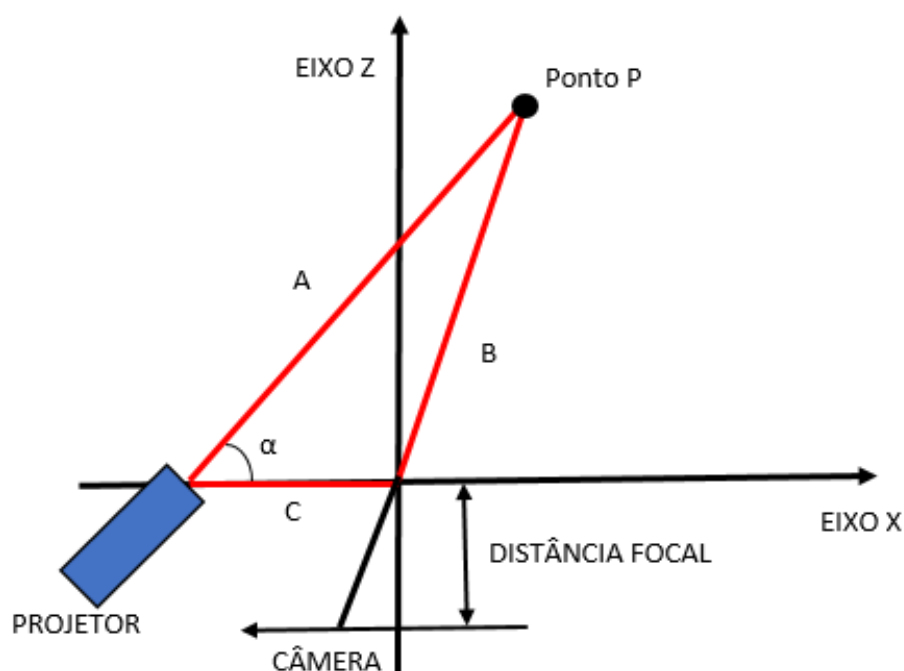


Figura 2. 14 – Esquema de um sistema a laser baseado na triangulação, (FERNANDES, 2005).

Este método possibilita a determinação das distâncias, que com o conhecimento prévio de uma das arestas do triângulo e dois ângulos, é possível determinar o comprimento das outras duas arestas e o outro ângulo. Conhecendo-se a relação espacial entre o projetor e a câmara, bem como os parâmetros internos da câmara, a posição do ponto P no espaço Euclidiano pode ser estimada pela aplicação da Lei dos Senos (FERNANDES, 2005). Os segmentos de reta A, B e C definem um triângulo cujo ângulo α , o comprimento C e a posição em que P é projetado na imagem capturada pela câmara

são conhecidos, ou seja, o princípio da triangulação parte do pressuposto que um determinado ponto pode ser definido pela interseção de duas retas no espaço, ou um plano e uma reta. A figura 2.14 mostra essa análise. Matematicamente, o sistema de triangulação a laser utiliza a Lei dos Senos, conforme a Eq. (2.1) a seguir.

$$\frac{\sin(\angle AB)}{C} = \frac{\sin(\angle BC)}{A} = \frac{\sin(\angle CA)}{B} \quad (2.1)$$

Quando o feixe de laser incidir sobre a superfície determinada, parte da radiação é refletida e parte transmitida, desta forma para um sistema que trabalha com escaneamento a laser, possa ter uma leitura bem sucedida, o feixe incidente deve atingir a superfície e o feixe refletido necessita ser detectado pelo sensor (ELMARAGHY & YANG, 2003).

2.5 LIMITAÇÕES E DIFICULDADES NA DIGITALIZAÇÃO

Nos processos de digitalização existem limitações e dificuldades operacionais inerentes que influenciam a aquisição dos dados. Segundo VÁRADY (1997) os principais são: calibração, precisão, acessibilidade, oclusão, fixação, vistas múltiplas, ruídos (falhas) ou dados incorretos, distribuição estatística do modelo e superfície de acabamento; que serão detalhados a seguir.

A Calibração, é uma parte essencial da configuração e operação do sistema de medição. Erros sistemáticos dos sensores podem ocorrer devido a erros geométricos da MMC, distorções nas lentes, desalinhamento eletrônico nas câmeras e situações similares. Todo sensor deve ser calibrado para determinados parâmetros de precisão com pontos da câmera e orientações, e para modelar e conceder os dados dentro dos limites de erros sistemáticos possíveis. Os digitalizadores ópticos típicos dependem da extensão (largura) da resolução do sistema de vídeo em uso. As distâncias a serem medidas e as partes móveis do equipamento contribuem para o acúmulo de erros.

Uma das limitações operacionais da digitalização é a acessibilidade, que está fortemente relacionada a geometria, topologia do modelo. Usualmente para modelos de maior complexidade, detalhes, é necessárias diferentes vistas, mas pode haver algumas regiões onde é impossível garantir a digitalização em certos métodos. Um típico exemplo

é dentro de furos, onde é impossível acessar sua região interna em função da existência de sombras ou pelo comprimento da *probe*.

Oclusão é o bloqueio da digitalização por sombra ou obstrução. Este é um problema grande que ocorre com digitalizadores ópticos. Contudo, digitalizadores acústicos ou magnéticos também podem apresentar este problema. Mecanismos de digitalização múltiplos não costumam ter este problema.

As geometrias dos dispositivos de fixação também passam a fazer parte do modelo. As eliminações destas áreas já foram mais difíceis, e frequentemente requer digitalizações múltiplas. As digitalizações múltiplas podem introduzir erros no processo porque provocam problemas no registro de dados.

Os ruídos podem ser introduzidos por diversos motivos, vibrações fortes, reflexões, deformações da peça causadas pelo apalpador mecânico, e não são fáceis de serem identificados e removidos. Existem diversos tipos de filtros que podem ser usados nestas situações. Uma importante questão é quando eliminar o ruído, antes, durante ou depois do modelo ser construído. Problema semelhante ocorre na restauração de dados perdidos. Isto é em parte necessário quando ocorrerem problemas de inacessibilidade ou oclusões devido às limitações construtivas dos sistemas ópticos e ou geometria do modelo. As informações próximas ao contorno geralmente são regiões que o sensor apresenta menor densidade de detalhes, além disso, existem situações onde apenas partes da superfície que podem ser mensuradas, existindo outras regiões que foram perdidas ou obstruídas por outros elementos. Todavia estas regiões podem ser necessárias para a reconstrução da superfície global. Outras estratégias de se restaurar os dados perdidos podem ser utilizadas como por extensão de superfícies, intersecção e preenchimento de furos.

Qualquer parte que é digitalizada representa apenas uma amostragem da população. Quando os métodos de Engenharia Reversa são utilizados para reproduzir uma forma, a tolerância da distribuição da parte digitalizada deve ser considerada. Isto dá razão para que várias partes sejam digitalizadas e um resultado médio seja escolhido. Contudo, isto se torna impraticável, pois muitas vezes só existe uma única peça.

O tipo de superfície do modelo também é uma questão importante. Rugosidade e determinadas pinturas podem afetar dramaticamente o processo de captura. Métodos ópticos ou por toque irão produzir mais ruídos (falhas) em uma superfície grosseira do que em uma lisa. A reflexão do material também pode afetar nos métodos ópticos. Quando se digitaliza uma face humana, falhas são introduzidas quando a luz reflete nos

olhos. O cabelo é um exemplo de superfície grosseira e apresenta dificuldades para a digitalização.

2.6 ESTUDOS QUE CONTEMPLA A AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE SISTEMAS DE MMC'S QUE USAM LASER

Desde as primeiras medições nas MMC com sensores por contato, tem se buscado o aprimoramento, métodos para avaliar o desempenho do sistema e corrigir erros. Entretanto para as MMC que utilizam sensores sem contato pouco se produziu, fato natural, pois segundo SILVA, et al (2011), o que se tem com maior frequência nas indústrias brasileiras são as MMCs que utilizam medições por contato.

Hoje em dia, são vários os tipos de sistemas de leitura a laser com aplicação na área de inspeção e engenharia reversa. Assim se fazem necessárias a avaliação e o melhoramento destes sistemas.

GESTEL (2009) propõe um método de teste simples que usa um artefato plano para identificar a influência do ângulo do sensor, a varredura de profundidade, e os aleatórios e sistemáticos do scanner a laser.

RAMU (2010) desenvolve uma máquina virtual de medição que incorpora um modelo paramétrico para estimar os erros paramétricos nas estratégias de correção em máquinas de medição por coordenadas com cinco eixos e multi sensor. A máquina virtual é usada para imitar a medições em tempo real a fim de chegar às estimativas de incerteza de medições específicas.

VUKASINOVIC (2011) examina a incerteza de medição em termos do ângulo incidente, da cor do objeto e da distância de medição para um processo de varredura a laser em MMCS. Descreve um novo método para a estimativa da incerteza de medição que considera simultaneamente todos os três parâmetros.

BEŠIĆ (2011) buscou em seu trabalho melhorar a precisão da varredura do sensor laser em MMCS para aplicações metrológicas, esta melhoria é alcançada pela filtragem dos erros aleatórios do scanner combinado com medições por contato, *touch trigger*. A nuvem de pontos filtrados é usada para estimar o desvio da forma do elemento inspecionado enquanto os poucos pontos obtidos por contato foram usados para efetivamente compensar erros na posição da nuvem de pontos.

POLO e FELICÍSIMO (2012) fizeram a análise de incerteza e repetitividade de um scanner 3D de baixo custo modelo. As medições de um objeto foram com o scanner e foram comparados com medições realizadas com um paquímetro digital (resolução correspondente a 0,01 mm), tomados como valores verdadeiros. Os autores realizaram as medições de duas seções do objeto, escolhidas com antecedência, depois calcularam as regressões lineares correspondentes para medir a incerteza. Como resultado para um intervalo de confiança de 95%, foram obtidos para o modo wide o valor 0,84 mm e para o modo macro o valor 1,82 mm. Estes resultados experimentais são significativamente mais elevados comparativamente que os valores relatados pelo fabricante.

FERREIRA (2013) descreve um método de controle (calibrações e/ou verificações) para MMC usando artefatos calibrados em uma MMC de referência com baixa incerteza. Com o propósito de desenvolver um método prático e intuitivo, para avaliar o desempenho e a conformidade do MMC na indústria, para os operadores de tais máquinas podem executar análise rápida e conclusiva quando vai enfrentar dúvidas sobre os resultados de um processo de medição.

ZÚÑIGA (2013) propôs um método para verificar o desempenho de um scanner laser 3D, usando padrão tridimensional projetado e fabricado em alumínio, com características geométricas específicas. Os valores destas mesmas características foram medidos no scanner laser e comparados com os valores convencionais, sendo que o desempenho do instrumento foi avaliado pela repetitividade e pela amplitude dos erros encontrados.

MURALIKRISHNAN (2015) discutiu um modelo de erro geométrico para os scanners a laser de grande volume. Descreve o modelo, aborda o seu efeito nos intervalos e ângulos medidos, e discute a sensibilidade dos testes de cada termo do modelo. Avalia a validade do modelo proposto e assim estabelece bases para: melhorar a precisão dos scanners a laser, facilitar a identificação dos procedimentos de ensaio para avaliação de desempenho destes instrumentos e, portanto, no desenvolvimento de padrões de documentário.

GENTA (2016) detalha uma metodologia completa para calibrar um scanner 3D e avaliar sua incerteza de medição. O procedimento proposto é baseado na utilização de uma placa de esferas de referência e aplicado a um scanner a laser triangulação.

2.7 A MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

A máquina de medição por coordenadas utilizada nesta tese de doutorado foi uma Mitutoyo modelo Crysta-Apex S 7106 CNC, do Laboratório de Engenharia de Precisão da UFPB – CT, a qual é equipada com os seguintes acessórios:

- Cabeçote PH10MQ - Renishaw;
- Magazine ACR3 - Renishaw;
- Sensor apalpador SP25M – Renishaw com esferas de rubi de $\phi = 2$ e 3 mm;
- Sensor do tipo visão de máquina QVP modelo IDR-70/39W-JA - Mitutoyo;
- Sensor a laser – LINE LASER PROBE (Surface Measure 606) - Mitutoyo;
- Mesa rotativa MRT 320 - Mitutoyo;
- Joystick – Mitutoyo;
- Mesa metrológica – Mitutoyo.



Figura 2. 15 - Máquina de medição por coordenadas utilizada é uma Mitutoyo modelo Crysta-Apex S 7106 CNC, do Laboratório de Engenharia de Precisão da UFPB – CT.

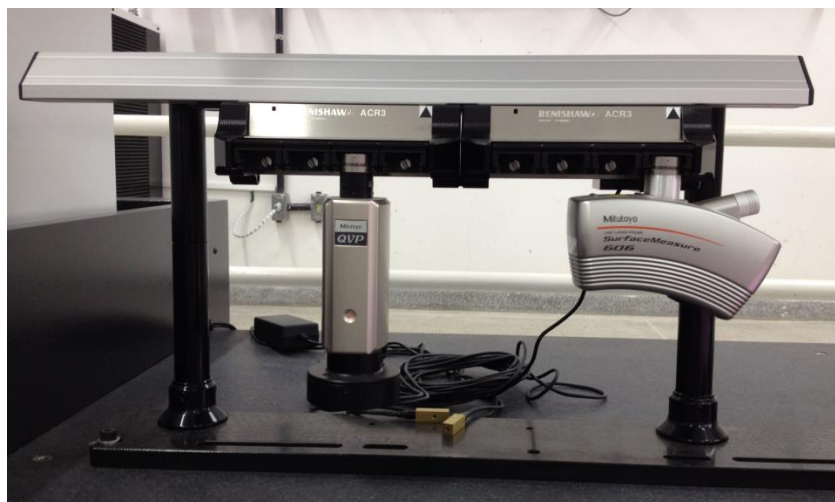


Figura 2. 16 - Magazine ACR3, equipado com os sensores: Sensor do tipo visão de máquina QVP modelo IDR-70/39W-JA e Sensor a laser – LINE LASER PROBE (Surface Measure 606).

2.7.1 SISTEMA DE CONTROLE MODULAR

Desenvolvido pela Mitutoyo para uso em equipamentos de medição, o MCOSMOs - Controlled Open Systems for Modular Operation Support, foi projetado para oferecer alta capacidade de resultados com extrema facilidade de operação e velocidade de respostas, atendendo personalizadamente cada nível de operador e de aplicações através de sua completa lista de módulos e ferramentas: Geopak (módulo de análise geométrico), Scanpak (confere ao sistema a capacidade de realizar digitalizações, análises de perfis e comparações 2D com perfis nominais e engenharia reversa).

2.7.2 Scanner a laser

Na atualidade, varios são os tipos de laser com aplicações diversas. Com uma sonda laser convencional, há necessidade de se ajustar a sensibilidade e a intensidade do laser que devem acordar com o ambiente e o material da peça de trabalho. Ao contrário, a série de Surface Measure a qual é incorporada a MMC usada neste trabalho de tese (606), que ajusta automaticamente esses fatores, permite a varredura com o laser de forma mais simples e mais confortável.

As figuras 2.17, 2.18 e 2.19 mostram possíveis aplicações do sensor laser 606. Sua versatilidade se evidencia na possibilidade de utilização:

- Na fase de desenvolvimento, na otimização do projeto, utilizando dados de nuvens de pontos de medição significativamente melhora a eficiência do processo de desenvolvimento, mesmo quando nenhum modelo mestre ou dados CAD estão disponíveis para um produto.

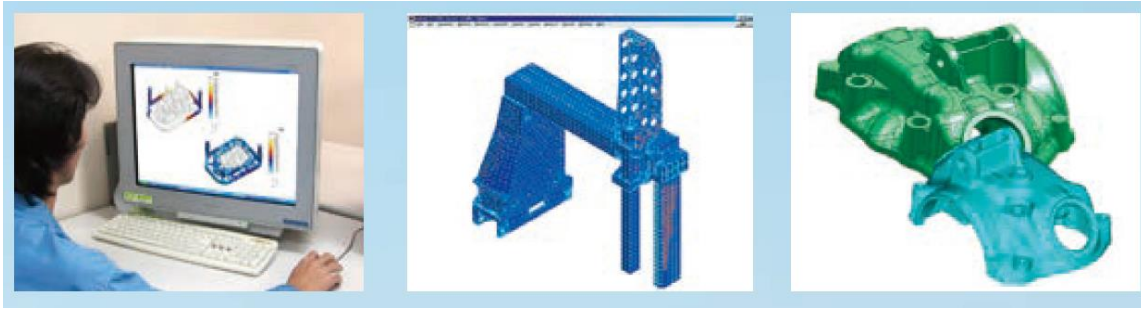


Figura 2. 17 – Aplicação do sensor laser no desenvolvimento e otimização do projeto (Surface Mearure 606).

- Na fase de prototipagem, encurtando o processo inteiro de produção em massa porque simulações podem ser usadas para comparar protótipos com dados CAD, verificar se há interferência de peças e conjunto de folgas e otimizar configurações de usinagem.

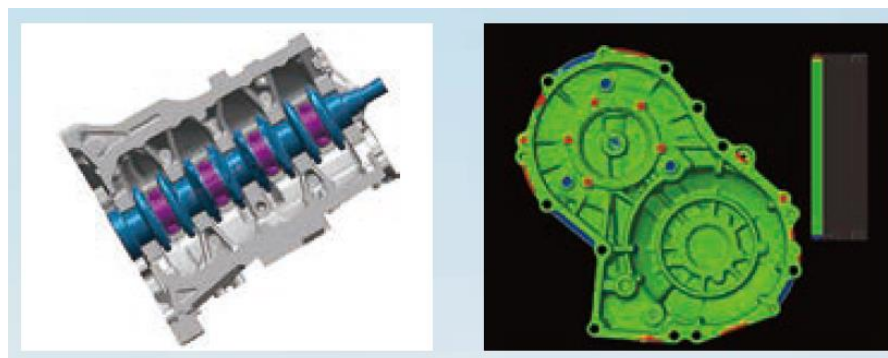


Figura 2. 18 – Aplicação do laser na fase de prototipagem (Surface Mearure 606).

- Na fase de produção, permitindo que os dados obtidos possam ser usados para a correção, por exemplo, controlando a variabilidade nos produtos produzidos em massa, e fornecendo dados de análise de alimentação à etapa anterior do processo.

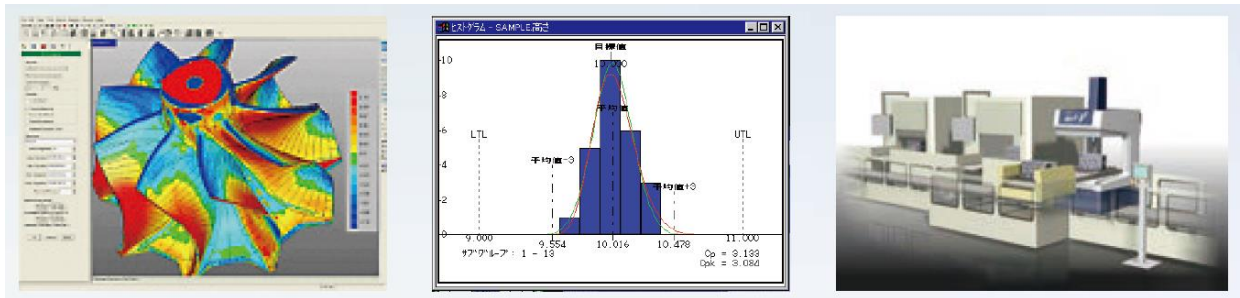


Figura 2. 19 - Aplicação do laser na fase de produção permite que os dados obtidos possam ser usados para a correção (Surface Measure 606).

2.7.2.1 Especificações do sensor (Surface Measure)

O Surface Measure é um sensor laser leve, de alto desempenho, desenvolvida para uso com máquinas de medição por coordenadas CNC. Utiliza sinais digitais que eliminou os efeitos da deterioração do sinal na exatidão da medida e também melhorou a velocidade de medição. Além disso, ajustando automaticamente a intensidade do laser e a sensibilidade da câmera de acordo com o ambiente e o material da peça, reduzindo assim a incerteza do ambiente-varredura a laser.

A grande quantidade de dados de medição de ponto (nuvem de pontos), fornecidos por varredura a laser facilita a criação de modelos de CAD das peças. Sondas de Surface Measure podem ser usadas não somente para medição das dimensões, mas também para a modelagem de dados de nuvem de ponto usando software comercial, análise estrutural/fluidos e transferência de dados para uma máquina de moldagem como uma ferramenta para engenharia digital.

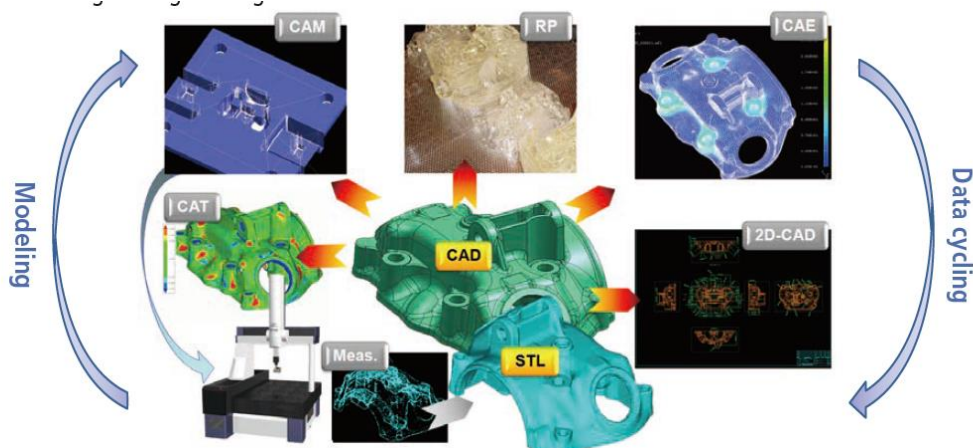


Figura 2. 20 – Ilustração da integração das fases (Surface Measure 606).

Características da MMC sem contato em três palavras-chave:

- Confiabilidade:
 - Com base em uma MMC que suporta operações de garantia de qualidade.
 - Permite a verificação dos dados de medição sem contato com um sensor de contacto
- Medição híbrida:
 - Visualiza uma forma que foi anteriormente invisível através do estabelecimento de um plano de corte de pontos medidos.
 - Permite o intercâmbio entre as medições com e sem contato, de acordo com a necessidade da precisão ou da forma da peça a ser trabalhada.
- Medição totalmente automática



Figura 2. 21 - Sensores laser, modelos 606, 610 e 1010 (Surface Measuring 606).

Tabela 2. 1 - Especificações dos sensores a laser (Surface Measure 606).

Item/Modelo	606
Método de irradiação do laser	Line Laser
Max. largura de varredura	2.36" (60mm)
Max. profundidade de digitalização	2.36" (60mm)
Distância de trabalho	4.84" (123mm)
Erro de digitalização *	12µm
Max. Taxa de aquisição	75,000 points/sec
Massa	.95 lbs (430g)

Tabela 2. 2 - Características e aplicações do sensor 606.

Modelo sensor laser	Características	Aplicações
606	O modelo de maior precisão na série SurfaceMeasure.	Peças do trem de força, peças elétricas domésticas, bem como pequenas peças.

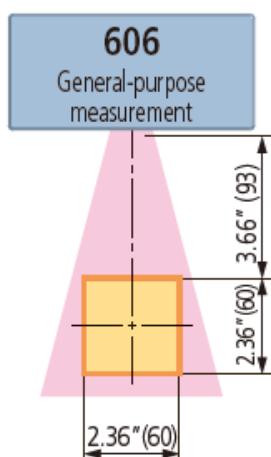


Figura 2. 22 – Faixa de medição do sensor laser.

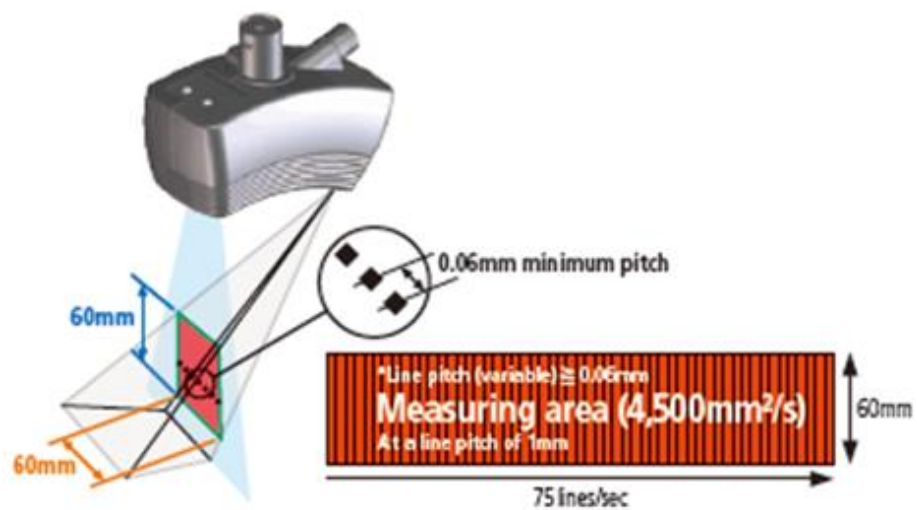


Figura 2. 23 – Ilustração da faixa de medição do sensor.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA E INFRAESTRUTURA PARA O DESENVOLVIMENTO DA TESE

3.1 INFRAESTRUTURA

O projeto foi desenvolvido no Laboratório de Engenharia de Precisão da Universidade Federal da Paraíba usando sua infraestrutura de instrumento de precisão tais como:

- Máquina de medição por coordenadas Mitutoyo modelo Crysta-Apex S 7106 CNC descrita na seção 2.7.
- Sensor a laser – (Surface Mearure 606) - Mitutoyo;
- Softwares: MCOSMO, MSurf e NX 7.0.
- Centro de Usinagem Romi série D-600 do Instituto Federal da Paraíba – IFPB.

3.2 METODOLOGIA

Como o foco do trabalho de tese é a avaliação da qualidade de medição do sensor laser utilizado na Máquina de Medição por Coordenadas nesta seção será apresentada a dinâmica a ser desenvolvida (figura 3.1) para evolução e obtenção dos objetivos listados no capítulo I.

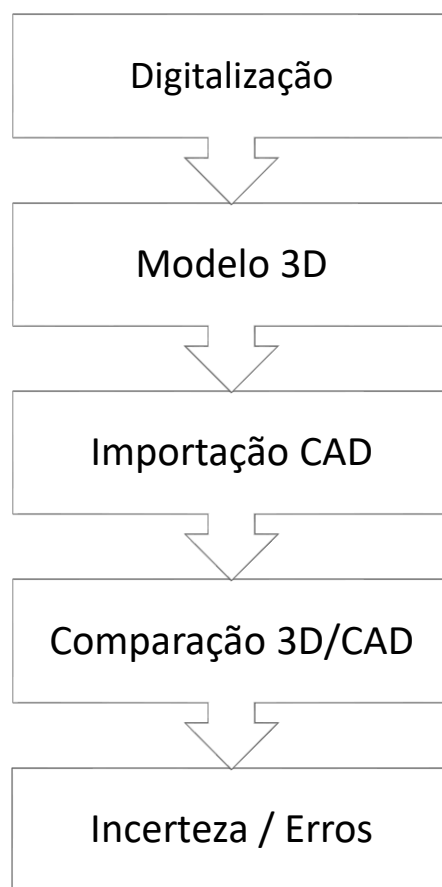


Figura 3. 1 - Diagrama de fluxo da metodologia do trabalho.

Antes da execução dos procedimentos de medição efetiva, independente da máquina de medição por coordenadas a ser utilizada, torna-se necessário à execução dos protocolos de inicialização da MMC, como por exemplo: execução do processo de qualificação do (s) sensor (es) (figuras 3.2 e 3,3), alinhamento/posicionamento da peça e determinação da origem (seção 4.2).

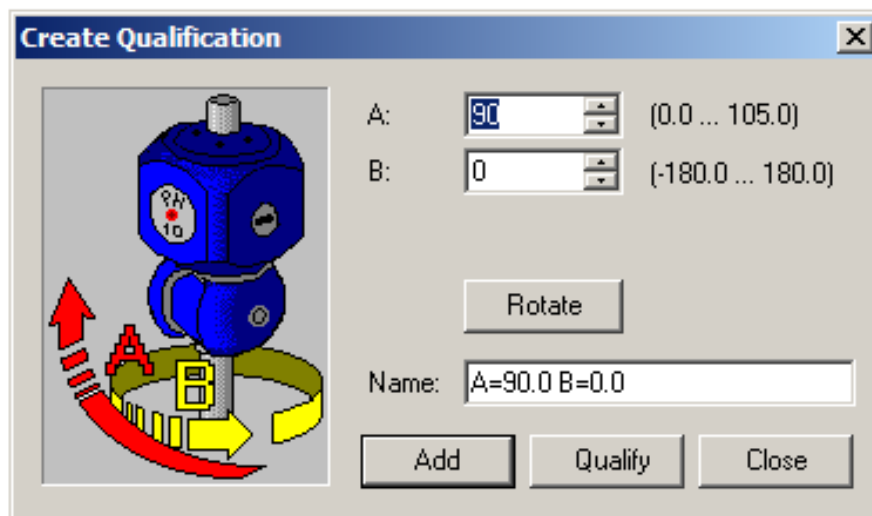


Figura 3. 2 - Criando Qualificação de sensor (orientação).

Os campos A e B, da figura 3.2, permitem a especificação dos ângulos da orientação. Os ângulos são como mostrados na imagem na caixa de diálogo.



Figura 3. 3 - Qualificação de sensor laser (A = 90 e B = 45).

Seguindo necessariamente a ordem de acionamento da MMC automática e execução do software computacional MCOSMOS dar-se início os procedimentos. O MCOSMOS integra todos os sistemas computacionais em um único sistema, no qual o programa genérico é o principal e os demais são os módulos dentro deste, em que todos utilizam os mesmos sistemas de coordenadas e banco de dados (LIMA JR, 2007).

Por padrão, a MMC Crysta-Apex S 7106 CNC estabelece a origem do sistema de coordenadas na extremidade superior esquerda da máquina, porém é possível reposiciona-los e defini-los na peça (seção 4.1).

O sensor a ser usado foi guiado para medir uma esfera de referência fixada sobre a mesa de trabalho do MMC; em seguida, os dados obtidos foram aplicados para calcular a matriz de rotação e translação para Unificação do sistema de coordenadas, qualificação do sensor. Esta operação tem de ser feito para cada sensor antes de executar qualquer tarefa de medição. Em suma, a qualificação dos sensores consiste em estabelecer, definir a sua orientação em função de padrões de referência, definindo os ângulos de orientação como mostrado nas figuras 3.2 e 3.3.

Com a digitalização gradual da peça, tem se a formação das nuvens por superfície e consequentemente a formação do sólido. Para atingir os objetivos desta tese de doutorado, serão efetuadas digitalizações de duas formas de referências: um bloco padrão de 50,0000 mm e uma esfera de referência de raio 14,9946 mm que serão consideradas uma superfície simples e complexa respectivamente, e nelas são aplicadas duas sistemáticas de digitalização que são descritas na seção 4.2.

A avaliação da incerteza da medição com sensor laser dar-se-á pela utilização de sólidos de referência, um bloco padrão e uma esfera de referências utilizadas para calibração dos sensores, a serem digitalizados e posteriormente comparados ao seu projeto (representação gráfica em CAD). Adicionalmente serão digitalizadas quatro peças semelhantes de materiais diferentes que serão comparadas com seus respectivos modelos CAD.

CAPÍTULO IV

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS LOCAL DA PEÇA A SER DIGITALIZADA

Nesta seção apresenta-se o início da preparação, aprendizado e adaptação à máquina, alguns de seus comandos, e o procedimento para a determinação do sistema de coordenadas local da peça a ser digitalizada. Por padrão, a MMC Crysta-Apex S 7106 CNC estabelece a origem do sistema de coordenadas na extremidade superior esquerda da máquina, entretanto a origem do sistema de coordenadas foi redefinida na peça. Este permite que a origem do sistema de coordenadas da peça a ser digitalizada seja o mesmo do modelo nominal da referida peça obtida com um sistema CAD. A figura 4.1 apresenta a peça digitalizada que deu início aos estudos deste trabalho de pesquisa.



Figura 4. 1 - Primeira peça digitalizada no estudo.

Os sistemas computacionais utilizados neste processo de digitalização são o GEOPAK e o MSURF os mesmos são incorporados a MMC Crysta-Apex S 7106 CNC. Para a realização da digitalização de uma peça são utilizados os seguintes passos:

- I. Definir um sistema de coordenadas local na peça usando o sensor de contato;
 - II. Digitalização com sensor laser;
 - III. Tratamento das nuvens de pontos.
1. Definir um sistema de coordenadas local na peça usando o sensor de contato;

A figura 4.2 apresenta a medição realizada com o sensor de contato para a determinação do sistema de coordenadas local da peça.

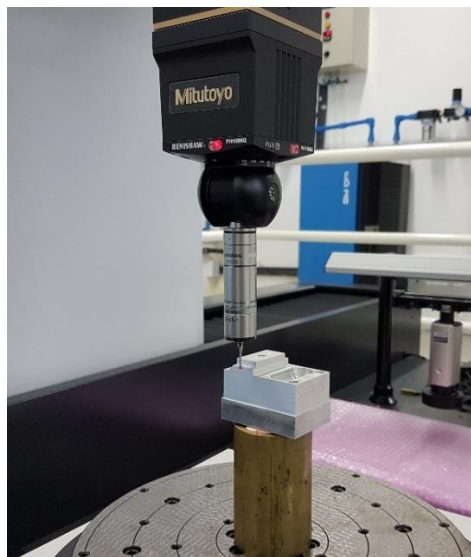


Figura 4. 2 – Definição do sistema de coordenadas local.

Para a correta determinação do sistema de coordenadas local foram necessários realizar os seguintes procedimentos utilizando o sistema computacional GEOPAK.

- I. **Definir plano de referência XY** - Para definição do plano de referência faz se uso do comando ELEMENT PLANE, promovendo a captura de quatro pontos na superfície mais elevada da peça;

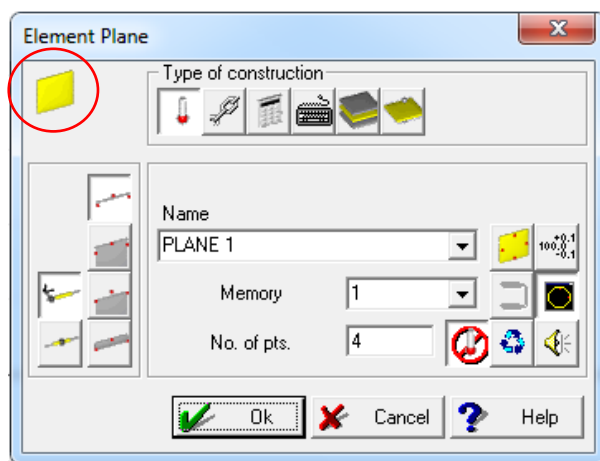


Figura 4. 3 – Caixa de diálogo para definição do novo plano de referência.

- II. **Definir eixos X e Y** - Para definição dos eixos X e Y faz se uso do comando ELEMENT LINE, promovendo a captura de dois pontos para cada eixo (LINHA 1 e LINHA 2) nas bordas laterais da peça nas direções X e Y do novo plano de referência.

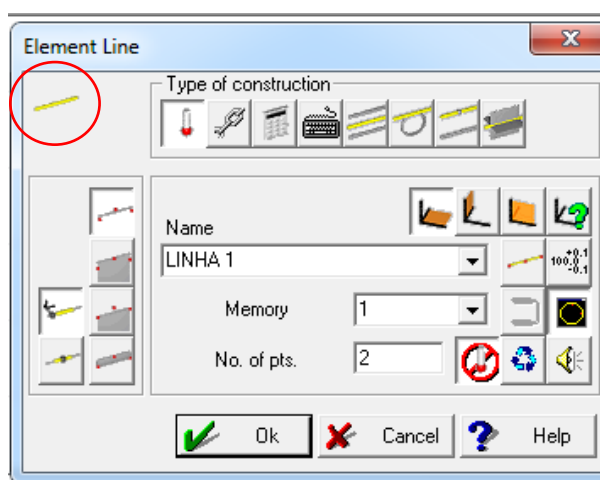


Figura 4. 4 - Caixa de diálogo para definição dos eixos X e Y.

- III. **Criar ponto para origem do sistema de coordenadas** - Para criação do ponto para origem (PONTO 1) do novo sistema de coordenadas faz se uso do comando ELEMENT POINT, promovendo a intercessão das: LINHA 1 e LINHA 2.

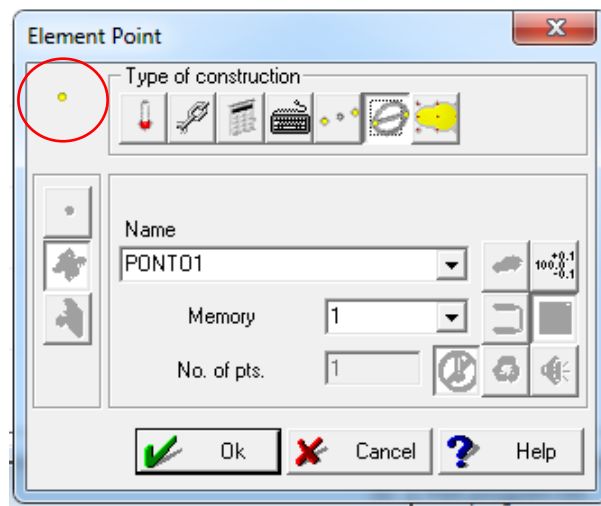


Figura 4. 5 - Caixa de diálogo para definição da origem do novo sistema de coordenadas.

- IV. **Alinhar plano** – Nesta fase é necessário promover o alinhamento dos eixos (LINHA 1 e LINHA 2) ao novo plano de referência, faz se uso do comando ALIGN BASE PLANE.

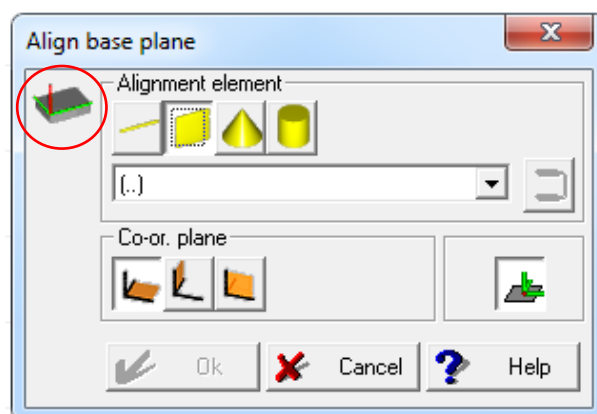


Figura 4. 6 - Caixa de diálogo para alinhamento de plano.

- V. **Criar origem a partir do ponto** – Para criação da origem do novo sistema, faz se uso do comando CREATE ORIGIN, promovendo o alinhamento do plano XY criado ao ponto de PONTO 1.

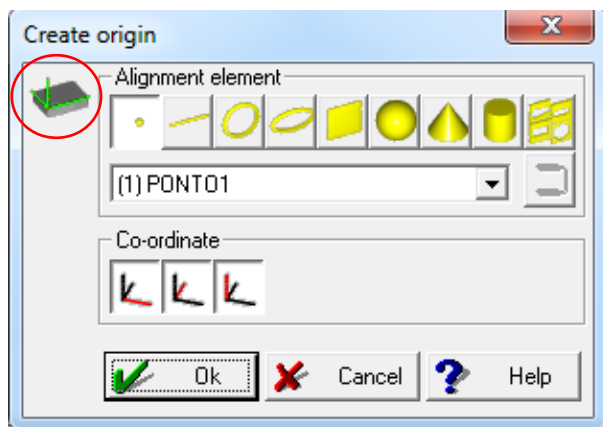


Figura 4. 7 - Caixa de diálogo para definição da origem.

- VI. **Salvar sistema de coordenadas** – Ao finalizar a criação do novo sistema de coordenadas é necessário salva-lo, utilizando a sequência de comandos CO-OR.SYS. e STORE CO-SYSTEM localizados na aba de comandos do GEOPAK que abre caixa de diálogo para nomear o sistema.

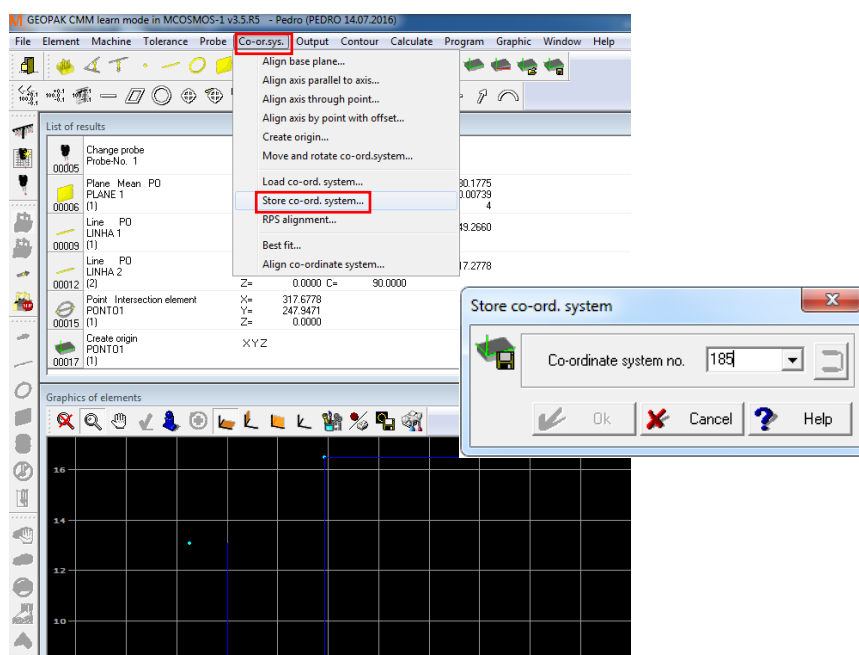


Figura 4. 8 – Salvando sistema de coordenadas.



Figura 4. 9 – Digitalizando a primeira peça.

2. Digitalização com sensor laser

Após as operações para determinação dos planos de referências e a origem do sistema de coordenadas dar se início a operações de digitalização laser com a troca do sensor (figura 4.10) e posteriormente, ainda no GEOPAK, na aba MACHINE opção SCAN WITH EXTERNAL APPLICATION (figura 4.11).

I. Trocar sensor.

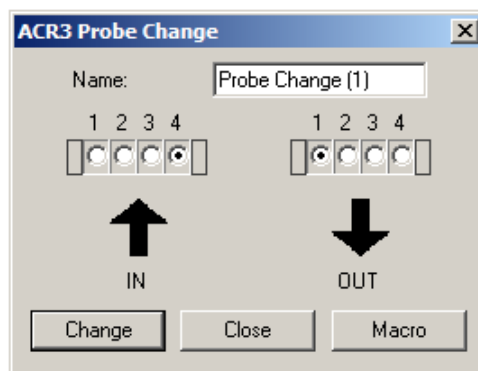


Figura 4. 10 - Caixa de diálogo para troca de sensor.

II. Medição com aplicação externa.

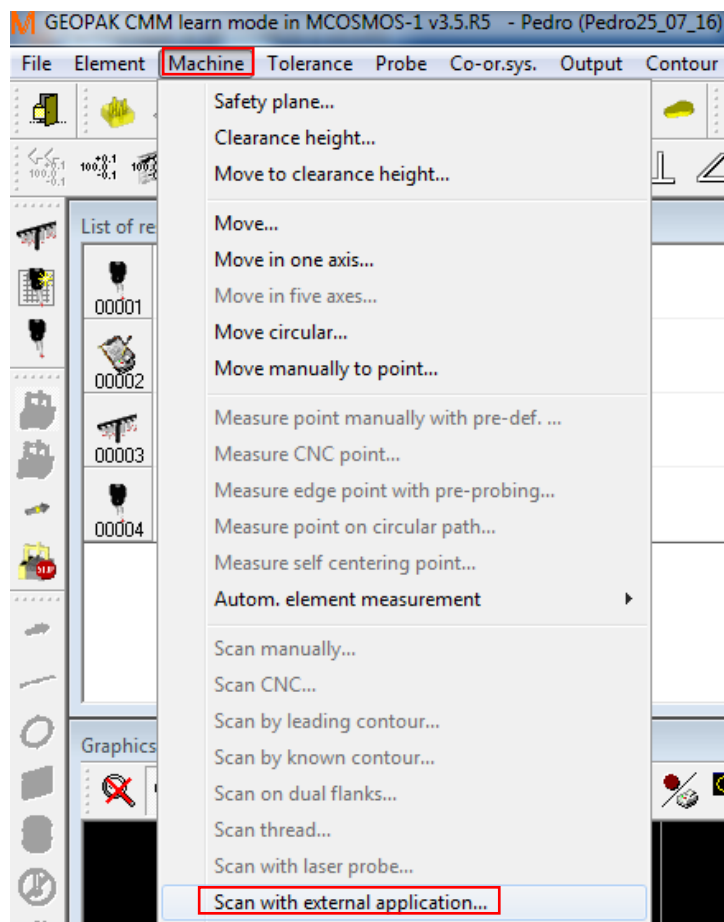


Figura 4. 11 – Ativação do sensor laser com abertura automática do Msurf.

Com a ativação do sensor laser e a abertura automática do MSURF (*software* responsável pela digitalização a laser) deve se carregar as qualificações pré-definidas (figura 4.12) na aba QUALIFICATION MANAGER, sub aba QUALIFICATION botão LOAD, para operação e determinar os limites do deslocamento do sensor aba SAFETY POSICION, na sub aba SAFETY POSICION determinar a posição de segurança (figura 4.13) e na aba e sub aba SCAN definir área de digitalização (figura 4.14) por fim botão SCAN.

III. Carregar qualificações.

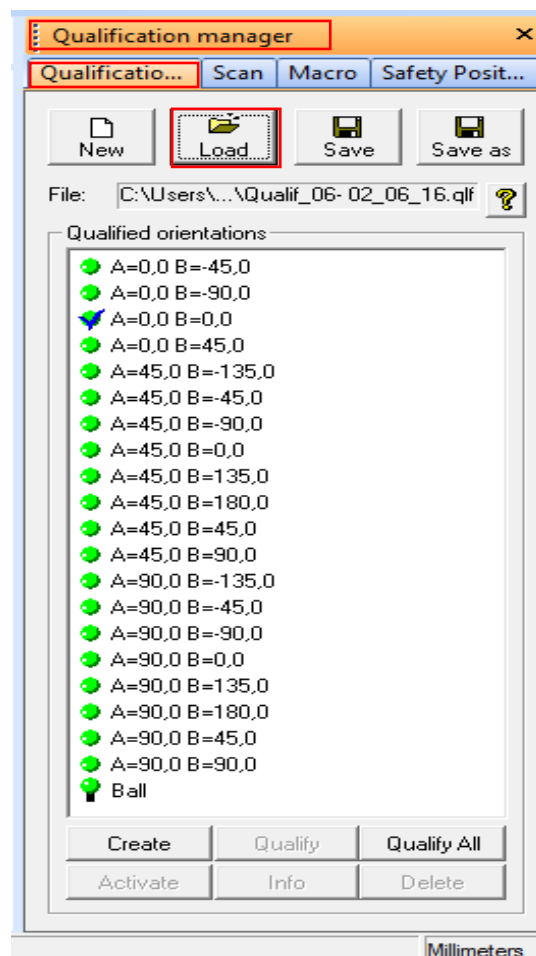


Figura 4. 12 – Seleção das qualificações.

IV. Determinação dos limites de deslocamento do sensor.

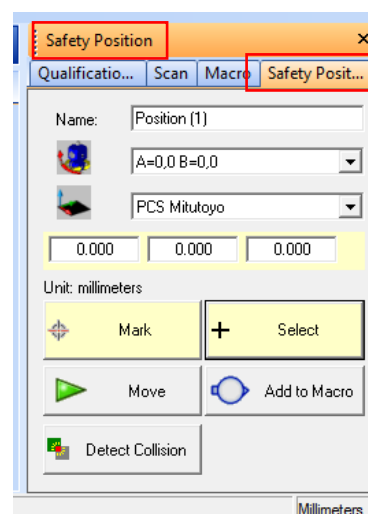


Figura 4. 13 – Escolha da posição de segurança.

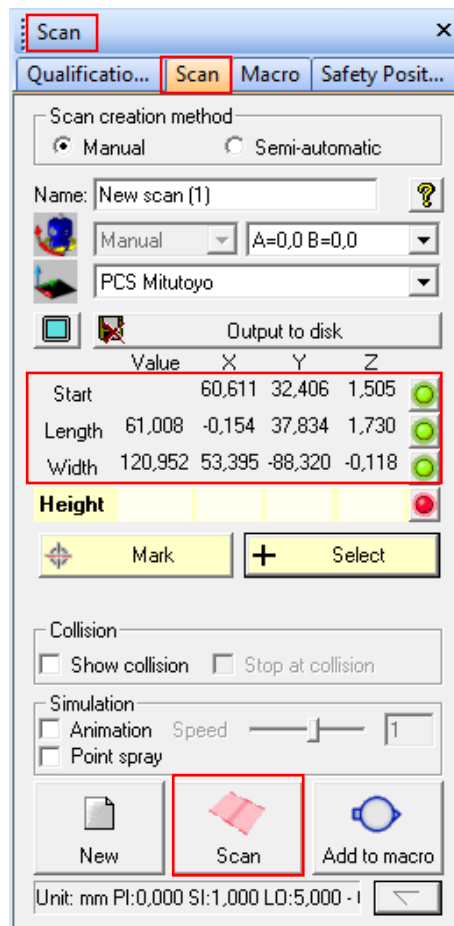


Figura 4. 14 – Definição da área de digitalização.

Com a obtenção das nuvens de pontos se inicia o tratamento dos mesmos para obtenção da “materialização” do sólido, usando ferramentas disponíveis no MSURF.

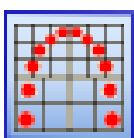
3. Tratamento das nuvens de pontos.

I. Função MERGE.



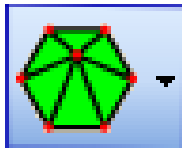
A ferramenta de mesclagem de uma ou mais nuvens de pontos do objeto central, representa o objeto físico como um conjunto de pontos no espaço ou malhas.

II. Função FILTER.



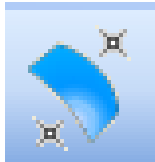
A ferramenta filtro elimina pontos que estão fora de uma determinada faixa especificada pelo sistema MSURF, usando filtros de dispersão, grade ou curvatura.

III. Função MESH POINT.



O comando que cria um objeto da malha de nuvens.

IV. Função OPTIMIZE.



É uma ferramenta de otimização melhora a qualidade do objeto criado, por suavizar a forma da nuvem de pontos ou malhas dos dados de medição.

4. Sair do MSURF (FILE - EXIT).
5. Trocar sensor.

O resultado das operações de digitalização de uma peça e tratamento das nuvens são apresentados nas figuras 4.15 e 4.16.

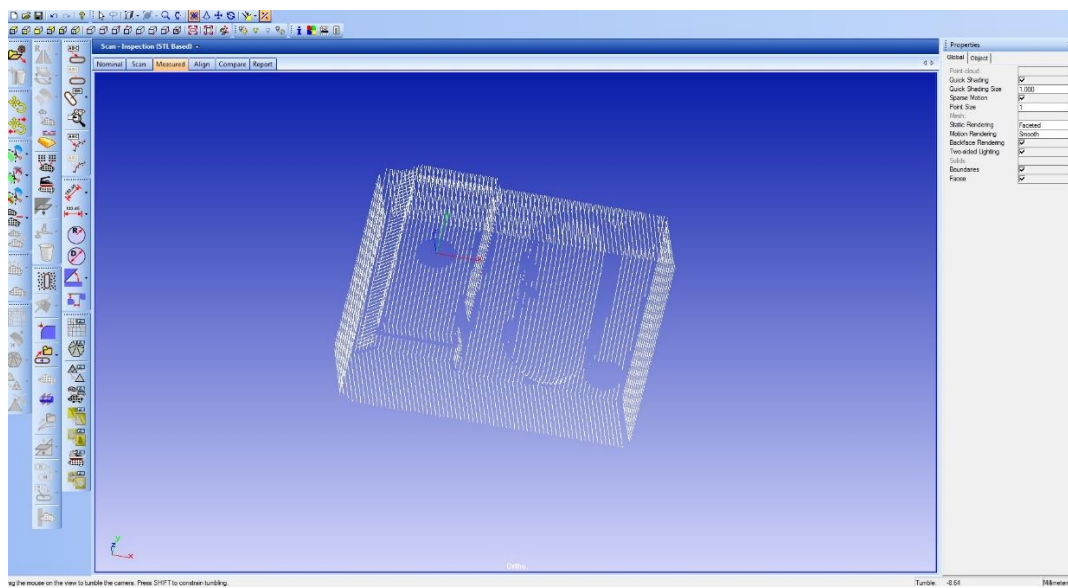


Figura 4. 15 - Malha gerada pela digitalização da peça de trabalho.

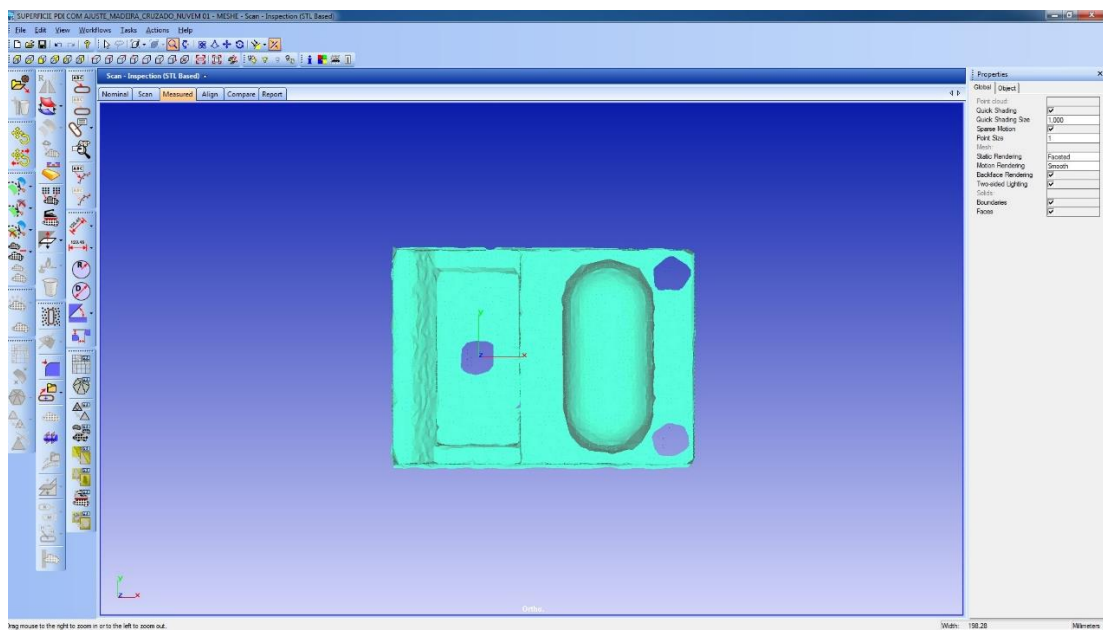


Figura 4. 16 - Sólido gerado após a digitalização da peça de trabalho.

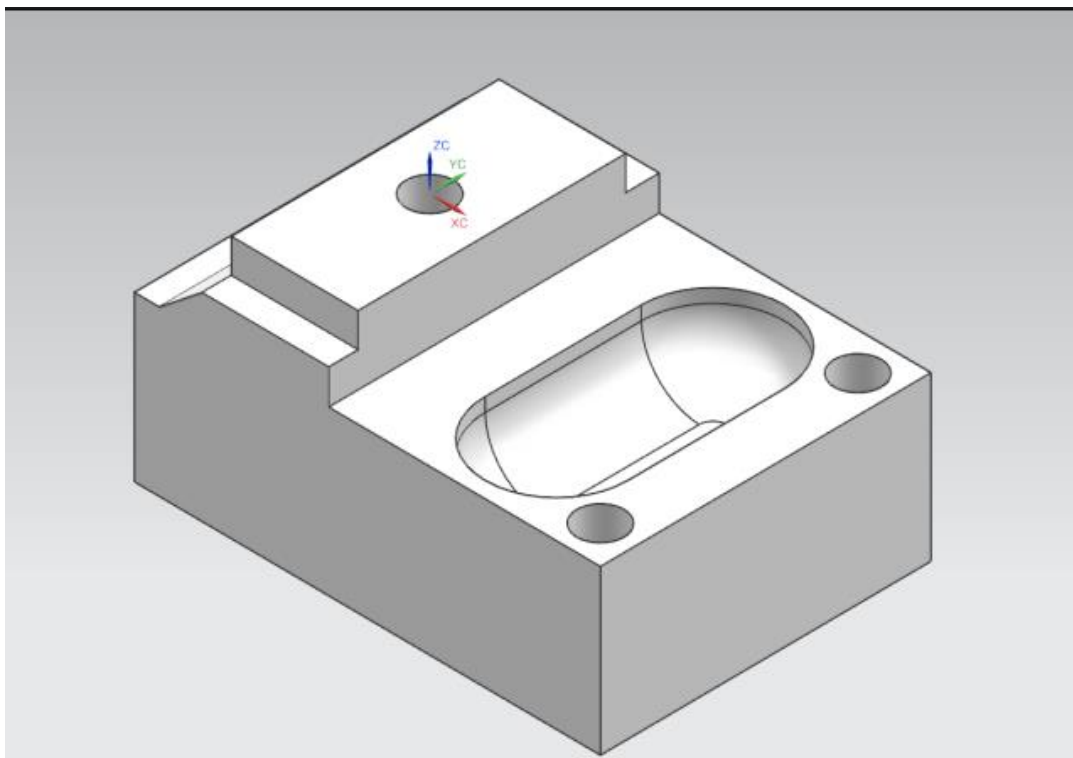


Figura 4. 17 – Modelo CAD da primeira peça de estudo construído no NX.

4.2 INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DA PEÇA A SER DIGITALIZADA (ESCANEADA) COM LASER

Para a avaliação da influência da geometria da peça foram utilizados dois padrões de referência: um bloco padrão de 50,0000 mm e uma esfera de referência de raio 14,9946 mm que serão consideradas uma superfície simples e complexa respectivamente (figura 4.18). A análise foi feita com a variação do número de digitalizações da mesma superfície e a orientação do sensor. Foram aplicadas duas sistemáticas, na primeira figura 4.19a consiste em promover a digitalização, ou seja, o deslocamento do sensor laser sobre a superfície na direção do eixo X variando o número de passes de 1 a 10. Ou seja, número de vezes que o feixe de laser passará sobre a peça no processo de digitalização, cumulativamente com orientação do sensor $A = 0^\circ$ e $B = 0^\circ$. Na figura 4.19b, tem se a combinação do deslocamento do sensor em duas direções, primeiro na direção X com orientações do sensor $A = 0^\circ$ e $B = 0^\circ$ e depois na direção Y com orientação do sensor $A = 0^\circ$ e $B = -90^\circ$ com mesma variação do número de passes, de 1 a 10. Sendo A e B os eixos de rotação do sensor laser. Na figura 4.20 é mostrada o sensor nas posições angulares $A = 0^\circ$ e $B = 0^\circ$ durante a digitalização do bloco padrão e da esfera padrão.

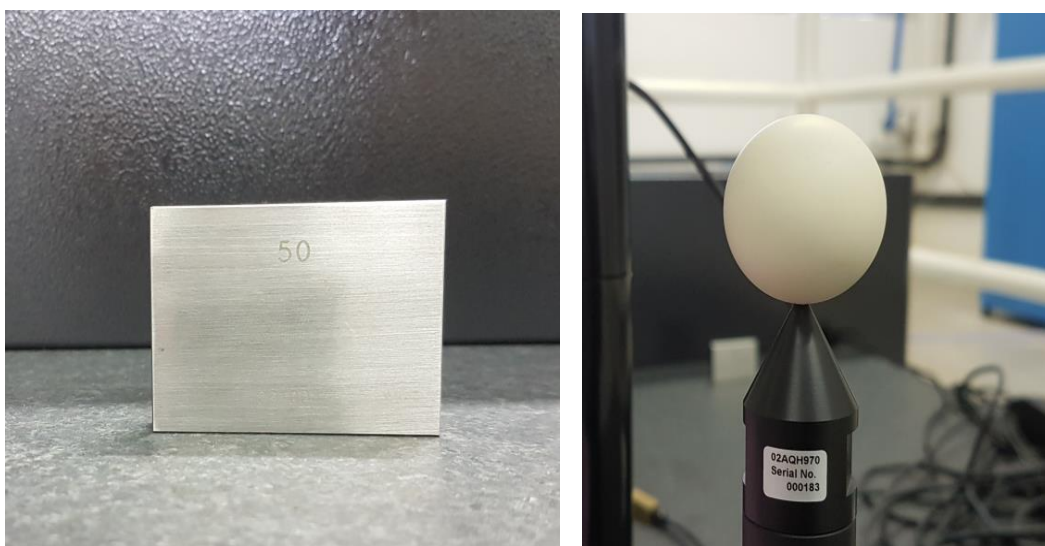


Figura 4. 18 – Padrões de referência utilizados no estudo da influência da geometria na digitalização com o sensor laser.

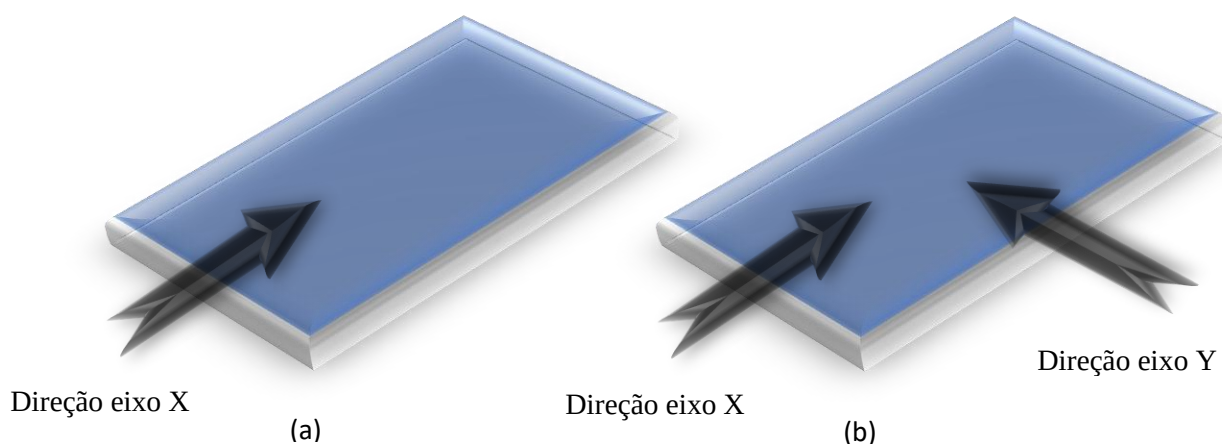


Figura 4. 19 - Deslocamento do sensor laser sobre a superfície, (a) em uma direção e (b) em duas direções.

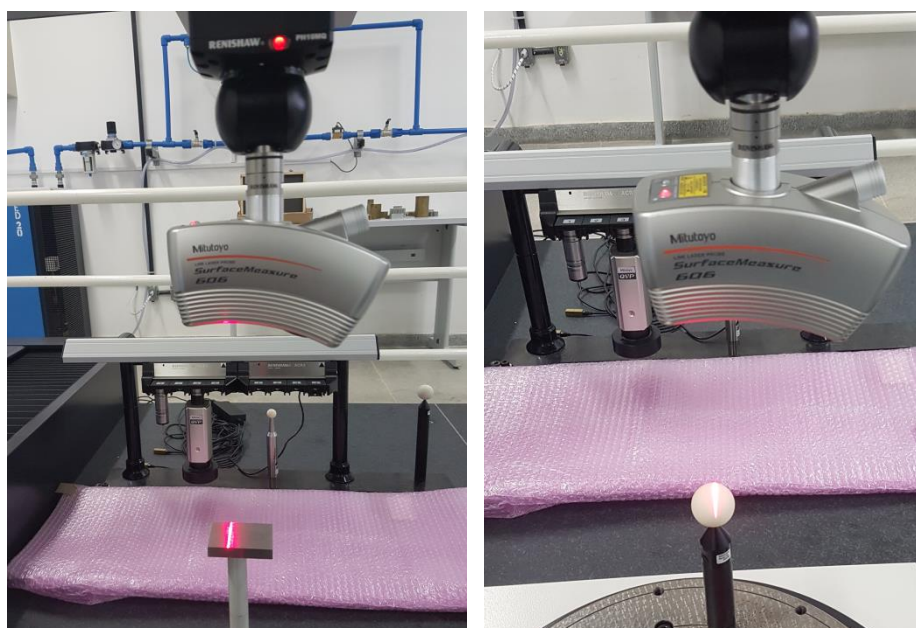


Figura 4. 20 – Digitalização dos padrões de referências utilizados no estudo.

Na avaliação de superfícies de forma livre, comumente são aplicadas duas formas de medição: comparação direta e indireta (NEROSKY, 2001).

A comparação direta verifica o desvio (erro) entre as superfícies, a avaliada e a padrão, por meio das folgas existentes entre as duas, quando são sobrepostas. Não aplicável a qualquer tipo de peça, mas em situações específicas como na inspeção de hélices de turbinas. Fortemente dependente da habilidade do inspetor os resultados estão carregados de incertezas (SILVA H. d., 2015).

Em compensação, na comparação indireta, o padrão é substituído por um modelo geométrico computadorizado 3D. Desta forma, sua realização depende diretamente da tecnologia de medição por coordenadas e não mais do operador. O princípio básico deste método é avaliar a medição da superfície em comparação ao modelo computadorizado (SILVA H. d., 2015).

Para determinação da incerteza foram criados dois modelos CAD, um para o Bloco Padrão e outro para a Esfera Padrão, mostrados nas figuras 4.21 e 4.22, respectivamente. Para a criação dos modelos foram usadas as dimensões do certificado de calibração do fabricante e o software CAD NX. Após realização das operações descritas na seção 4.2 nos padrões e de posse dos modelos deu-se início as comparações utilizando a função COMPARE GLOBAL, que compara todos os pontos medidos da nuvem/malha, para revelar o erro entre o modelo nominal e o modelo medido. Convém ressaltar, que a incerteza calculada é determinada usando todos os pontos obtidos com a digitalização sobre a superfície da peça.

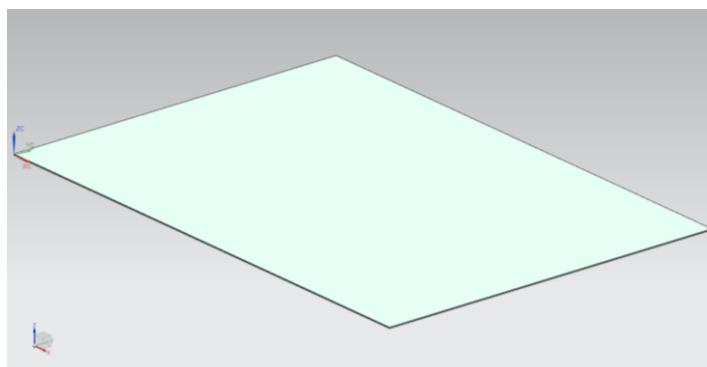


Figura 4. 21 – Modelo da superfície simples para comparação do bloco padrão.

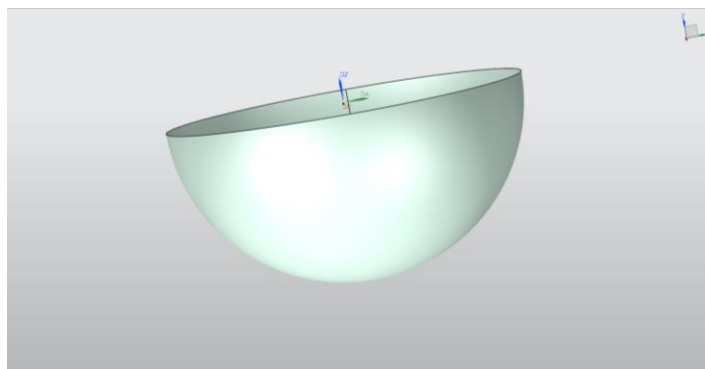


Figura 4. 22– Modelo da superfície complexa para comparação da esfera de referência.

4.2.1 BLOCO PADRÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das comparações digitalizações/modelo CAD para o Bloco Padrão (superfície simples) e a análises em função do número de passos: do número de pontos válidos, do erro médio e da incerteza quando aplicada as sistemáticas propostas a superfície. A figura 4.23 ilustra as fases para as comparações.

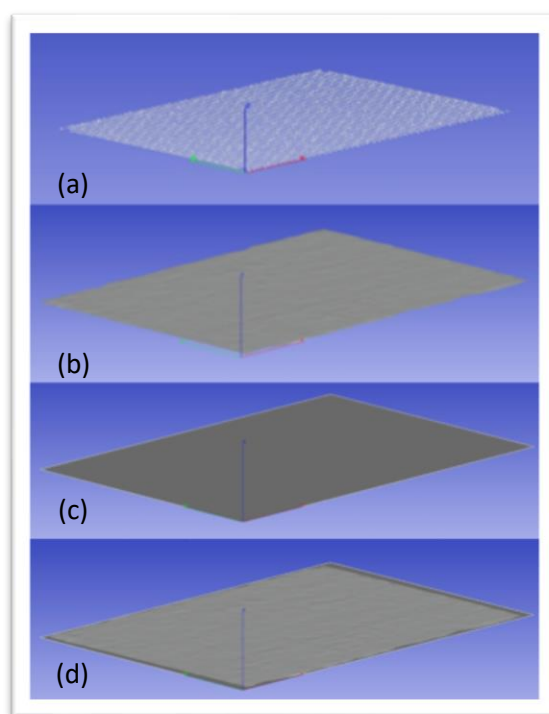


Figura 4. 23 – Fase do processo para comparação: resultado da digitalização (a), criação do sólido (b), modelo CAD (c) e comparação sólido oriundo da digitalização /modelo CAD (d) (superfície simples).

A figura 4.24 apresenta um dos relatórios gerados das comparações para o Bloco Padrão, nele temos: representação gráfica da comparação nominal/CAD (a); resultados da comparação (b), informações estatísticas (c) e identificação da comparação (d).

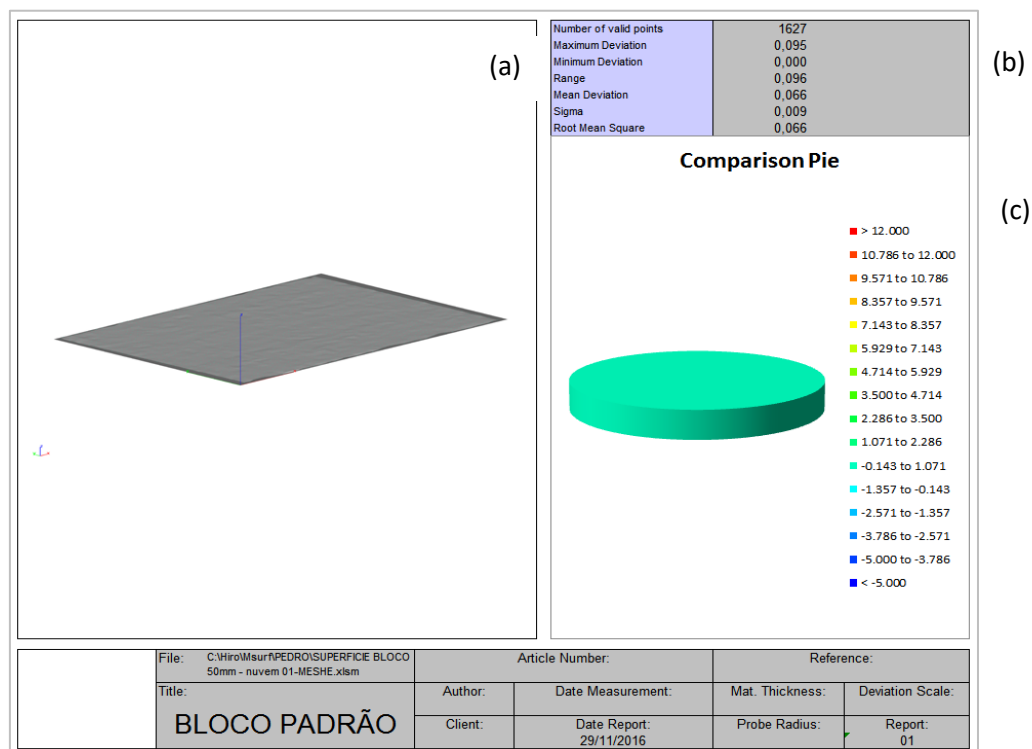


Figura 4. 24 – Exemplo de relatório de comparação superfície simples. (d)

As tabelas a seguir, 4.1 e 4.2, apresentam os resultados das comparações entre o modelo CAD e o modelo obtido das medições (digitalização). Sendo que:

- Número de pontos válidos: representa o número de pontos usados na comparação;
- Erro mínimo: representa a menor distância ou a maior distância negativa obtida na comparação entre os valores medidos e nominais de um determinado ponto;
- Erro máximo: representa a maior distância positiva obtida na comparação entre os valores medidos e nominais de um determinado ponto;
- Erro médio: representa a média das distâncias entre os dados medidos e os nominais dos pontos válidos.

- Range: representa o intervalo de distâncias dos dados medidos para o modelo nominal;
- Signa: representa a incerteza padrão das distâncias entre os dados medidos e nominais dos pontos validos;

Tabela 4. 1 – Resultados do deslocamento do sensor na direção X para superfície simples (Bloco Padrão).

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	1642	0,12308	-0,00050	0,01262	0,01066
2	1668	0,12491	-0,00049	0,01579	0,01205
3	1681	0,10906	-0,00046	0,01688	0,01251
4	1659	0,14885	-0,00049	0,01870	0,01371
5	1672	0,16474	-0,00044	0,01996	0,01439
6	1680	0,14836	-0,00049	0,02074	0,01327
7	1670	0,12308	-0,00049	0,02057	0,01319
8	1683	0,21267	-0,00043	0,02169	0,01603
9	1713	0,16817	-0,00050	0,02213	0,01538
10	1724	0,16513	-0,00045	0,02252	0,01607

Tabela 4. 2 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para superfície simples (Bloco Padrão).

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	1728	0,0857	-0,0500	-0,0342	0,0139
2	1839	0,0991	-0,0500	-0,0317	0,0142
3	1871	0,0671	-0,0500	-0,0314	0,0136
4	1875	0,0857	-0,0500	-0,0308	0,0138
5	1896	0,1212	-0,0500	-0,0295	0,0156
6	1879	0,1204	-0,0500	-0,0304	0,0148
7	1918	0,1935	-0,0500	-0,0293	0,0154
8	1960	0,0825	-0,0500	-0,0295	0,0147
9	1979	0,2525	-0,0500	-0,0282	0,0175
10	1995	0,2270	-0,0500	-0,0280	0,0183

Das tabelas 4.1 e 4.2 são construídos três gráficos (figuras 4.25, 4.26 e 4.27) do: número de pontos válidos, erro médio e incerteza, respectivamente, para avaliar a influência do número passos e a sistemática aplicadas a superfície.

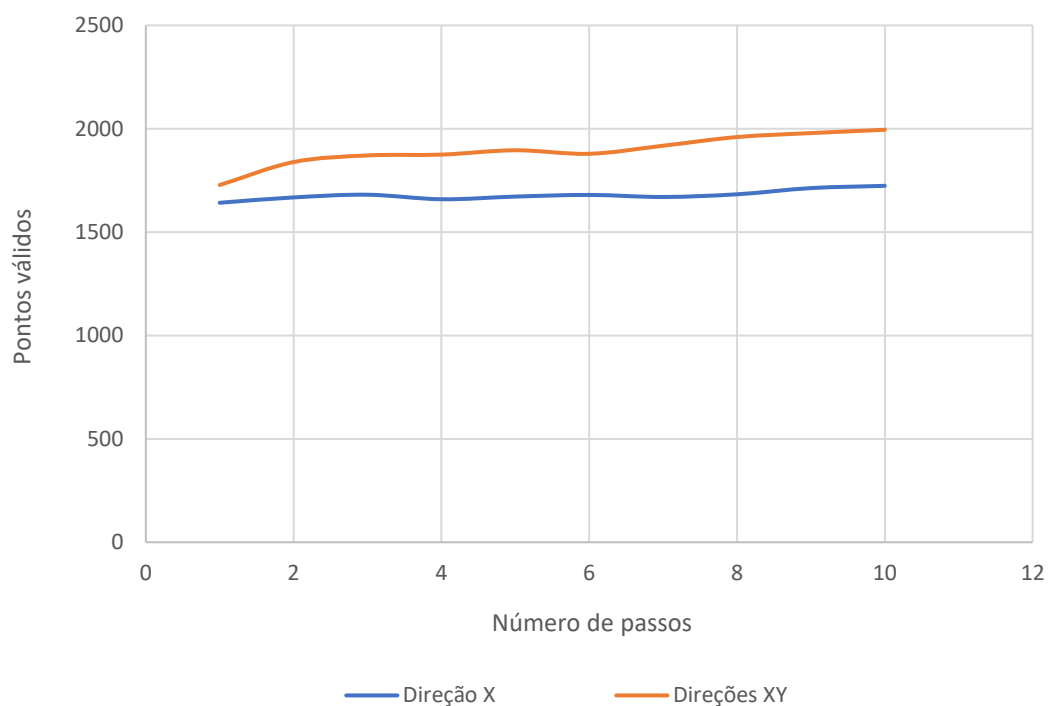


Figura 4. 25 – Número de pontos válidos por número de passos da superfície simples.

Do gráfico número de pontos válidos por número de passos (figura 4.25) quando a sistemática aplicada a superfície simples é a do deslocamento do sensor na direção X observa-se um pequeno aumento de 2,9 % do número de pontos, do primeiro (1627 pontos) passo ao décimo (1676 pontos). Já ao aplicar a sistemática do deslocamento combinado do sensor nas direções XY tem-se o aumento do número de pontos em 13,3 %, do primeiro (1728 pontos) ao décimo (1995 pontos). Os resultados da sistemática do deslocamento combinado se apresentam superiores aos do deslocamento do sensor na direção X.

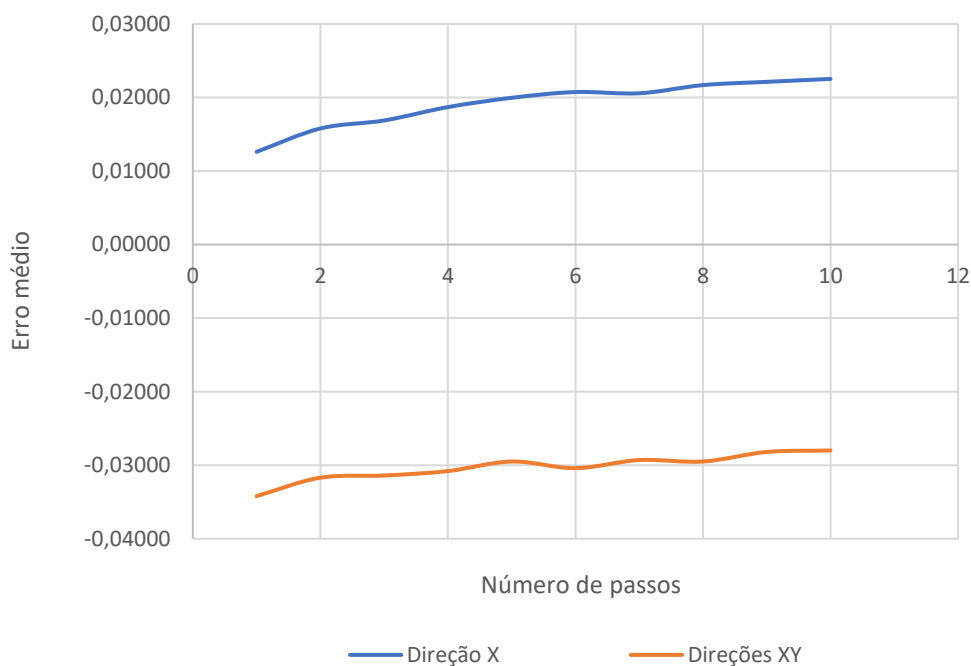


Figura 4. 26 – Influência do número de passos no erro da superfície simples.

O erro de medição é definido como a diferença entre o valor medido da grandeza e seu valor de referência (distâncias), já o erro médio representa a média destas diferenças.

O gráfico influência do número de passos no erro médio da superfície simples, figura 4.26, exibe comportamentos distintos com o incremento do número de passos. No deslocamento combinado, direções XY, tem-se a diminuição do erro médio com valor máximo de - 0.0342mm (primeiro passo) e mínimo de - 0,0280 mm (décimo passo). Quando o deslocamento do sensor ocorre apenas na direção X, os valores verificados do erro médio são menores aos do deslocamento nas direções XY, e o valor do erro médio aumenta com o incremento de passos. Para o primeiro passo tem-se um erro médio de 0,01262 mm e no décimo 0,02252 mm.

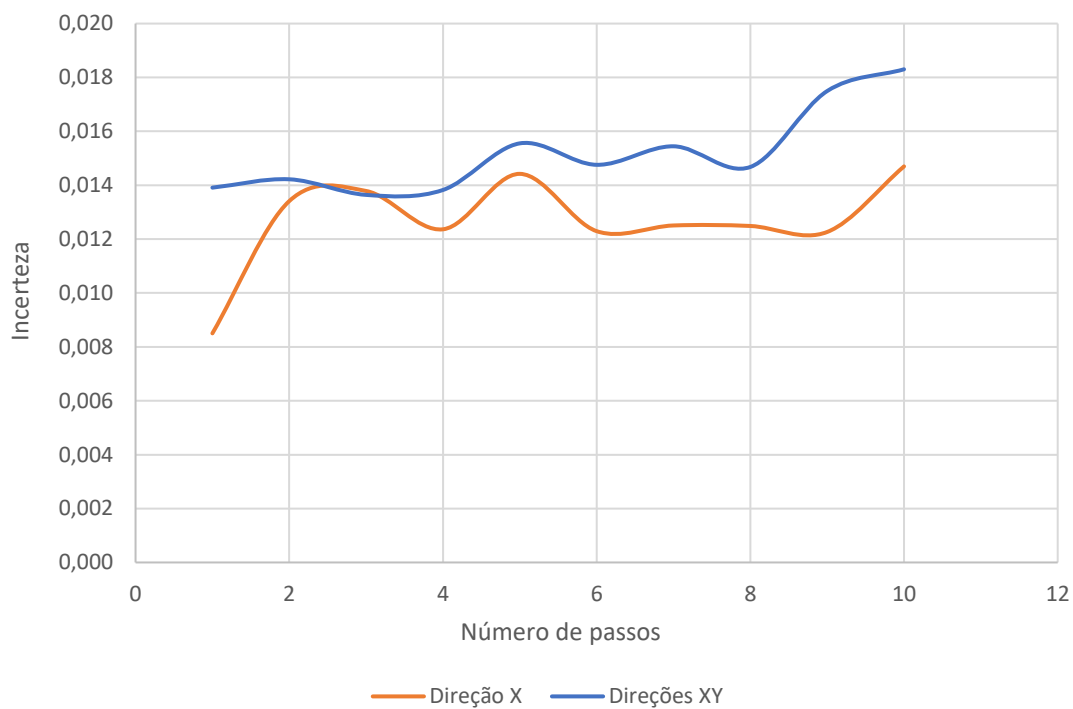


Figura 4. 27 - Influência do número de passos na incerteza da superfície simples.

A incerteza de medição é definida como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser atribuídos ao mensurando, o gráfico da influência do número de passos na incerteza para a superfície simples (figura 4.27) revela variação de 42,17 % da incerteza para o deslocamento do sensor na direção X, com valor máximo de 0,0147 mm e mínimo de 0,0085 mm, para o deslocamento na direção XY variação de 25,68 % com valor máximo de 0,0183 mm e mínimo de 0,0136 mm.

4.2.2 ESFERA DE REFERÊNCIA

Nesta seção são apresentados os resultados e análises das comparações digitalizações/modelo CAD para o Esfera de Referência (superfície complexa). A figura 4.28 ilustra as fases para as comparações.

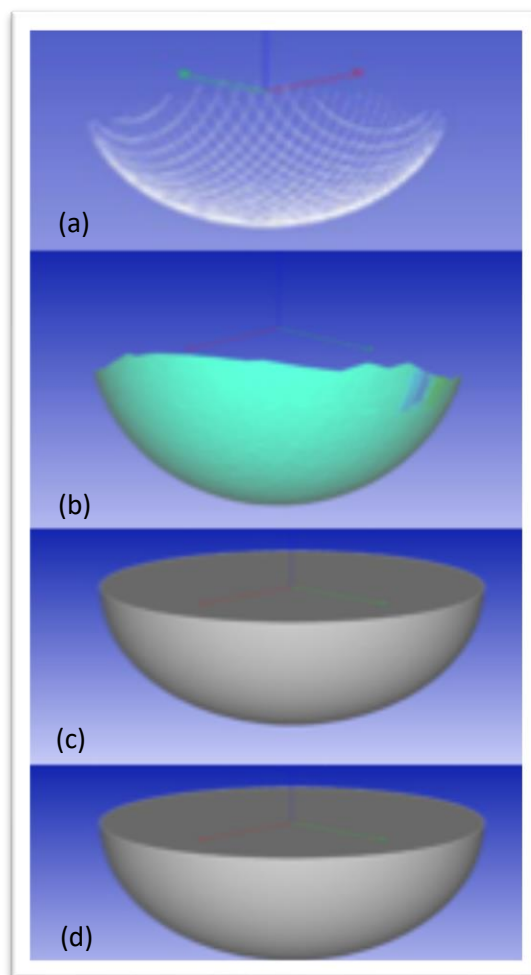


Figura 4. 28 - Fase do processo para comparação: resultado da digitalização (a), criação do sólido (b), modelo CAD (c) e comparação sólido oriundo da digitalização /modelo CAD (d) (superfície complexa).

A figura 4.29 apresenta um dos relatórios gerados das comparações para a Esfera de Referência, nele temos: representação gráfica da comparação nominal/CAD (a); resultados da comparação (b), informações estatísticas (c) e identificação da comparação (d).

As tabelas, figura 4.3 e 4.4, apresentam os resultados das comparações entre o modelo CAD e o modelo obtido das medições (digitalização).

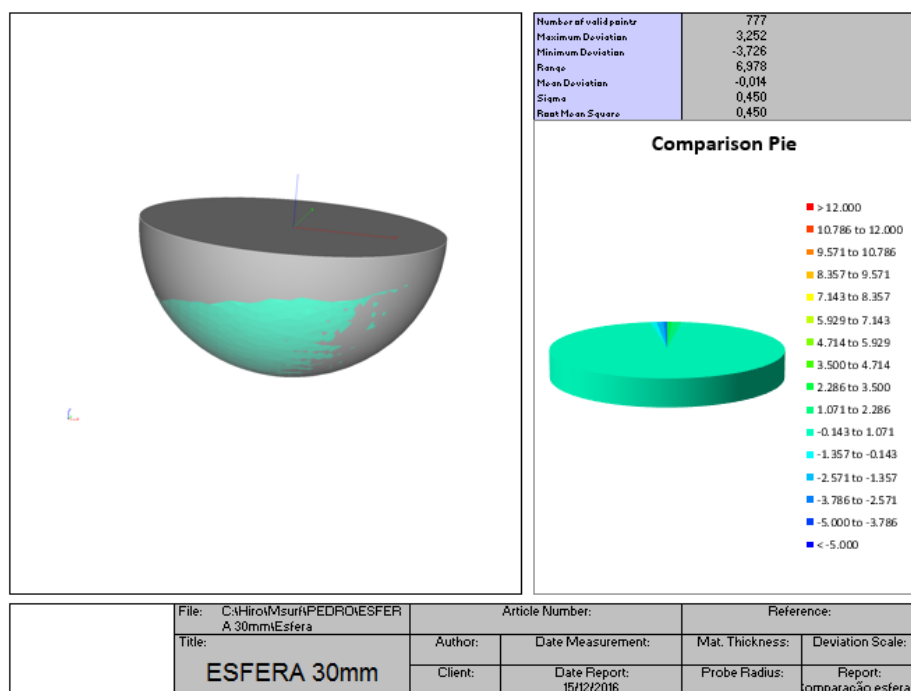


Figura 4. 29 - Exemplo de relatório de comparação superfície complexa.

Tabela 4. 3 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para superfície complexa.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	777	3,252	-3,726	-0,014	0,450
2	797	3,610	-3,624	-0,007	0,481
3	790	3,664	-3,446	-0,005	0,444
4	795	3,463	-3,814	-0,013	0,457
5	793	3,463	-3,726	0,002	0,451
6	924	3,782	-3,105	0,002	0,481
7	936	3,811	-3,286	-0,002	0,499
8	1008	3,789	-3,673	-0,012	0,503
9	996	3,286	-3,629	-0,017	0,485
10	1000	3,746	-3,336	-0,009	0,489

Tabela 4. 4 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para superfície complexa.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	936	3,825	-3,688	-0,019	0,569
2	1011	3,819	-3,883	-0,002	0,577
3	1089	3,969	-4,035	0,003	0,629
4	1145	3,905	-4,104	0,006	0,611
5	1156	4,297	-3,906	0,001	0,619
6	1157	3,986	-4,085	-0,008	0,635
7	1197	4,297	-3,623	-0,004	0,598
8	1210	3,956	-4,086	0,002	0,625
9	1200	3,852	-3,810	0,007	0,608
10	1180	3,822	-4,013	-0,005	0,586

Dos dados oriundos das comparações registrados nas tabelas 4.3 e 4.4 foram construídos gráficos que evidenciam a influência do número de passos para: o número de pontos válidos, o erro médio e a incerteza.

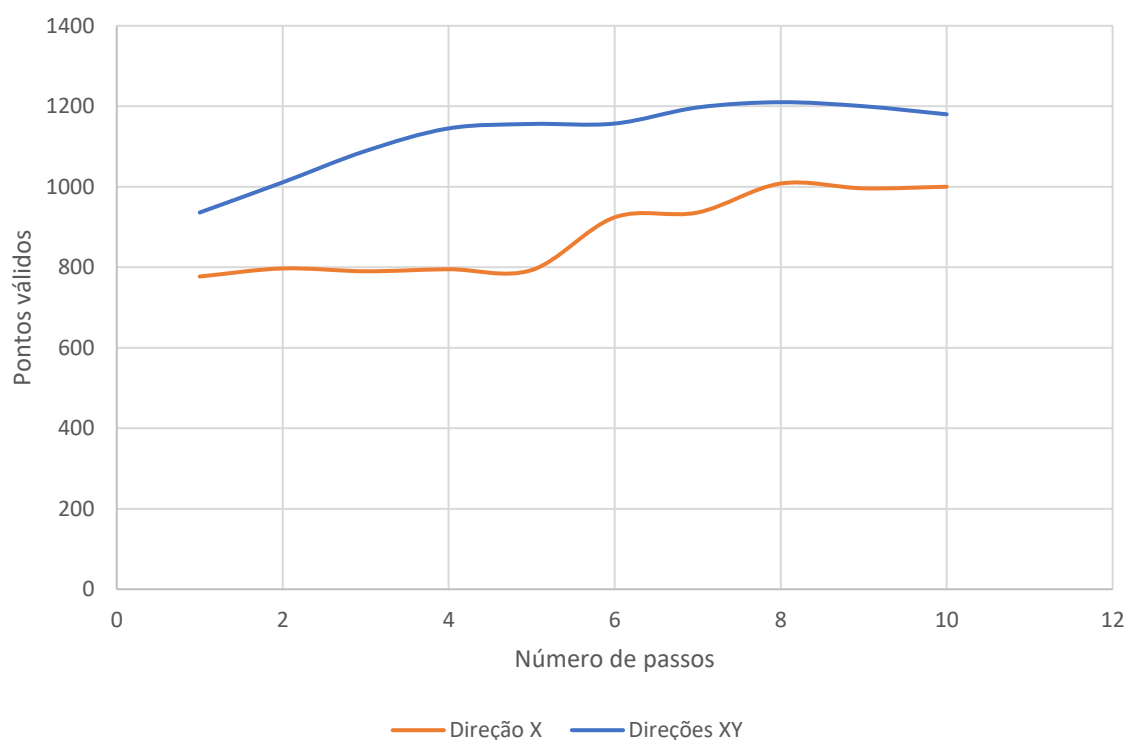


Figura 4. 30 - Número de pontos válidos por número de passos da superfície complexa.

No deslocamento do sensor na direção X o aumento do número de pontos é 22,9%, do primeiro (777 pontos) ao oitavo (1008 pontos), apresentando redução de 0,7 %, do oitavo ao decimo (1000 pontos). Para o deslocamento combinado do sensor o aumento dos pontos é de 22,6 % do primeiro (936 pontos) ao oitavo (1210 pontos), redução de 2,5%, do oitavo ao decimo (1180 pontos) que também apresenta valores sempre superiores ao deslocamento do sensor só na direção X.

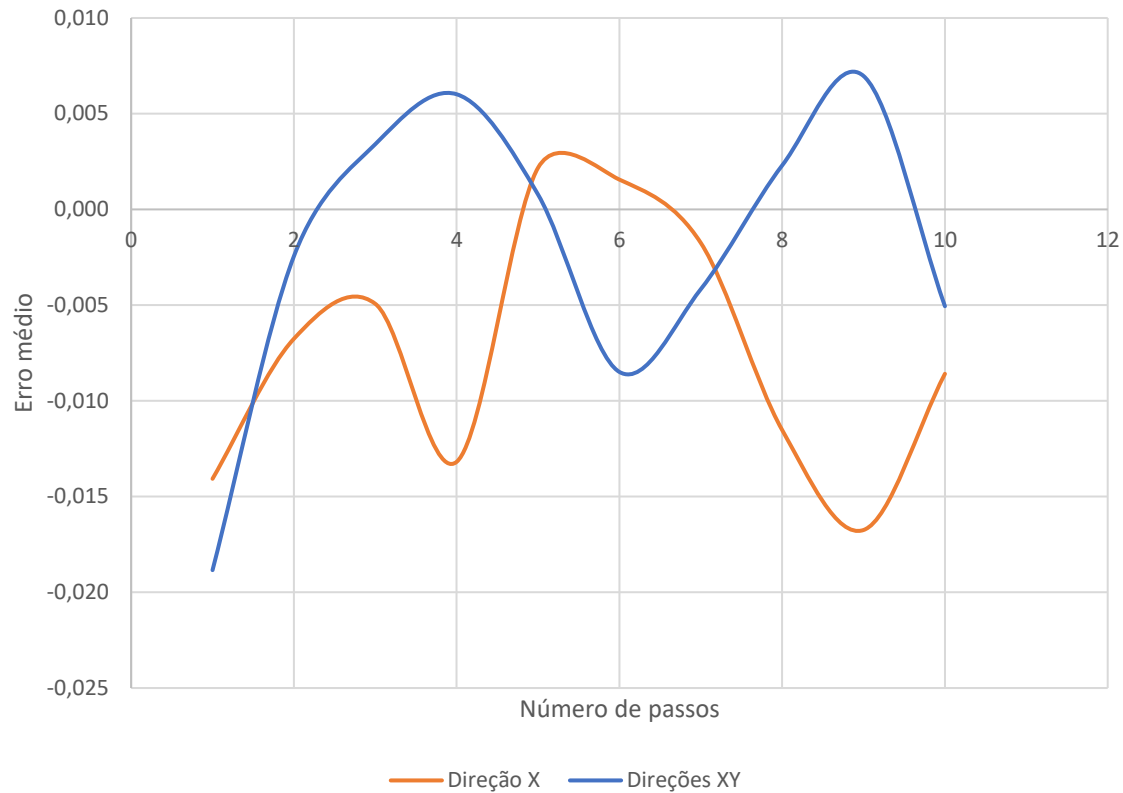


Figura 4. 31 - Influência do número de passos no erro médio da superfície complexa.

Na superfície complexa o erro médio se apresenta inconstante com elevações e abaixamentos de seus valores, no deslocamento do sensor na direção X a variação é de 89,5% tendo -0,017 mm como valor mínimo, e 0,002 mm como máximo. Já no deslocamento combinado do sensor nas direções XY a variação é de 76,0 % com valor mínimo de -0,019 mm e de máximo 0,006 mm.

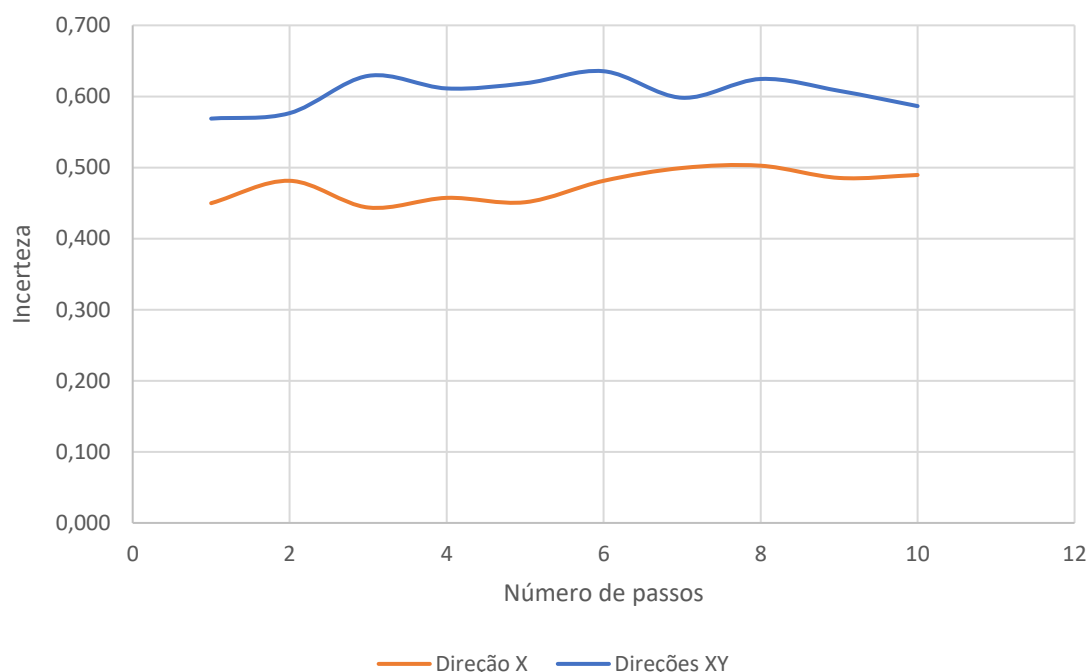


Figura 4. 32 - Influência do número de passos na incerteza da superfície complexa.

Para a superfície complexa no deslocamento do sensor na direção X, a incerteza de medição assume valor máximo de 0,503 mm (oitavo ponto) e mínimo de 0,444 mm, uma variação de 11,72 %, no deslocamento na direção XY, variação de 10,39 %, o valor máximo é de 0,635 mm e mínimo de 0,569 mm.

4.2.3 COMPARAÇÕES DOS RESULTADOS PARA AS SUPERFÍCIES

Pela diferença de área superficial entre as superfícies, aqui denominadas simples e complexa, se faz necessário equipará-las. Admitindo que na superfície simples a distribuição dos pontos válidos seja homogeneia basta determinar a relação entre as áreas superficiais a aplicá-la ao número pontos válidos da superfície simples para o deslocamento na direção X e no deslocamento da combinação de duas direções X e Y. Com a relação determinada, o qual tem um valor de 0,809, foi possível obter o número de pontos válidos para área das superfícies equiparadas, os quais são mostrados na tabela 4.5. Também, foi possível obter um gráfico comparativo do número de pontos válidos em função do número de passos, figura 4.33. Assim, fica evidente a influência da geometria pois independente da sistemática aplicada às superfícies, há maior quantidade de pontos

válidos para a superfície simples e o aumento dos mesmos com a implementação dos passos.

Tabela 4. 5 – Número de pontos válidos para área das superfícies equiparadas.

Número de passos	Número de pontos válidos			
	Superfície simples		Superfície complexa	
	X	XY	X	XY
1	1316	1398	777	936
2	1313	1488	797	1011
3	1307	1514	790	1089
4	1343	1517	795	1145
5	1316	1534	793	1156
6	1336	1520	924	1157
7	1345	1552	936	1197
8	1331	1586	1008	1210
9	1351	1601	996	1200
10	1356	1614	1000	1180

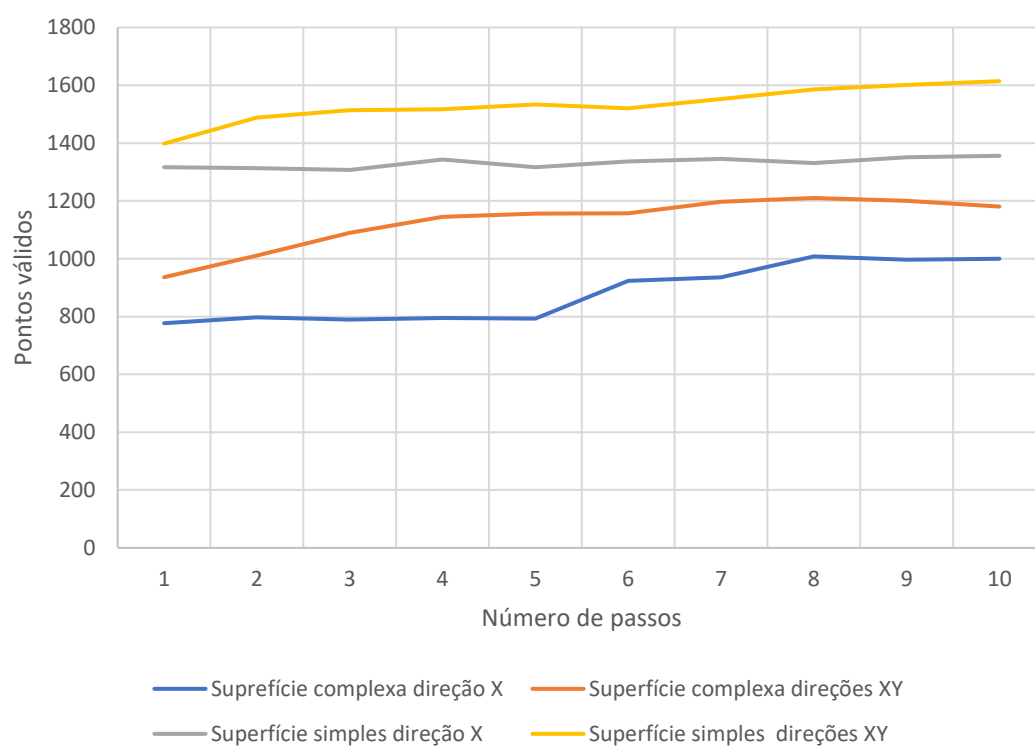


Figura 4. 33 – Comparativo do número de pontos válidos por números de passos da geometria e sistemática aplicada.

Tabela 4. 6 – Erro médio em função do número de passos aplicado as duas superfícies.

Número de passos	Erro médio (mm)			
	Superfície simples		Superfície complexa	
	X	XY	X	XY
1	0,01262	-0,0342	-0,014	-0,019
2	0,01579	-0,0317	-0,007	-0,002
3	0,01688	-0,0314	-0,005	0,003
4	0,01870	-0,0308	-0,013	0,006
5	0,01996	-0,0295	0,002	0,001
6	0,02074	-0,0304	0,002	-0,008
7	0,02057	-0,0293	-0,002	-0,004
8	0,02169	-0,0295	-0,012	0,002
9	0,02213	-0,0282	-0,017	0,007
10	0,02252	-0,0280	-0,014	-0,005

A figura 4.34, gráfico comparativo do erro médio em função do número de passos aplicado as duas superfícies, revela que os menores resultados estão relacionados a superfície complexa com deslocamento nas direções XY e os maiores erros para a superfície simples na direção X.

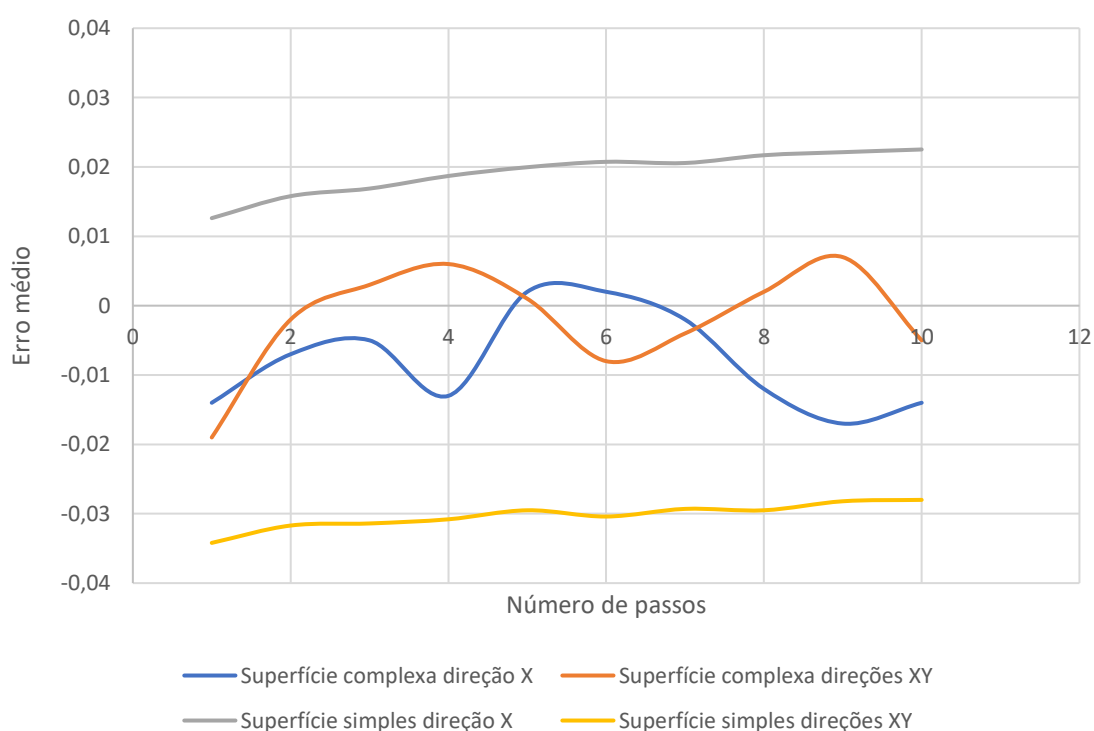


Figura 4. 34 - Comparativo do erro médio em função do número de passos aplicado as duas superfícies.

A figura 4.35, comparativo da influência do número de passos na incerteza em função da geometria e sistemáticas aplicadas, evidência maior influência do número de passos no deslocamento do sensor na superfície complexa nas direções XY na incerteza com valores sempre superiores ao do primeiro passo.

Tabela 4. 7 – Incerteza em função do número de passos aplicado as duas superfícies.

Número de passos	Incerteza (mm)			
	Superfície simples		Superfície complexa	
	X	XY	X	XY
1	0,0085	0,0139	0,450	0,569
2	0,0134	0,0142	0,481	0,577
3	0,0138	0,0136	0,444	0,629
4	0,0124	0,0138	0,457	0,611
5	0,0144	0,0156	0,451	0,619
6	0,0123	0,0148	0,481	0,635
7	0,0125	0,0154	0,499	0,598
8	0,0125	0,0147	0,503	0,625
9	0,0123	0,0175	0,485	0,608
10	0,0147	0,0183	0,450	0,586

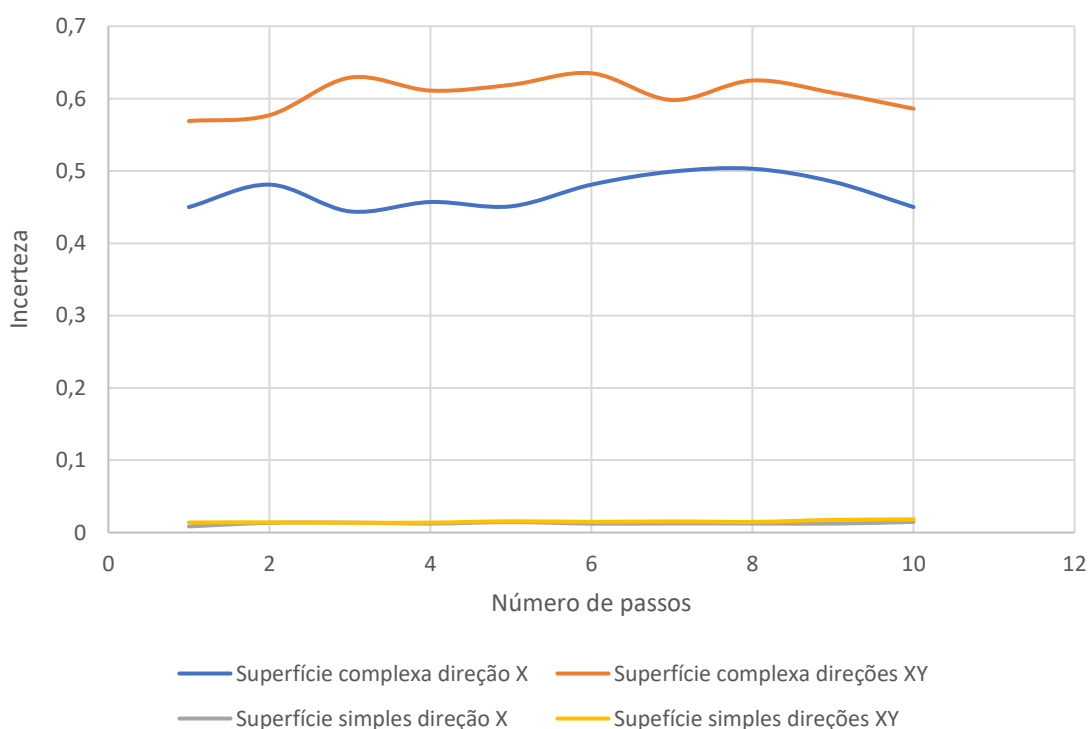


Figura 4. 35 - Comparativo da influência do número de passos na incerteza em função da geometria e sistemáticas aplicadas.

4.3 MEDIÇÕES DAS PEÇAS USINADAS

Neste trabalho quatro peças com idêntica geometria e dimensões nominais foram usinadas para serem digitalizadas e analisadas nesta pesquisa. Estas peças, mostradas na figura 4.36, foram produzidas no Centro de Usinagem Romi série D-600 do Instituto Federal da Paraíba – IFPB. Das quatro peças, uma é de alumínio, duas de nylon nas cores preta e branca e uma de madeira. Com estas peças foi possível analisar a influência no erro e na incerteza de medição de parâmetros como: número de passos (digitalizações), orientação da digitalização, material e a cor das peças.



Figura 4. 36 – Peças produzidas para avaliação da influência da cor e natureza do material.

Assim como todo processo, o sistema de medição também está sujeito a fatores que influenciam e causam variabilidade nos resultados (HOCKEN & PEREIRA, 2012). Em uma medição qualquer, os resultados contêm erros e incertezas que dificultam a identificação das variações geométricas da peça fabricada em relação à idealizada no projeto (ABNT, 2012) GUM (2012) para reduzir os erros e incertezas derivadas do processo de fabricação a construção dos modelos CAD (figura 4.37) desprezou as dimensões do projeto e fez uso das obtidas pela medição de cada peça (anexos : A1, A2, A3 e A4) usando uma máquina de medição por coordenadas (descrita na seção 2.6) com uso de um sensor de contato.

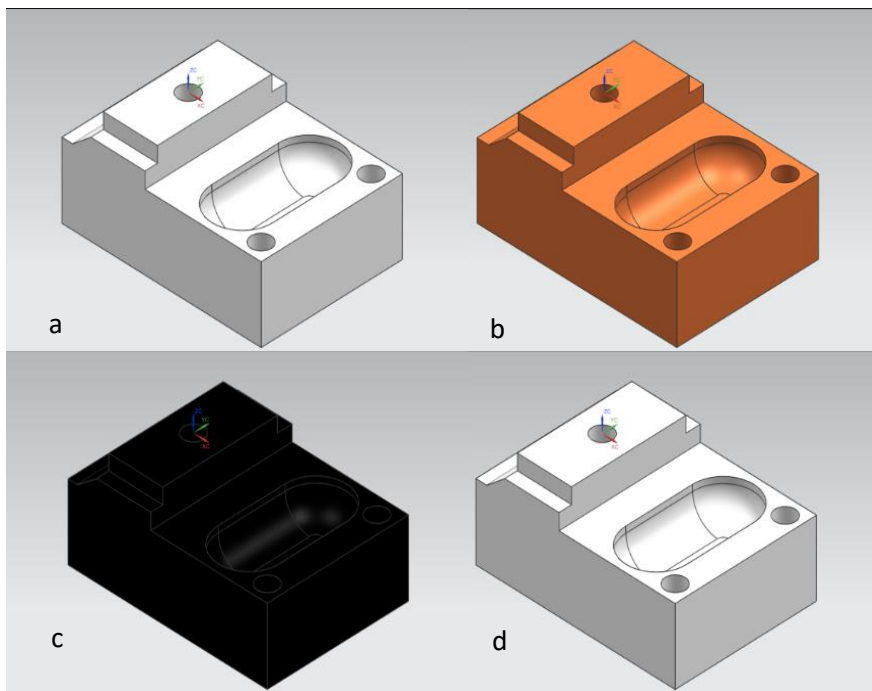


Figura 4. 37 - Modelos (a) alumínio, (b) madeira, (b) nylon preto e (b) nylon branco.

Realizadas as operações descritas na seção 4.2 nas quatro peças e de posse dos modelos deu-se início as comparações utilizando a função COMPARE GLOBAL, que compara todos os pontos medidos da nuvem/malha, para revelar o desvio do medido em relação ao seu modelo nominal associado. Neste caso, os parâmetros estimados assumem valores únicos para toda peça avaliada e não para cada um dos pontos medidos na superfície. Os parâmetros medidos estão conceituados na seção 4.3.1.

Nas seções seguintes serão apresentados os resultados das comparações entre os modelos CAD e os modelos digitalizados (obtido das medições com o sensor Laser) das peças mostradas na figura 4.34. Os parâmetros avaliados serão: número de pontos válidos, erro e incerteza de medição.

4.3.1 PEÇA DE ALUMÍNIO

Nesta seção são apresentados os resultados (tabelas 4.8 e 4.9) e análises das comparações digitalizações/modelo CAD para a peça de alumínio, figuras 4.39, 4.40 e 4.41.

Tabela 4. 8 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de alumínio.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9459	0,874	-0,050	0,191	0,160
2	9486	0,856	-0,053	0,191	0,160
3	9513	0,852	-0,050	0,190	0,161
4	9465	0,913	-0,052	0,190	0,160
5	9459	0,913	-0,050	0,190	0,159

Tabela 4. 9 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de alumínio.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9915	0,913	-0,050	0,189	0,160
2	9930	0,913	-0,156	0,189	0,160
3	10039	0,913	-0,054	0,186	0,161
4	10191	0,913	-0,119	0,188	0,161
5	10225	0,913	-0,172	0,188	0,161

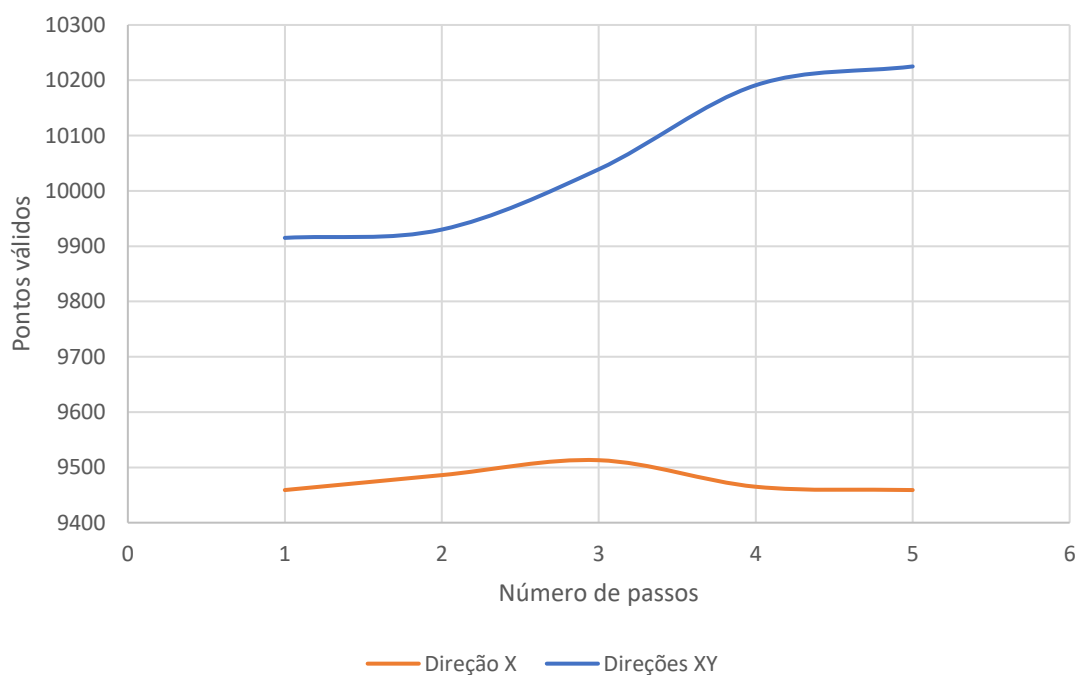


Figura 4. 38 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de alumínio.

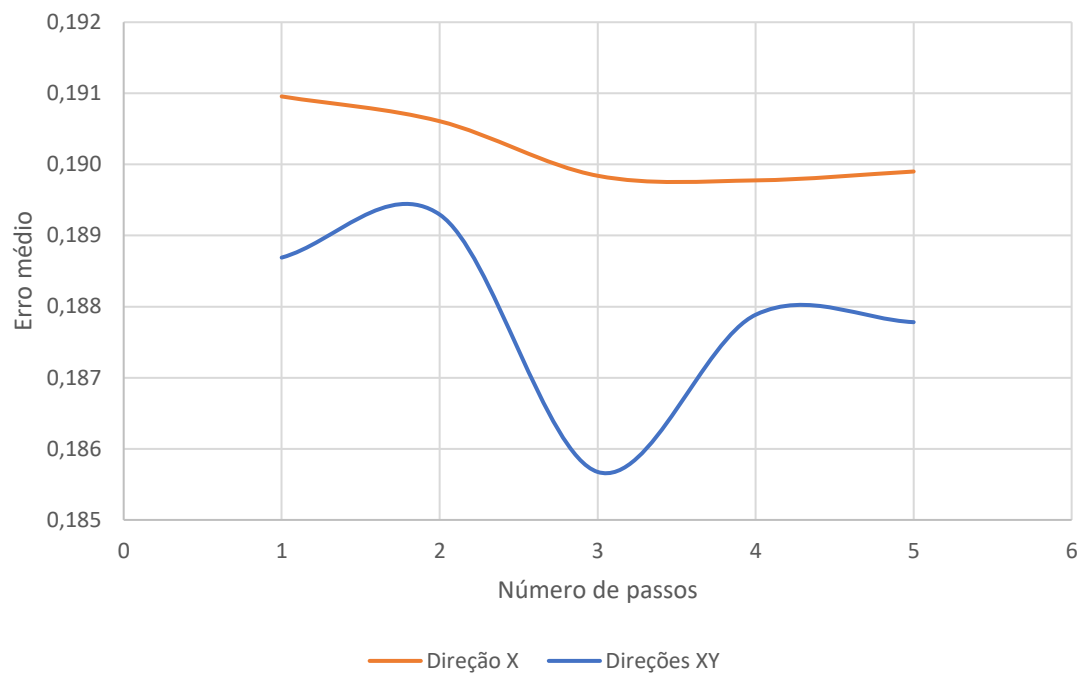


Figura 4. 39 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de alumínio.

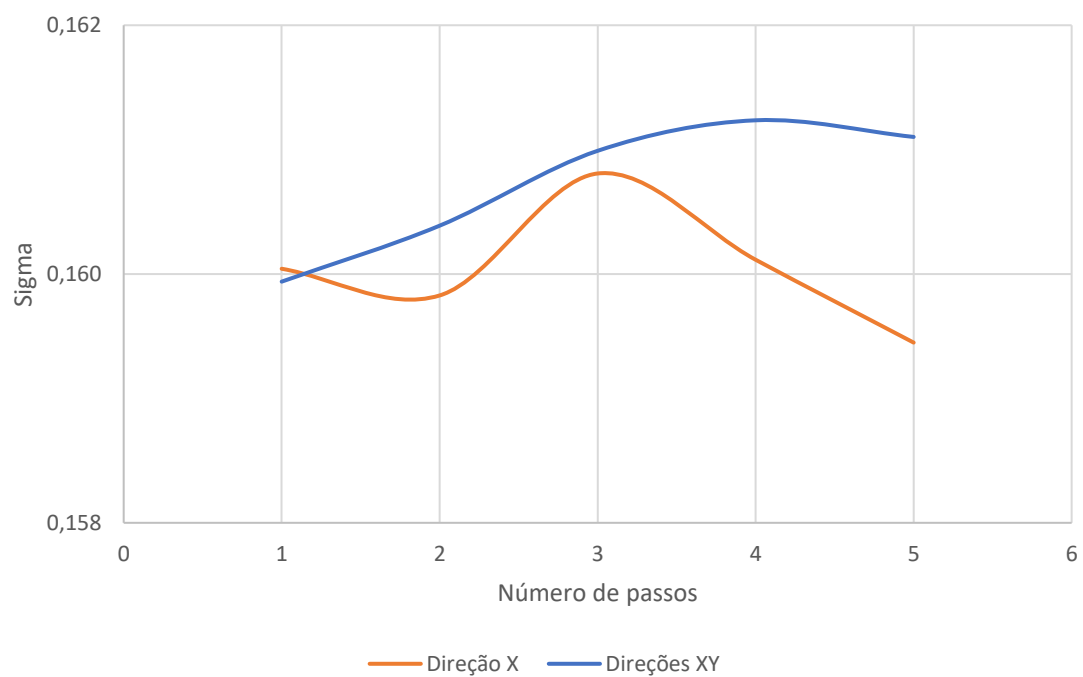


Figura 4. 40 - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de alumínio

Do gráfico números de pontos válidos por número de passos na peça de alumínio, figuras 4.37, se observa um aumento de 3,0 % do número pontos validos em função do

número de passes no deslocamento do sensor nas direções XY enquanto que na direção X tem se um pequeno aumento de 0,56 % até o terceiro passo e posteriormente uma redução do mesmo patamar no quinto passo.

Já no que tange ao erro, figura 4.38, observa se uma pequena redução de 0,52 % do primeiro ao quinto passo no deslocamento na direção X, nas direções XY tem se uma redução de 1,5 % do primeiro ao terceiro ponto e aumento do terceiro ao quinto passo de 0,52 %. A incerteza associada as medições apresentam-se distintas para as duas sistemáticas aplicadas, para o deslocamento na direção X há a manutenção do valor inicial (0,160 mm) e aumento de 0,62 % do segundo para o terceiro passo e redução de 1,2 % do terceiro para o quinto passo. Para o deslocamento nas direções XY o crescimento da incerteza é de 0,62% primeiro ao terceiro passo e a incerteza se mantém no mesmo patamar até o quinto passo.

4.3.2 PEÇA DE MADEIRA

Nesta seção são apresentados os resultados (tabelas 4.10 e 4.11) e análises das comparações digitalizações/modelo CAD para a peça de madeira, figuras 4.42, 4.43 e 4.44.

Tabela 4. 10 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de madeira.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9391	1,200	-0,513	-0,007	0,154
2	9433	1,410	-0,416	-0,001	0,175
3	9464	1,471	-0,352	-0,001	0,176
4	9404	1,497	-0,400	0,000	0,177
5	9377	1,530	-0,358	0,001	0,176

Tabela 4. 11 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de madeira.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9952	1,500	-0,396	0,007	0,182
2	9964	1,504	-0,400	0,008	0,179
3	10040	1,428	-0,465	0,008	0,176
4	10227	1,531	-0,496	0,010	0,181
5	10306	2,031	-0,484	0,011	0,182

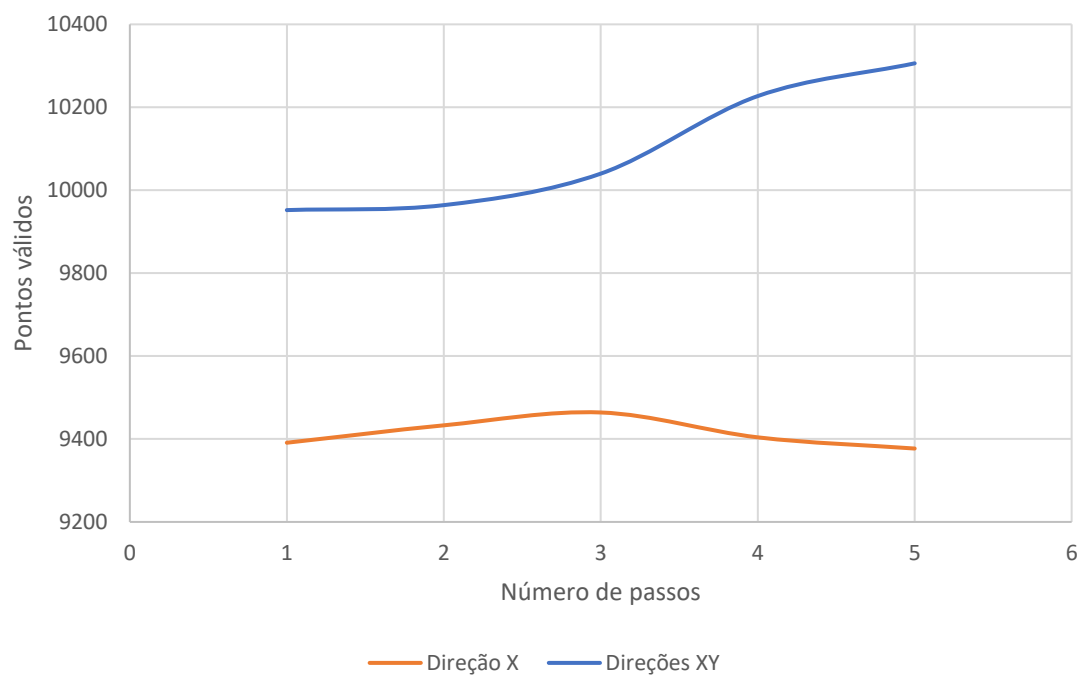


Figura 4. 41 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de madeira.

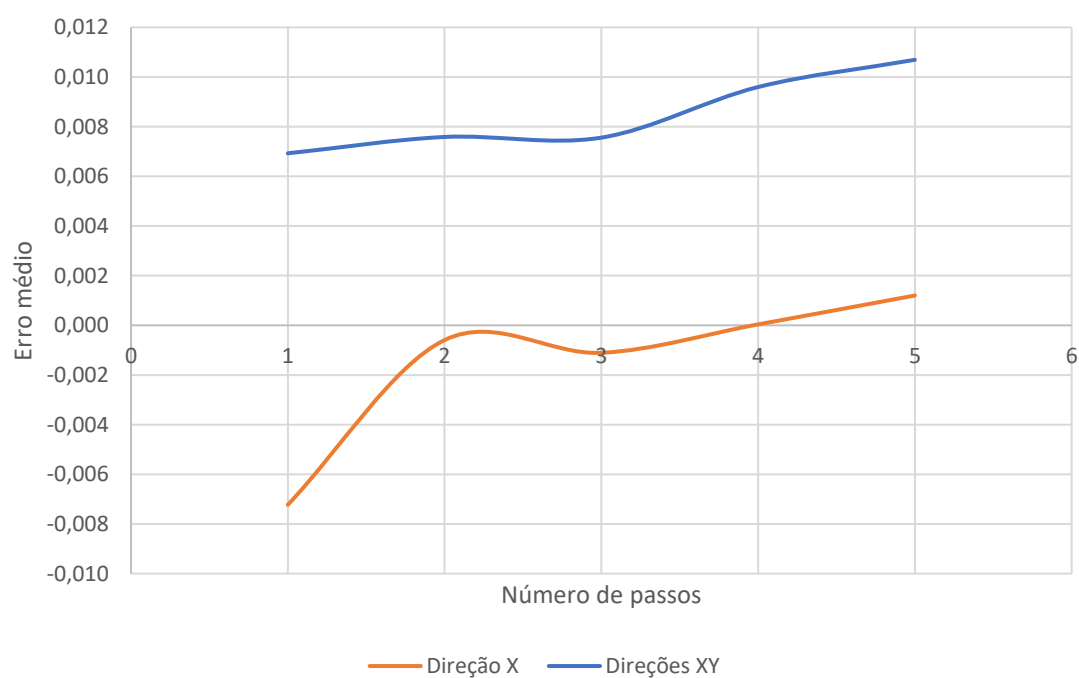


Figura 4. 42 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de madeira.

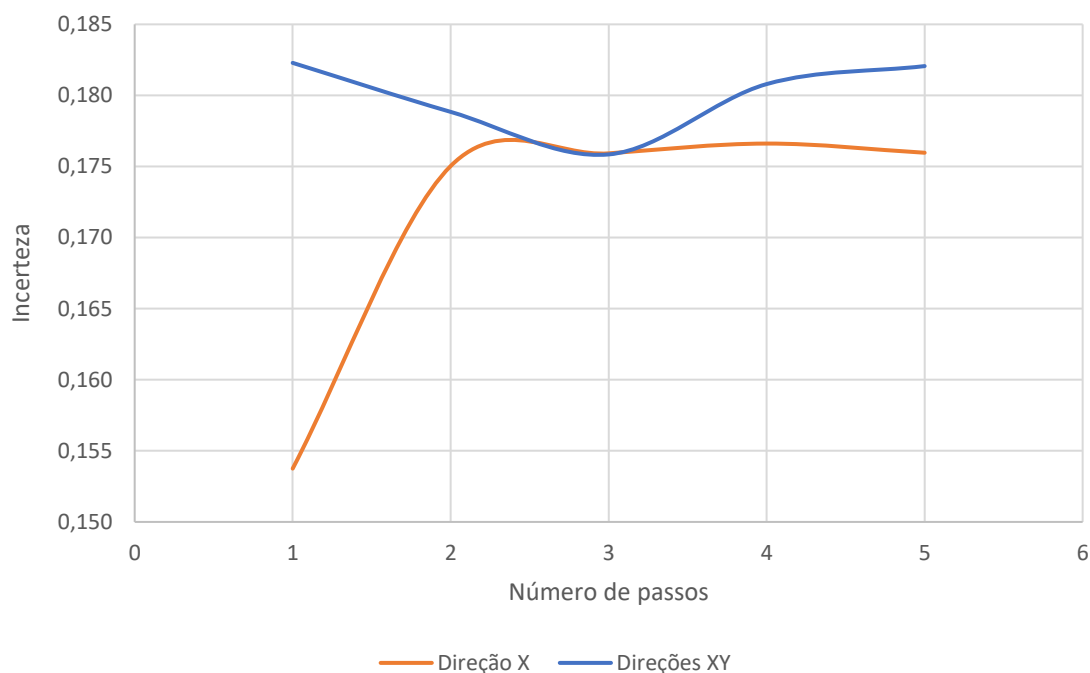


Figura 4. 43 - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de madeira.

Do gráfico números de pontos válidos por número de passos na peça de madeira, figuras 4.40, se observa um aumento de 3,4 % do número pontos validos em função do número de passes no deslocamento do sensor nas direções XY enquanto que na direção X tem se um pequeno aumento de 0,77 % até o terceiro passo e posteriormente uma redução de 0,91 % do terceiro ao quinto passo. No que tange ao erro, figura 4.41, observa o aumento para as duas sistemáticas aplicadas, no deslocamento na direção X tem se o aumento significativo de 87,5 % do erro do primeiro ao quinto passo, já para o deslocamento nas direções XY o aumento é de 36,36 %do primeiro ao quinto passo. A incerteza associada as medições, figura 4,42: na direção X sofre um aumento de 12,0 % do primeiro ao segundo passo, um novo aumento do segundo ao quarto de 1,12 % e uma redução do quarto ao quinto de 0,56 %, nas direções XY inicialmente tem se uma redução de 3,29 % do primeiro ao terceiro passo e um aumento do mesmo patamar do terceiro ao quinto.

4.3.3 PEÇA DE NYLON BRANCO

Nesta seção são apresentados os resultados (tabelas 4.12 e 4.13) e análises das comparações digitalizações/modelo CAD para a peça de nylon branco, figuras 4.45, 4.46 e 4.47.

Tabela 4. 12 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de nylon branco.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9210	0,824	-0,050	0,092	0,156
2	9347	0,827	-0,050	0,092	0,157
3	9359	0,808	-0,051	0,092	0,158
4	9333	0,822	-0,051	0,092	0,158
5	9264	0,808	-0,050	0,091	0,157

Tabela 4. 13 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de nylon branco.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9691	1,249	-0,249	0,099	0,166
2	9848	1,713	-0,056	0,101	0,171
3	9856	2,415	-0,050	0,101	0,174
4	10126	2,419	-0,050	0,102	0,176
5	10160	2,438	-0,050	0,103	0,177

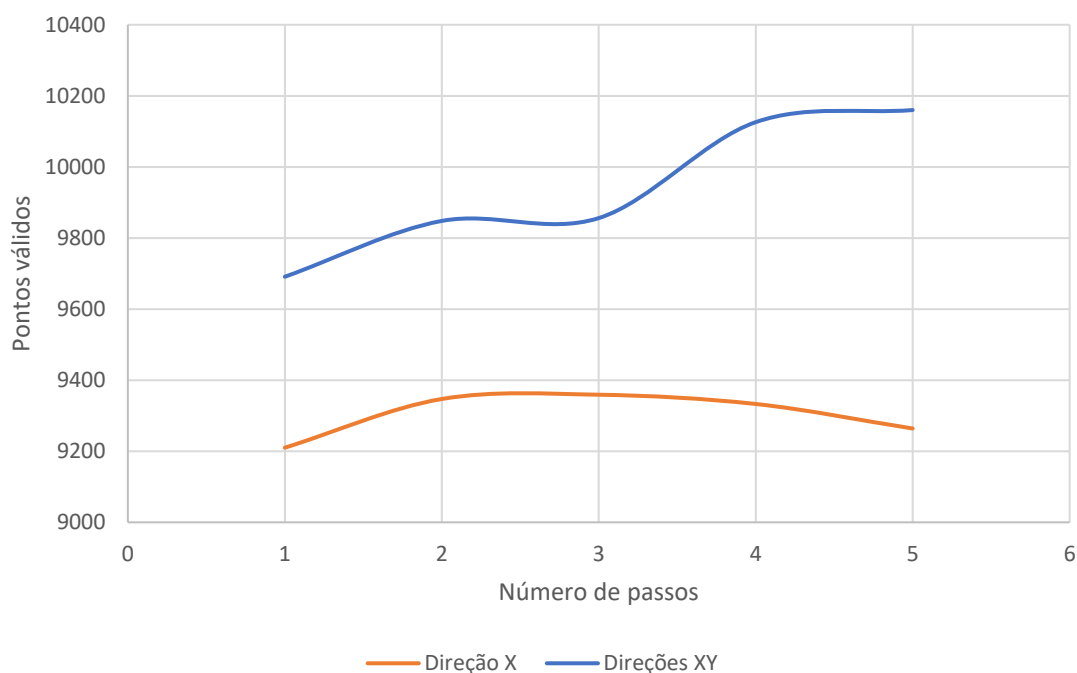


Figura 4. 44 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de nylon branco.

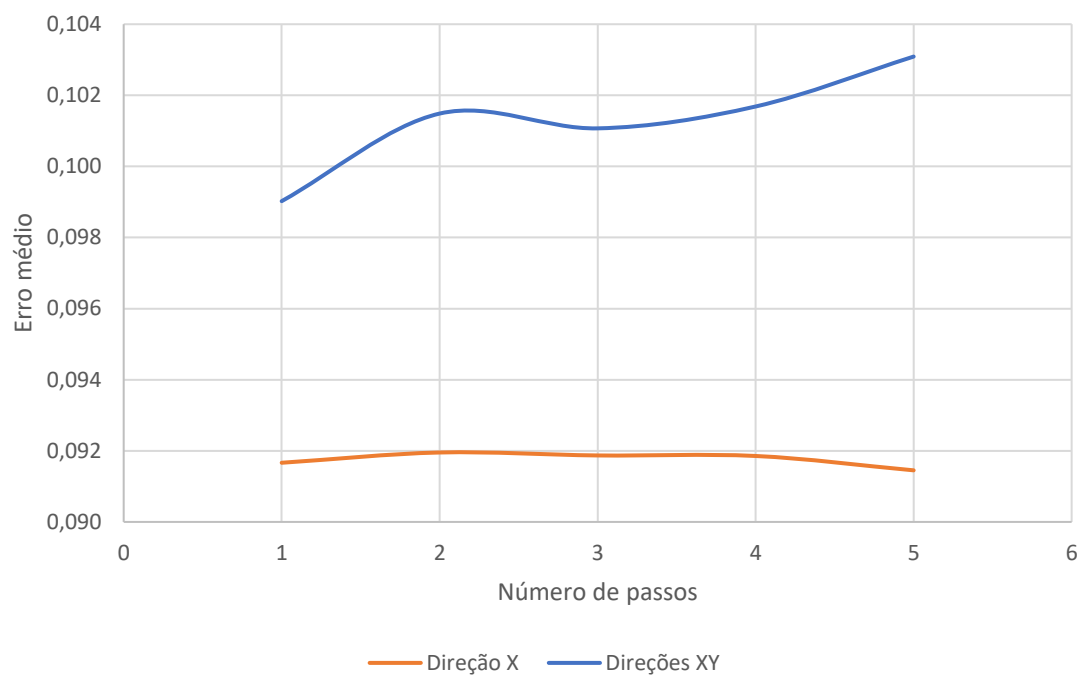


Figura 4. 45 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de nylon branco.

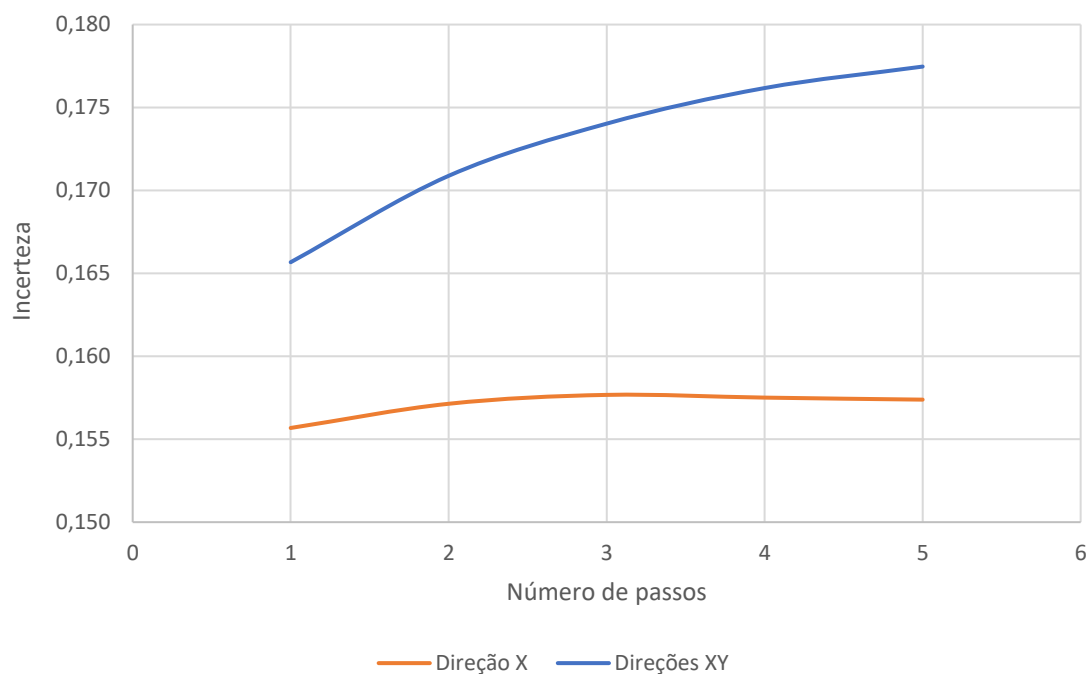


Figura 4. 46 - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de nylon branco.

Do gráfico números de pontos válidos por número de passos na peça de nylon branco, figuras 4.43, se observa um aumento de 4,61 % do número pontos validos em função do número de passes no deslocamento do sensor nas direções XY enquanto que na direção X tem se um aumento de 1,59 % até o terceiro passo e posteriormente uma redução de 0,58 % do terceiro ao quinto passo.

Já no que tange ao erro, figura 4.44, observa se aumento de 3,88 % do primeiro ao quinto passo no deslocamento nas direções XY, na direção X tem se uma redução de 1,08 % do primeiro ao quinto passo. Nas incertezas associadas as medições na peça de nylon branco, figura 4.45, para o deslocamento nas direções XY tem se um aumento de 6,21 % do primeiro ao quinto passo, para o deslocamento na direção X aumento de 1,26 % do primeiro ao terceiro passo e redução de 0,63 5% do terceiro ao quinto.

4.3.4 PEÇA DE NYLON PRETO

Nesta seção são apresentados os resultados (tabelas 4.14 e 4.15) e análises das comparações digitalizações/modelo CAD para a peça de alumínio, figuras 4.48, 4.49 e 4.50.

Tabela 4. 14 - Resultados do deslocamento do sensor na direção X para peça de nylon preto.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9380	1,612	-0,050	0,189	0,258
2	9405	1,612	-0,054	0,189	0,258
3	9415	1,568	-0,050	0,190	0,258
4	9424	1,612	-0,050	0,188	0,258
5	9407	1,612	-0,050	0,187	0,258

Tabela 4. 15 - Resultados do deslocamento do sensor nas direções X e Y para peça de nylon preto.

Número de passos	Número de pontos válidos	Erros (mm)			Sigma (mm)
		Máximo	Mínimo	Médio	
1	9865	1,568	-0,050	0,204	0,269
2	9959	1,735	-0,050	0,202	0,268
3	10017	1,829	-0,054	0,200	0,268
4	10167	1,855	-0,052	0,205	0,273
5	10197	2,118	-0,057	0,204	0,273

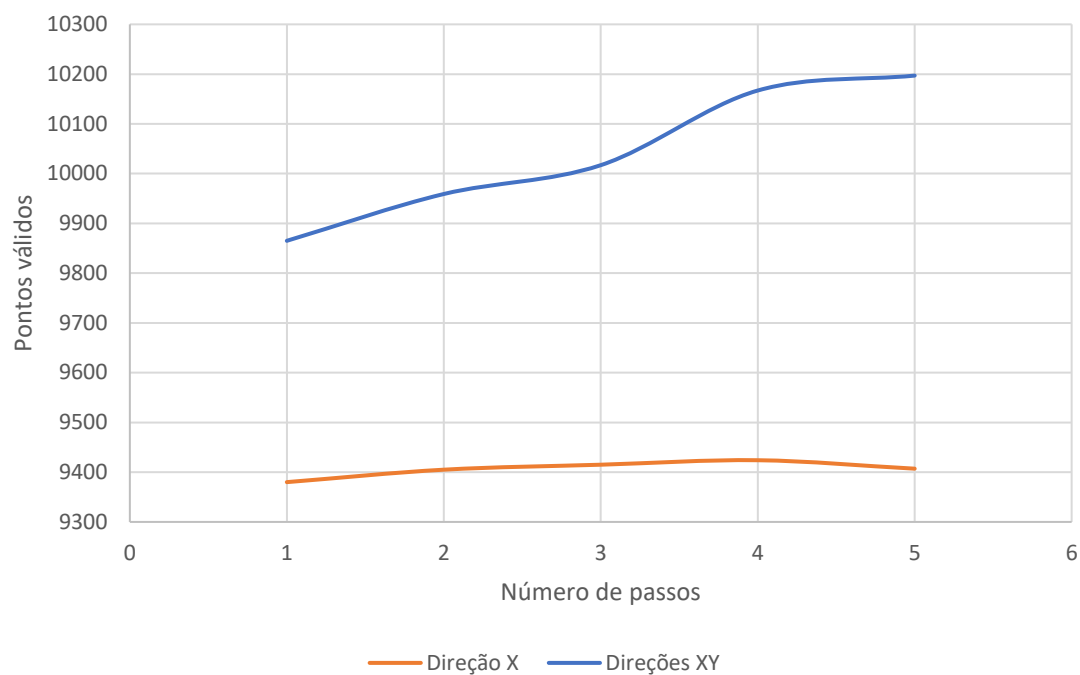


Figura 4. 47 - Número de pontos válidos por número de passos na peça de nylon preto.

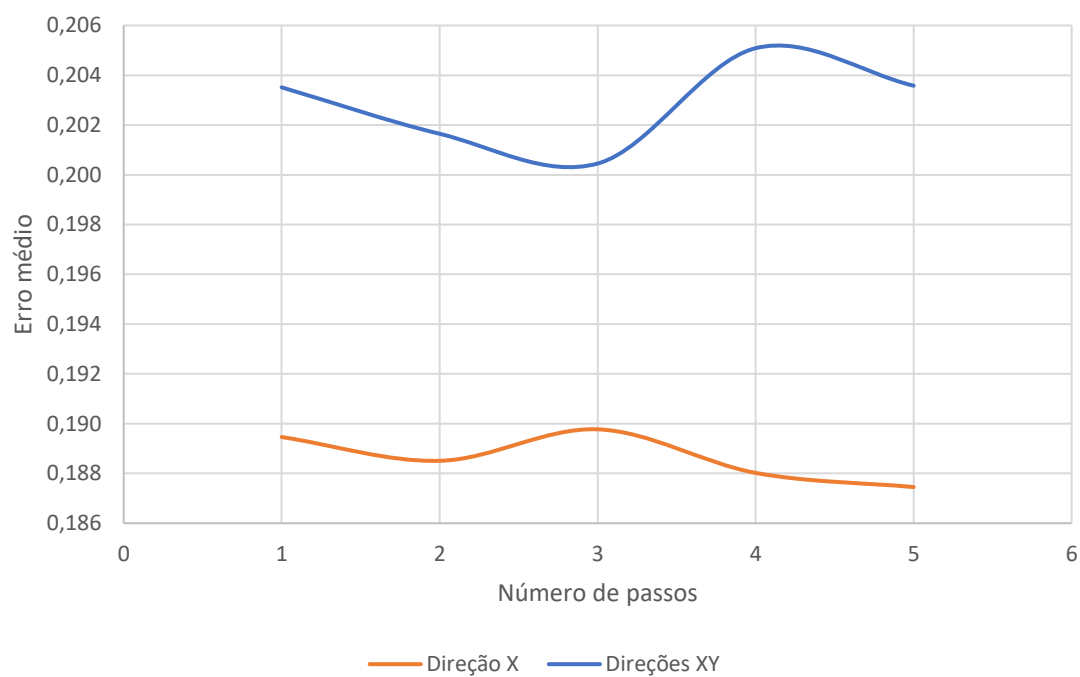


Figura 4. 48 - Influência do número de passos no erro médio medida na peça de nylon preto.

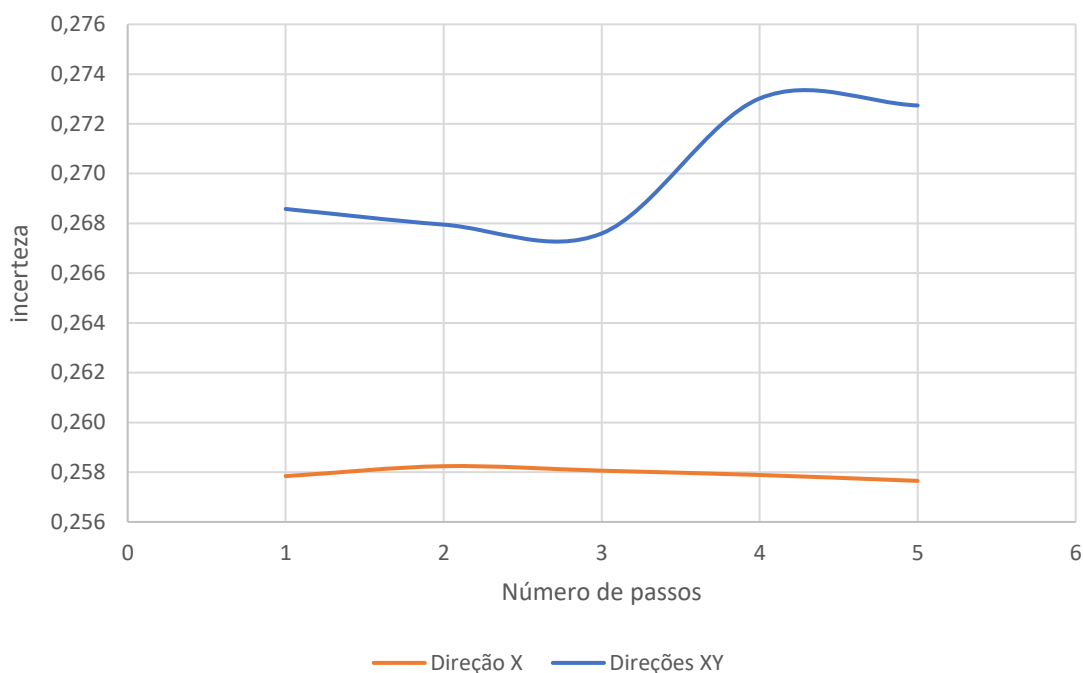


Figura 4. 49 - - Influência do número de passos na incerteza medida na peça de nylon preto.

Do gráfico números de pontos válidos por número de passos na peça de nylon preto, figuras 4.46, se observa um aumento de 3,25 % do número pontos validos em função do número de passes no deslocamento do sensor nas direções XY enquanto que na direção X tem se um pequeno aumento de 0,46 % até o quarto passo e posteriormente uma redução de 0,48 % do quarto ao quinto passo.

Já o erro, figura 4.38, no deslocamento do sensor nas direções XY uma observa se redução de 1,96 % do primeiro ao terceiro passo, aumento de 2,43 % do terceiro ao quarto e nova redução do quarto passo de 0,49 %, no deslocamento na direção X tem se o aumento de 0,52 % do primeiro ao terceiro ponto e redução do terceiro ao quinto passo de 1,57 %. No gráfico da incerteza das medições na peça de nylon, figura 4.48, observa se a manutenção do mesmo valor (0,258 mm) para os cinco passos para o deslocamento do sensor na direção X e para direções XY redução de 0,37 5 do primeiro ao terceiro passo, o aumento do terceiro ao quarto de 1,83 % e a não alteração do quarto ao quinto ponto.

4.4 INFLUÊNCIA DA COR

Para discutir a influência da cor: no número de pontos válidos, no erro médio e na incerteza fez se uso de duas peças semelhantes, de mesmo material e cores diferentes, branco e preto, e seus modelos CAD. Fazendo uso dos resultados apresentados na seção 4.4 elaborou se as tabelas 4.16, 4.17 e 4.18, respectivamente número de pontos válidos, erro médio e incerteza. Das tabelas foram gerados gráficos comparativos das peças para os três parâmetros.

Tabela 4. 16 – Dados para avaliação da influência da cor no número dos pontos válidos.

Número de passos	Número de pontos válidos			
	Nylon branco		Nylon preto	
	X	XY	X	XY
1	9210	9691	9380	9865
2	9347	9848	9405	9959
3	9359	9856	9415	10017
4	9333	10126	9424	10167
5	9264	10160	9407	10197

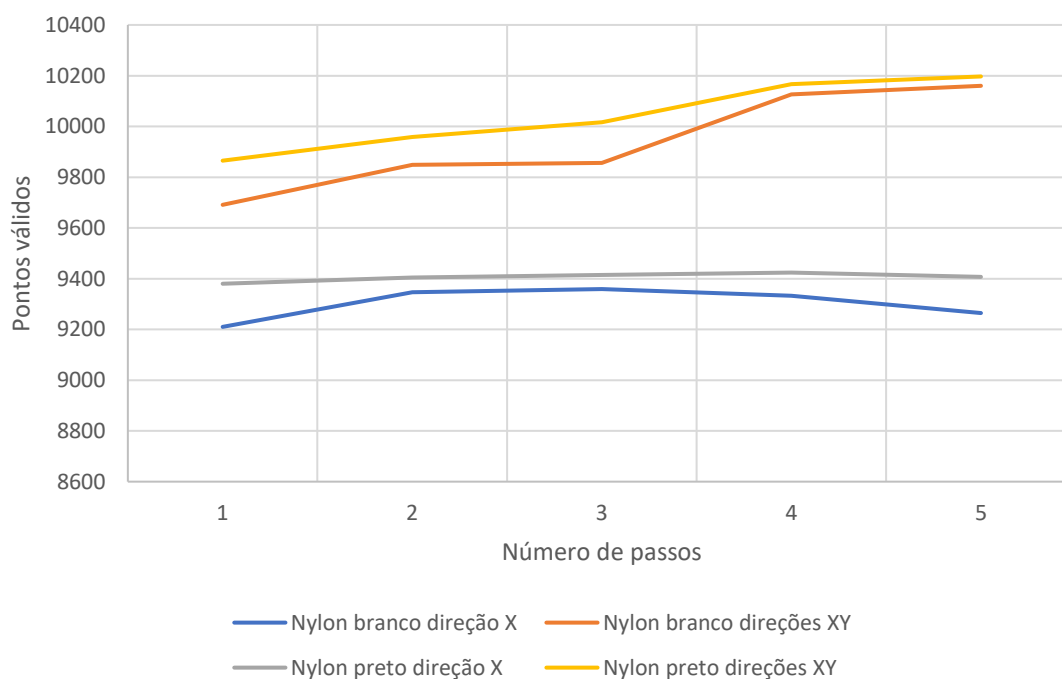


Figura 4. 50 - Comparativo da influência da cor no número de pontos válidos por números de passos.

Do gráfico (figura 4.49) comparativo da influência da cor no número de pontos válidos por números de passos observa-se que a peça de nylon preto apresenta maior quantidade de pontos válidos quando comparadas cada sistemática e que a implementação de passos adicionais, em geral, promove o aumento número de pontos.

Tabela 4. 17 – Dados para avaliação da influência da cor no erro médio.

Número de passos	Erro médio (mm)			
	Nylon branco		Nylon preto	
	X	XY	X	XY
1	0,092	0,099	0,189	0,204
2	0,092	0,101	0,189	0,202
3	0,092	0,101	0,190	0,200
4	0,092	0,102	0,188	0,205
5	0,091	0,103	0,187	0,204

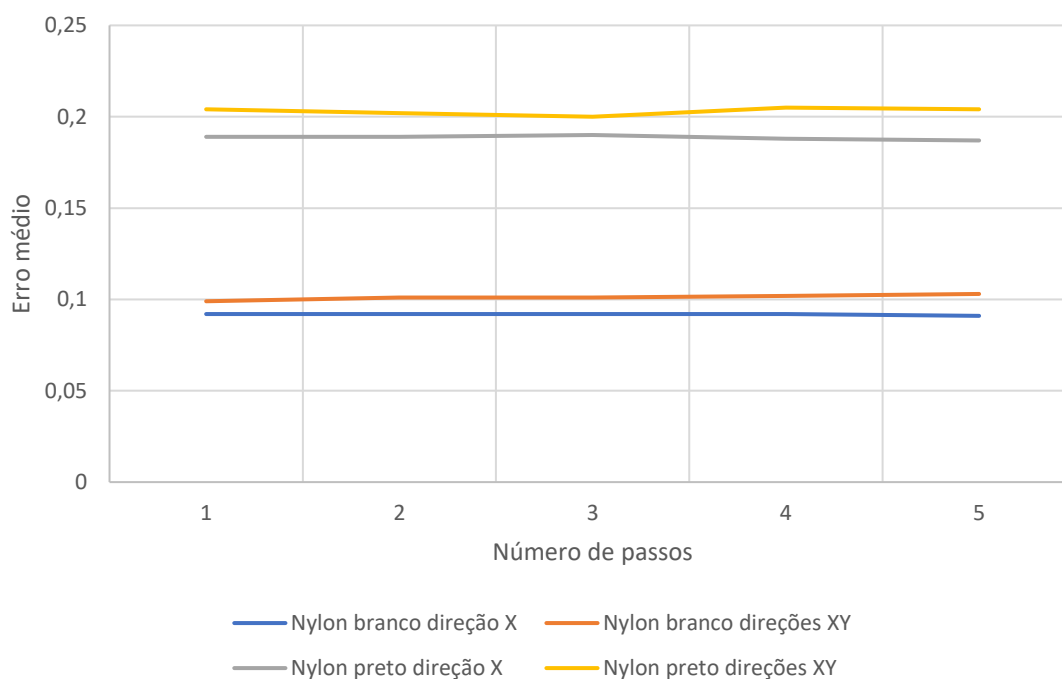


Figura 4. 51 - Comparativo da influência da cor no erro médio por números de passos.

Quando o enfoque é o erro médio decorrente da medição, da comparação (figura 4.50), pode-se dizer que os maiores foram registrados para a peça de nylon preto, revelando que a peça de nylon branco apresenta menor erro médio registrado praticamente inalterado com o incremento de passos.

Tabela 4. 18 - Dados para avaliação da influência da cor na incerteza.

Número de passos	Incerteza (mm)			
	Nylon branco		Nylon preto	
	X	XY	X	XY
1	0,156	0,166	0,258	0,269
2	0,157	0,171	0,258	0,268
3	0,158	0,174	0,258	0,268
4	0,158	0,176	0,258	0,273
5	0,157	0,177	0,258	0,273

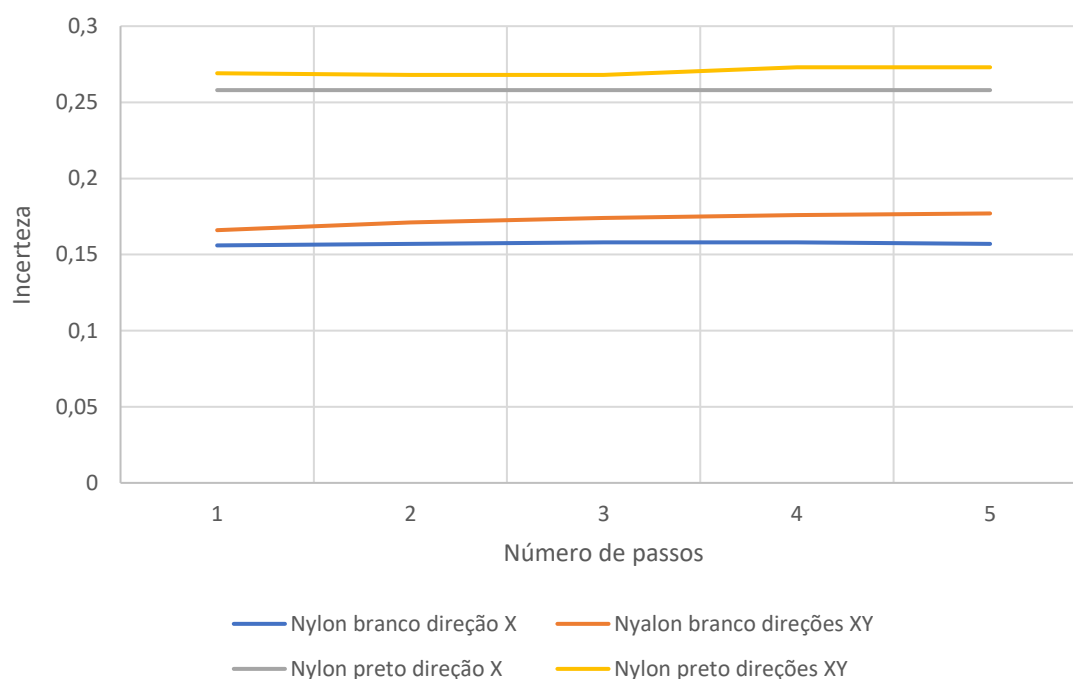


Figura 4. 52 - Comparativo da influência da cor na incerteza por números de passos.

A incerteza da medição representa a possível dispersão da medição, no estudo da influência da cor observou-se (figura 4.51) que a peça manufaturada em nylon branco apresenta os menores valores de dispersão, sendo que na digitalização onde o sensor se desloca na direção X é a melhor condição.

4.5 INFLUÊNCIA DO MATERIAL

Para discutir a influência do material: no número de pontos válidos, no erro médio e na incerteza fez se uso de três peças semelhantes, de materiais diferentes: alumínio, madeira e nylon, e seus modelos CAD. Fazendo uso dos resultados apresentados na seção 4.4 elaborou se as tabelas 4.19, 4.20 e 4.21, respectivamente número de pontos válidos, erro médio e incerteza. Das tabelas foram gerados gráficos comparativos das peças para os três parâmetros.

Tabela 4. 19 - Dados para avaliação da influência do material no número dos pontos válidos.

Número de passos	Número de pontos válidos					
	Alumínio		Madeira		Nylon branco	
	X	XY	X	XY	X	XY
1	9459	9915	9391	9952	9210	9691
2	9486	9930	9433	9964	9347	9848
3	9513	10039	9464	10040	9359	9856
4	9465	10191	9404	10227	9333	10126
5	9459	10225	9377	10306	9264	10160

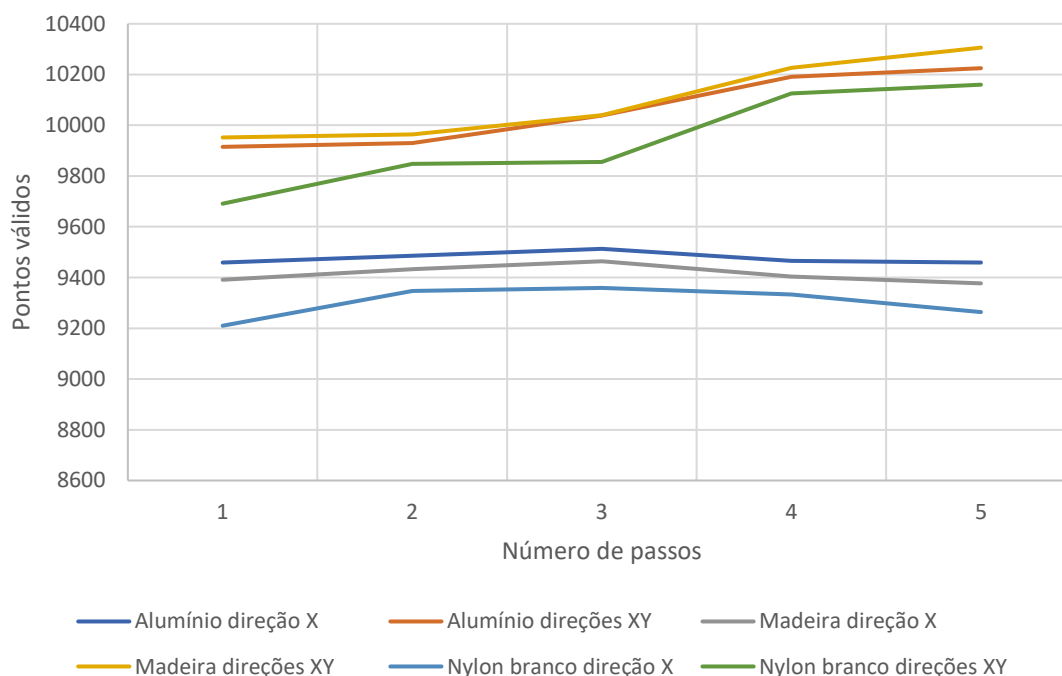


Figura 4. 53 - Comparativo da influência do material no número de pontos válidos por números de passos.

Do gráfico (figura 4.52) comparativo da influência do material no número de pontos válidos por números de passos observa-se que a peça confeccionada em madeira apresenta maior quantidade de pontos válidos quando aplicada a sistemática do deslocamento do sensor combinado nas direções XY, o incremento do número de passos eleva a quantidade de pontos válidos.

Tabela 4. 20 - Dados para avaliação da influência do material no erro médio.

Número de passos	Erro médio (mm)					
	Alumínio		Madeira		Nylon branco	
	X	XY	X	XY	X	XY
1	0,191	0,189	-0,007	0,007	0,092	0,099
2	0,191	0,189	-0,001	0,008	0,092	0,101
3	0,190	0,186	-0,001	0,008	0,092	0,101
4	0,190	0,188	0,000	0,010	0,092	0,102
5	0,190	0,188	0,001	0,011	0,091	0,103

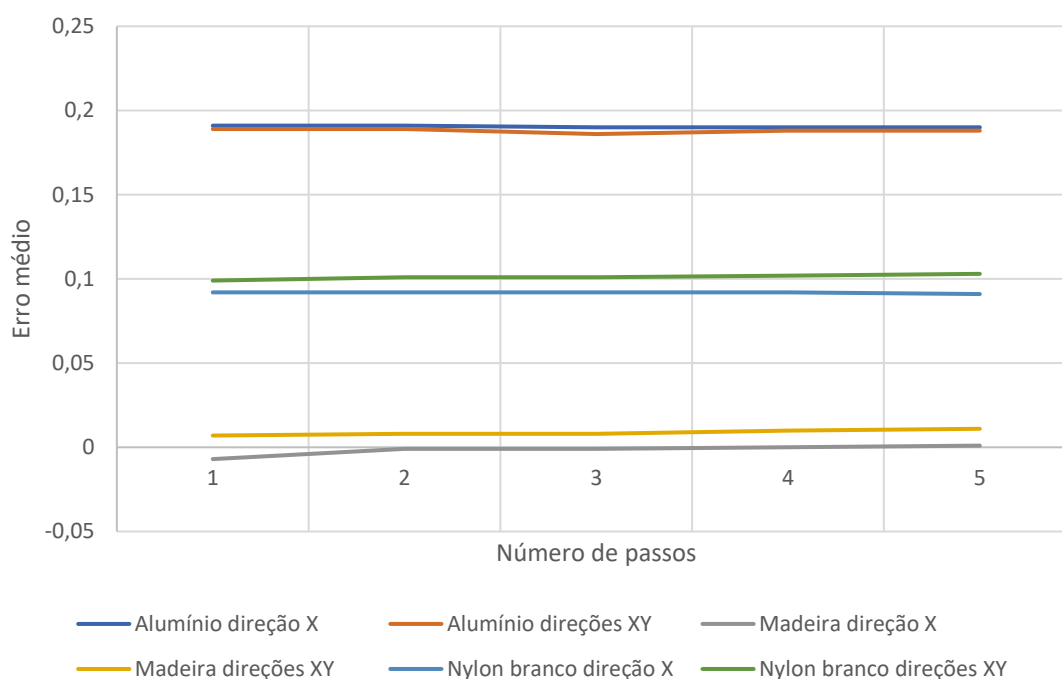


Figura 4. 54 - Comparativo da influência do material no erro médio por números de passos.

Ao avaliar a comparação do erro médio decorrente da medição, (figura 4.53), pode-se dizer que os maiores foram registrados para a peça de alumínio e os menores para a peça de madeira.

Tabela 4. 21 - Dados para avaliação da influência do material na incerteza.

Número de passos	Incerteza (mm)					
	Alumínio		Madeira		Nylon branco	
	X	XY	X	XY	X	XY
1	0,160	0,160	0,154	0,182	0,156	0,166
2	0,160	0,160	0,175	0,179	0,157	0,171
3	0,161	0,161	0,176	0,176	0,158	0,174
4	0,160	0,161	0,177	0,181	0,158	0,176
5	0,159	0,161	0,176	0,182	0,157	0,177

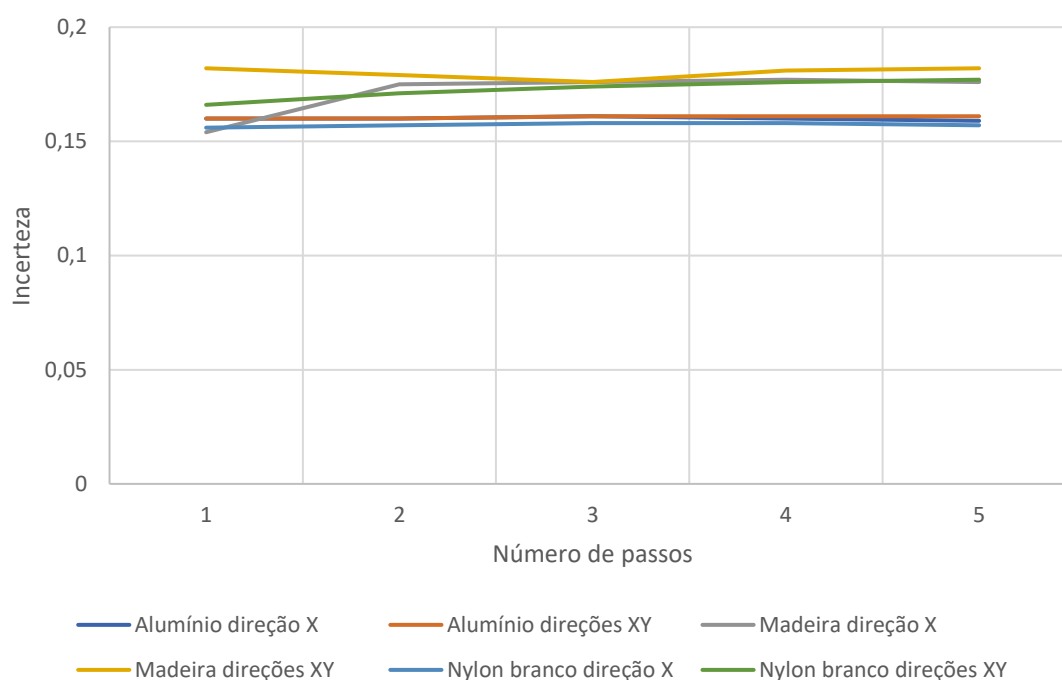


Figura 4. 55 - Comparativo da influência do material na incerteza por números de passos

A incerteza da medição representa a possível dispersão da medição, no estudo da influência do material (figura 4.54) se observou que a peça em madeira apresenta os maiores valores (direções XY) os menores valores de dispersão estão relacionados a peça de nylon branco (direção X).

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO FINAL E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS.

5.1 CONCLUSÃO FINAL

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo o desenvolvimento de uma estratégia/metodologia para a determinação e análise da incerteza de MMC, que incorporam sensor a laser, no sentido de contribuir para a rastreabilidade das medições por escaneamento a laser. Com a aplicação da metodologia proposta nesta tese foi possível concluir que:

1- Em relação a geometria:

- 1.1 Independentemente do número de passos e da sistemática aplicada as superfícies a dita simples apresenta maior quantidade de pontos válidos em relação a superfície complexa. Este fato se dá pelas regiões de oclusões inerentes a geometria da superfície complexa em estudo (esfera);
- 1.2 O erro médio apresenta se menor, quando aplicada a superfície complexa;
- 1.3 A incerteza apresenta se menor, quando aplicada a superfície simples com pequenas variações quando comparadas as duas sistemáticas.

2- Em relação a cor:

- 2.1. Quando comparado os resultados observa se que a peça de nylon preto apresenta maior quantidade de pontos válidos quando comparadas cada sistemática e que a implementação

de passos adicionais, em geral, promove o aumento número de pontos;

2.2.O erro médio apresenta se menor, para peça de nylon branco nas duas sistemáticas. Cerca de 50% menor do que os resultados obtidos para peça da cor preta;

2.3.A peça de nylon branco apresenta incerteza menor para as duas sistemáticas aplicadas quando comparadas a peça de nylon preto.

3. Em relação ao material:

3.1 Quando comparado os resultados das três peças observa se em geral o crescimento no número de pontos válidos na aplicação das duas sistemáticas, destacando se a madeira no deslocamento do sensor combinado, direções XY.

3.2 Do erro pode-se registrar que os maiores foram para a peça de alumínio e os menores para a peça de madeira.

3.3 No estudo da influência do material na incerteza observou se que a peça em madeira apresenta os maiores valores (direções XY) os menores valores de dispersão estão relacionados a peça de nylon branco (direção X).

Assim tem se que a aplicação das estratégias e fatores propostos neste documento de tese para o desenvolvimento de uma metodologia de análise da incerteza em MMC com sensor laser revelam a necessidade de padronização de tal avaliação, haja vista a variação dos resultados obtidos em função do número de passos de digitalização e da: geometria, material e cor do artefato.

5.2 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

1. Aplicação da metodologia proposta nesta tese com o objetivo de:
 - 1.1 Criação dos modelos nominais das peças estudadas através de escaneamento por contato e assim fazer uma análise comparativas com os resultados obtidos com o escaneamento a laser;
 - 1.2 Aplicar a proposta desenvolvida para o escaneamento por laser em geometrias de forma livre;
 - 1.3 Avaliar a influência da rugosidade das peças no processo de escaneamento a laser;

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, A. B. (2012). Guia para Expressão da Incerteza de Medição.
- ALBERTAZZI, A. (2008). Fundamentos de metrologia científica e industrial. Barueri, SP: Manole.
- BEŠIĆ, I., GESTEL, N. V., KRUTH, J.-P., BLEYS, P., & HODOLIČ, J. (2011). Accuracy improvement of laser line scanning for feature measurements on CMM. *Optics and Lasers in Engineering*.
- BRITO NETO, A. d. (2003). A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças com Geometria Complexas. Universidade Federal de Santa Catarina.
- CLAVERLEY, J., & LEACH, R. (2014). A review of the existing performance verification infrastructure for micro-CMMs. *Precision Engineering*.
- ELMARAGHY, H., & YANG, X. (2003). Computer-Aided Planning of Laser Scanning of Complex Geometries. *Manufacturing Technology*.
- FERNANDES, L. A. (2005). Estudo de Métodos para Extração de Formas e Realização de Medidas a partir de Imagens. Porto Alegre: UFRS.
- FERREIRA, F. A., OLIVA, J. V., & PEREZ, A. M. (2013). Evaluation of the Performance of Coordinate Measuring Machines in the Industry, Using Calibrated Artefacts. *Procedia Engineering*.
- FERREIRA, J. C., & ALVES, N. F. (2003). Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology. *Journal of Materials Processing Technology*.
- GENTA, G., MINETOLA, P., & BARBATO, G. (2016). Calibration procedure for a laser triangulation scanner with uncertainty evaluation. *Optics and Lasers in Engineering*.
- Geometrical Product Specifications (GPS) – Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM) (International Organisation for Standardisation 2001).
- GESTEL, N. V., CUYPERS, S., BLEYS, P., & KRUTH, J.-P. (2008). A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs.
- GESTEL, N. V., CUYPERS, S., BLEYS, P., & KURTH, J. P. (2009). A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. *Optics and Lasers in Engineering*.
- GONÇALVES FILHO, E. V. (2011). Comando numérico de máquinas ferramentas. São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Mecânica.
- HOCKEN, R. J., & PEREIRA, P. H. (2012). Coordinate Measuring Machines and Systems. *CRC Press Taylor & Francis Group*. New York.

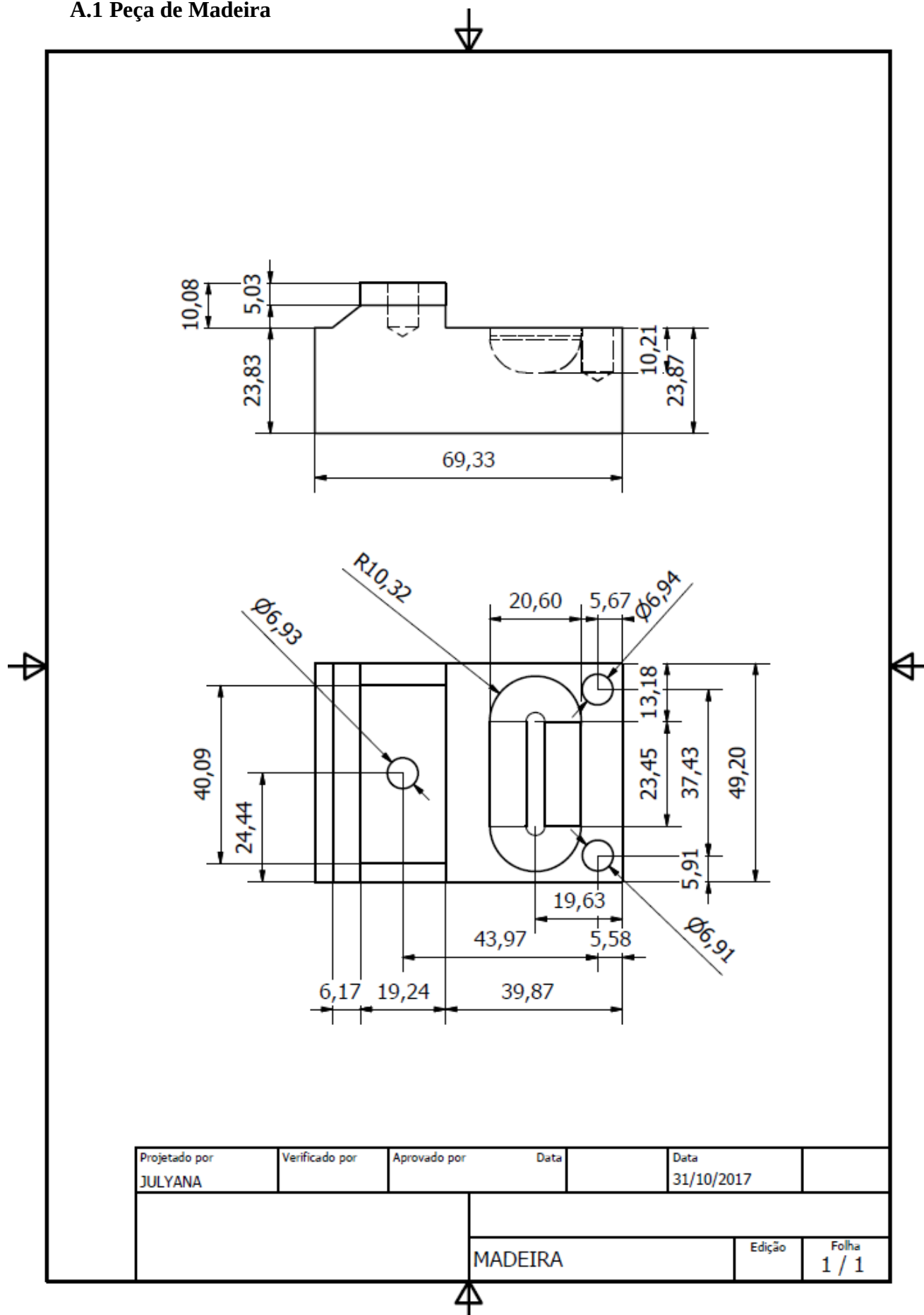
- HOCKEN, R. J., & PERREIRA, P. H. (2012). *Coordinate Measuring Machines and Systems*. CRC Press.
- JATOBÁ, F. (2011). Projeto de graduação planejamento do processo de medição utilizando um scanner 3D.
- JCGM 100:2008. (2008). Evaluation of measurement data- Guide to the expression of uncertainty in measurement:GUM 1995 with minor corrections.
- JIANG, X., & CRIPPS, R. J. (2015). A method of testing position independent geometric errors in rotary axes of a five-axis machine tool using a double ball bar. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*.
- LIMA Jr, J. C. (2007). APLICAÇÃO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA DETERMINAR PARÂMETROS DE GEOMETRIAS SUBSTITUTAS EM MMCs. *Tese de doutorado apresentada na Universidade Federal da Paraíba*.
- LIMA, C. (2006). Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional da superfícies livres em paças de médio e grande porte.
- MARTIN, V. B. (2010). Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear. Rio de Janeiro.
- MURALIKRISHNAN, B., FERRUCCI, M., SAWYER, D., GERNER, G., V, L., BLACKBURN, C., . . . PALMATEER, J. (2015). Volumetric performance evaluation of a laser scanner based on geometric error model. *Precision Engineering*.
- NEROSKY, L. A. (2001). Medição de Formas Livres através da Integração de um Braço de Medição. *Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC*. Florianópolis.
- NÓBREGA, L. H. (2011). “Projeto e Desenvolvimento de um Apalpador Touch Trigger de Baixo Custo para Medição por Coordenadas”. *Dissertação de Mestrado*. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB. João Pessoa, PB, Brasil.
- NÓBREGA, L. H. (2014). DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA COMPUTACIONAL, BASEADO EM NURBS, PARA INSPEÇÃO DO PERFIL EVOLVENTE E SUPERFÍCIE DE DENTES DE ENGRENAGENS CILÍNDRICAS USANDO MMCs. João Pessoa.
- OLIVEIRA, A. L. (2003). *Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade*. *Dissertação de Mestrado*. Florianópolis.
- PAPA, M. C. (2012). Modelo Decisório para Avaliar a Qualidade Geométrica e Dimensional de Superfícies de Forma Livre, 2012.) -. *Tese de doutorado em Engenharia de Produção*. Santa Bárbara D'Oeste: Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba.
- PIRATELLI FILHO, A. (2007). Performance of CAD model recovering method based on CMA measurement and nurbs modeling applied to small free form surfaces. *Revista Ciência & Engenharia*, 16.

- POLO, M. E., & FELICÍSIMO, A. M. (2012). Analysis of Uncertainty and Repeatability of a Low-Cost 3D Laser Scanner. *Sensors*.
- RAMU, P., YAGÜE, J., HOCKEN, R., & MILLER, J. (2010). Development of a parametric model and virtual machine to estimate task specific measurement uncertainty for a five-axis multi-sensor coordinate measuring machine. *Precision Engineering*.
- SANSONI, G., TREBESHI, M., & DOCCHIO, F. (2009). State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors*.
- SANTOS, L. B. (2002). Análise da exatidão volumétrica de máquinas de medição por coordenadas (MMCs).
- SILVA, E. C., SILVA, J. B., LIMA JR, J. C., & ANDREZZA, I. I. (2011). Aplicação de NURBS para Modelagem de Curvas e Superfícies de Formas Livres Utilizando MMCs com Apaladores do Tipo Touch Trigger. Natal.
- SILVA, H. d. (2015). PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA ESTIMAR A INCERTEZA DE MEDIÇÃO NA AVALIAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE POR MEIO DE UMA MMC. *Dissertação*. SANTA BÁRBARA D'OESTE.
- SILVA, J. B., & BURDEKIN, M. (1999). . Application of a Modular Space Frame for Volumetric Accuracy Measurement of Co-ordinate Measuring Machines (CMMs). . *XV-IMEKO Word Congress*.
- SUDATHAM, W., H., M., TAKAHASHI, S., & TAKAMASU, K. (2015). Diagonal in space of coordinate measuring machine verification using an optical-comb pulsed interferometer with a ball-lens target. *Precision Engineering*.
- T.Váray, R. M. (1997). Reverse Engineering of geometric models – an Introduction. *Journal of Computer Aided Design*.
- TALÓN, J. L., MARÍN, R. G., GARCÍA-HERNÁNDEZ, C., BERGES-MURO, L., LÓPEZ-GÓMES, C., M., Z. J., & ORTEGA, J. C. (2013). Generation of Mechanizing Trajectories with a Minimum Number of Points.
- TSUTSUMI, M., TONE, S., KATO, N., & SATO, R. (2013). Enhancement of geometric accuracy of five-axis machining centers based on identification and compensation of geometric deviations. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*.
- VÁRADY, T., MARTIN, R., & COX, J. (1997). Reverse Engineering of geometric models – an Introduction. *Journal of Computer Aided Design*.
- VUKASINOVIC, N., BRACUN, D., MOZINA, J., & DUHOVNIL, J. (2012). A new method for defining the measurement-uncertainty model of CNC laser-triangulation scanner. 58. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.
- VUKASINOVIC, N., RACUN, D., MOZINA, J., & DUHOVNIK, J. (2011). A new method for defining the measurement-uncertainty model of CNC laser-triangulation scanner. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.

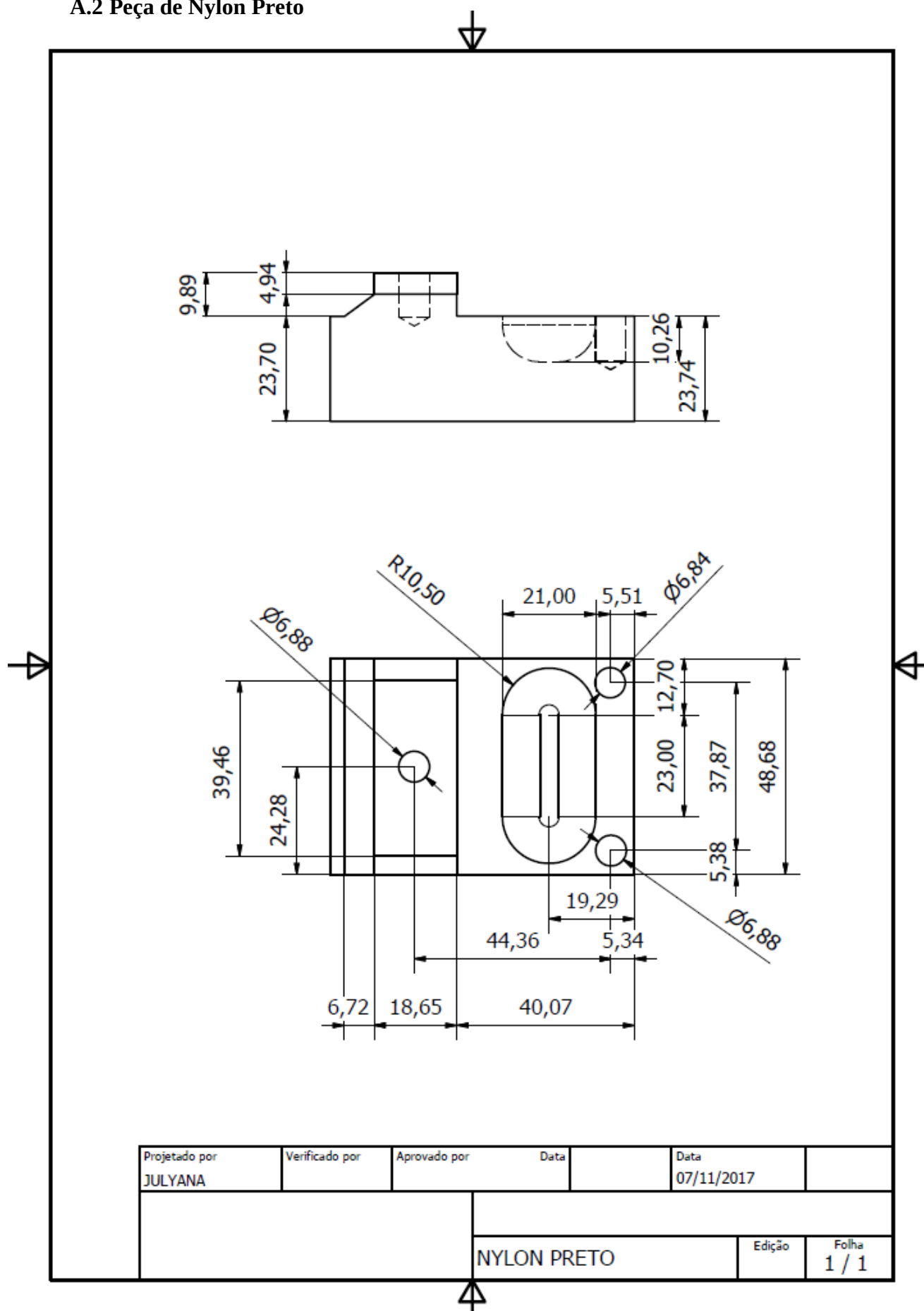
- WANG, W., ZHANG, Y., & YANG, J. (2013). Double Ballbar Measurement for Identifying Kinematic Errors of Rotary Axes on Five-Axis Machine Tools. *Hindawi Publishing Corporation Advances in Mechanical Engineering*.
- XIUZI, Y., HONGZHENG, L., LEI, C., ZHIYANG, C., XIANG, P., & SANYUAN, Z. (2008). Reverse innovative design—an integrated product design methodology. *Computer-Aided Design*, 40.
- ZÚÑIGA, L. D. (2013). Método de verificação do desempenho de scanners laser usando um artefato tridimensional. *Dissertação de Mestrado-Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia*.

ANEXO A

A.1 Peça de Madeira



A.2 Peça de Nylon Preto



A.4 Peça de Alumínio

