

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO PROFISSIONAL
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (PPGPEP)

FERNANDO DAS DORES SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO DIMENSIONAL PARA
PLACAS CERÂMICAS DE GRANDE FORMATO

SÃO CARLOS -SP
[2023]

FERNANDO DAS DORES SILVA

DESENVOLVIMENTO DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO DIMENSIONAL PARA
PLACAS CERÂMICAS DE GRANDE FORMATO

Dissertação de mestrado profissional apresentada ao Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção, ao Departamento de Engenharia de Produção – DEP da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Dr. Pedro Carlos Oprime
Coorientador: Dr. Juliano Endrigo Sordan

São Carlos-SP
[2023]

FICHA CATALOGRÁFICA

Dores Silva, Fernando das

Desenvolvimento de um processo de medição dimensionais para placas cerâmicas de grande formato / Fernando das Dores Silva - 2023.
110f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de São Carlos, campus São Carlos, São Carlos

Orientador (a): Pedro Carlos Oprime

Banca Examinadora: Pedro Carlos Oprime, Juliano Endrigo Sordan, Eduardo Quinteiro

Bibliografia

1. Análise de sistema de medição. 2. Medição por coordenadas. 3. Placas cerâmicas de grande formato. I. Silva, Fernando das Dores. II. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Engenharia de Produção
Programa de Pós-Graduação Profissional em Engenharia de Produção

Folha de aprovação

Assinatura dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Mestrado do candidato Fernando das Dores Silva, realizada em 01/12/2023:

Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime
Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Campus São Carlos

Prof. Dr. Juliano Endrigo Sordan
Faculdade de Tecnologia (FATEC), Campus Sertãozinho.

Prof. Dr. Eduardo Quinteiro
Universidade Federal de São Paulo (UNIFESP), Campus São José dos Campos.

Dedico esta dissertação de mestrado ao meu filho, minha esposa, meus irmãos e familiares. Em especial, dedico a memória dos meus pais, que foram exemplos de virtudes ensinadas e praticadas ao longo da minha vida.

AGRADECIMENTO

Antes de tudo, sou grato a Deus pela minha saúde, minha família amorosa e pelos amigos que estiveram ao meu lado em todos os momentos desta jornada.

Quero expressar minha gratidão aos meus pais, que mesmo não estando presentes, são a base do meu ser. Agradeço especialmente à minha esposa Priscila, por seu apoio incondicional. Meus irmãos Carla, Camila e Felipe sempre estiveram ao meu lado, me apoiando. E um agradecimento especial ao meu filho Isaac, que dá sentido a tudo o que faço.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Dr. Pedro Carlos Oprime, e ao meu coorientador, Dr. Juliano Endrigo Jordan. Sua manifestação de apoio, disponibilidade e aconselhamento foram fundamentais para a qualidade desta pesquisa. Agradeço também pela amizade construída nesse processo.

O Centro Cerâmico do Brasil (CCB) foi fundamental no desenvolvimento deste trabalho, investindo em projetos para melhorar a qualidade dos produtos cerâmicos. Agradeço à equipe do LabCCB, especialmente ao Johnny Henrique e a Juliana Bonfim, pelo suporte essencial desde a preparação das amostras até os ensaios.

Não posso deixar de agradecer às empresas Eliane, Incepa, Majopar, Embramac, Nova Porcelanato, Formigrês e Portobello, que generosamente doaram materiais e/ou contribuíram tecnicamente para o desenvolvimento deste estudo.

Ao departamento de engenharia de produção da escola de engenharia de São Carlos, agradeço aos professores, funcionários e colegas.

Agradeço às associações ANFACER e ASPACER por seu apoio financeiro na aquisição do braço tridimensional essencial para esta pesquisa.

A todos vocês, meu mais sincero agradecimento. Sem o apoio, a contribuição e o suporte de cada um, esta dissertação não teria sido possível. Vocês fazem parte do meu percurso acadêmico e pessoal, e serei eternamente grato(a) por isso.

RESUMO

No mercado de revestimentos cerâmicos brasileiro, placas cerâmicas de grande formato têm se destacado. Em 2019, o país foi o terceiro maior produtor global, segundo em consumo e o sétimo em exportação. O crescimento na produção de placas de grande formato é resultado do avanço tecnológico na conformação, viabilizando formatos maiores e mais diversificados. Entretanto o método de medição dimensional (ISO 10545-2), permaneceu desatualizados desde a década de 90, tornando-se inadequado para as exigências de alta qualidade e precisão das placas atuais. Para abordar essa lacuna, esta dissertação propôs um Sistema de Medição por Coordenadas (SMC) medindo a peça inclinada a 83° como alternativa ao Sistema de Medição Atual (SMA). O objetivo principal da pesquisa foi desenvolver uma metodologia de ensaio que permitisse medir as características dimensionais das placas cerâmicas de grande formato com repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) compatíveis com o método atual, eliminando a deformação planar. Os resultados indicaram que várias variáveis, como formato, espessura e tipologia das placas, afetam a deformação elástica. O formato registrou uma variação de até 1,42 mm na maior dimensão, a espessura de 0,8 mm nas placas finas, e a tipologia influenciou com 0,77 mm na Bllb. Além disso, observou-se uma interação significativa entre essas variáveis, especialmente em tamanhos maiores. No processo de desenvolvimento do método, o Braço de Medição Tridimensional (BMT) foi selecionado devido à sua relação custo-benefício. O programa criado possibilitou reproduzir medições sem a rotação manual das peças, e o painel inclinado com estrutura robusta e pinos de apoio eliminou a deformação elástica das placas. Os resultados de R&R entre o SMA e o SMC demonstraram amplitudes médias variando de 0,013 mm a 0,075 mm, com desvios padrões de 0,062 mm a 0,114 mm, todos abaixo da resolução exigida pela norma. Para atributos específicos das placas, como tamanho e retitude lateral, os resultados foram 22% e 24% menores que o limite especificado de 30%. Os desvios em características como ortogonalidade, empeno, curvatura central e lateral também permaneceram abaixo do limite de 20%, com valores de 17%, 16%, 9% e 14%, respectivamente. A repetitividade das características ficou entre 7% e 9%, abaixo de 10%, e não foram observados desvios sistemáticos de estabilidade e tendência no SMC, enquanto o SMA apresentou alguns desvios de tendência insignificantes. Esses resultados destacam a compatibilidade dos sistemas de medição e sua capacidade de fornecer medições precisas e conformes às normas, garantindo o controle eficaz das variações dimensionais. Os resultados indicam que o SMC é uma alternativa viável ao SMA para medir as características dimensionais das placas cerâmicas de grande formato com precisão e conformidade às normas. De modo que ambos os métodos em conjunto atendem às demandas do mercado para diferentes tamanhos de placas cerâmicas e garantem um controle eficaz das variações dimensionais. Cabe ressaltar que os métodos podem ser utilizados em conjunto, sendo que o SMA adequado para peças com comprimento de até 60 cm e o SMC pode ser utilizado para peças menores, porém em termos de custo-benefício é recomendado para peças maiores.

Palavras-chave: placas cerâmicas; análise de sistema de medição (MSA); repetitividade e reprodutibilidade (R&R); medição por coordenadas; controle de qualidade.

ABSTRACT

In the Brazilian ceramic tile market, large-format ceramic tiles have gained prominence. In 2019, the country ranked as the third-largest global producer, second in consumption, and seventh in exports. The growth in large-format tile production is a result of technological advancements in conformation, enabling the creation of larger and more diverse formats. Despite technological advances in ceramic tile production, the dimensional measurement method (ISO 10545-2) has remained unchanged since the 1990s, becoming unsuitable for the high-quality and precision requirements of modern tiles. To address this gap, this dissertation proposed a Coordinate Measurement System (CMS) that measures the tile at an 83° incline as an alternative to the Current Measurement System (CuMS). The main objective of the research was to develop a testing methodology that would allow for the measurement of the dimensional characteristics of large-format ceramic tiles with repeatability and reproducibility (R&R) compatible with the current method and eliminating planar deformation. The results indicated that several variables, such as format, thickness, and typology of the tiles, affect elastic deformation. The format showed a variation of up to 1.42 mm in the largest dimension, thickness varied by 0.8 mm in thin tiles, and typology influenced by 0.77 mm in B11b. Furthermore, a significant interaction was observed between these variables, especially in larger sizes. In the method development process, the Three-Dimensional Measurement Arm (TMA) was chosen due to its cost-effectiveness. The developed program allowed for measurements to be replicated without the need for manual rotation of the tiles, and the inclined panel with a robust structure and support pins eliminated elastic deformation. The R&R results between the CuMS and the CMS demonstrated average amplitude ranging from 0.013 mm to 0.075 mm, with standard deviations ranging from 0.062 mm to 0.114 mm, all below the resolution required by the standard. For specific tile attributes, such as size and lateral straightness, the results were 22% and 24% better than the specified limit of 30%. Deviations in characteristics such as orthogonality, warpage, central and lateral curvature also remained below the 20% limit, with values of 17%, 16%, 9%, and 14%, respectively. The repeatability of the characteristics ranged from 7% to 9%, below 10%, and no systematic deviations from stability and trend were observed in the SMC, while the CuMS exhibited some insignificant trend deviations. These results highlight the compatibility of the measurement systems and their ability to provide precise and standards-compliant measurements, ensuring effective control of dimensional variations. The results indicate that CMS is a viable alternative to CuMS for accurately measuring the dimensional characteristics of large-format ceramic tiles in compliance with standards. Thus, both methods together meet market demands for different sizes of ceramic tiles and ensure effective control of dimensional variations. It is worth noting that these methods can be used in conjunction, with CuMS suitable for pieces up to 60 cm in length, and CMS can be used for smaller pieces, but in terms of cost-effectiveness, it is recommended for larger sizes.

Keyword: ceramic tiles; measurement system analysis (MSA); repeatability and reproducibility (R&R); coordinate measurement; quality control.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Régua-côvado egípcia exposta no Museu Egípcio de Turim, Itália	21
Figura 2 – Variabilidade do sistema de medição – Diagrama de causa e efeito	25
Figura 3 - Correlação entre exatidão e precisão	27
Figura 4 – Representação do desvio de estabilidade	30
Figura 5 - Carta de médias (A – superposta; B – não superposta)	38
Figura 6 – Gráfico sequencial	39
Figura 7 - Processo de fabricação de placas cerâmicas prensadas	44
Figura 8 - Processo de fabricação de placas cerâmicas prensadas	45
Figura 9 – Defeitos reconhecidos pelo planar (SYSTEM)	46
Figura 10 - Defeitos dimensionais	47
Figura 11 - Dataplucômetro (Dispositivo de medição atual)	48
Figura 12 - Estrutura do estudo	53
Figura 13 - fluxograma de trabalho	54
Figura 14 - Variáveis de entrada	54
Figura 15 – Segundo modelo do painel vertical	55
Figura 16 - Painel de apoio laboratório espanhol	57
Figura 17 - Gráficos Desvios Padrões (DP)	62
Figura 18 - Deformação das placas sobre Tipologia formato e espessura	63
Figura 19 - Mapa de cores para placas (30x30) cm	65
Figura 20 - Mapa de cores para placas (40x40) cm	65
Figura 21 - Mapa de cores para placas (50x50) cm	66
Figura 22 - Mapa de cores para placas (60x60) cm	66
Figura 23 - Evolução do sistema do painel de apoio	69
Figura 24 - Carta \bar{X} -R do tamanho	72
Figura 25 - Carta \bar{X} -R da Retitude Lateral	73
Figura 26 - Carta \bar{X} -R da Ortogonalidade	74
Figura 27 - Carta \bar{X} -R da Curvatura Central	75
Figura 28 - Carta \bar{X} -R da Curvatura Lateral	75
Figura 29 - Carta \bar{X} -R da Empeno	76
Figura 30 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Tamanho	79
Figura 31 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Retitude lateral	80
Figura 32 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Ortogonalidade	82
Figura 33 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Curvatura Central	84
Figura 34 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Curvatura Lateral	85
Figura 35 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Empeno	87
Figura 36 - Esquema Dataplucômetro	99
Figura 37 - Esquema para marcação das peças	101
Figura 38 – Diagrama de causa e efeito baseado no modelo de erro S.W.I.P.E.	107
Figura 39 - Pontos de coleta	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Unidades base do S.I	22
Tabela 2 - Prefixos do SI	22
Tabela 3 – Constantes	31
Tabela 4 – Exemplo de tabela ANOVA	39
Tabela 5 – Equações para determinação dos desvios padrões	40
Tabela 6 - Resumo das tolerâncias de produtos prensados	49
Tabela 7 - Resumo das tolerâncias de pastilhas	49
Tabela 8 - Resumo das tolerâncias de produtos extrudados	50
Tabela 9 - Variáveis consideradas na análise da deformação	55
Tabela 10 - Planejamento Fatorial Multinível L16	57
Tabela 11 - limite de aceitação %RR	59
Tabela 12 - Planejamento Fatorial Multinível L16 e resultados	61
Tabela 13 - Resultados ANOVA - Deformação	63
Tabela 14 – Teste de Tukey	64
Tabela 15 - Análise do estudo de tendência – SMC	70
Tabela 16 - Análise do estudo de tendência –SCA	71
Tabela 17 - Resumo do estudo comparativo	77
Tabela 18 - ANOVA com 2 fatores com interação – Tamanho	78
Tabela 19 - Avaliação das medições – Tamanho das placas em mm	78
Tabela 20 - ANOVA com 2 fatores com interação – Retitude lateral	80
Tabela 21 - Avaliação das medições – Retitude lateral	80
Tabela 22 - ANOVA com 2 fatores com interação – Ortogonalidade	81
Tabela 23 - Avaliação das medições – Ortogonalidade	81
Tabela 24 - ANOVA com 2 fatores com interação – Curvatura Central	83
Tabela 25 - Avaliação das medições – Curvatura Central	83
Tabela 26 - ANOVA com 2 fatores com interação – Curvatura Lateral	84
Tabela 27 - Avaliação das medições – Curvatura Lateral	85
Tabela 28 - ANOVA com 2 fatores com interação – Empeno	86
Tabela 29 - Avaliação das medições – Empeno	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos
ANOVA	Análise de Variância
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
BMT	Braço de Medição Tridimensional
CCB	Centro Cerâmico do Brasil
DMAIC	<i>Define, Measure, Analyze, Improve and Control</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
GL	Graus de Liberdade
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
IoT	<i>Internet of Things</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LIC	Limites Inferior de Controle
LSC	Limites Superior de Controle
MMC	Máquinas de Medição por Coordenadas
MSA	<i>Measurement System Analysis</i>
NBR	Norma Brasileira
NDC	Número de Categorias Distintas
PBQP-H	Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat
PIB	Produto interno bruto
PSQ	Programa Setorial da Qualidade
QM	Quadrado Médio
R&R	Repetibilidade e Reprodutibilidade
Repe.	Repetitividade
Repro.	Reprodutibilidade
SI	Sistema Internacional de Unidades
SM	Sistema de Medição
SMA	Sistema de Medição Atual
SMC	Sistema de Medição por Coordenadas
SQ	Soma dos Quadrados
VE	Variabilidade do equipamento (repetibilidade)
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
VP	Varição da Peça
VR	Valor de Referência
VT	Varição total.

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
A	Ampere
Bla	Placas cerâmicas prensada com absorção entre 0% e 0,5%, porcelanato.
Bllb	Placas cerâmicas prensada com absorção entre 6% e 10%, semi-poroso.
cd	Candela
cm	Centímetro
I, i	Corrente elétrica
Iv	Intensidade luminosa
K	Kelvin
kg	Quilograma
l, x, r	Comprimento
m	Massa
m	Metro
mm	Milímetro
mol	Mol
n	Quantidade de substância
R	Amplitude
\bar{R}	Média das amplitudes
s	Segundo
T	Temperatura termodinâmica
t	Tempo
\bar{X}	Média
$\bar{\bar{X}}$	Média das médias
σ	Desvio padrão
σ_{repe}	Desvio padrão da repetitividade
σ_{repro}	Desvio padrão da reprodutibilidade
σ_b	Incerteza da tendência
H_0	Hipótese nula
H_1	Hipótese alternativa
α	Nível de significância
\bar{y}	Média das tendências
Tip	Tipologia
E	Espessura
F	Formato

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA	17
1.2	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	METROLOGIA	20
2.1.1	Contexto histórico da metrologia	20
2.1.2	Sistema internacional de unidades (SI)	21
2.1.3	Futuro da metrologia e indústria 4.0	23
2.2	SISTEMA DE MEDIÇÃO	24
2.2.1	Variabilidade do sistema de medição e seus componentes	25
2.2.1.1	Erro de medição: exatidão e precisão	26
2.2.2	Análise do sistema de medição (MSA)	27
2.2.2.1	Estabilidade	29
2.2.2.2	Tendência	31
2.2.2.3	Linearidade	33
2.2.2.4	Repetitividade e reprodutibilidade (R&R)	36
2.2.3	Sistema de medições dimensionais	41
2.2.3.1	Máquinas de medição por coordenadas (MMC)	42
2.3	PLACAS CERÂMICAS	43
2.3.1	Mercado nacional de placas cerâmicas: normas e qualidade	43
2.3.2	Processo de produção e influência nas características dimensionais	45
2.3.3	Características dimensionais	47
2.3.4	Métodos alternativos	50
3	MÉTODO DE PESQUISA	52
3.1	PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	53
3.1.1	Identificar o início da deformação	54
3.1.2	Desenvolvimento do método 3D e análise da compatibilidade	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A DEFORMAÇÃO DAS PLACAS CERÂMICAS	60
4.1.1	Análise do efeito da tipologia, formato e espessura na variabilidade	61
4.1.2	Análise do efeito da tipologia, formato e espessura na deformação	62
4.1.3	Análise de deformação por imagem	64
4.2	DESENVOLVIMENTO DO SMC E ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE	67
4.2.1	Desenvolvimento do SMC	67
4.2.2	Estudo de tendência	70
4.2.3	Estudo de estabilidade	71
4.2.4	Análise da compatibilidade dos SMA e SMC	76
4.2.4.1	Análise da compatibilidade – Tamanho	78
4.2.4.2	Análise da compatibilidade – Retitude lateral	79
4.2.4.3	Análise da compatibilidade – Ortogonalidade	81
4.2.4.4	Análise da compatibilidade – Curvatura Central	82
4.2.4.5	Análise da compatibilidade – Curvatura Lateral	84
4.2.4.6	Análise da compatibilidade – Empeno	86
5	CONCLUSÕES	88

REFERÊNCIAS	92
APÊNDICE A – Procedimento de medição dataplucômetro	99
APÊNDICE B – Procedimento de medição primeira etapa	101
APÊNDICE C – Checklist de desenvolvimento do SMC	103
APÊNDICE D – Programa de medição do SMC	108

1 INTRODUÇÃO

O Brasil tem relevância no mercado global de revestimentos cerâmicos, ocupando a terceira posição como maior produtor, atrás apenas da China e Índia (ANFACER, 2022). Com 60 empresas e 71 parques fabris, o setor alcançou em 2021 a maior produção nacional dos últimos oito anos, com 927 milhões de metros quadrados, representando aproximadamente 7% da produção mundial. O setor gerou em 2021, 28 mil empregos diretos e 200 mil empregos indiretos, contribuindo positivamente para o PIB nacional, e representa 6% da indústria de materiais de construção. É o segundo maior mercado consumidor e o sétimo maior exportador mundial de revestimentos cerâmicos (ANFACER, 2022).

Na primeira década do século XXI, o setor de revestimentos cerâmicos mundial, incluindo o Brasil, tem mostrado uma forte tendência na produção de placas de grandes formatos, utilizadas não apenas para revestir superfícies, mas também na fabricação de bancadas, painéis, cubas, balcões e móveis (OLIVEIRA; HOTZA, 2015). Essa tendência se originou nos porcelanatos de maior valor agregado (tipologia BIa) e se expandiu para os revestimentos semi-porosos (tipologia BIIb), anteriormente considerados commodities. O avanço tecnológico na conformação de peças cerâmicas por prensagem contínua, observado na segunda década deste século, permitiu a produção de placas cerâmicas de grandes dimensões (acima de 100 cm) e formatos variados.

Apesar dos avanços significativos ocorridos no setor nas últimas décadas, os métodos normativos de controle de qualidade não acompanharam o desenvolvimento tecnológico. A norma ISO 10545 - *Ceramic tiles - Part 2 Determination of dimensions and surface quality* (2018a), que normatiza os procedimentos de controle de qualidade e de medição dimensional, foi desenvolvida na década de 90 e não passou por alterações em seus procedimentos metodológicos nas suas últimas revisões. Por consequência, a norma tornou-se obsoleta e inadequada para atender as especificidades das placas cerâmicas de grande formato e baixa espessura (FAZIO et al., 2018).

Assim, é urgente a necessidade de atualizar as normas técnicas, de modo a garantir a qualidade dos produtos disponibilizados no mercado consumidor e fortalecer a credibilidade dos programas de avaliação da qualidade, como a certificação de produto (Inmetro) e o programa setorial da qualidade (PSQ/PBQP-H).

Portanto, este é um problema de engenharia que precisa ser estudado, e novos procedimentos técnicos devem ser propostos de modo que se atualize as atuais normativas e que garanta maior confiabilidade metrológica e atendimento aos requisitos técnicos dos produtos.

O objetivo geral desta dissertação é desenvolver e propor uma nova normativa de medição de placas cerâmicas de grande formato, maior ou igual a 100 cm, que garanta índices adequados de capacidade dos sistemas de medição, por meio de indicadores de repetitividade e reprodutibilidade (R&R), que sejam compatíveis ou melhores que o método atual.

Para atingir este objetivo geral, são propostos os seguintes objetivos específicos:

- a) determinar os efeitos do tamanho, espessura e tipologia das placas cerâmicas nas deformações planares quando submetidas ao ensaio de medição das características dimensionais em plano horizontal, conforme a norma ISO 10545-2 (2018a);
- b) determinar o grau de compatibilidade entre o sistema de medição atual (SMA) e do sistema de medição por coordenadas (SMC), através de estudos de R&R;
- c) Identificar o nível de adequação dos métodos estudados o SMA e SMC para diferentes tipologias, espessuras e formatos.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TEMA

A evolução do conceito de qualidade levou a um aumento das exigências por placas cerâmicas esteticamente e tecnicamente superiores. Planeza e juntas de assentamento finas são requisitos apreciados e essenciais do cliente, exigindo um maior rigor no controle das variações dimensionais (BAENA, 2011; BÓ et al. 2012). Deste modo, a norma de especificação (ISO, 2018c) passou por revisões, resultando em critérios mais rigorosos para placas retificadas, com limites de variação em milímetros ou porcentagem adotando o critério mais restrito. Isso resultou em uma significativa redução da tolerância. Por exemplo, para uma placa retificada de dimensões (60x60) cm, a tolerância de curvatura central foi reduzida de 0,5% da diagonal (4,24 mm) para 1,8 mm, menos da metade do valor anterior.

Entretanto, o sistema de medição (SM) descrito na norma ISO (2018a), denominado neste trabalho como "Sistema de Medição Atual (SMA)", não acompanhou a evolução dos requisitos. O método ainda utiliza um equipamento com concepções antigas (dataplucômetro) para medir placas cerâmicas produzidas nos anos 90, que eram pequenas, em geral com dimensões iguais ou inferiores a (20x20) cm e superfície lisa (FAZIO et al., 2018). Porém, as placas atuais são maiores, mais finas e possuem relevos acentuados, o que apresenta desafios para o controle dimensional em indústrias e laboratórios (BÓ et al., 2012; OLIVEIRA; HOTZA, 2015; SÁNCHEZ et al., 2018).

O SMA não considera a deformação elástica das placas devido ao seu peso quando suspensas nos suportes inferiores de apoio do dispositivo de medição em posição horizontal, especialmente para placas finas (FAZIO et al., 2018). Isso pode resultar na desaprovação de placas de boa qualidade devido às novas tolerâncias, ou ter efeito inverso. Além disso, o método não leva em conta os relevos superficiais das placas, afetando a medição da espessura e características planares, a distância entre os pontos e defeitos que ocorrem entre eles, entre outros problemas.

De acordo com Fazio et al. (2018), placas com mais de 60 cm apresentam deformações durante o ensaio, uma vez que são suspensas em plano horizontal por três de seus vértices, o que afeta a exatidão e precisão dos resultados. Entretanto o CCB¹ observou deformações elásticas em placas menores, com maior intensidade em placas do tipo B11b (semiporosas) e de espessura baixa, próximas a 60 cm. Esse problema foi a principal motivação do presente estudo.

Estudos avaliaram métodos alternativos para medir características dimensionais de placas cerâmicas, como máquinas de medição por coordenadas e medição por captura de imagem (ALI; BUAJARERN, 2014; EMAM; SAYYEDBARZANI, 2019; FAZIO et al., 2018). Essas pesquisas buscaram um método mais moderno, preciso e confiável. No entanto, há poucos estudos que avaliam a qualidade das medições, a correlação entre os métodos e o impacto da deformação elástica no erro de medida, sendo temas escassos na literatura.

Este estudo propõe um sistema de medição por coordenadas (SMC), como alternativa para caracterizar as dimensões das placas cerâmicas. Ele utiliza um braço

¹ O CCB realiza mais de 30.000 ensaios em placas cerâmicas, dos quais aproximadamente 3.600 ensaios são para determinar as características dimensionais de placas cerâmicas pela ISO 10545-2 (2018a)

de medição tridimensional portátil (BMT), apoiando as peças em um painel inclinado. O programa de medição é baseado nos princípios do SMA, visando replicar seus resultados sem deformar as peças. Assim, o estudo adota o SMA e o SMC como objetos de estudo para minimizar a interferência da deformação da placa.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, conforme resumido a seguir.

O Capítulo 1 aborda a Introdução do tema de pesquisa, incluindo justificativa, relevância, objetivos e estrutura.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica sobre metrologia e o Sistema Internacional de Unidades (SI), sistemas de medição, suas fontes de variação e análise de sistemas de medição (*Measurement System Analysis - MSA*). Além disso, aborda a produção de placas cerâmicas, com enfoque nos desvios dimensionais, e ao fim do capítulo, será apresentado o estado da arte sobre os métodos de medições alternativos já estudados.

No Capítulo 3, descreve-se o método da pesquisa, detalhando todas as etapas, desde o planejamento até a coleta e análise dos dados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e a análise dos dados obtidos em cada etapa da metodologia, correlacionando-os com as hipóteses elaboradas.

Finalmente, o Capítulo 5 traz a conclusão do estudo, baseada nos resultados obtidos, avalia a viabilidade do SMC como alternativa ao SMA e discute as limitações e possibilidades de estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo tem o objetivo de apresentar os principais conceitos sobre metrologia, sistemas de medição e suas fontes de variações, bem como descrever a produção das placas cerâmicas, suas características e problemas tecnológicos do processo de medição de placas de grande porte. Complementarmente, são apresentados métodos alternativos de medição de placas cerâmicas, ainda pouco utilizados pelas empresas e laboratórios de certificações.

O primeiro tópico abordado nesta revisão é sobre a metrologia, partindo dos conceitos mais básicos até a relação destes com o processo de medição de placas cerâmicas.

2.1 METROLOGIA

A metrologia, do grego "metron" (medida) e "logos" (estudo), engloba a teoria e a prática de processos de medição normalmente de propriedades físicas, químicas e dimensionais de produtos tangíveis. A metrologia está no rol das tecnologias industrial básica, essencial para atividades de produção e comércio de bens e serviços (BIPM, 2012; TOLEDO, 2014). Ela subdivide-se em metrologia científica, que desenvolve padrões de rastreabilidade, a metrologia legal (representada no Brasil pelo Inmetro), que protege consumidores controlando medidas em produtos comerciais, e metrologia industrial, garantindo qualidade em processos e especificações técnicas dos produtos (SANTOS, 2016).

A metrologia é uma área da ciência e da engenharia em constante desenvolvimento. Na seção seguinte é apresentado o contexto histórico do desenvolvimento desta área.

2.1.1 Contexto Histórico da Metrologia

A metrologia, disciplina que estuda as medições, possui origens ancestrais com registros em civilizações antigas como Egito, China, Índia e Mesopotâmia (TOLEDO, 2014; FANTON, 2019; ZUIN, 2019). Inicialmente, as unidades de medida baseavam-se em partes do corpo, mas padronizá-las era desafiador devido às diferenças individuais (GUPTA, 2009; TOLEDO, 2014; SANTOS, 2016; ZUIN, 2019).

Como solução, surgiram artefatos padrões, como o "Cúbito Egípcio" (Figura 1), utilizado há aproximadamente 4.500 anos, que eram afixados em templos e palácios para permitir o acesso às medidas (GUPTA, 2009; ZUIN, 2019; LEACH et al., 2020).

Figura 1 - Régua-côvado egípcia exposta no Museu Egípcio de Turim, Itália



Fonte: Zuin (2019, p.17)

Até o século XVII, a inexistência de uma padronização de pesos e medidas acarretava problemas de ordem administrativa, comercial e científica. Nesse contexto, pesquisadores propuseram a concepção de um protótipo fundamentado na natureza, que fosse fixo e invariável, adotando o sistema decimal para representar os múltiplos e submúltiplos da unidade, buscando, assim, estabelecer um padrão universal (ZUIN, 2019; FANTON, 2019). Esse movimento culminou na criação do da unidade de medida metro, utilizada para determinar distâncias, correspondente à décima milionésima parte de um quarto do meridiano terrestre, o que deu origem ao sistema métrico em 1795, englobando unidades como metro, área, litro, grama e bar (ZUIN, 2019; TOLEDO, 2014).

Em 1875, a Convenção do Metro criou o *Bureau International des Poids et Mesures* (BIPM) em Paris com a adesão de 17 países. O BIPM busca unificar medidas físicas, incluindo eletricidade, fotometria, radiação ionizante, escalas de tempo e química. O SI foi estabelecido na década de 60. O Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) padroniza termos e definições, em vigor no Brasil desde 2012. De acordo com Fanton (2019), a metrologia surgiu para atender demandas econômicas, mas expandiu-se a várias áreas, contribuindo para o bem-estar humano. Cooperação internacional fortalece o uso do sistema métrico.

2.1.2 Sistema Internacional de Unidades (SI)

O BIPM (2019, p.125) define o SI com:

“...um sistema consistente de unidades para uso em todos os aspectos da vida, incluindo comércio internacional, fabricação, segurança, saúde e segurança, proteção do meio ambiente e na ciência básica que sustenta tudo isso. O sistema de grandezas subjacente ao SI e as equações que os

relacionam baseiam-se na descrição atual da natureza e são familiares a todos os cientistas, tecnólogos e engenheiros”.

O SI, em sua 9ª edição, é composto por sete unidades básicas representando diversas grandezas, conforme tabela 1. Outras unidades derivadas são obtidas a partir delas. Cada unidade tem uma definição específica para sua realização física. Antes da 9ª edição, a unidade de massa era definida por um padrão físico, o que apresentava riscos de perda e danos, prejudicando a credibilidade do sistema (BIPM, 2019; FANTON, 2019). O SI facilita a globalização e a intercambialidade de componentes em indústrias, como a automotiva (SECCO, 2019).

Tabela 1 - Unidades base do S.I

Grandeza		Unidade de medida	
Nome	Símbolo	Nome	Símbolo
Tempo	t	Segundo	S
Comprimento	l, x, r, etc	Metro	m
Massa	m	Quilograma	kg
Corrente elétrica	I, i	Ampere	A
Temperatura termodinâmica	T	Kelvin	K
Quantidade de substância	n	Mol	mol
Intensidade luminosa	lv	Candela	cd

Fonte: BIPM (2019, p. 130).

Tabela 2 - Prefixos do SI

Prefixo	10 ⁿ	Escala	Equivalente numérico	
Nome	Símbolo			
lota	Y	10 ²⁴	Septilhão	1 000 000 000 000 000 000 000 000
zeta	Z	10 ²¹	Sextilhão	1 000 000 000 000 000 000 000
exa	E	10 ¹⁸	Quintilhão	1 000 000 000 000 000 000
peta	P	10 ¹⁵	Quadriilhão	1 000 000 000 000 000
tera	T	10 ¹²	Trilhão	1 000 000 000 000
giga	G	10 ⁹	Bilhão	1 000 000 000
mega	M	10 ⁶	Milhão	1 000 000
quilo	k	10 ³	Mil	1 000
hecto	h	10 ²	Cem	100
deca	da	10 ¹	Dez	10
nenhum		10 ⁰	Unidade	1
deci	d	10 ⁻¹	Décimo	0,1
centi	c	10 ⁻²	Centésimo	0,01
mili	m	10 ⁻³	Milésimo	0,001
micro	μ	10 ⁻⁶	Milionésimo	0,000 001
nano	n	10 ⁻⁹	Bilionésimo	0,000 000 001
pico	p	10 ⁻¹²	Trilionésimo	0,000 000 000 001
femto	f	10 ⁻¹⁵	Quadrilionésimo	0,000 000 000 000 001
atto	a	10 ⁻¹⁸	Quintilionésimo	0,000 000 000 000 000 001
zepto	z	10 ⁻²¹	Sextilionésimo	0,000 000 000 000 000 000 001
iocto	y	10 ⁻²⁴	Septilionésimo	0,000 000 000 000 000 000 000 001

Fonte: Adaptado (BIPM, 2019, p.143)

O SI, inclui 7 unidades básicas e 22 unidades derivadas com nomes específicos. Essas unidades derivadas são construídas a partir das 7 constantes definidoras. Juntas, elas compõem o núcleo das unidades do SI, sendo todas as outras unidades combinações dessas 29. Além disso, o SI estabelece prefixos para formar múltiplos e submúltiplos decimais, facilitando a expressão de valores maiores ou menores que a unidade coerente (tabela 2).

As tecnologias de produção de bens e serviços é dinâmica, e em especial cabe aqui destacar o impacto das tecnologias da informação e comunicação nos novos modos de produção (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2018; PRZYKLENK et al., 2021). O acontecimento mais significativo que ocorreu no início do século XXI são as tecnologias da informação e comunicação que juntas constituem o arcabouço conceitual do que se denomina indústria 4.0 (VERMULM, 2018; TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2018; PRZYKLENK et al., 2021). Cabe, portanto, uma reflexão de como a metrologia tem absorvido essas tecnologias, ou indicação de como ela pode ser influenciada por essas novas tecnologias relacionadas a digitalização, coleta e armazenamento de dados, análise de imagens, dentro outras. Na seção seguinte serão apresentadas algumas considerações sobre o futuro da metrologia sobre o campo do conhecimento do que se denomina indústria 4.0.

2.1.3 Futuro da Metrologia e Indústria 4.0

Na literatura é possível identificar alguns avanços na metrologia, que englobam o aprimoramento do desempenho metrológico, e a ampliação da faixa de medição e precisão das medidas, bem como a aplicação do que se denomina "*soft metrology*" para mensurar percepções humanas. Estudos sobre *soft metrology* estão sendo estudados em países como EUA, Reino Unido e União Europeia (FANTON, 2019; VALLEJO et al., 2020).

A indústria 4.0 é definida como um conjunto de tecnologias de apoio ao processo industrial dentre as tecnologias mais comumente mencionadas estão *big data*, IoT (Internet das coisas), armazenamento de dados em nuvem, comunicação entre máquinas, análises estatísticas multivariadas e aprendizado de máquinas em modelos preditivos. A indústria 4.0 é considerada a quarta revolução industrial (VERMULM, 2018).

No que se refere a metrologia, a indústria 4.0 tem impulsionado mudanças e

desafios para medir grandezas multidimensionais, muitas vezes não físicas. Portanto, há indicações da necessidade de padrões internacionais, métodos e instrumentos específicos para este fim. Acrescenta-se, que métodos metrológicos avançados são essenciais para garantir a qualidade em uma manufatura avançada no contexto da indústria 4.0 (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2018; PRZYKLENK et al., 2021).

A metrologia e a manufatura avançada têm sido objeto de crescente pesquisa nos últimos anos (PRZYKLENK et al., 2021). Na Indústria 4.0, a metrologia desempenha papel crucial, processando resultados de medição em nuvem e integrando instrumentos com confiabilidade automática, utilizando IoT e sistemas ciberfísicos para garantir estabilidade e confiabilidade dos instrumentos de medição ao longo do tempo (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2018; STOJADINOVIC et al., 2021).

O setor cerâmico do Brasil não está ainda no patamar de indústrias de ponta que trabalham com os conceitos, ferramentas e tecnologias da indústria 4.0, especificamente no que se refere aos processos metrológicos. Os métodos utilizados são da década de noventa para características dimensionais.

2.2 SISTEMA DE MEDIÇÃO

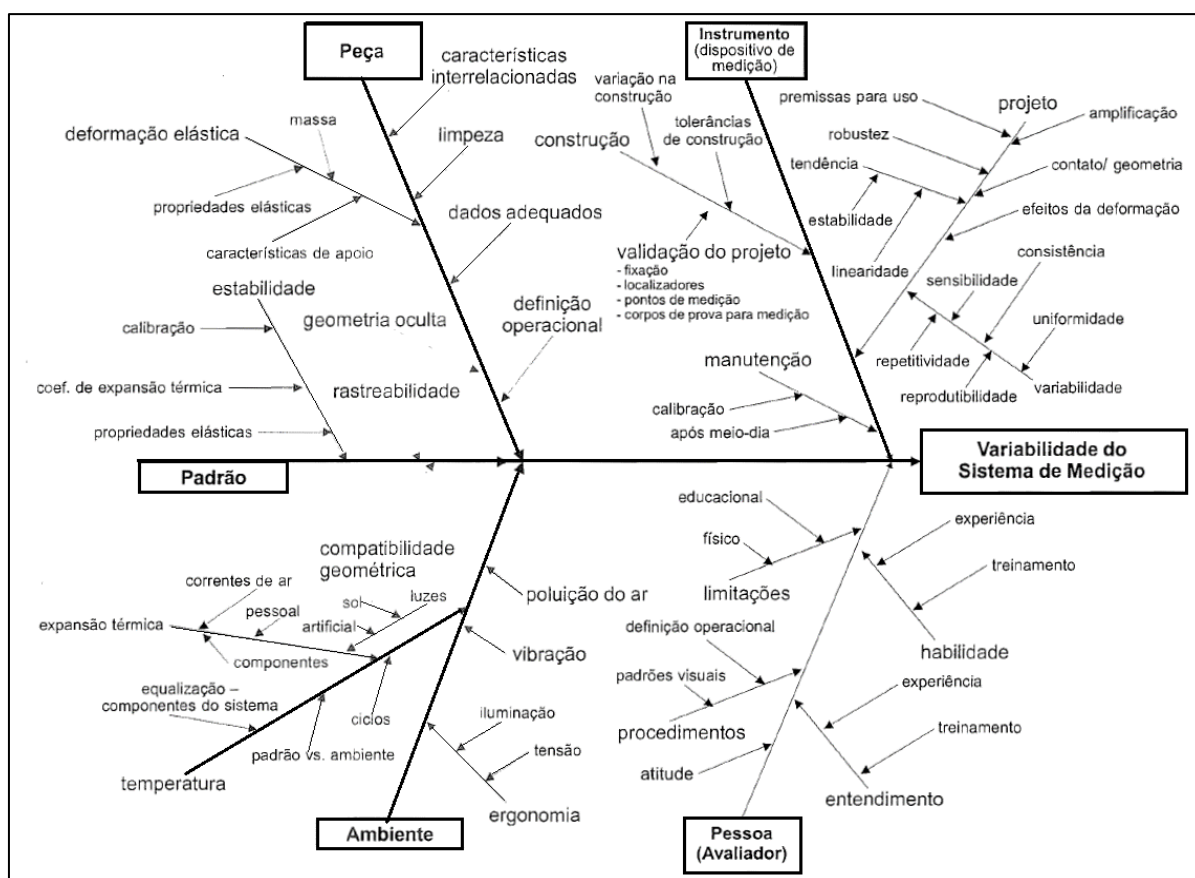
A melhoria do desempenho dos processos e a identificação de problemas de qualidade dependem da aplicação de técnicas como o controle estatístico de processo, planejamento de experimentos e amostragem de aceitação, conforme listado por Montgomery (2009). A qualidade dos dados gerados nas medições é crucial, pois eles ajustam o processo, evitam falhas e determinam relações entre variáveis (AIAG, 2010; KLAPUT et al. 2016). Além dos aspectos técnicos, é importante considerar os aspectos econômicos, buscando um método preciso e de baixo custo, e logísticos, como prazo de entrega e disponibilidade de insumos e assistência técnica (AIAG, 2010; KLAPUT et al., 2016; ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

O AIAG (2010) estabelece propriedades essenciais para um bom SM, incluindo adequada discriminação, controle estatístico, baixa variabilidade e satisfação do cliente (DEDHIA, 2001; PIZZOLATO et al., 2019). O sistema abrange além dos instrumentos, elementos e processos para quantificar e avaliar características. Conclui-se que o sistema de medição é similar a um processo de manufatura, com variações aleatórias e sistemáticas (AIAG, 2010).

2.2.1 Variabilidade do Sistema de Medição e Seus Componentes

As fontes de variação dos SM devem ser identificadas e eliminadas ou reduzidas (PEREIRA et al., 2016). Segundo o AIAG (2010), um SM possui seis elementos essenciais que podem ser utilizados para mapear as possíveis fontes de variação por meio de um diagrama de Ishikawa (Figura 2). Esses elementos são: padrão, peça, instrumento, pessoa/procedimento e ambiente.

Figura 2 – Variabilidade do sistema de medição – Diagrama de causa e efeito



Fonte: Traduzido AIAG (2010, p.17)

Fatores ambientais podem afetar os resultados das medições. Normas como a ABNT NBR NM-ISO 1 (1997), ISO 10545 parte 13 (2016) e ABNT NBR 14081 parte 4 (2012) estabelecem controles das condições ambientais. O operador também pode ser uma das principais fontes de variação, devido a treinamento ineficaz, falta de experiência ou procedimentos mal elaborados (AIAG, 2010; PEREIRA et al., 2016; MARQUES et al., 2018; PIZZOLATO et al., 2019). Os instrumentos podem afetar os

resultados de medição devido a detalhes construtivos, falta de manutenção ou calibração (AIAG, 2010; PIZZOLATO et al., 2019; ARENHART; PIZZOLATO, 2020). A peça medida pode influenciar o resultado devido a deformações elásticas, falta de limpeza ou rebarbas (ABNT, 2009; AIAG, 2010; ABNT, 2017; FAZIO et al., 2018; ISO, 2018b).

Em síntese, as variações em um SM estão relacionadas à sua capacidade e desempenho ao longo do tempo. A capacidade refere-se ao erro aleatório em um curto período, considerando erros como linearidade, uniformidade, repetitividade e reprodutibilidade. O desempenho é afetado pela estabilidade do sistema e requer controle estatístico de processo. Além disso, os sistemas de medição possuem incertezas que representam a faixa de valores em que o verdadeiro valor da medida está contido (AIAG, 2010; BIPM, 2012).

Os erros de medição, que são a soma das variações, desempenham um papel fundamental nos SM utilizados nas tomadas de decisões. Portanto, é essencial tratá-los e reduzi-los por meio de projetos de melhoria da qualidade (Pereira et al., 2016).

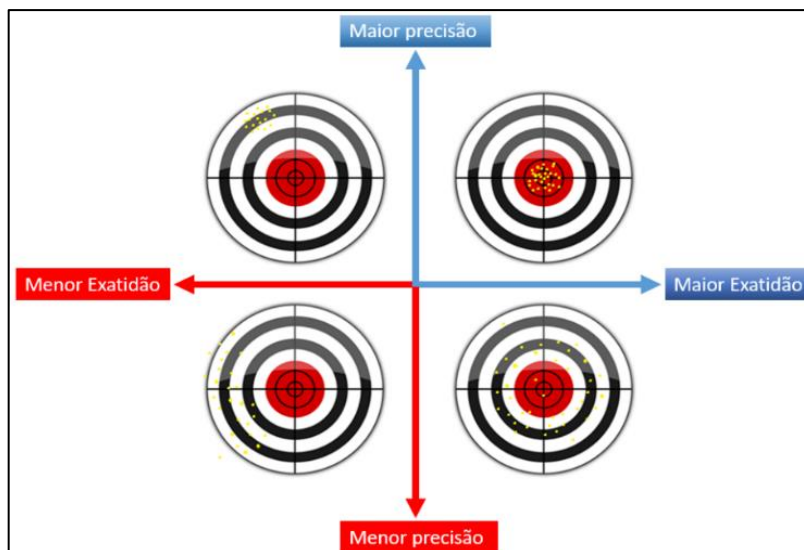
2.2.1.1 Erro de Medição: Exatidão e Precisão

Conforme definição do BIPM (2012), o erro de medição é a diferença entre o valor medido e um valor de referência, enquanto a incerteza de medição é a dispersão dos valores medidos. O erro pode ser corrigido, mas a incerteza é inerente a todos os processos de medição. Ele é decomposto em variação de localização (exatidão) e variação de dispersão (precisão).

A exatidão é a proximidade da média com o valor verdadeiro, enquanto a precisão é a concordância entre medidas replicadas (TOLEDO, 2014). A figura 3 ilustra a relação entre elas, mostrando que uma medição pode ser precisa, mas distante do valor verdadeiro, e vice-versa. É importante considerar tanto a exatidão quanto a precisão para obter resultados confiáveis.

Os erros de tendência, estabilidade e linearidade estão relacionados à exatidão da medição e ao dispositivo utilizado (AIAG, 2010; ARENHART; PIZZOLATO, 2020). A tendência é a diferença entre a média das medidas e o valor de referência, podendo ser corrigida (WERKEMA, 2011; BIPM, 2012; TOLEDO, 2014). A estabilidade refere-se à consistência das medições ao longo do tempo, enquanto a linearidade indica a manutenção da mesma tendência em toda a faixa de medição (TOLEDO, 2014).

Figura 3 - Correlação entre exatidão e precisão



Fonte: Adaptado (MONTGOMERY, 2009, p. 372)

Os erros de repetitividade e reprodutibilidade estão associados à precisão da medição. A repetitividade refere-se à variação entre medições sucessivas sob condições fixas, enquanto a reprodutibilidade quantifica as variações em um sistema de medição devido a operadores e fatores ambientais. A soma dos quadrados dessas duas variações resulta no erro de repetitividade e reprodutibilidade (R&R) do sistema de medição (HAJIPOUR et al., 2013; GARCÍA; RÍO, 2013; ZANOBINI et al., 2016).

De acordo com Saikaew (2018), os erros de tendência, estabilidade, linearidade, repetitividade e reprodutibilidade devem ser avaliados utilizando ferramentas estatísticas para determinar se a variabilidade do sistema é adequada para o controle de um processo ou produto específico. Recomenda-se a aplicação dos métodos do manual de análise de sistema de medição para essa análise. Pereira et al. (2016) e Arenhart e Pizzolato (2020) complementam que a soma desses componentes de variação de medição juntamente com a variação intrínseca do processo de fabricação resulta na variação total do processo, a qual deve ser reduzida sempre que possível.

2.2.2 Análise do Sistema De Medição (MSA)

Aprimorar os processos e produtos depende de um controle de qualidade eficaz, o qual está intrinsecamente ligado à confiabilidade dos SM, que desempenham

um papel vital nas indústrias (ARENHART; PIZZOLATO, 2020). Como resultado, empresas do setor automotivo, como a Chrysler, Ford e General Motors, desenvolveram e publicaram o Manual de referência de análise de sistema de medição, MSA (AIAG, 2010). Esse manual se concentra em sistemas replicáveis de testes não destrutivos e pode ser usado para avaliar a exatidão (tendência, estabilidade e linearidade) e a precisão (repetitividade e reprodutibilidade) dos SM industrial, mas também pode ser adotado em outros setores e para testes destrutivos (PIZZOLATO et al., 2019; AIAG, 2010).

Weaver et al. (2012) enfatizam a importância de avaliar um SM antes de usá-lo em controles estatísticos de processo, experimentos de melhoria da qualidade, testes de aceitação e outras atividades que envolvam dados de medição. O MSA surge como uma técnica essencial para reduzir erros nos processos, utilizando métodos estatísticos para analisar a capacidade do SM, aumentando a confiança nos dados obtidos (HAJIPOUR et al., 2013; PIZZOLATO et al., 2019).

O MSA pode ser aplicado para determinar a aceitação de novos instrumentos de medição, servir como base para avaliar sistemas considerados deficientes e ser utilizado no controle de um processo de produção (WERKEMA, 2011). Marques et al. (2018) complementam afirmando que o objetivo do MSA é avaliar a qualidade de um sistema de medição e determinar se ele é capaz de controlar um determinado processo ou produto.

O MSA é aplicável em vários setores e SM, especialmente o estudo de R&R, que quantificam as variações de repetitividade e reprodutibilidade dos instrumentos, empregando a análise de variância (ANOVA) (PEREIRA, 2016). Esta é a estratégia mais adotada quando os dispositivos estão devidamente calibrados (PERUCHI et al., 2013).

Kuo e Huang (2013) e Zhu et al. (2014) realizaram estudos de R&R em SM óptica para determinar o teor de gordura do leite de coco e a rugosidade de filmes de revestimento, obtendo resultados satisfatórios. Gijo e Scaria (2014) avaliaram as características dimensionais de uma peça, obtendo índices de R&R abaixo de 10%. Pereira et al. (2016) analisaram um cordão de solda em aço inoxidável, reduzindo o índice de R&R de 24% para 9% após melhorias. Marques et al. (2018) reduziram em 50% os defeitos classificados erroneamente ao utilizar um estudo MSA associado a uma máquina de inspeção óptica. Pizzolato et al. (2019) identificaram problemas em sistemas de medição em um setor de usinagem, resultando em um plano de ação

para melhorias. Arenhart e Pizzolato (2020) aceitaram um índice de R&R de 21%, entretanto propuseram melhorias no sistema de fixação, que se apresentou como uma fonte relevante de variação dimensional.

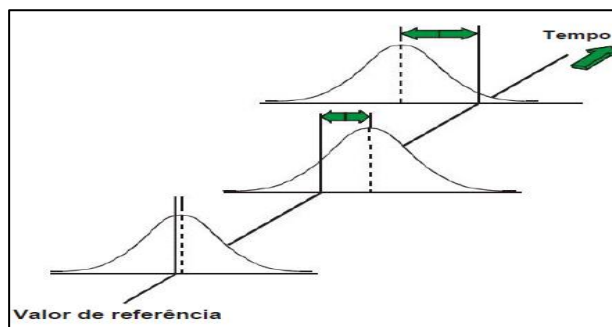
O MSA é amplamente utilizado em projetos de Six Sigma DMAIC. Dejaegher et al. (2006) aplicaram a metodologia DMAIC, com estudos R&R e delineamento experimental, para melhorar a capacidade de medição na indústria farmacêutica. Gijo e Scaria (2014) utilizaram o Six Sigma DMAIC, incluindo MSA, regressão linear, DOE com método Taguchi, teste de hipóteses e correlação Beta, resultando em uma melhoria significativa no processo e economia anual estimada de 87 mil dólares. O MSA pode ser combinado com outras ferramentas estatísticas, como o Fuzzy R&R, que considera as incertezas nas saídas (HAJIPOUR et al., 2013), e métodos simplificados como ANOVA e mínimos quadrados (SHI et al., 2014). Pereira et al. (2016) utilizaram o método Scott-Knott em conjunto com o R&R para identificar causas especiais de variação.

O estudo de R&R é amplamente aplicado na gestão de qualidade industrial para controle estatístico de processos e melhoria da qualidade (SHI et al., 2014; MARQUES et al., 2018). No entanto, AIAG (2010) ressalta que o uso exclusivo do índice de R&R como único critério de avaliação do sistema de medição é inadequado, sendo necessário realizar uma análise abrangente. O AIAG (2010) estabelece diretrizes e práticas recomendadas, incluindo estabilidade, tendência, linearidade e R&R, para conduzir estudos de sistema de medição de variáveis.

2.2.2.1 Estabilidade

O objetivo do desenvolvimento de um estudo de estabilidade é avaliar a interação do sistema de medição com o ambiente, o desgaste dos componentes e os ajustes dos dispositivos e sensores, visando quantificar a variação ao longo do tempo (Figura 4). Conforme o AIAG (2010), considera-se que o processo é estável quando está sob controle estatístico. A estabilidade do método é crucial para laboratórios de ensaios acreditados, pois garante que, independentemente do momento em que as amostras forem testadas, os resultados serão estatisticamente equivalentes.

Figura 4 – Representação do desvio de estabilidade



Autor: Traduzido AIAG (2010, p. 6)

Para um estudo de estabilidade em um sistema de medição replicável, é essencial selecionar e identificar uma peça, estabelecendo seu valor de referência em relação a um padrão rastreável. Caso não haja um padrão disponível, pode-se usar uma peça da produção dentro da faixa de medições. O objetivo é avaliar variações ao longo do tempo, não necessariamente a proximidade com o valor real. É importante estabelecer a periodicidade das medições, alternando os horários das coletas dos subgrupos, com 3 a 5 medições cada. Recomenda-se adotar 20 subgrupos, considerando o conhecimento prévio do sistema (AIAG, 2010). Em um estudo realizado por Pizzolato et al. (2019), foram conduzidas medições a cada dois dias durante 13 semanas, resultando em cerca de 45 subgrupos. Em outro estudo, realizado por Arenhart e Pizzolato (2020), foram realizadas medições em triplicata três vezes por semana ao longo de três meses, obtendo-se 35 subgrupos.

Após a definição de todos os parâmetros, realizasse as medições e a organização dos dados em ordem cronológica, visando a construção das cartas de controle média (\bar{X}) e amplitude (R). A análise gráfica segue o método convencional das cartas de controle, no qual, após a coleta dos dados, são estabelecidos a linha central e os limites superior de controle (LSC) e inferior de controle (LIC) para a média (Equação 1) e a amplitude (Equação 2). Para os cálculos, devem ser utilizadas as constantes definidas na tabela 3, conforme proposto por Montgomery (2009).

Equação 1

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R}$$

$$\text{Linha central} = \bar{\bar{X}}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R}$$

$$LSC = D_4 \bar{R}$$

$$\text{Linha central} = \bar{R}$$

$$LIC = D_3 \bar{R}$$

Onde,

\bar{X} – Média das médias

A_2, D_3 e D_4 – Constante conforme Tabela 3

\bar{R} – Média das amplitudes

Tabela 3 – Constantes

n	A ₂	D ₃	D ₄	d ₂
2	1,880	0,000	3,267	1,128
3	1,023	0,000	2,574	1,693
4	0,729	0,000	2,282	2,056
5	0,577	0,000	2,114	2,326
6	0,483	0,000	2,004	5,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,970
10	0,308	0,223	1,777	3,078

Autor: Montgomery (2009, p. 735)

2.2.2.2 Tendência

Em um SM replicável, o estudo de tendência busca quantificar o erro sistemático do SM. Seleciona-se uma amostra e determina-se seu valor de referência em relação a um padrão rastreável. Geralmente, um laboratório de calibração acreditado pelo Inmetro realiza esse processo. Em casos sem padrão disponível, é possível usar uma peça do processo, medindo-a pelo menos 10 vezes no sistema de medição. O valor de referência será a média dessas leituras, seguindo a sugestão do AIAG (2010).

A tendência deve ser calculada pela equação 3, e é recomendável o uso do histograma para análise gráfica. Para maior robustez, é aconselhável realizar 30 ou mais medições. Caso essa quantidade não seja viável, é importante interpretar cuidadosamente os resultados para identificar possíveis causas especiais ou anomalias nos dados.

Equação 3

$$Tend\hat{e}ncia = X_i - VR$$

Onde,

X_i - Valor da medição individual

VR - Valor de referência

Para realizar a análise numérica dos resultados deve-se calcular a tendência média das leituras (n) conforme equação 4.

Equação 4

$$Tend\hat{e}ncia\ m\acute{e}dia = \frac{\sum_{i=1}^n tend\hat{e}ncia}{n}$$

A análise da tendência pressupõe um desvio de repetitividade aceitável. Para isso, é necessário calcular o desvio padrão da repetitividade, conforme demonstrado na equação 5, e avaliar sua aceitabilidade de acordo com a Equação 6. O termo "VE" representa a variabilidade do equipamento, ou seja, a repetitividade, enquanto "VT" simboliza a variação total.

Caso o valor de %VE seja significativamente alto, isso indica que a variação é inaceitável, pois conduzirá a resultados enganosos e confusos. Em contrapartida, caso exista um estudo de R&R válido, o desvio padrão poderá ser baseado nos resultados obtidos nesse estudo.

Equação 5

$$\sigma_{repetitividade} = \sigma_{repe} = \frac{\sum_{i=1}^n (X - \bar{X})^2}{n - 1}$$

Equação 6

$$\%VE = 100 \left[\frac{VE}{VT} \right] = 100 \left[\frac{\sigma_{repe}}{VT} \right]$$

A variação total (VT) refere-se à variação esperada do processo ou a amplitude da especificação dividida por 6. Após avaliar a aceitabilidade do desvio de repetitividade, é necessário analisar se a tendência é aceitável. Para essa análise, utiliza-se o teste de hipóteses:

$$H_0 \text{ tendência} = 0$$

$$H_1 \text{ tendência} \neq 0$$

Para realizar a análise do teste de hipóteses, é necessário calcular a incerteza para a tendência conforme a Equação 7, a estatística t através da Equação 8 e o intervalo de confiança por meio da Equação 9. Considera-se a tendência como aceitável no nível α (geralmente adotando-se 0,05 ou 95% de confiança). Se o p-valor associado à estatística t for maior que α , então aceitamos a hipótese nula (H_0). Além disso, também aceitamos H_0 se o valor zero estiver contido no intervalo de confiança.

Equação 7

$$\sigma_b = \frac{\sigma_{repe}}{\sqrt{n}}$$

Equação 8

$$\text{estatística } t = t_{tendência} = \frac{\text{tendência média}}{\sigma_b}$$

Equação 9

$$\text{Tendência} - \left[\sigma_b \left(t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \right) \right] \leq \text{zero} \leq \text{Tendência} + \left[\sigma_b \left(t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}} \right) \right]$$

Onde, $t_{n-1, 1-\frac{\alpha}{2}}$ é obtido nas tabelas t padrão.

2.2.2.3 Linearidade

O estudo de linearidade é comumente realizado em conjunto com a análise de tendência em SM replicáveis, uma vez que ambos buscam examinar o erro sistemático do SM. No entanto, a linearidade tem o propósito específico de medir a tendência para diferentes valores de referência dentro da faixa de medição. Espera-se que o erro sistemático apresente um comportamento linear, independentemente do tamanho da amostra avaliada.

Para realizar esse estudo, é necessário selecionar 5 ou mais amostras que correspondam à faixa de medição do sistema ou que abranjam a amplitude da

variação do processo. Similarmente ao estudo de tendência, para cada amostra, deve-se determinar o valor de referência de acordo com o item 0 e realizar pelo menos 10 medições em cada uma delas, de forma aleatória, para minimizar qualquer viés. Para realizar a análise gráfica, é necessário calcular a tendência de cada amostra para cada medição, de acordo com a equação 3. Em seguida, calcula-se a média de cada amostra utilizando a equação 4. A fim de traçar a linha de melhor ajuste, emprega-se a equação 10, enquanto para obter a faixa de confiança da linha utiliza-se a equação 11.

Equação 10

$$\bar{y} = ax_i + b$$

Equação 11

$$\text{Limite inferior: } b + ax_0 - \left[t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{\frac{1}{2}} s \right]$$

$$\text{Limite superior: } b + ax_0 + \left[t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{1}{gm} + \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum (x_i - \bar{x})^2} \right)^{\frac{1}{2}} s \right]$$

Onde,

 x_i = valor de referência, \bar{y} = média das tendências,
$$a = \frac{\sum xy - \left(\frac{1}{gm} \sum x \sum y \right)}{\sum x^2 - \frac{1}{gm} (\sum x)^2} = \text{inclinação,}$$

g = número de amostras utilizadas,

m = número de repetições por amostra e,

b = $\bar{y} - a\bar{x}$ = interseção da reta com o eixo vertical

Assim como na análise da tendência, a avaliação da linearidade pressupõe um desvio de repetitividade aceitável. Para tal, é imprescindível calcular o desvio padrão da variabilidade da repetitividade através da equação 12. Esses valores também serão empregados no cálculo da faixa de confiança e na análise de sua aceitabilidade, conforme estabelecido na equação 6.

Equação 12

$$\sigma_{repe} = \sqrt{\frac{\sum y_i^2 - b \sum y_i - a \sum x_i y_i}{gm - 2}}$$

Com os dados calculados, é necessário plotar um gráfico de linhas que apresente as tendências individuais e as médias, acompanhadas pela linha de melhor ajuste, a faixa de confiança e a linha de tendência igual a zero. É essencial que a linha de tendência igual a zero esteja completamente contida na faixa de confiança da linha de melhor ajuste para que o sistema seja considerado aceitável em relação à linearidade. Para realizar a análise numérica, emprega-se o teste de hipótese da inclinação da reta, de acordo com a equação 13.

$$\begin{aligned} H_0: a &= 0 & \text{inclinação da reta} &= 0 \\ H_1: a &\neq 0 & \text{inclinação da reta} &\neq 0 \end{aligned}$$

Equação 13

$$|t| = \frac{|a|}{\left[\frac{s}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \right]} \leq t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}}$$

Se esta hipótese for verdadeira, o sistema de medição apresenta a mesma tendência para todos os valores de referência. No entanto, para que a linearidade seja considerada aceitável, essas tendências devem ser iguais a zero. Portanto, emprega-se o teste de hipótese da interseção da linha, conforme apresentado na equação 14.

$$\begin{aligned} H_0: b &= 0 & \text{interseção da linha com o eixo vertical (da tendência)} &= 0 \\ H_1: b &\neq 0 & \text{interseção da linha com o eixo vertical (da tendência)} &\neq 0 \end{aligned}$$

Equação 14

$$|t| = \frac{|b|}{\left[\frac{1}{gm} + \frac{\bar{x}^2}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2}} \right]} \leq t_{gm-2, 1-\frac{\alpha}{2}}$$

2.2.2.4 Repetitividade e Reprodutibilidade (R&R)

O estudo de R&R, tem como objetivo quantificar a soma das variações decorrentes da falta de repetitividade e reprodutibilidade. O AIAG (2010) e Toledo (2014) apresenta três métodos para conduzir esse estudo: o método de amplitude, o método de amplitude e média, que inclui o método de carta de controle, e o método ANOVA. O método ANOVA, aplicado nesta pesquisa, é o método mais preciso, que extrai mais informações e tratar qualquer estrutura de experimento, sendo definido pelo AIAG (2010) como:

“...uma técnica estatística padrão que pode ser utilizada para analisar o erro de medição e outras fontes de variabilidade dos dados em um estudo de sistema de medição. Na análise de variância, está pode ser decomposta em quatro categorias: peças, avaliadores, interação peça-avaliador e o erro de replicação devido ao dispositivo de medição”.

Ao planejar um estudo de R&R, é importante levar em consideração o tipo de SM e o objetivo da análise. Por exemplo, em um sistema automático de medição em que o operador não influencia os resultados, o efeito de reprodutibilidade pode ser considerado insignificante. No entanto, se o mesmo equipamento possuir diferentes dispositivos de fixação que podem ser utilizados, a reprodutibilidade não deve ser desconsiderada (AIAG, 2010; TOLEDO, 2014).

A determinação do número de avaliadores, peças e réplicas deve seguir critérios específicos, como a criticidade da medida. Dimensões críticas requerem mais peças ou réplicas. Além disso, o tamanho e peso das peças também influenciam na escolha, onde dificuldades maiores implicam em utilizar menos peças e mais réplicas. Em relação à seleção dos avaliadores, devem ser preferidos aqueles que utilizam o sistema de medição em suas rotinas de trabalho (AIAG, 2010).

Quanto à seleção das peças, dependerá do propósito do sistema de medição. Se for utilizado para controle do produto, ou seja, para determinar a conformidade ou não conformidade do produto, as peças não precisam cobrir toda a faixa de variação do processo, e a avaliação será baseada na tolerância da característica avaliada. Já se for utilizado para controle do processo, ou seja, para determinar a capacidade do processo, é essencial obter peças que cubram toda a faixa de variação do processo, e a avaliação será baseada na variação do processo (AIAG, 2010).

Em relação ao instrumento, o AIAG (2010) estabelece que a discriminação seja

de pelo menos um décimo da variação esperada. Além disso, os valores medidos devem ser registrados até o seu limite prático e o método de medição deve estar adequado e sendo seguido.

Para assegurar a independência estatística do estudo, especialmente ao utilizar o método ANOVA, é imprescindível que as medições sejam realizadas de forma aleatória. A aleatorização pode ser efetuada manualmente, consistindo em identificar o operador e a peça em pedaços de papel e, posteriormente, sortear os papéis aleatoriamente para definir a ordem das medições. Esse processo deve ser repetido para todas as repetições definidas.

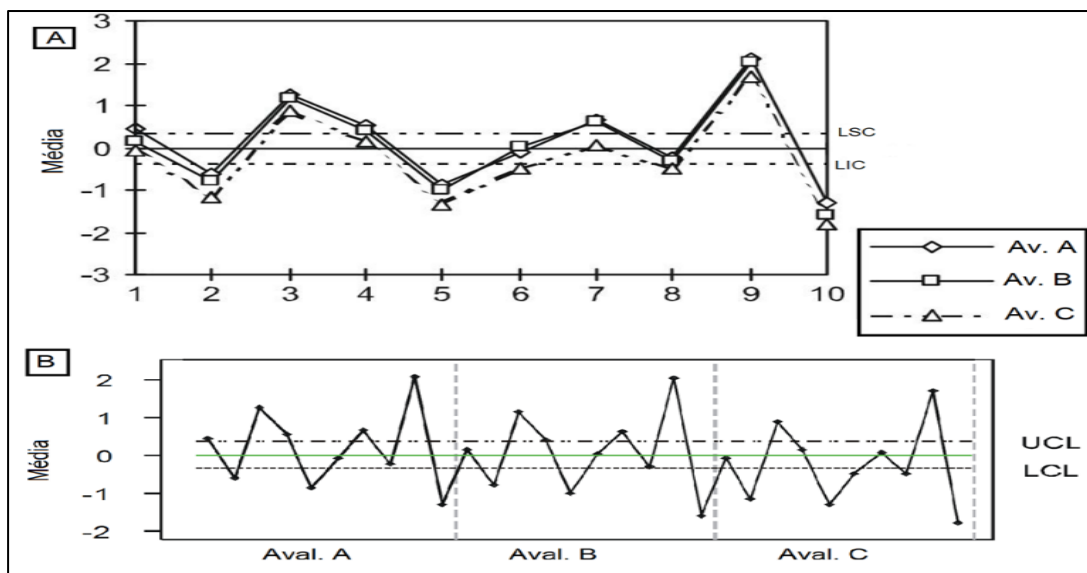
O número de peças (n), avaliadores (k) e repetições (r) pode variar de acordo com cada estudo, levando em consideração os critérios já apresentados. No entanto, o AIAG (2010) sugere que o número total de amplitudes geradas seja maior que 15 ($n \times k$) para obter um intervalo de confiança mínimo nos resultados. O manual recomenda que a amostra seja composta por 10 ou mais peças, mas essa sugestão nem sempre é viável ou aplicável, como identificado em estudos de Gijo e Scaria (2014), que utilizaram um total de 20 amplitudes (n (10) \times k (2)), Pereira et al. (2016), que adotaram uma análise com um total de 24 amplitudes (n (8) \times k (3)), e Pizzolato et al. (2019), que utilizaram um total de 16 amplitudes (n (8) \times k (2)).

Após o planejamento, o estudo deve ser conduzido selecionando peças de lotes distintos de produção (para controle de processo) e identificando-as. Os operadores devem ser selecionados sempre que possível, envolvendo todos os turnos, e a ordem de medições deve ser aleatorizada. O AIAG (2010) apresenta diversas ferramentas gráficas que devem preceder a análise estatística, sugerindo a aplicação de carta de médias (\bar{X}), carta de amplitudes (R), gráfico sequencial, gráfico de dispersão, gráfico "*Whiskers*", gráficos de erros, histograma normalizado, gráfico X-Y de médias por tamanho e gráfico de comparação X-Y. No entanto, não é obrigatório utilizar todos esses gráficos para conduzir a análise. Neste estudo, o foco será nos gráficos de carta de médias, carta de amplitudes e sequencial.

Para a elaboração das cartas de médias, é necessário calcular a média das repetições de cada peça para cada operador. Em seguida, os LSC e LIC devem ser calculados conforme a equação 1. Os dados devem ser, então, representados em um gráfico de linhas "superpostas", também conhecido como "carta de interação avaliador por peça", embora também possa ser plotado de forma "não superposta" (Figura 5). Nesta análise, espera-se um maior número de pontos fora dos limites, uma

vez que a amplitude dos limites reflete a repetitividade do SM e os pontos representam a variabilidade entre as peças (AIAG, 2010).

Figura 5 - Carta de médias (A – superposta; B – não superposta)



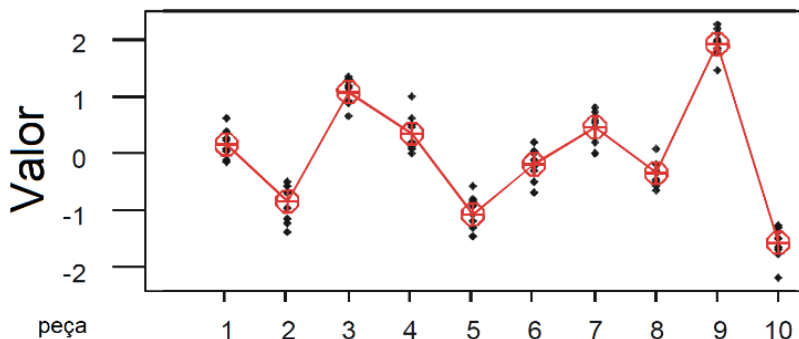
Autor: AIAG (2010, p. 107)

Para a elaboração das cartas de controle de amplitude, primeiro é necessário calcular as amplitudes das repetições de cada peça para cada operador. Em seguida, deve-se calcular o LSC e o LIC, conforme a equação 2. Os dados devem ser representados em um gráfico de linhas similar ao da figura 5. Nesta análise, espera-se que todos os pontos estejam dentro dos limites, evidenciando o controle estatístico em relação à repetitividade e consistência do processo de medição entre avaliadores para cada peça. Isso possibilita a avaliação da discriminação do sistema, uma vez que é esperado que a maior parte dos pontos seja diferente de zero. Além disso, é possível avaliar o treinamento dos avaliadores ou métodos complexos que requerem muita habilidade manual. Se eventualmente um avaliador apresentar pontos fora de controle, entre outros pontos, também pode ser investigado (AIAG, 2010).

Para elaborar os gráficos sequenciais (Figura 6), é necessário plotar um gráfico de dispersão com todas as leituras obtidas pelos avaliadores, separadas por peça. Isso permitirá identificar o efeito individual das peças na consistência da variação e destacar leituras discrepantes. Ademais, esses dados podem ser representados em um Diagrama de Caixa para analisar a reprodutibilidade, observando possíveis diferenças entre os avaliadores. A linha que conecta os avaliadores deve ser o mais

paralela possível ao eixo x.

Figura 6 – Gráfico sequencial



Fonte: AIAG (2010, p. 109)

Devido à complexidade dos cálculos, o AIAG (2010) recomenda que a análise numérica através do método ANOVA seja realizada por programas de computadores. A tabela de ANOVA tem como finalidade decompor a variação total em quatro componentes (fontes), conforme apresentado na tabela 4. Essa tabela também inclui os graus de liberdade (GL) associados a cada fonte, a soma dos quadrados (SQ) que representa o desvio em torno da média da fonte, o quadrado médio (QM) que é obtido dividindo a SQ pelo GL e o quociente F, calculado para determinar a significância estatística do valor da fonte.

No entanto, o quociente F é avaliado apenas para a interação avaliador x peça, comparando-o com o valor crítico tabelado, geralmente a um nível de significância de 95%. Caso o valor obtido seja inferior ao valor tabelado, não rejeitamos a hipótese nula (H_0), indicando que não há interação significativa. Adotando-se seguinte teste de hipóteses:

$$H_0: AP = 0 \quad \text{interação avaliador x peça} = 0$$

$$H_1: AP \neq 0 \quad \text{interação avaliador x peça} \neq 0$$

Tabela 4 – Exemplo de tabela ANOVA

Fonte	GL	SQ	QM	F
Avaliador (A)	2	3,1673	1,58363	34,44
Peças (P)	9	88,3619	9,81799	213,52
interação avaliador x peça (AP)	18	0,3590	0,01994	0,434
Equipamento (E)	60	2,7589	0,04598	
Total (T)	89	94,6471		

Fonte: AIAG (2010, p. 128)

Após a ANOVA, procede-se aos cálculos do desvio padrão e das porcentagens de contribuição em relação à variação total e à tolerância. Essas contribuições referem-se à repetitividade (desvio do equipamento), à reprodutibilidade (variações dos avaliadores e da interação operador x peça), ao desvio de R&R, à variação da peça e à variação total, conforme apresentado na tabela 5 (MONTGOMERY, 2009).

De acordo com Montgomery (2009) e AIAG (2010), dois valores da constante k são comumente adotados. O valor $k = 5,15$ corresponderá a uma cobertura de 99% de uma população normal, enquanto o valor $k = 6$ corresponde a 99,73% de cobertura. Quanto maior a cobertura, maior será a garantia do processo de medição.

Tabela 5 – Equações para determinação dos desvios padrões

Fonte de variação	Desvio padrão	% variação total	% tolerância
1 - Repetitividade (σ_{repe})	$\sqrt{QM_e}$	$\frac{\sigma_{repe}}{VT} \times 100$	$k \times \frac{\sigma_{repe}}{VT} \times 100$
2 – Reprodutibilidade (σ_{repro})	$\sqrt{A^2 + I_{AP}^2}$	$\frac{\sigma_{repro}}{VT} \times 100$	$k \times \frac{\sigma_{repro}}{VT} \times 100$
2.1 - Avaliador (A)	$\sqrt{\frac{QM_A - QM_{AP}}{nr}}$	$\frac{A}{VT} \times 100$	$k \times \frac{A}{VT} \times 100$
2.2 - Interação (I_{AP})	$\sqrt{\frac{QM_{AP} - QM_e}{r}}$	$\frac{I_{AP}}{VT} \times 100$	$k \times \frac{I_{AP}}{VT} \times 100$
3 - R&R	$\sqrt{\sigma_{repe}^2 + \sigma_{repro}^2}$	$\frac{R\&R}{VT} \times 100$	$k \times \frac{R\&R}{VT} \times 100$
4 - Peça (VP)	$\sqrt{\frac{QM_p - QM_{AP}}{or}}$	$\frac{VP}{VT} \times 100$	$k \times \frac{VP}{VT} \times 100$
5 - Variação Total (VT)	$\sqrt{R\&R^2 + VP^2}$	-	-
6 – NDC	$1,41 \times \left(\frac{VP}{R\&R}\right)$		

Onde: n = número de peças; o = número de avaliadores; r = número de repetições; k = constante

Autor: Adaptado (MONTGOMERY, 2009, p. 375; AIAG, 2010, p.197)

Toledo (2014) indica que SM com resultados de R&R inferiores a 20%, estão aprovados, já o AIAG (2010) indica que um sistema de medição aceitável deve ter índices de R&R abaixo de 10%. Sistemas com índices entre 10% e 30% são considerados marginais e podem ser aceitos em situações específicas, mediante análise de custo-benefício. No entanto, índices superiores a 30% são considerados inaceitáveis. Alguns autores (GIJO; SCARIA, 2014; PEREIRA et al, 2016) adotaram o critério mais restritivo de 10% em seus estudos. Já Arenhart e Pizzolato (2020), mesmo identificando melhorias no processo de medição, consideraram adequado um índice de 21% para a aplicação pretendida.

O AIAG (2010) sugere utilizar o número de categorias distintas (NDC) para avaliar a capacidade do sistema de medição em discriminar categorias de peças, recomendando um índice igual ou superior a 5 para a análise de controle de processo, já para controle de produto este índice não é significativo. Quando o desvio de repetitividade é significativo em relação à reprodutibilidade, é necessário verificar manutenção, robustez, sistemas de fixação, posição do dispositivo e estabilidade da peça. Em caso contrário, é essencial revisar treinamentos e procedimentos para eliminar ambiguidades ou implementar mecanismos de auxílio na medição.

2.2.3 Sistema de Medições Dimensionais

Com o progresso tecnológico, a metrologia e os sistemas de medição avançaram, resultando em diversas opções para mensurar uma mesma grandeza. Esses sistemas diferem em princípios de medição, incerteza, automação e robustez, impactando nos custos. A seleção do sistema deve considerar o custo-benefício (ALBERTAZZI; SOUSA, 2008; SECCO, 2019). Toledo (2014) recomenda que a resolução do instrumento seja de, no máximo, 10% da faixa de tolerância, ou, quando inviável, não superior a 25%.

Os sistemas de medição dimensionais avaliam se as tolerâncias dimensionais ou geométricas estão dentro das especificações. A tolerância dimensional é a variação permitida na dimensão da peça, e a tolerância geométrica abrange a variação de formas e posições. A combinação dessas tolerâncias permite a montagem adequada (SECCO, 2019).

Ali e Buajarern (2014) destacam que os avanços tecnológicos da metrologia possibilitaram o surgimento de uma nova abordagem: as técnicas de medição sem contato. Dentre essas técnicas, destacam-se a microscopia eletrônica de varredura, a microscopia eletrônica de transmissão, a tomografia computadorizada e o método interferométrico. No catálogo da empresa System (COESIA, 2022), é apresentada uma solução para medições dimensionais de placas cerâmicas sem contato, o planar e calibre, utilizando lasers que realizam medições comparativas entre a peça e um bloco padrão.

Emam e Sayyedbarzani (2019) e Sioma (2020) desenvolveram estudos utilizando máquinas de visão para realizar medições dimensionais. Os sistemas de medições sem toque e por imagem têm ganhado cada vez mais espaço nas

indústrias, estando fortemente atrelados aos conceitos da Indústria 4.0. Entretanto, Secco (2019) contrapõe que, em geral, equipamentos extremamente sofisticados possuem custos elevados e, por vezes, são inacessíveis para empresas de pequeno e médio porte ou com baixo nível de especialização. Nestes casos, as empresas devem desenvolver dispositivos baseados nos mesmos princípios de medição para a determinação das características geométricas toleradas.

2.2.3.1 Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC)

As MMC surgiram nas décadas de 50 e 60 e são utilizadas para medir tolerâncias dimensionais e geométricas em peças grandes e complexas (SECCO, 2019; LEACH et al. 2020). São instrumentos versáteis e amplamente empregados em diversos setores da economia. A metrologia dimensional por coordenadas é considerada uma opção viável para sistemas globais de garantia de qualidade (ALI; BUAJARERN, 2014; ARENHART; PIZZOLATO, 2020). Atualmente, as MMC são empregadas na calibração dos blocos padrões, conhecidos como placas padrões na indústria cerâmica, e podendo este equipamento ser uma alternativa para determinar as características dimensionais das placas cerâmicas.

As MMC operam com base no sistema cartesiano ortogonal de coordenadas, geralmente combinado com um programa computacional que utiliza algoritmos matemáticos. Esses algoritmos são fundamentados em três dimensões: comprimento (X), largura (Y) e altura (Z). Por meio desse sistema, as MMC são capazes de determinar as coordenadas espaciais em uma superfície da peça de trabalho (RAAB, 2002; ALI; BUAJARERN, 2014; LEACH et al. 2020).

Para realizar as medições, é necessário utilizar um sistema de apalpadores, normalmente equipados com ponta esférica de rubi sintético, e definir os pontos de referência para o alinhamento, conhecidos como "*Datum*", que formam a origem do sistema de coordenadas. As medições nas MMC são realizadas por pontos únicos, coletados nas superfícies das peças, ou por varredura, onde os pontos são coletados continuamente através do toque do apalpador ou de sonda ótica. As condições ambientais recomendadas para as medições são temperatura de (20 ± 1) °C e umidade relativa de (50 ± 3) % (ABNT, 1997; ALI; BUAJARERN, 2014; LEACH et al. 2020).

Raab (2002) destaca dois tipos de MMC disponíveis no mercado. Os equipamentos convencionais apresentam maior precisão, porém são mais

dispendiosos e possuem limitações no tamanho e volume de medição. E os MMC portáteis, conhecidos como Braços de medição tridimensional (BMT), requerem um investimento menor e são projetados para operar em locais não controlados, oferecendo maior flexibilidade no tamanho e volume de medição.

Leach et al. (2020) afirma que o sistema de medição por coordenadas não se restringe às MMC de medição por toque, abrangendo também técnicas de raios X e óticas. O autor destaca limitações das MMC por contato: deflexões em caso de deformação plástica, baixa dureza da superfície, tempo e limitação da coleta ponto a ponto.

2.3 PLACAS CERÂMICAS

A cerâmica é um material antigo, com diversas aplicações, desde isolantes até produtos de construção civil, possuindo potencial para inovação tecnológica (BIFFI, 2000; OLIVEIRA; HOTZA, 2015; LEONEL, 2020). Segundo Kingery (1958), é a arte e ciência de fabricar objetos sólidos com materiais inorgânicos e não metálicos.

Placas cerâmicas são finas peças feitas de argilas, podendo conter outras matérias-primas, moldadas por técnicas apropriadas, secas e, em seguida, decoradas e sinterizadas a altas temperaturas. Suas características incluem incombustibilidade, resistência à luz, facilidade de limpeza, alta durabilidade da superfície para maior vida útil e alta resistência mecânica, apesar de serem frágeis (MENEGAZZO, 2001; BAENA, 2011; OLIVEIRA; HOTZA, 2015; ISO, 2018c).

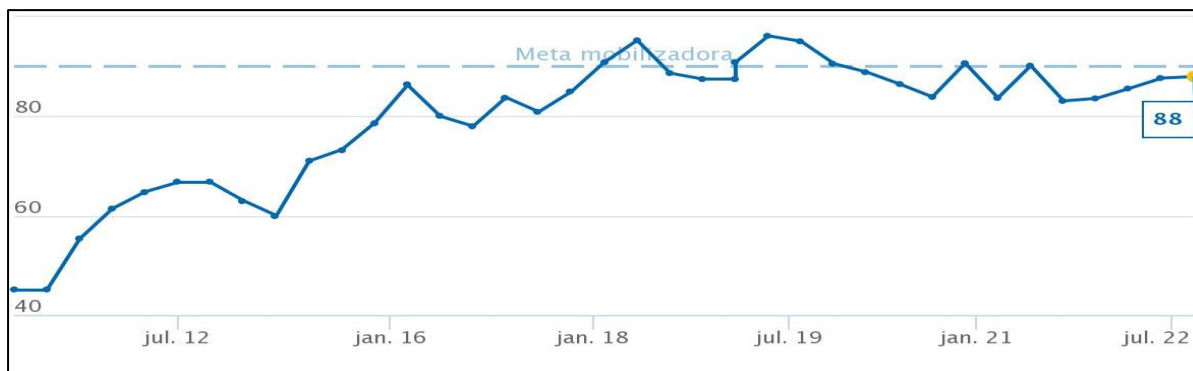
2.3.1 Mercado Nacional de Placas Cerâmicas: Normas e Qualidade

O Brasil é uma figura de destacada no setor cerâmico mundial, sendo um importante produtor (3°), consumidor (2°) e exportador (7°). O porcelanato, que tem onde está concentrada a produção de placas de grande formato, registrou crescimento significativo, aumentando 30% entre 2020 e 2021, tornando-se a segunda tipologia mais produzida no país. O PSQ qualifica cerca de 88% da produção nacional, com 61% de BIlb e 25% de porcelanato. As regiões sul, sudeste (70% da produção nacional) e nordeste são os principais polos produtores (ANFACER, 2022; CCB, 2022).

O setor cerâmico evidencia uma notável evolução na qualidade ao longo do

tempo, destacando-se mundialmente. O PSQ demonstra um significativo aumento na taxa de conformidade desde o início do programa até o presente momento, conforme ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - Processo de fabricação de placas cerâmicas prensadas



Fonte: PBQP-H (2022)

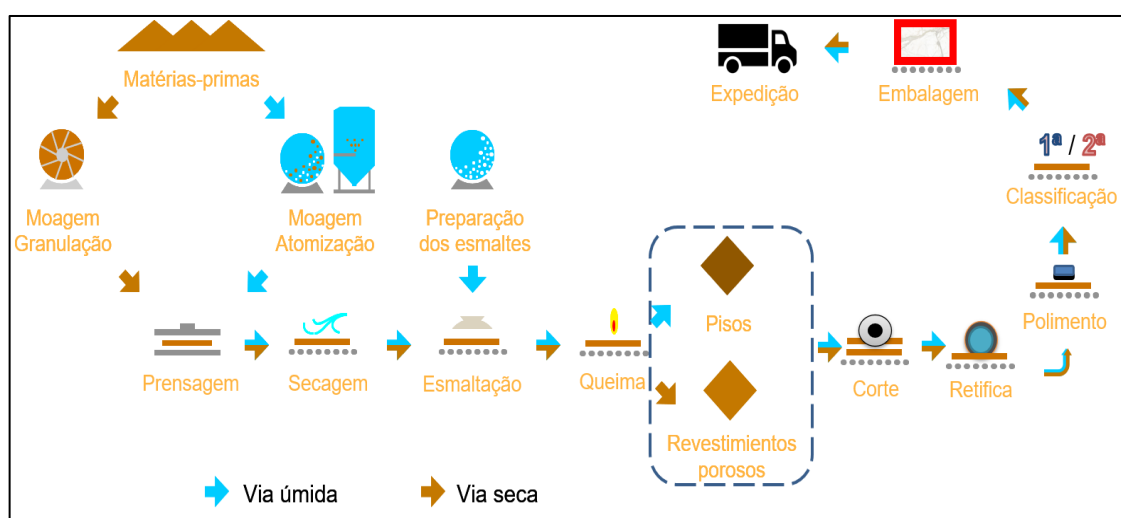
Em 1993, a ANFACER estabeleceu o Centro Cerâmico do Brasil (CCB) com o objetivo principal de aprimorar a qualidade dos produtos cerâmicos fabricados no país. Há três décadas, o CCB tem desempenhado um papel crucial como uma instituição tecnológica de destaque no cenário da indústria cerâmica brasileira, desempenhando um papel fundamental no desenvolvimento de normas de qualidade e certificações. Anualmente, realiza mais de 30.000 ensaios em placas cerâmicas, incluindo 3.600 ensaios dimensionais e outros em diferentes áreas da construção civil. A instituição figura entre os principais laboratórios de revestimentos cerâmicos do mundo.

Desde 2020, o Brasil adotou as normativas internacionais ISO 13006 e todas as partes da ISO 10545, que definem termos, classificações e requisitos para placas cerâmicas de melhor qualidade comercial, além de métodos de ensaio. Essas regulamentações apresentam padrões dimensionais mais restritos e critérios de absorção de água mais exigentes do que a antiga norma nacional (ISO, 2018c). No entanto, não contemplam pastilhas cerâmicas e ensaio para resistência ao escorregamento, levando à publicação das normas ABNT NBR 16919 em 2020 e ABNT NBR 16928 em 2021, para esses aspectos específicos (DEMARCH, 2019; CCB, 2022).

2.3.2 Processo de Produção e Influência nas Características Dimensionais

A produção das placas cerâmicas pode ser realizada por extrusão ou prensagem, sendo esta última o processo mais utilizado, devido à estabilidade dimensional obtida no produto acabado (BIFFI, 2000; MENEGAZZO, 2001; BARBA, 2002; BAENA, 2011; OLIVEIRA; HOTZA, 2015), conforme esquematização apresentada na figura 8.

Figura 8 - Processo de fabricação de placas cerâmicas prensadas



Fonte: Adaptado (BARBA et. al., 2002, p.20)

Algumas etapas do processo são responsáveis por influenciar nas características dimensionais das placas cerâmicas. Conforme Biffi (2000), uma moagem insuficiente gera maior variação de tamanhos, enquanto uma granulometria excessivamente fina resulta em maior retração de queima. Diversos autores (BIFFI, 2000; MENEGAZZO, 2001; OLIVEIRA; HOTZA, 2015) atribuem alguns defeitos relacionados à geometria ao processo de prensagem, tais como falhas de carregamento e variação de densidade na peça.

O processo de esmaltação também exerce influência sobre as características dimensionais das placas cerâmicas. Segundo Biffi (2000), Bó et al. (2012) e Sánchez et al. (2018), a diferença de retração linear entre a massa (base), o engobe e o esmalte influenciam na planeza. Durante o processo de queima, intervenções podem ser realizadas para corrigir ou minimizar defeitos de planeza. Na zona de resfriamento, é possível controlar as variações dimensionais que afetam o tamanho,

retitude e perpendicularidade. Outro defeito inerente à queima é a deformação piropoplástica (BIFFI, 2000; SÁNCHEZ et al., 2018).

A última etapa do processo é a classificação, na qual ocorre a segregação do produto de acordo com sua qualidade superficial e suas características dimensionais. A Figura 9 exibe exemplos de defeitos identificados pelo equipamento de medição da empresa System, chamado de Planar, para linhas de produção que envolvem as características planares detectadas por laser.

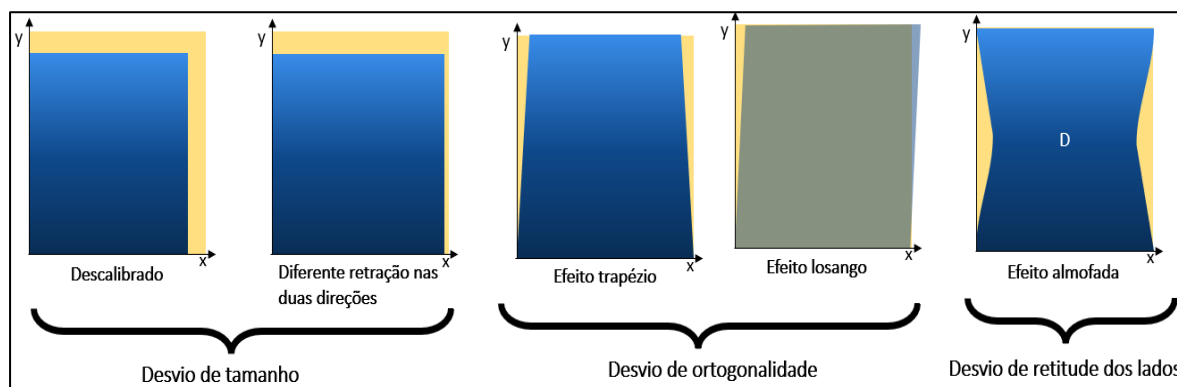
Figura 9 – Defeitos reconhecidos pelo planar (SYSTEM)



Fonte: Coesia (2022, p. 4)

Para produtos prensados, os defeitos dimensionais resumidos na figura 10 são desvios produzidos por uma retração não uniforme da massa no sentido do comprimento e largura (BIFFI, 2000). A classificação dimensional segrega os produtos com defeitos e, para evitar problemas com os clientes, aqueles decorrentes da falta de uniformidade dimensional intrínseca ao processo de fabricação de placas cerâmicas, onde as peças mais próximas aos queimadores sofrem maior retração do que as mais distantes. Separam-se as placas com base em suas dimensões reais, surgindo o conceito de bitola ou calibre, que corresponde à separação das peças com base em seu tamanho real. A amplitude de cada bitola dependerá do padrão de qualidade de cada empresa (ABELLÁN-NEBOT, 2018).

Figura 10 - Defeitos dimensionais



Fonte: Autor, 2022

Em sua pesquisa, Abellán-Nebot (2018) desenvolveu um modelo capaz de explicar 70% da variabilidade dimensional, possibilitando uma redução de 65% da variação dimensional. Isso tem um impacto significativo no aumento da qualidade, na redução dos calibres e, conseqüentemente, nos custos de estocagem.

2.3.3 Características Dimensionais

O SMA define sete características dimensionais para a avaliação de desvios de tamanho, orientação e forma (ISO, 2018a; SECCO, 2019). No apêndice A, encontra-se detalhado o procedimento para determinar essas características dimensionais com o dataplucômetro.

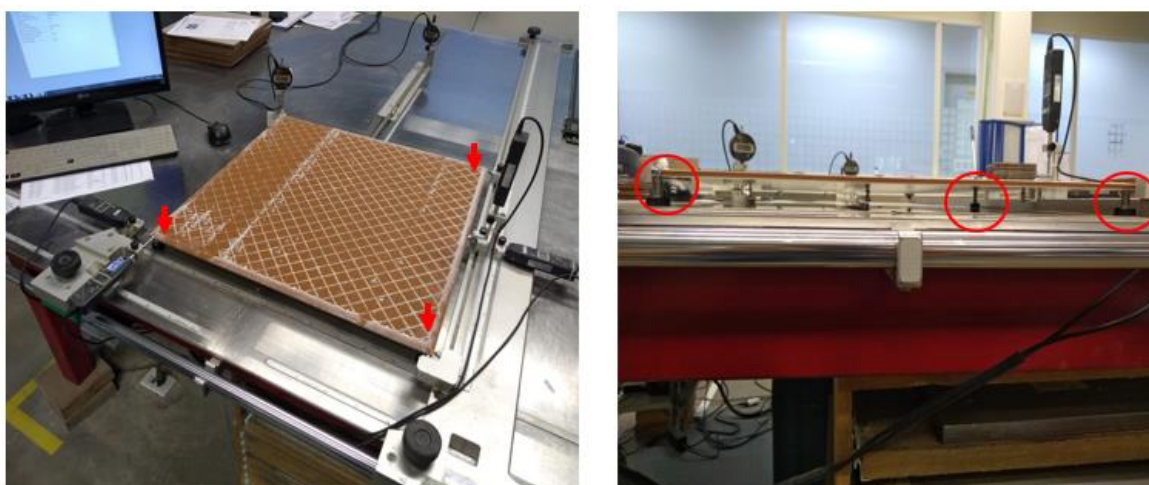
A avaliação do tamanho é essencial para garantir a quantidade declarada pelo fabricante e o correto assentamento das peças com juntas especificadas. No entanto, a tolerância de até 4 mm dentro de uma mesma caixa (ISO, 2018c), compromete a eficiência da produção e não atende às expectativas dos clientes. Seria mais apropriado estabelecer limites menores para a variação entre as peças e uma margem maior em relação ao valor declarado, garantindo a qualidade desejada e promovendo a sustentabilidade (ABELLÁN-NEBOT, 2018; ISO, 2018c).

As tolerâncias de forma (retitude lateral) e de orientação (ortogonalidade), exemplificadas na figura 10, têm o propósito de verificar se, ao posicionar as placas lado a lado, evita-se a formação de frestas irregulares ou desvios de esquadro, permitindo o assentamento com juntas mínimas e um alinhamento adequado das placas (BAENA 2011; ISO, 2018a; EMAM; SAYYEDBARZANI, 2019).

No entanto, o SMA possui limitações, como o número limitado de pontos utilizados para avaliar a retitude, especialmente em peças de grande formato, o que impossibilita a detecção de potenciais desvios entre esses pontos. No que diz respeito à ortogonalidade, o SMA força o alinhamento da placa com base em apenas três pontos, o que pode mascarar desvios significativos ou resultar na rejeição de placas de boa qualidade. Além disso, o SMA avalia independentemente os desvios de tamanho, retitude e ortogonalidade, o que pode levar a situações em que cada desvio individual esteja dentro dos limites tolerados, mas a soma deles afete a aplicação final (SECCO, 2019).

As tolerâncias relacionadas à planeza, que englobam a curvatura central, curvatura lateral e empeno, estão exemplificadas na figura 9. Seu propósito é garantir que as peças não apresentem abaulamentos que possam impedir o correto preenchimento de argamassa, o acúmulo de água no centro ou desníveis entre as placas quando forem assentadas (ALI; BUJARERN, 2014; ISO, 2018a; EMAM; SAYYEDBARZANI, 2019). No início do século, Biffi (2000) já alertava que os desvios de planeza não se restringem a pontos específicos, o que representa outra limitação do SMA. Essa limitação é agravada em placas de grande formato, uma vez que o SMA não considera os desvios ao longo de toda a extensão da placa, nem o efeito das deformações pirolásticas, outro fator negativo é a deformação elástica gerada em função do seu próprio peso que a placa sofre ao ser colocada sobre 3 apoios inferiores do dataplucômetro em plano horizontal, conforme evidenciado na figura 11.

Figura 11 - Dataplucômetro (Dispositivo de medição atual)



Fonte: Autor, 2022

A norma ISO 10545-2 (2018a) recomenda o uso do dataplucômetro para medir as características dimensionais das placas cerâmicas, exceto a espessura. Alternativamente, um paquímetro pode ser utilizado para medir o tamanho. A medição da espessura requer um relógio comparador fixo em uma mesa. Os equipamentos devem apresentar resolução de mínima de 0,1 mm, entretanto, a resolução mínima de 0,1 mm torna-se problemática com as tolerâncias mais restritas, dificultando a obtenção da precisão necessária nas medições.

As tolerâncias das placas prensadas são estabelecidas com base no tipo de placa, considerando seu formato e se as bordas foram retificadas. No caso das placas extrudadas, as tolerâncias são determinadas de acordo com a tipologia e a natureza do processo (ISO, 2018a). As tolerâncias específicas estão resumidas nas tabelas 6, 7 e 8.

Tabela 6 - Resumo das tolerâncias de produtos prensados

Requisito Prensadas	Não Retificada			Retificada		
	7 cm ≤ N < 15 cm	N ≥ 15 cm ¹⁾		7 cm ≤ N < 15 cm	N ≥ 15 cm ¹⁾	
	mm	%	mm	mm	%	mm
N/W (modulares)	-					
N/W (Não modulares)	± 2 % (Max. ± 5 mm)					
r/S_w	± 0,9	± 0,6	± 2,0	± 0,4	± 0,3	± 1,0
Espessura	± 0,5	± 5 ²⁾	± 0,5	± 0,5	± 5 ²⁾	± 0,5
Retitude dos lados	± 0,8	± 0,5	± 1,5	± 0,4	± 0,3	± 0,8
Ortogonalidade			± 2,0			± 1,5
Curvatura central			± 0,6	± 0,4	± 1,8	
Curvatura Lateral						
Empeno						

¹⁾ Adota-se o mais restritivo ²⁾ Para a tipologia BIII adota-se 10%

Fonte: Adaptado, (ISO, 2018c)

Tabela 7 - Resumo das tolerâncias de pastilhas

Requisito Pastilhas	Não Retificada		Retificada	
	N < 7 cm	7 cm ≤ N < 10 cm	N < 7 cm	7 cm ≤ N < 10 cm
	mm	mm	mm	mm
N/W (modulares)	-			
N/W (Não modulares)	± 2 % (Max. ± 5 mm)			
r/S_w	± 0,75	± 0,9	± 0,4	± 0,4
Espessura	± 0,5	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Retitude dos lados	Não se aplica	± 0,8	Não se aplica	± 0,4
Ortogonalidade				± 0,6
Curvatura central				
Curvatura Lateral				
Empeno				

Fonte: Adaptado, (ISO, 2018c)

Tabela 8 - Resumo das tolerâncias de produtos extrudados

Requisito Extrudadas	Precisão				Natural	
	Ala e Alb	Alla-1	Alla-2	Allb-1, Allb-2 e Alll	Ala e Alb	Alla-2, Allb-1 Allb-2 e Alll
N/W (modulares)	-					
N/W (Não modulares)	± 3 mm					
r/S _w	± 1,0 % ± 2 mm	± 1,25 % ± 2 mm	± 1,5 % ± 2 mm	± 2,0 % ± 2 mm	± 2,0 % ± 4 mm	
r/R	± 1,0 %				± 1,5 %	
Espessura	± 10%					
Retitude dos lados	± 0,5 %		± 1,0 %		± 0,6 %	± 1,0 %
Ortogonalidade	± 1,0%				± 1,0%	
Curvatura central	± 0,5 %		± 1,0 %		± 1,5 %	
Curvatura Lateral ³⁾	± 0,5 %		± 1,0 %		± 1,5 %	
Empeno	± 0,8 %		± 1,5 %		± 1,5 %	
Garras cônicas	Altura, h, para placas com área de superfície, A					
49 cm ² ≤ A < 60 cm ²	Mínimo h = 0,7 mm; Máximo h = 3,5 mm					
A ≥ 60 cm ²	Mínimo h = 1,5 mm; Máximo h = 3,5 mm					
Formato	L ₀ – L ₁ > 0; L ₀ – L ₂ > 0; L ₀ – L ₃ > 0					

Fonte: Adaptado, (ISO, 2018c)

2.3.4 Métodos Alternativos

Estudos buscam métodos alternativos para medir características dimensionais de placas cerâmicas. Ali e Buajarern (2014) e Fazio et al. (2018) usaram MMC. Emam e Sayyedbarzani (2019) e Sioma (2020) investigaram métodos com câmeras para o controle na produção de placas cerâmicas.

Ali e Buajarern (2014) propuseram um método alternativo que coleta pontos ao longo das diagonais e laterais das peças para considerar o desvio máximo, especialmente em peças grandes, destacando que os desvios não se concentram nos pontos normativos (BIFI, 2000). No entanto, sua comparação com o método normativo usando uma MMC dificultou a avaliação completa das características dimensionais. Fazio et al. (2018) conduziram um estudo abrangente comparando todas as características da norma, exceto a espessura, com o uso de um dataplucômetro, uma MMC e um BMT em 10 placas de diferentes formatos. Seu método demonstrou ser altamente promissor, produzindo resultados consistentes entre as três técnicas de medição.

Emam e Sayyedbarzani (2019) propuseram um sistema de visão estéreo para caracterização dimensional de placas cerâmicas na linha de produção, mas não compararam com o método atual e não detalharam os testes em produção. Sioma (2020) usou câmeras com laser para análise tridimensional, eficaz na detecção de

defeitos superficiais e desvios de planeza, mas não abordou tamanho, retitude lateral e ortogonalidade.

Métodos de visão, são promissores na Indústria 4.0 medindo peças em movimento com precisão, integrando inteligência artificial, mas sua aplicação como substitutos dos métodos tradicionais ainda requer estudos (BADUGE et al., 2022). Apesar de não terem sido testados em laboratório, eles oferecem rapidez e precisão independentes da habilidade do operador, baseados em princípios tridimensionais, permitindo comparações com outros métodos de medição. Essas abordagens contribuem para avanços da indústria 4.0 na indústria cerâmica.

As MMCs surgem como alternativas viáveis, já que são empregadas atualmente na calibração das placas padrões, estabelecendo uma base sólida para este estudo. A pesquisa em questão se expandirá para investigar a relação entre a tipologia, formato e espessura das peças e as deformações, com o objetivo de estabelecer critérios para determinar a viabilidade da utilização do SMA e SMC.

3 MÉTODO DE PESQUISA

Este projeto de pesquisa adotará uma abordagem quantitativa na área de engenharia de produção, analisando a compatibilidade entre o sistema de medição atual e o sistema de medição proposto, bem como a qualidade de seus resultados. A pesquisa não utilizará questionários, e o estudo manipulará as variáveis, configurando um experimento, não um quase-experimento. A pesquisa qualitativa não é aplicável, pois não considerará a perspectiva dos indivíduos envolvidos, característica distintiva desse tipo de pesquisa (MARTINS, 2018).

Segundo Bryman (1989), ao conduzir um estudo quantitativo, devem-se considerar quatro principais preocupações. Primeiramente, é necessário garantir a mensurabilidade, ou seja, certificar-se de que as hipóteses contenham conceitos passíveis de medição. Em seguida, é essencial demonstrar causalidade para explicar a relação entre as variáveis. Além disso, é importante buscar a generalização dos resultados para além dos limites da pesquisa, bem como garantir a capacidade de replicação do estudo. Nesse sentido, o desenvolvimento desta pesquisa levará em conta essas principais preocupações da abordagem quantitativa, assegurando a sua qualidade e rigor metodológico:

- a) **Mensurabilidade**, onde as hipóteses serão avaliadas através de dados de medição, e as variáveis de influência serão mensuradas e controladas;
- b) **Causalidade**, que estabelecerá a relação causal entre os métodos avaliados e suas variáveis;
- c) **Generalização**, buscando um método aplicável a qualquer formato e tipologia por meio de estudos de alguns formatos;
- d) **Replicação**, com o objetivo de desenvolver um método para atualizar a norma ISO 10545 parte 2 (2018a), fornecendo informações suficientes para reduzir as variações interlaboratoriais nas medições dimensionais.

O método de medição por coordenadas, assim como outras abordagens alternativas para a caracterização dimensional, e a aplicação de ferramentas como a MSA, são ainda incipientes no setor de revestimentos cerâmicos. Nesse contexto, o levantamento das referências e, por conseguinte, a fundamentação teórica em questão, não se limitou ao âmbito específico deste setor. Através da fundamentação teórica, foi desenvolvida e planejada a intervenção, levando em consideração os

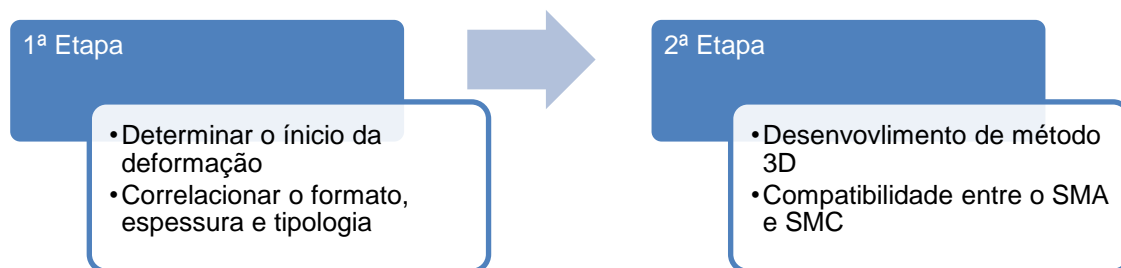
seguintes aspectos relevantes:

- a) A utilização de um grupo de controle (SMA);
- b) A determinação e o controle das variáveis que podem influenciar os resultados, incluindo aquelas de natureza ambiental;
- c) A aleatorização das medições;
- d) A garantia da precisão do método, assegurado por meio de um número adequado de repetições das medições;
- e) A busca de equivalência entre os grupos, uma vez que, por se tratar de um ensaio não destrutivo, as mesmas peças serão utilizadas em ambos os sistemas de medição;

3.1 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

O estudo encontra-se estruturado em duas etapas macro. Na primeira etapa, procedeu-se à determinação do grau de deformação das placas, correlacionando o seu formato, espessura e tipologia. Na segunda etapa, desenvolveu-se o SMC, contemplando a padronização do programa de medição, a implementação de sistemas de apoio e fixação da peça, e, em seguida, avaliou-se a tendência e estabilidade de ambos os SM e a compatibilidade do SMA e SMC, através da utilização de um estudo de R&R. A figura 12 ilustra as etapas do método.

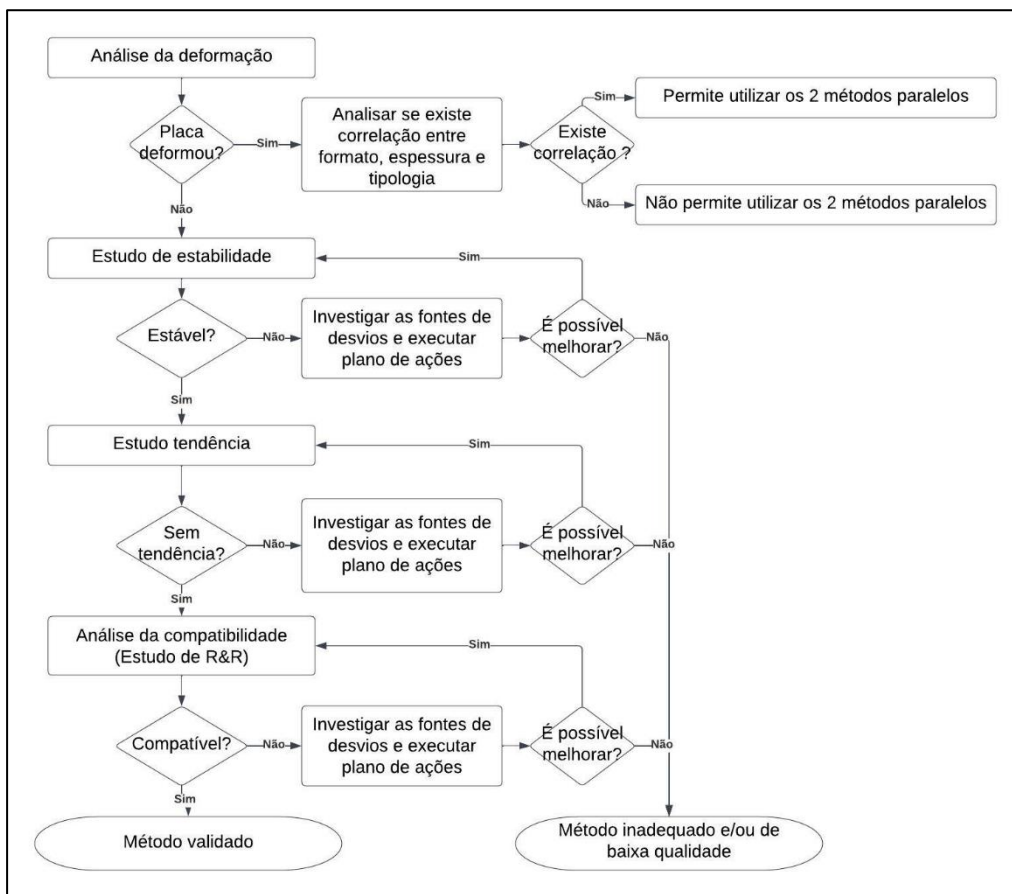
Figura 12 - Estrutura do estudo



Fonte: Autor, 2023

Conforme ilustrado na figura 13, as etapas estão relacionadas entre si, demonstrando que a aplicabilidade do método não depende exclusivamente de uma única etapa, mas da análise conjunta de todos os estudos realizados.

Figura 13 - fluxograma de trabalho

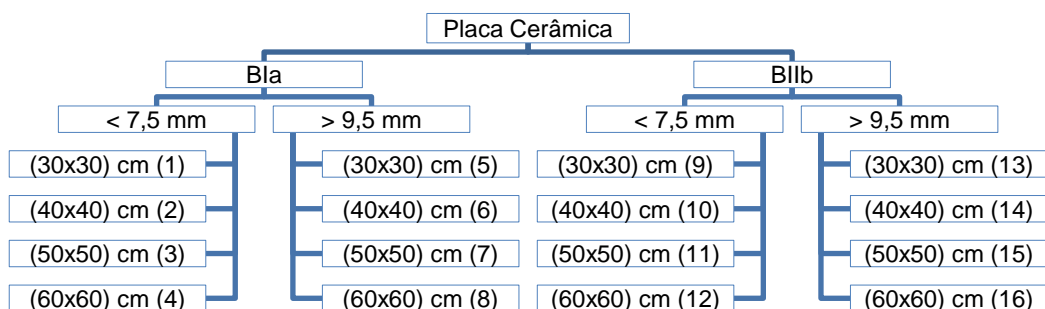


Fonte: Autor, 2023

3.1.1 Identificar o Início da Deformação

Nesta etapa, foram realizadas medições em 16 placas cerâmicas (Figura 14), selecionadas com base em suas Tipologias (Tip), Espessura (E) e Formato (F), representando, assim, as variáveis de entrada do experimento. Para a execução desta etapa, as variáveis consideradas estão listadas e justificadas na tabela 9.

Figura 14 - Variáveis de entrada



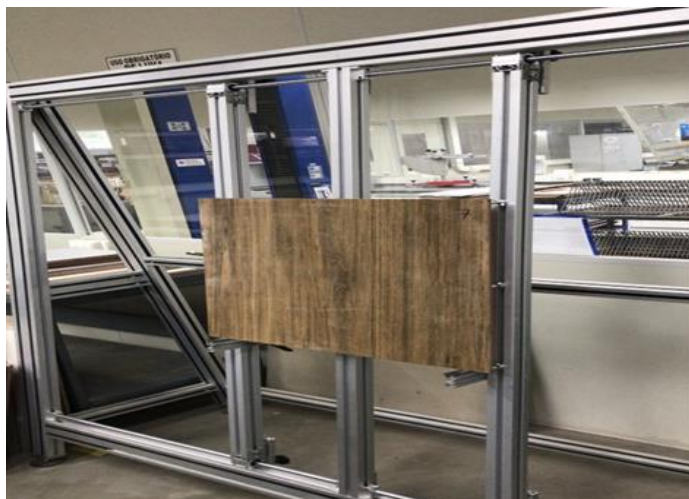
Fonte: Autor, 2023

Tabela 9 - Variáveis consideradas na análise da deformação

Variáveis	justificativa
Tipologia (Tip) (1) BIa (Porcelanato) (2) BIb (Semi- poroso)	<p>As tipologias BIa e BIb foram escolhidas por representarem o maior volume de produção no Brasil (CCB,2022). Ademais, essas tipologias apresentam a menor porosidade e densidade (BIa), ao passo que são as segundas mais porosas e menos densas (BIb). A tipologia BIII (a mais porosa) não foi selecionada devido à baixa representatividade nos volumes produzidos e à dificuldade em encontrar placas com espessuras baixas.</p>
Espessura (E) (1) Menor que 7,5 mm (2) Maior que 9,0 mm	<p>A espessura das placas foi dividida em dois níveis: peças finas e grossas. A seleção das placas finas baseou-se no teste de resistência à ruptura (ISO, 2019), o qual estabelece que placas com espessura $\leq 7,5$ mm devem ser cortadas em formatos pequenos (20 cm x 20 cm), visando reduzir o efeito da curvatura antes da ruptura. As placas de maior espessura (> 9 mm) correspondem às maiores espessuras encontradas em produtos normalmente submetidos a testes pelo CCB. Nesta etapa, não serão avaliadas as espessuras entre 7,5 mm e 9 mm, pois, caso haja deformação nas amostras de 9 mm, automaticamente esta faixa também apresentará deformação. No entanto, caso não haja deformação nessa faixa, será necessário realizar um estudo para determinar a partir de qual espessura inicia-se a deformação.</p>
Formato (F) (1) (30x30) cm (2) (40x40) cm (3) (50x50) cm (4) (60x60) cm	<p>Placas quadrados de 30 cm, 40 cm, 50 cm e 60 cm foram usados de acordo com a faixa de medição do SMA no CCB.</p>
Variável resposta Deformação elástica (De)	<p>Como variável de saída do estudo, foi selecionada a deformação elástica (De), que consiste na diferença entre os resultados médios do empeno das placas cerâmicas obtidos na condição 1 e na condição 2. Na condição 1, a peça é simulada no dataplucômetro (Figura 11), sendo colocada na suporta em três vértices, enquanto o relógio comparador de empeno é posicionado em seu quarto vértice. A condição 2 apoia a peça em um painel inclinado a aproximadamente 83° em relação ao chão, com pinos de apoio reguláveis para evitar que a peça se mova durante a medição (figura 15).</p>

Fonte: Autor, 2023

Figura 15 – Segundo modelo do painel vertical



Fonte: Autor, 2023

A medição foi conduzida utilizando o BMT modelo Edge FaroArm®, equipado com scanner, após uma calibração adequada prévia às medições. As placas foram medidas com a superfície de uso voltada para cima, permitindo a coleta de dados pelo BMT. As placas foram identificadas e para a condição 1 foram posicionadas horizontalmente em três apoios inferiores e o relógio comparador de empeno foi posicionado no quarto vértice simulando a medição normativa no dataplucômetro. O alinhamento foi feito no programa Faro CAM2® e o empeno foi medido por scanner para evitar deformações por toque (ALI; BUJARERN, 2014). O procedimento foi replicado no painel inclinado (condição 2). O detalhamento completo desse procedimento encontra-se descrito no apêndice B.

Na sequência, a placa foi submetida a digitalização para analisar o comportamento em cada situação de apoio. Utilizando o software Faro CAM2®, foram extraídos mapas de cores das nuvens de pontos. As cores quentes (do amarelo ao vermelho) representam os pontos acima do plano de referência, enquanto as cores frias (do azul claro ao azul escuro) representam os pontos abaixo do plano de referência, e o verde corresponde aos desvios dentro da tolerância estabelecida. A tolerância definida para o estudo foi de 0,2 mm, aproximadamente 5% da tolerância normativa para as tipologias e tamanhos avaliados.

Com base no objetivo da pesquisa experimental, que é estudar a deformação elástica de placas cerâmicas durante a realização do ensaio dimensional (ISO, 2018a), as variáveis Tip, E e F foram utilizadas para o planejamento do delineamento experimental. Utilizou-se um DOE - fatorial multinível, com três variáveis de entrada, quatro níveis na variável F e dois níveis nas variáveis Tip e E. O DOE consiste em um teste ou uma série de testes que avaliam como as mudanças na variável de entrada influenciam a variável de saída (MONTGOMERY, 2009).

A matriz experimental mais adequada é um Planejamento Fatorial Multinível L16, com 16 experimentos - Experimento fatorial L16, representa 2^4 combinações das variáveis - conforme listado na tabela 10. Todas as medições foram realizadas aleatoriamente pelo mesmo técnico, à temperatura de (20 ± 2) °C e em duplicata, a fim de evitar viés e minimizar influências.

Tabela 10 - Planejamento Fatorial Multinível L16

Parâmetros reais			Parâmetros codificados		
F	Tip	E	F	Tip	E
(30x30) cm	Bla	Fino	1	1	1
(30x30) cm	Bla	Espesso	1	1	2
(30x30) cm	Bllb	Fino	1	2	1
(30x30) cm	Bllb	Espesso	1	2	2
(40x40) cm	Bla	Fino	2	1	1
(40x40) cm	Bla	Espesso	2	1	2
(40x40) cm	Bllb	Fino	2	2	1
(40x40) cm	Bllb	Espesso	2	2	2
(50x50) cm	Bla	Fino	3	1	1
(50x50) cm	Bla	Espesso	3	1	2
(50x50) cm	Bllb	Fino	3	2	1
(50x50) cm	Bllb	Espesso	3	2	2
(60x60) cm	Bla	Fino	4	1	1
(60x60) cm	Bla	Espesso	4	1	2
(60x60) cm	Bllb	Fino	4	2	1
(60x60) cm	Bllb	Espesso	4	2	2

Fonte: Autor, 2023

3.1.2 Desenvolvimento do método 3D e análise da compatibilidade

Antes do início deste estudo, o CCB adquiriu o BMT devido aos resultados de Fázio et al. (2018). O BMT tem resolução de 0,001 mm, apenas 1% do exigido pela norma, 0,1 mm, abaixo do limite de 10%, recomendado por AIAG (2010) e TOLEDO (2014). Adicionalmente, foi desenvolvido um sistema de fixação inclinado. O design desse sistema foi inspirado por meio de uma análise comparativa com instituições do setor cerâmico, incluindo os equipamentos Datadimension-v da Gabbrielli Technology (Itália) e o Tile Scanner da ELVI (Espanha) e o serviço de medição com painel inclinado e BMT do ITC (Espanha), que inspirou o modelo do CCB (Figura 16).

Figura 16 - Painel de apoio laboratório espanhol



Fonte: Autor, 2019

Para criar o SM, foram consideradas questões relacionadas ao projeto, desenvolvimento, fabricação e implementação. O checklist apresentado no manual de referência (AIAG, 2010, p. 37-39) serviu como guia de orientação. Nessa etapa registrou-se as decisões e ações tomadas para o desenvolvimento do SM, dividindo-o em duas etapas: Programa de medição, replicando o princípio do dataplucômetro; Sistema de apoio e fixação, eliminando a deformação elástica das placas.

Após o desenvolvimento do SM, foram empregados testes específicos que visaram identificar e mensurar quatro categorias de erros de medição: tendência, estabilidade, repetitividade e reprodutibilidade. A não realização do estudo de linearidade se fundamentou no equipamento ser previamente submetido a calibração por laboratório acreditado, o qual atestou a precisão e linearidade.

Foram realizados três estudos distintos. O primeiro analisou a estabilidade ao longo do tempo dos SM. O segundo, abordando a tendência, complementou os resultados da calibração, investigando erros sistemáticos. O terceiro estudo comparou os SMA e SMC usando o estudo de R&R, alternando o equipamento de medição em vez do avaliador, considerando que a reprodutibilidade nem sempre se relaciona com variação do avaliador, mas pode decorrer de outras fontes, como a variação entre os SM (AIAG, 2010; TOLEDO, 2014). Os estudos realizados foram conduzidos por profissionais qualificados, seguindo as diretrizes para avaliação de sistemas de medição de variáveis do AIAG (2010).

O estudo de estabilidade foi realizado por um técnico, que fez 30 medições e calculou a média dessas medições como valor de referência. Em seguida, foram feitas medições em triplicata em uma placa de (50x50) cm ao longo de 16 dias úteis, duas vezes por dia em horários alternados. Isso resultou em 32 subgrupos racionais. Os cálculos foram feitos, seguidos pela criação de gráficos de carta de controle de média e amplitude, conforme descrito na seção 2.2.2.1.

Para realizar o estudo de tendência, escolheu-se uma placa de formato (30x30) cm, que havia sido previamente calibrada em um laboratório acreditado. A escolha dessa placa não foi baseada em nenhuma característica específica, mas sim em sua disponibilidade no laboratório. A calibração foi efetuada por meio de uma MMC de maior precisão em relação àquela utilizada no SMC. A placa calibrada foi submetida a 12 medições realizadas por um único técnico. Em sequência, foram conduzidos os cálculos e a análise indicados no item 2.2.2.2. Para estas análises foi considerado aceitável um desvio de repetitividade menor ou igual a 10% da tolerância mais

restritiva das características.

O estudo de R&R considerou a distribuição da variação total de 99%, adotando-se o fator multiplicador de 5,15 (AIAG, 2010; TOLEDO, 2014). Foram utilizadas 9 placas nos formatos (30x30) cm, (50x50) cm e (60x60) cm, sendo 3 peças de cada formato. Para o objetivo deste estudo de avaliar a compatibilidade entre os SM foi adotado os diferentes SM para avaliar a reprodutibilidade ao invés dos operadores, conforme fundamentado pelo AIAG (2010) e Toledo (2014). Portanto o estudo foi conduzido nos 2 métodos: SMA² e SMC (k), por um analista previamente treinado e habilitado para utilizar os dois SM, com 9 peças (n) e 3 repetições (r), totalizando 18 amplitudes (n (9) x k (2)).

As medições foram aleatorizadas pelo pesquisador para assegurar independência estatística e realizadas em temperatura controlada de (20± 2) °C. O controle da temperatura visa eliminar a variável do efeito das dilatações decorrente a variação de temperatura (ABNT, 1997; FARAGO; CURTIS, 1994). Em complemento os pontos de coleta de dados do SMA foram identificados para serem replicados no SMC. Estas ações foram tomadas a fim de controlar as variáveis que podem influenciar o experimento (MARTINS, 2018).

Subsequentemente, uma análise gráfica e numérica foi conduzida por meio do método ANOVA. Essa análise levou em consideração as tolerâncias (amplitudes da especificação) adotadas neste estudo. Os limites de aceitação estão definidos na tabela 11. Foi adotado o critério de aceitação de 20% sugerido por Toledo (2014), entretanto para as características tamanho e retitude lateral, cujo as tolerâncias são mais rigorosas, foi adotado o limite de 30%, que conforme o AIAG (2010) é aceitável em situações específicas, tomando-se o cuidado para que o desvio padrão de R&R não ultrapassasse 0,1 mm (resolução exigida pela norma).

Tabela 11 - limite de aceitação %RR

Características	Tolerância (mm)	%R&R aceitável
Tamanho	2,0 (±1,0)	30%
Retitude lateral	1,6 (±0,8)	30%
Ortogonalidade	3,0 (±1,5)	20%
Planares (empeno, curvatura central e lateral)	3,6 (±1,8)	20%

Fonte: Autor, 2023

² Em um teste paralelo, um dataplucômetro foi inclinado a 83° e conduzido medições comparativas similares a primeira etapa deste estudo, evidenciando a eliminação da deformação elástica no dataplucômetro inclinado, sendo este utilizado para aumentar a faixa de medição até 60 cm, para comparação entre o SMA e o SMC.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos experimentos planejados com o objetivo de avaliar a capacidade dos SMA e SMC e identificar se há compatibilidade entre esses dois métodos.

Os resultados apresentados neste capítulo foram divididos em duas partes, sendo que na primeira são mensurados os efeitos da deformação elásticas por meio de testes estatísticos e análise de imagens. O propósito desta análise é identificar o impacto do formato, espessura e tipologia na deformação de placas cerâmicas. Esses dados foram utilizados na decisão do procedimento de medição. Na segunda parte foi projetado o SMC e em seguida foram feitas as análises estatísticas e calculado os índices de repetibilidade e reprodutibilidade, bem como a somatória das variâncias através do índice de R&R.

4.1 ANÁLISE DOS FATORES QUE INFLUENCIAM A DEFORMAÇÃO DAS PLACAS CERÂMICAS

O primeiro passo foi realizar o processo de medição em ambas as condições de apoio (inclinada e horizontal) e calcular as deformações médias, cujo resultados foram analisados e resumidos na tabela 12. No passo seguinte, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) para identificar a influência dos fatores considerados no experimento (formato, espessura e tipologia). Foram estimados os efeitos principais e as interações entre esses fatores, cuja variáveis foram definidos previamente no capítulo 3 desta dissertação. Os resultados referentes à influência das variáveis F - Formato (30, 40, 50 e 60), Tip – Tipologia (BIa e BIb) e E - Espessura (<7,5 mm e > 9,0 mm) na deformação estão na figura 18, os resultados dos desvios padrão nas figuras 17, a da análise ANOVA na tabela 13, o teste de Tukey na tabela 14 e no mapa de cores quentes e frias nas figuras 19 a 22.

Tabela 12 - Planejamento Fatorial Multinível L16 e resultados

Parâmetros reais			Parâmetros codificados			Variável de saída (De) (mm)		
F	Tip	E	F	Tip	E	1ª Rep.	2ª Rep.	Média
(30x30) cm	Bla	Fino	1	1	1	-0,17	-0,17	-0,17
(30x30) cm	Bla	Espesso	1	1	2	-0,04	-0,13	-0,09
(30x30) cm	Bllb	Fino	1	2	1	-0,21	-0,18	-0,19
(30x30) cm	Bllb	Espesso	1	2	2	-0,08	-0,08	-0,08
(40x40) cm	Bla	Fino	2	1	1	-0,34	-0,29	-0,31
(40x40) cm	Bla	Espesso	2	1	2	-0,10	-0,16	-0,13
(40x40) cm	Bllb	Fino	2	2	1	-0,41	-0,48	-0,45
(40x40) cm	Bllb	Espesso	2	2	2	-0,27	-0,35	-0,31
(50x50) cm	Bla	Fino	3	1	1	-0,68	-0,61	-0,64
(50x50) cm	Bla	Espesso	3	1	2	-0,22	-0,30	-0,26
(50x50) cm	Bllb	Fino	3	2	1	-1,03	-1,03	-1,03
(50x50) cm	Bllb	Espesso	3	2	2	-0,62	-0,54	-0,58
(60x60) cm	Bla	Fino	4	1	1	-1,39	-1,42	-1,41
(60x60) cm	Bla	Espesso	4	1	2	-0,74	-0,81	-0,78
(60x60) cm	Bllb	Fino	4	2	1	-2,19	-2,27	-2,23
(60x60) cm	Bllb	Espesso	4	2	2	-1,26	-1,27	-1,27

Fonte: Autor, 2023

4.1.1 Análise do efeito da tipologia, formato e espessura na variabilidade

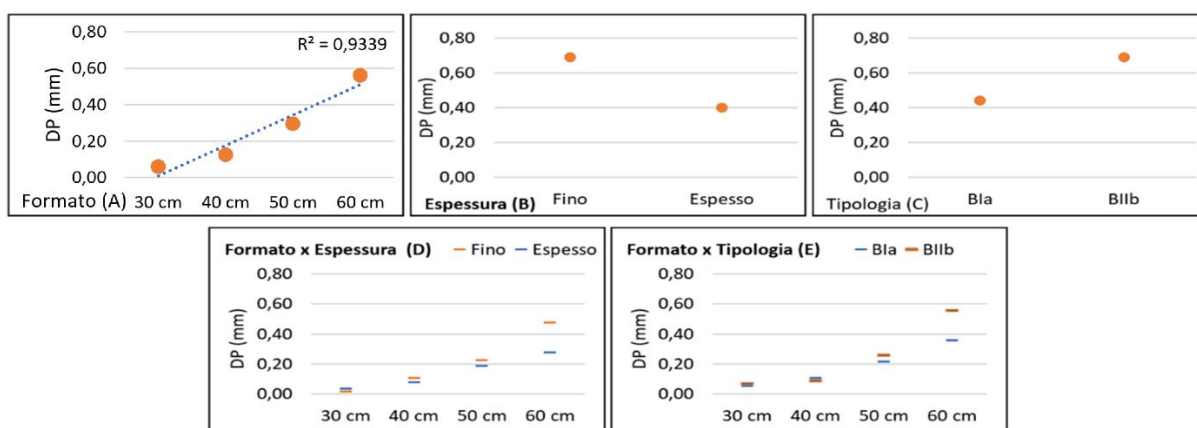
A Figura 17a apresenta a relação entre o desvio padrão e o formato das peças. Como pode ser observado, quanto maior o formato, maior é o desvio padrão, o que era esperado. O coeficiente de determinação R^2 , que atinge o valor de 0,934, revela que o modelo ajustado para essa relação é altamente significativo. Esse resultado evidencia uma maior instabilidade nas medidas das placas de dimensões maiores, o que impacta diretamente na acurácia e precisão dos resultados das medições.

Análises semelhantes foram conduzidas para as variáveis espessura e tipologia, cujos resultados estão apresentados nas Figuras 17b e 17c. Essas análises indicam que a tipologia Bllb e os produtos com espessuras mais finas demonstram maior dispersão em comparação com a tipologia Bla e produtos mais espessos. Isso se explica devido à maior porosidade do produto Bllb e ao fato de que espessuras mais finas possuem uma menor seção transversal, que por consequência sofrem maior ação da força gravitacional. Esses dois fatores contribuem para o aumento da variabilidade das medidas.

As Figuras 17d e 17e ilustram a análise da combinação entre as variáveis estudadas. Nota-se que, tanto para a combinação entre formato e espessura, quanto para a combinação formato e tipologia a variabilidade é maior para placas de tamanho igual ou superior a 60 cm. Conclui-se, portanto, que peças com tamanho maiores que

50 cm, são mais suscetíveis a variabilidade nos processos de medição, dependendo da porosidade e espessura das placas. Assim, é recomendado especial atenção na análise de peças com essas características e que é recomendável readequar os processos de medição para essas configurações de tamanho, formato e espessura.

Figura 17 - Gráficos Desvios Padrões (DP)



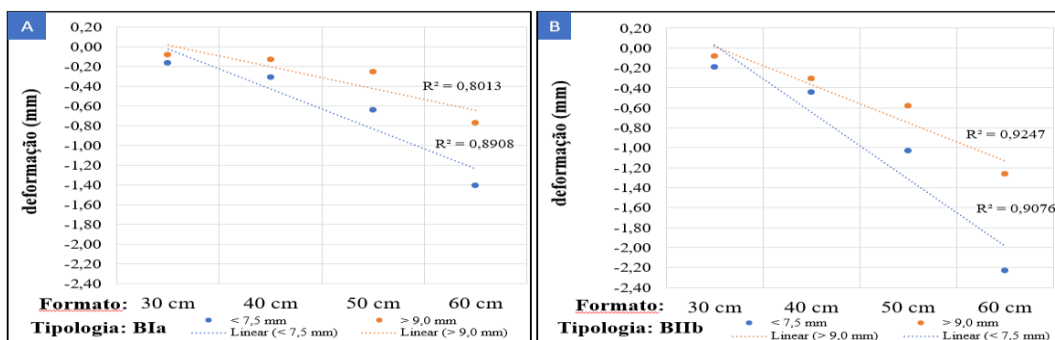
Fonte: Autor, 2023

4.1.2 Análise do efeito da tipologia, formato e espessura na deformação

As Figuras 18a e 18b mostram a relação entre o formato das peças (eixo X) e a deformação (eixo Y) para as duas tipologias analisadas, Bla e BIIb. Os resultados representados nestes dois gráficos demonstram que a deformação é mais significativa para as peças porosas (BIIb). No entanto, essa deformação se torna ainda mais acentuada em peças de menor espessura.

Todas as amostras com formato de 30 cm e a amostra espessa Bla de 40 cm apresentam deformações relativamente baixas, todas inferiores a 0,2 mm (cerca de 7% da tolerância normativa). Já as demais amostras com formato de 40 cm e a amostra espessa Bla de 50 cm exibem deformações que variam entre 0,3 mm e 0,4 mm (aproximadamente de 8% a 11% da tolerância). Deste modo, é possível concluir que essas amostras se tornam críticas quando as peças estão próximas do limite da tolerância normativa, o que compromete a avaliação do analista. No que diz respeito às outras dimensões, espessuras e tipologias, as deformações variam de 0,6 mm a 2,2 mm (cerca de 17% a 61% da tolerância).

Figura 18 - Deformação das placas sobre Tipologia formato e espessura



Fonte: Autor, 2023

A ANOVA, indicada na tabela 13, mostra que a interação entre formato, espessura e tipologia afetam a qualidade do processo de medição. Para entender melhor a relação entre esses fatores foi feita uma análise de diferença entre médias através do teste de Tukey (tabela 14). A análise indica que placas com formato 60 cm, tipologia BIb, de espessura fina, tem a maior deformação elástica. Portanto, essa é a situação mais crítica para medição. Os experimentos até aqui realizado mostram a necessidade do desenvolvimento de um novo sistema de medição minimize a deformação nas placas acima de 40 cm. O método atual se mostra adequado para placas com formato inferior ou igual a 30 cm.

Tabela 13 - Resultados ANOVA - Deformação

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	P-valor
Formato	3	7,86	2,608	1582,88	0,000
Espessura	1	1,08	1,082	656,36	0,000
Tipologia	1	0,70	0,697	423,04	0,000
Formato x Espessura	3	0,61	0,202	122,43	0,000
Formato x Tipologia	3	0,47	0,156	94,83	0,000
Espessura x Tipologia	1	0,02	0,019	11,33	0,004
Formato x Espessura x Tipologia	3	0,04	0,014	8,49	0,002
Erro	15	0,03	0,002		
Total	31	10,77			

Fonte: Autor, 2023

Tabela 14 – Teste de Tukey

F	E	T	De	Grupos												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
(60x60) cm	Fino	Bllb	-2,23	****												
(60x60) cm	Fino	Bla	-1,41		****											
(60x60) cm	Espesso	Bllb	-1,27		****											
(50x50) cm	Fino	Bllb	-1,03			****										
(60x60) cm	Espesso	Bla	-0,78				****									
(50x50) cm	Fino	Bla	-0,64				****	****								
(50x50) cm	Espesso	Bllb	-0,58					****	****							
(40x40) cm	Fino	Bllb	-0,45						****	****						
(40x40) cm	Fino	Bla	-0,31							****	****					
(40x40) cm	Espesso	Bllb	-0,31							****	****					
(50x50) cm	Espesso	Bla	-0,26								****	****				
(30x30) cm	Fino	Bllb	-0,19								****	****	****			
(30x30) cm	Fino	Bla	-0,17								****	****	****	****		
(40x40) cm	Espesso	Bla	-0,13									****	****	****		
(30x30) cm	Espesso	Bla	-0,09												****	
(30x30) cm	Espesso	Bllb	-0,08													****

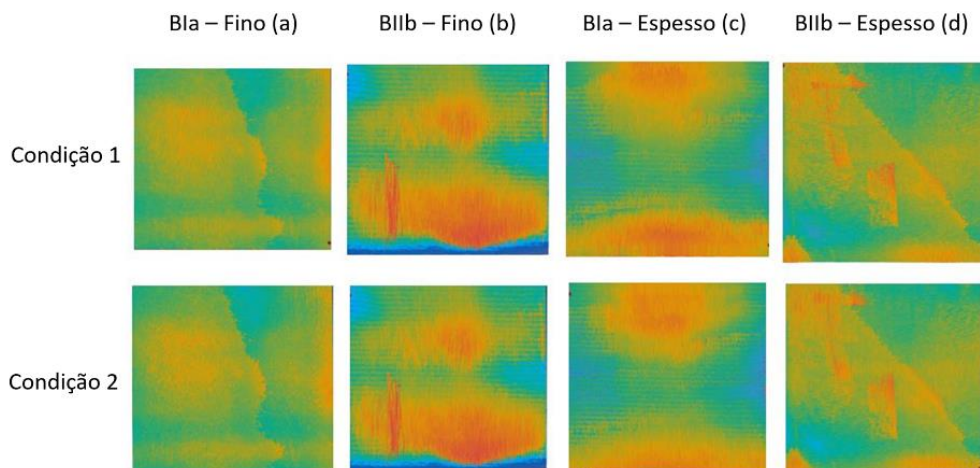
Fonte: Autor, 2023

4.1.3 Análise de deformação por imagem

Conforme descrito no Capítulo 3, procedeu-se à extração de imagens a partir da nuvem de pontos obtida pelos escaneamentos das placas cerâmicas. Esses escaneamentos foram realizados para as duas tipologias, as duas espessuras e os quatro formatos, utilizando o laser do FaroArm®. As cores nas imagens variam desde o azul escuro até o azul claro (representando pontos localizados abaixo do plano de referência) e do amarelo ao vermelho (indicando pontos situados acima do plano de referência). A cor verde identifica os pontos que se encontram dentro da tolerância estabelecida neste estudo, que corresponde a um desvio de planeza de 0,2 mm. Os resultados das análises estão apresentados nas Figuras 19 a 22 e consideram duas condições às quais as peças foram submetidas: Condição 1 – Peças dispostas em um plano horizontal; Condição 2 – Peças inclinadas a um ângulo de 83°.

As alterações na planeza foram identificadas nas figuras, sendo representadas por setas brancas quando a deformação foi mais positiva, ao comparar a Condição 1 com a Condição 2, e por setas rosas quando a deformação resultou em pontos mais negativos. Para uma compreensão mais clara, é relevante destacar que o vértice não apoiado está localizado à direita na parte superior de cada mapa, enquanto os demais possuem apoio. A figura 19 demonstra que todas as placas no formato de 30 cm não apresentam mudanças perceptíveis na planeza.

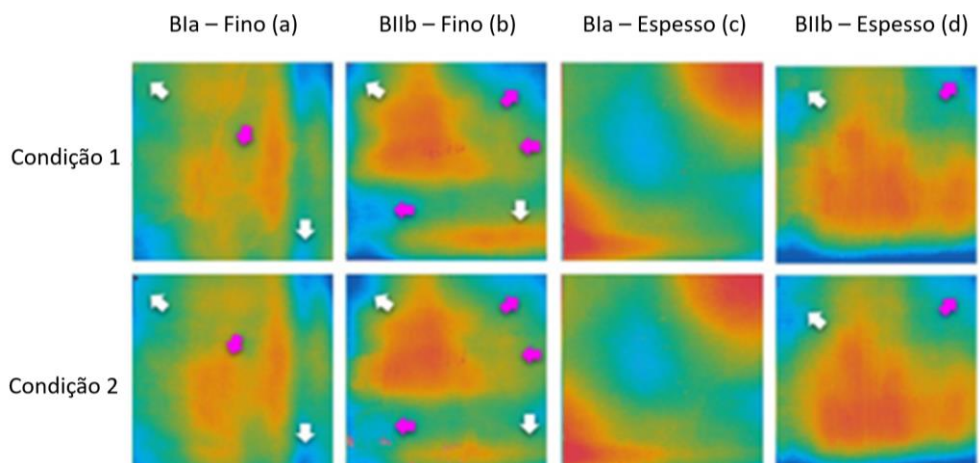
Figura 19 - Mapa de cores para placas (30x30) cm



Fonte: Autor, 2023

No caso do formato de 40 cm, apenas a tipologia Bla mais espessa, conforme ilustrado na figura 20c, não demonstra mudanças perceptíveis na planeza. Entretanto, nas demais placas deste formato (Figuras 20a, 20b e 20c), observam-se sutis alterações na sua forma.

Figura 20 - Mapa de cores para placas (40x40) cm

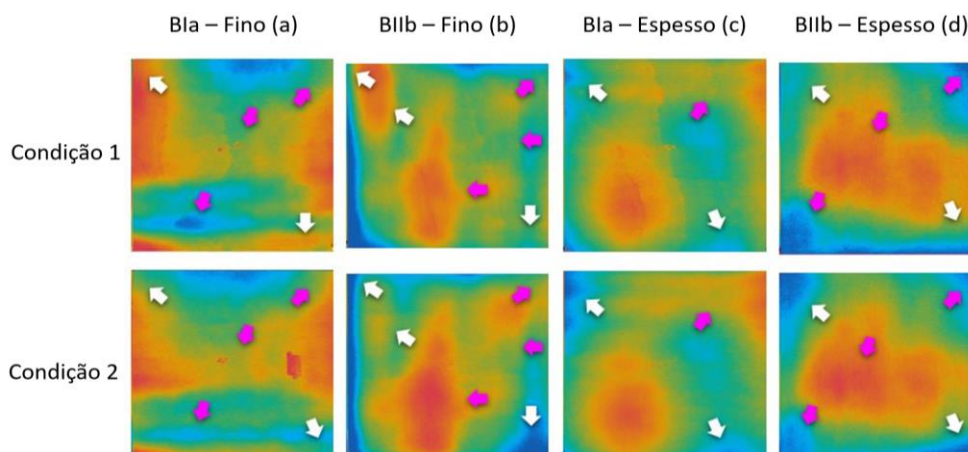


Fonte: Autor, 2023

No formato de 50 cm, observa-se que na peça da tipologia Bla mais espessa, figura 21c, ocorrem mudanças sutis na forma da placa. Entretanto, para todas as outras placas de 50 cm (Figuras 21a, 21b e 21c), bem como para todas as placas no formato de 60 cm, verifica-se alterações significativas em sua forma. É relevante notar que o centro da peça e o vértice não apoiado apresentaram resultados mais negativos

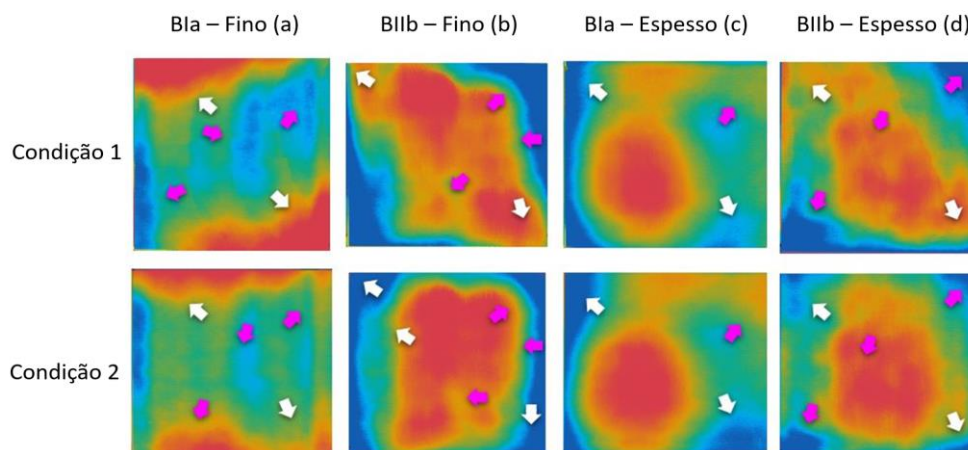
na Condição 1, quando comparados à Condição 2. Por outro lado, para os vértices apoiados, o efeito é inverso. Esse fenômeno é particularmente evidente na peça BIIb de tamanho 60 cm e fina, a qual exibe um formato convexo quando apoiada verticalmente (Condição 2), enquanto os vértices apoiados ficam nivelados ao centro da peça quando apoiada no plano horizontal (Condição 1).

Figura 21 - Mapa de cores para placas (50x50) cm



Fonte: Autor, 2023

Figura 22 - Mapa de cores para placas (60x60) cm



Fonte: Autor, 2023

Em conclusão, os resultados apontam que, quando a peça é apoiada na condição horizontal, há uma tendência de deformação no centro e no vértice não apoiado. Essa ocorrência é explicada pelo efeito da gravidade, o qual exerce um impacto mais notável em peças maiores e mais finas, resultando em uma influência mais pronunciada na deformação elástica dessas peças.

4.2 DESENVOLVIMENTO DO SMC E ANÁLISE DA COMPATIBILIDADE

Na seção 4.1 foram feitas análises dos efeitos da deformação elástica em placas cerâmicas de diferentes formatos, tipologias e espessuras. Os resultados destas análises indicaram que quando a peça é apoiada na condição horizontal ela tende a deformar o centro e o vértice não apoiado, em razão do efeito de gravidade. Portanto, é necessário desenvolver um novo sistema de medição que minimize os efeitos da deformação elástica no processo de medição. Assim, nesta seção serão apresentados os resultados de uma proposta de um novo sistema de medição de modo a reduzir os efeitos da deformação elástica das placas.

Será apresentado inicialmente o desenvolvimento do SMC, validado através de análise de tendência, estabilidade e da análise de compatibilidade através do estudo R&R.

4.2.1 Desenvolvimento do SMC

O SMC foi projetado com três elementos-chave: o equipamento de medição por coordenadas, a rotina de medição e um painel de apoio e fixação, inclinado a 83 graus. No apêndice C está o checklist realizado do projeto inicial, cujo as orientações se baseiam no AIAG (2010).

O BMT é o equipamento de medição que faz parte do SM e tem como finalidade realizar medições em pontos predefinidos na placa cerâmica. Existem alternativas para a coleta de dados, como a utilização do MMC convencional, sistemas de captura por imagem e tecnologias a laser. Contudo, a escolha pelo BMT, levando em consideração critérios econômicos, foi fundamentada na notável diferença de custos em relação ao MMC convencional, o qual, adicionalmente, acarreta despesas consideráveis tanto na fase de preparação quanto na operação.

No que se refere aos aspectos logísticos, a empresa fornecedora do BMT, a FARO®, localizada a menos de 200 km de distância, oferece assistência local e disponibiliza planos de garantia para a substituição e calibração periódica do equipamento. Em termos técnicos, é relevante destacar que o BMT foi utilizado no estudo conduzido por Fázio et al. (2018), demonstrando seu desempenho satisfatório na medição de placas. As MMCs convencionais, que são responsáveis por calibrar os blocos padrões utilizados no SMA, operam com base nos mesmos princípios do

BMT. Além disso, a resolução de 1 milésimo de milímetro é 100 vezes menor do que a requerida pelas normas (ISO, 2018a), e a FARO® indica erros máximos declarados de repetitividade e volumétrico de 0,029 mm e 0,041 mm, respectivamente.

Esses aspectos respalda a escolha desse equipamento, por possuir uma relação custo-benefício mais vantajosa em termos técnicos, logísticos e econômicos (AIAG, 2010; KLAPUT et al., 2016; ALBERTAZZI; SOUSA, 2008).

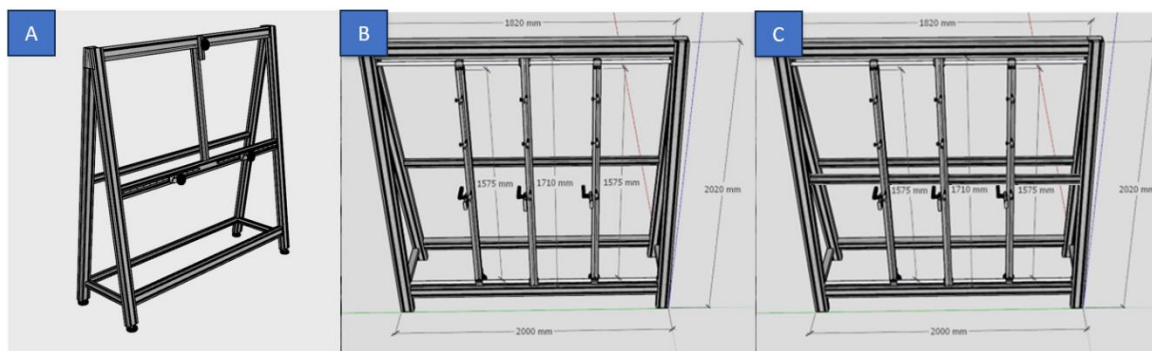
O programa de medição foi desenvolvido com base nos parâmetros da norma. Ele consiste em 21 pontos, dos quais 9 estão na superfície e 12 são coletados nas bordas, com 3 de cada lado. Foi projetado para realizar o giro da peça digitalmente, alterando o alinhamento da placa por 4 vezes, sem a necessidade de coletar os pontos novamente. Em seguida, os dados são transferidos para uma planilha de Excel® padronizada, que realiza automaticamente as correções de compensação dos pontos. Para mais detalhes sobre o programa de medição, consulte o apêndice D. O principal objetivo do programa foi replicar o SMA, eliminando a necessidade de girar manualmente a peça e permitindo a alteração dos ângulos de inclinação e da forma de apoio da peça, inclusive possibilitando a medição da peça instalada. No entanto, não foram implementadas melhorias em relação às falhas conhecidas desse método. O programa de medição desenvolvido inicialmente não precisou ser ajustado, pois conseguiu reproduzir os resultados do SMA.

A primeira etapa deste estudo, na seção 4.1, indicou que a medição da peça em posição inclinada mostrou-se eficaz ao aumentar a seção transversal sob a influência da gravidade, o que resultou em uma notável redução do efeito da deformação elástica, admitindo o uso do painel inclinado. No primeiro protótipo do painel, representado na Figura 23a, a peça era sustentada por dois pontos inferiores e três pontos no tardo, o que se revelou um sistema de apoio ineficaz, resultando em movimentações indesejadas durante as medições nos pontos não apoiados.

Na segunda versão (Figura 23b), foram incorporadas três colunas com pontos de apoio ajustáveis para se adaptarem à deformação da peça em cada ponto de medição, o que melhorou a estabilidade. No entanto, ainda persistia certa instabilidade devido à deformação da barra fixada apenas pelas suas extremidades, que estavam muito distantes. Na versão mais recente (Figura 23c), introduziu-se uma barra de reforço central e fixou-se o painel ao chão para reduzir oscilações, resultando em melhorias bem-sucedidas na estabilidade durante as medições. Entretanto, é fundamental enfatizar que o projeto do painel é apresentado como uma sugestão, e

alternativas podem ser desenvolvidas, contanto que mantenham a inclinação de 83°. Além disso, é crucial realizar um estudo de MSA antes da implementação, com o objetivo de assegurar a estabilidade, repetitividade e reprodutibilidade do SM.

Figura 23 - Evolução do sistema do painel de apoio



Fonte: Autor, 2023

Apesar de o desenvolvimento de um novo processo frequentemente envolver falhas, ajustes e cenários imprevistos, uma fase de planejamento mais minuciosa e abrangente deveria ter sido realizada. O AIAG (2010) até recomendava a integração da Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) no processo de construção do SM para minimizar situações imprevistas. No contexto deste estudo, a insuficiente etapa de planejamento e a falta de aplicação do FMEA resultaram na identificação posterior de falhas, especialmente relacionadas ao painel, durante os testes. Essa situação destaca a importância de dedicar mais tempo ao planejamento e utilizar ferramentas como o FMEA para prevenir a alocação desnecessária de recursos e retrabalho.

Embora seja comum enfrentar falhas e ajustes durante o desenvolvimento de um novo processo, uma fase de planejamento mais detalhada deveria ter sido adotada. O AIAG (2010) recomendava a integração da Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA) no processo de construção do SM para minimizar situações imprevistas. Neste estudo, a fase de planejamento foi insuficiente, e a não utilização da abordagem do FMEA, resultaram na identificação posterior de falhas, principalmente no painel, durante os testes. Isso ressalta a importância de investir mais tempo na análise prévia, a fim de evitar desperdício de recursos e retrabalho desnecessário.

4.2.2 Estudo de tendência

Foi escolhido uma placa (30x30) cm em razão da disponibilidade dela, que foi encaminhada para calibração em um laboratório credenciado pelo Inmetro. Posteriormente, foram realizadas 12 medições em cada um dos SM. Um único técnico executou as medições, seguidas pelo cálculo dos desvios de tendência para cada uma das características.

Os dados obtidos foram tratados e apresentados nas tabelas 15 e 16, referentes aos SMA e SMC, respectivamente. O SMA apresentou desvios de repetitividade que vão de 2,2% e 5,3%, enquanto o SMC apresentou desvios entre 1,4 a 5,4%. Em geral o SMC possui melhor repetitividade que o SMA, com exceção das características ortogonalidade e empeno, com uma pequena diferença de 0,1% e 0,3% respectivamente. todas as características de ambos os métodos exibiram uma repetitividade aceitável, ou seja, dentro de 10% da tolerância mais crítica de cada característica.

Ao analisar a tendência do SMC, cujo resultados estão na tabela 15, os intervalos de confiança estimados contêm o zero indicando não haver significância estatística para afirmar que há tendência no sistema de medição. O mesmo resultado pode ser observado nos testes de significância estatística, p-valor, cujo resultados variaram de 0,056 a 0,386. Por esses resultados não há justificativa para reprojetar o SM.

Tabela 15 - Análise do estudo de tendência – SMC

Característica	n.	μ	Valor de ref.	DP, σ	EP, σ_b	Tol.	%VE
Tamanho	12	302,844	302,8400	0,006	0,002	1,800	2,0%
Retitude Lateral	12	0,025	0,0267	0,004	0,001	1,600	1,4%
Ortogonalidade	12	0,794	0,7867	0,016	0,005	1,800	5,4%
Curvatura Central	12	0,016	0,0120	0,008	0,002	2,400	2,1%
Curvatura Lateral	12	0,012	0,0100	0,006	0,002	1,800	2,1%
Empeno	12	-0,005	-0,0080	0,007	0,002	1,800	2,5%

Nível de significância $\alpha = 0,05$							
Característica	Estatística t	P-valor	GL	Valor significativo t (bi-caldal)	Tendência média	95% Intervalo de Confiança da tendência	
						Inferior	Superior
Tamanho	2,1376	0,056	11	2,201	0,0038	-0,0001	0,0076
Retitude Lateral	-1,7481	0,108	11	2,201	-0,0020	-0,0044	0,0005
Ortogonalidade	1,4958	0,163	11	2,201	0,0069	-0,0033	0,0172
Curvatura Central	1,8347	0,094	11	2,201	0,0044	-0,0009	0,0097
Curvatura Lateral	0,9020	0,386	11	2,201	0,0017	-0,0024	0,0057
Empeno	1,4524	0,174	11	2,201	0,0031	-0,0016	0,0078

Fonte: Autor, 2023

Tabela 16 - Análise do estudo de tendência –SMA

Característica	n.	μ	Valor de ref.	DP, σ_a	EP, σ_b	Tol.	%VE
Tamanho	12	302,822	302,8400	0,011	0,003	1,800	3,7%
Retitude Lateral	12	0,049	0,0267	0,011	0,003	1,600	4,1%
Ortogonalidade	12	0,762	0,7867	0,016	0,005	1,800	5,3%
Curvatura Central	12	0,010	0,0120	0,020	0,006	2,400	4,9%
Curvatura Lateral	12	-0,050	0,0100	0,011	0,003	2,400	2,8%
Empeno	12	0,103	-0,0080	0,009	0,003	2,400	2,2%

Nível de significância $\alpha = 0,05$							
Característica	Estatística t	P-valor	GL	Valor significativo t (bi-caldal)	Tendência média	95% Intervalo de Confiança da tendência	
						Inferior	Superior
Tamanho	-5,6977	0,000	11	2,201	-0,0183	-0,0254	-0,0113
Retitude Lateral	7,1821	0,000	11	2,201	0,0225	0,0156	0,0294
Ortogonalidade	-5,4680	0,000	11	2,201	-0,0250	-0,0351	-0,0150
Curvatura Central	-0,3546	0,730	11	2,201	-0,0020	-0,0144	0,0104
Curvatura Lateral	-18,4236	0,000	11	2,201	-0,0600	-0,0672	-0,0528
Empeno	44,2000	0,000	11	2,201	0,1105	0,1050	0,1160

Fonte: Autor, 2023

Quanto a análise de tendência do SMA, conforme demonstrado na Tabela 16, observa-se que a curvatura central não apresentou tendência enquanto o tamanho, retitude lateral, ortogonalidade, curvatura lateral e empeno apresentam tendência. Embora o método apresente desvio de tendência na maioria das características, essa tendência é menor ou igual a 0,1 mm, que é o valor da resolução normativa. Isso não impede o uso deste SM para peças que não apresentem deformação, principalmente considerando que o método é utilizado desde a década de noventa.

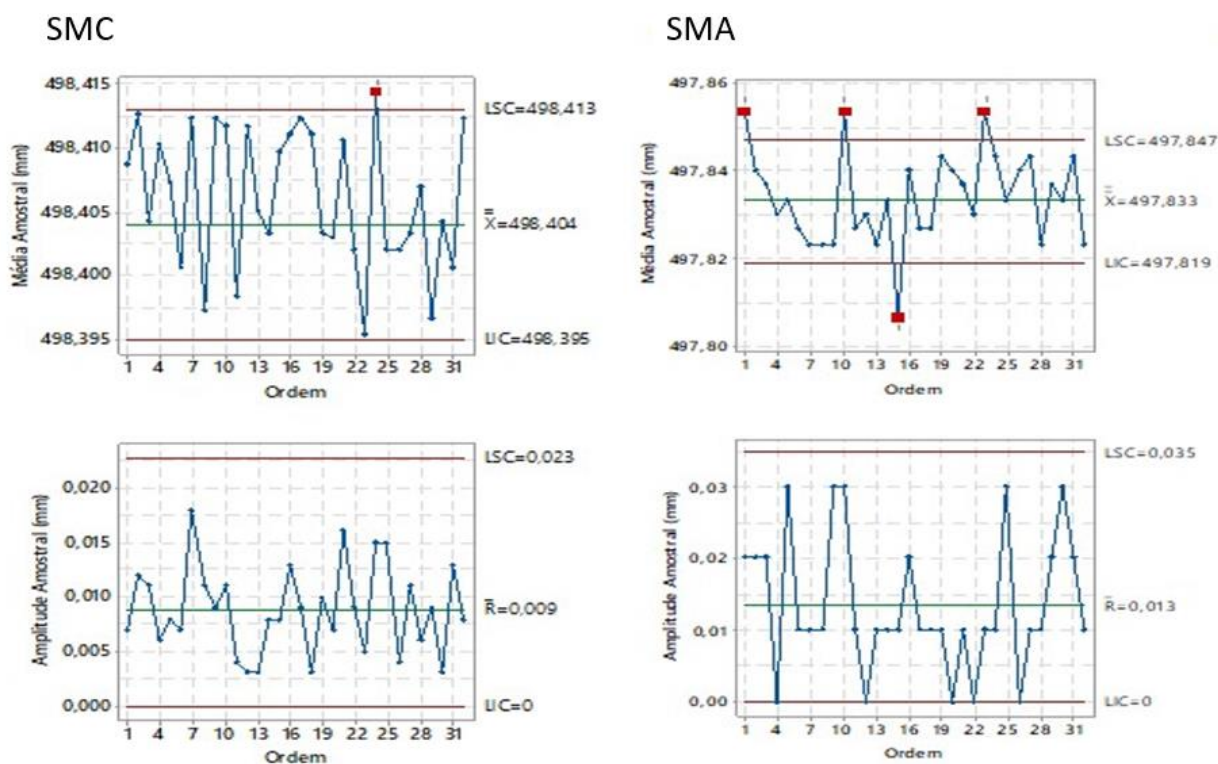
4.2.3 Estudo de estabilidade

Para o estudo de estabilidade, estava prevista a utilização de uma placa quadrada de 50 cm. No entanto, devido aos danos sofridos na mesma entre os estudos do SMC e do SMA, foi necessário utilizar uma placa para cada SM. Para cada sistema, o técnico realizou medições na peça 30 vezes consecutivas, e a média dessas medições foi empregada para estabelecer o valor de referência. Em seguida, foram efetuadas medições em triplicata ao longo de 16 dias úteis, duas vezes por dia, em uma placa selecionada para cada método. Isso resultou em 32 subgrupos.

Observa-se na figura 24, a análise dos gráficos de controle \bar{X} para os diferentes tamanhos analisados. O SMC apresentou 1 ponto além do limite de controle, enquanto o SMA apresentou 4 pontos. Não foram observadas tendências em ambos

os métodos. Nos gráficos de R, a amplitude média foi de 0,009 mm no SMC e 0,013 mm no SMA. Em ambos, nenhum ponto excedeu os limites. O desvio no SMC parece relacionar-se com os desvios de microforma da peça, devido à ponteira esférica e à pequena área de contato. No SMA, os desvios podem ser atribuídos ao processo de alinhamento e zeragem dos relógios. Importante notar que nenhum ponto fora de controle excedeu 0,1 mm, a resolução definida pela norma. Dessa forma, ambos os métodos demonstraram desempenho semelhante e não evidenciaram sintomas de instabilidade.

Figura 24 - Carta \bar{X} -R do tamanho

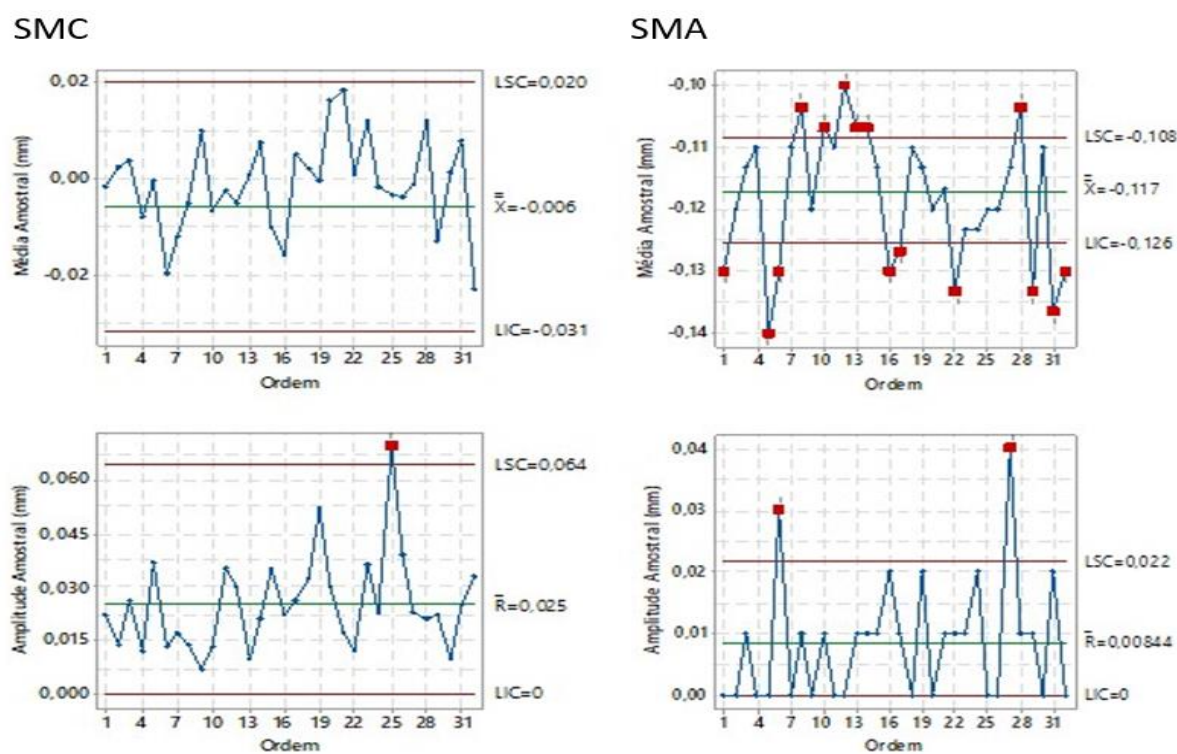


Fonte: Autor, 2023

Os resultados da retitude lateral, conforme ilustrado na figura 25, demonstram a ausência de qualquer indício de tendência em ambos os métodos. No gráfico \bar{X} do SMC, não se observou nenhum ponto que se encontrasse fora dos limites de controle. No entanto, o SMA apresentou 15 pontos que ultrapassaram esses limites, o que corresponde a cerca de 50% dos pontos analisados. O SMC exibiu uma amplitude média de 0,025 mm, com apenas um ponto situado fora dos limites. Por outro lado, o método SMA registrou uma amplitude média de 0,008 mm, com dois pontos que excederam os limites estabelecidos.

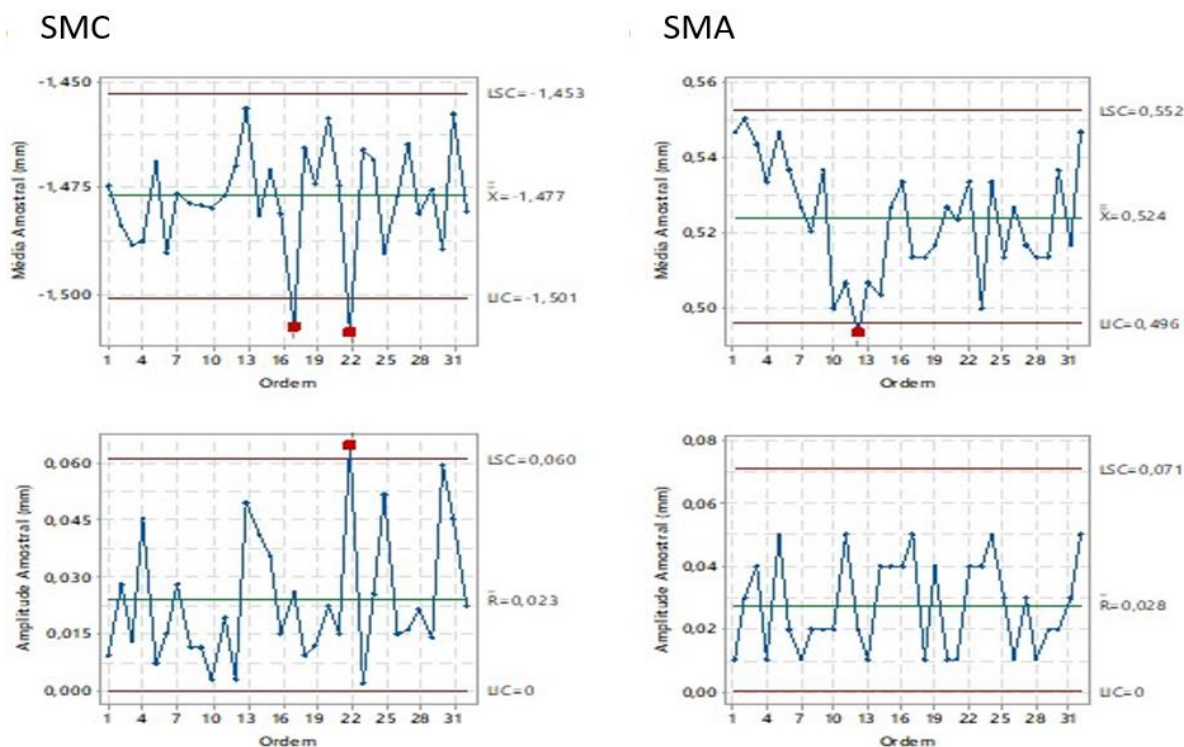
O desvio observado no SMC pode ter origem semelhante aos desvios identificados na avaliação da característica tamanho. Entretanto, o método SMA apresentou sinais de instabilidade. No entanto, essa instabilidade decorre de um baixo erro de repetibilidade, não representando uma variação significativa do ponto de vista prático. Isso se deve ao fato de que a diferença resultante entre o ponto de menor valor e o ponto de maior valor no SMA foi de apenas 0,04 mm, o que equivale a menos de 40% da resolução exigida pelas normas vigentes. É importante ressaltar que o SMC não demonstrou qualquer sinal de instabilidade.

Figura 25 - Carta \bar{X} -R da Retitude Lateral



Fonte: Autor, 2023

Constatou-se nos gráficos de \bar{X} referentes à ortogonalidade (Figura 26) 2 pontos fora dos limites de controle no SMC e 1 ponto no SMA, mas sem nenhum sinal de tendência para os SM. Nos gráficos R, observa-se que o SMC apresentou uma amplitude média de 0,023 mm e registrou 1 ponto além dos limites. Por outro lado, o SMA teve uma amplitude média de 0,028 mm e não apresentou nenhum ponto fora dos limites. Ambos os SM demonstraram desempenho semelhante e podem ser considerados estáveis.

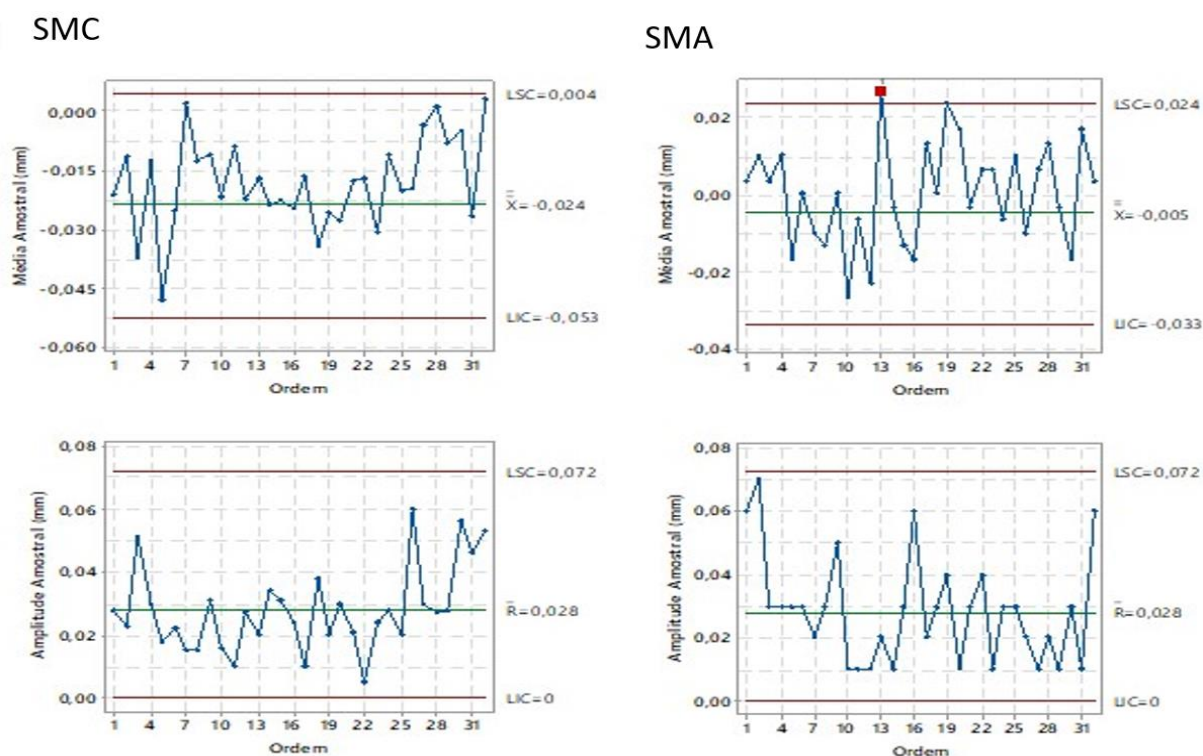
Figura 26 - Carta \bar{X} -R da Ortogonalidade

Fonte: Autor, 2023

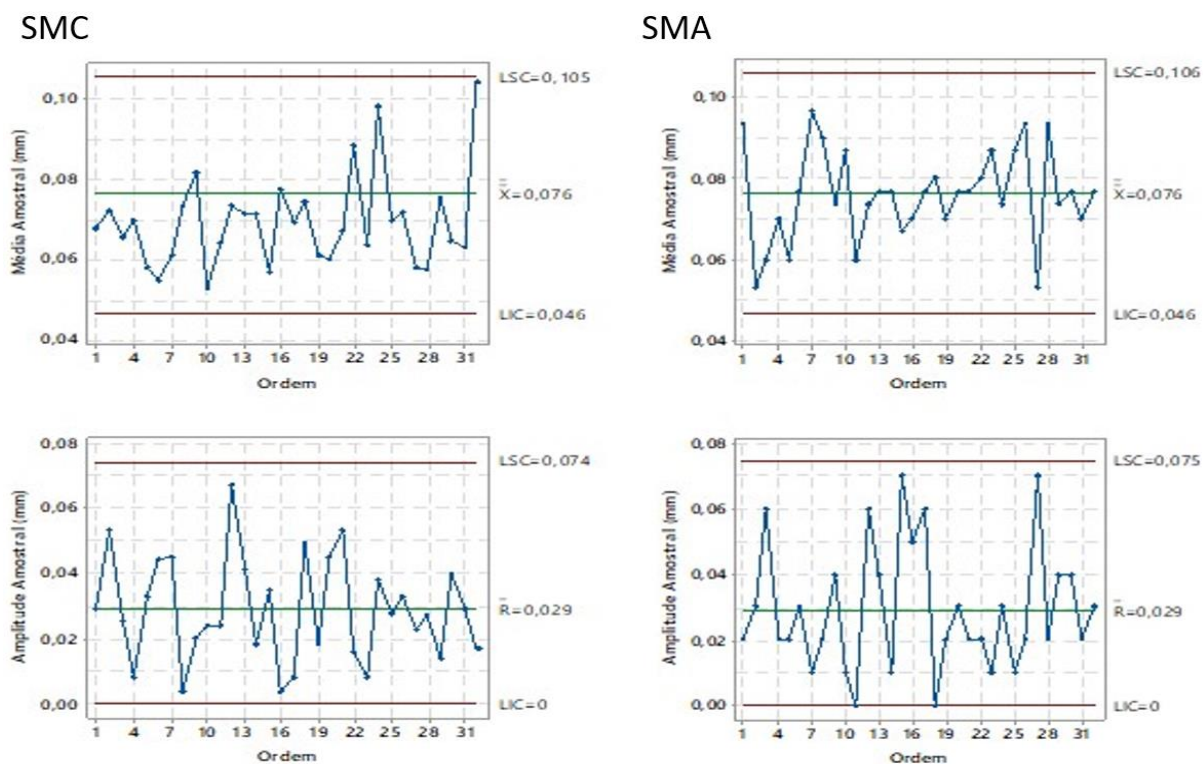
Os resultados relacionados a curvatura central, apresentados na figura 27, demonstram que o SMC não registrou nenhum ponto além dos limites de controle, enquanto o SMA apresentou 1 ponto excedente desse limite, ambos os SM não apresentaram tendência. Nos gráficos de R, a amplitude média foi de 0,028 mm, e não foi identificado nenhum ponto fora dos limites em ambos os SM. Os SM demonstraram desempenho similar e podem ser considerados estáveis.

Os resultados da curvatura lateral, figura 28, não demonstram tendência e nenhum ponto fora de controle em ambos os SM. A mesma similaridade é observada no gráfico de amplitude que não apresentou nenhum ponto fora e registrou amplitude média de 0,029 mm para ambos os métodos. Concluindo que ambos os sistemas são similares e estáveis.

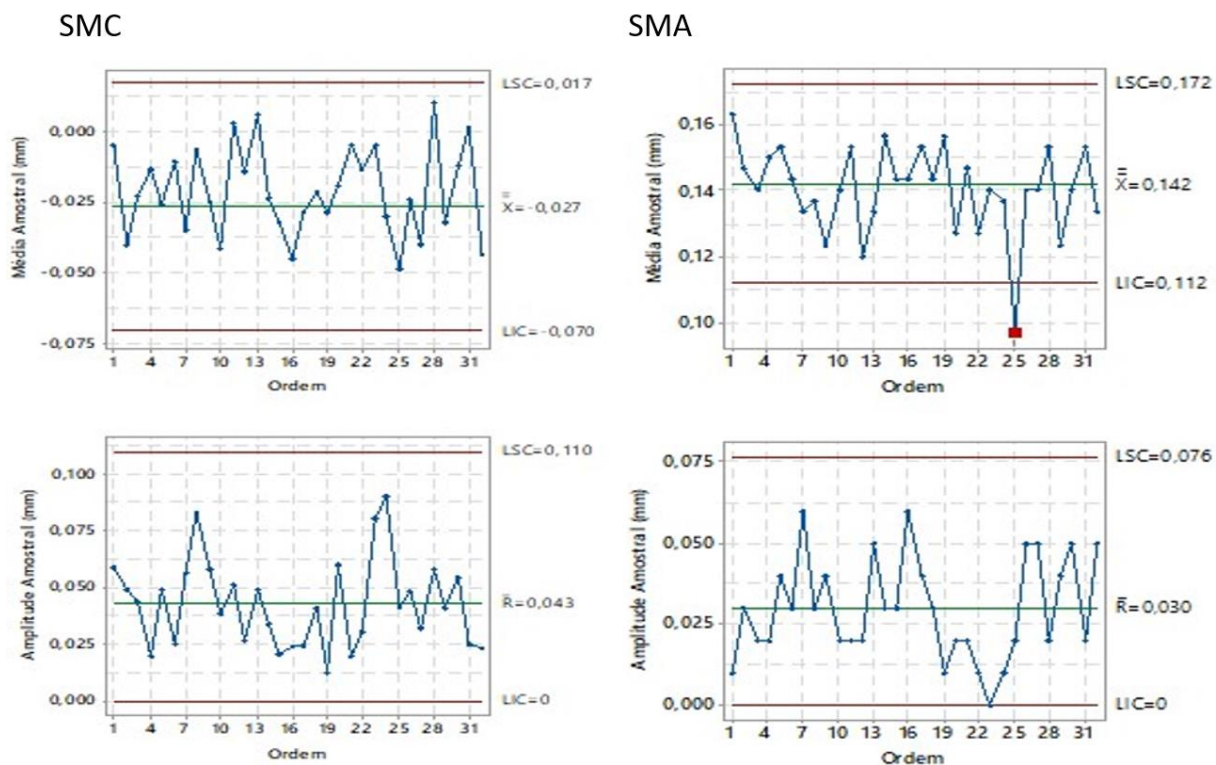
Na figura 29, constatou-se nos gráficos de \bar{X} referentes ao empeno que ambos os SM não apresentaram pontos além dos limites de controle ou sinais de tendências em seus resultados. Quanto aos gráficos de R, a amplitude média foi de 0,043 mm no SMC e de 0,030 mm no SMA, e nenhum dos métodos registrou pontos fora dos limites. Dessa forma, ambos os SM demonstraram desempenho semelhante e não apresentaram sintomas de instabilidade.

Figura 27 - Carta \bar{X} -R da Curvatura Central

Fonte: Autor, 2023

Figura 28 - Carta \bar{X} -R da Curvatura Lateral

Fonte: Autor, 2023

Figura 29 - Carta \bar{X} -R da Empeno

Fonte: Autor, 2023

De todos os casos analisados a diferença entre o SMA e SMC, foi na característica de retitude lateral do SMA, porém isto não tem implicações práticas significativas. No geral o SMC apresenta resultados similares em termos de estabilidade, o que valida o seu uso para a análise de diferentes características dimensionais do produto, atendendo todas as especificações em termos de critérios técnicos, recomendado pelo AIAG (2010).

4.2.4 Análise da compatibilidade dos SMA e SMC

Os resultados apresentados nas seções anteriores demonstram que o SMC é estável e não apresenta tendências, revelando-se como um SM confiável para medições de placas cerâmicas. Nesta seção, será realizado um estudo de R&R considerando uma distribuição de 99%, com o propósito de avaliar a compatibilidade e qualidade dos sistemas de medição. Para atingir esse objetivo, em vez de alternar o analista para avaliar a reprodutibilidade, alternou-se o sistema de medição, uma abordagem que, embora não seja a tradicional, é preconizada pelo AIAG (2010).

O estudo de R&R foi realizado por meio de medições em triplicata nos SMC e

SMA (r), em um conjunto de 9 placas quadradas (n), sendo 3 placas para cada formato (30 cm, 50 cm e 60 cm), totalizando 18 amplitudes (n (9) x k (2)), resultando em 54 medições de acordo com o planejamento estabelecido. Os dados obtidos foram tabulados e inseridos no software Minitab® com o propósito de conduzir uma análise de medição R&R cruzada.

Foram examinadas seis características dimensionais normativas: tamanho, retitude lateral, ortogonalidade, empeno, curvatura central e lateral. O objetivo do sistema de medição é avaliar a conformidade dos produtos em relação às tolerâncias preestabelecidas, por meio da análise de peças provenientes de diferentes lotes e formatos, desconsiderando variações do processo.

Uma síntese dos resultados obtidos no estudo de R&R para cada característica avaliada, está apresentada na tabela 17. É notável que as discrepâncias entre os sistemas de medição (SM) em todas as características não excederam 0,1 mm, conforme estabelecido pela norma como resolução mínima. Além disso, os valores de R&R permaneceram dentro dos limites previamente definidos, o que demonstra uma sólida compatibilidade entre os SM e a qualidade dos métodos empregados. Os desvios padrão, por sua vez, mostraram-se consistentemente inferiores a 0,1 mm para todas as características, inclusive no caso do empeno, que registrou um valor de 0,114 mm. No entanto, para fins de arredondamento, esse valor é considerado como 0,1 mm.

Ressalta-se, como explicado no capítulo 3, que a fonte de variação identificada como reprodutibilidade, que tradicionalmente refere-se a diferença de medição entre analistas, neste caso trata-se da comparação entre os dois métodos utilizados o SMA e o SMC.

Tabela 17 - Resumo do estudo comparativo

Características	Médias SMC (mm)	Médias SMA (mm)	Diferença (mm)	Desv.P. (mm)	R&R (%)	limite de aceitação %RR
Tamanho	0,808	0,846	0,038	0,084	22	30
Retitude lateral	0,294	0,239	0,054	0,076	24	30
Ortogonalidade	0,178	0,165	0,013	0,097	17	20
Curvatura Central	-0,019	-0,068	0,049	0,062	9	20
Curvatura Lateral	-0,002	-0,078	0,075	0,095	14	20
Empeno	0,069	0,087	0,018	0,114	16	20

Fonte: Autor, 2023

4.2.4.1 Análise da compatibilidade – Tamanho

Para uma melhor representação gráfica foram utilizados os desvios do tamanho real em relação ao tamanho de fabricação declarado, concentrando os valores uma única faixa de resultados. Os dados da ANOVA, tabela 18, revelam que a interação entre peça e método apresentaram valor de $p < 0,05$, rejeitando a hipótese H_0 , indicando uma influência significativa da peça e da interação entre peça e método na variação.

Tabela 18 - ANOVA com 2 fatores com interação – Tamanho

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	P-valor
Peça	8	4,537	0,567	30,68	0,00
Método	1	0,019	0,019	1,05	0,34
Peça x método	8	0,148	0,018	13,97	0,00
Repetitividade	36	0,048	0,001		
Total	53	4,752			

Fonte: Autor, 2023

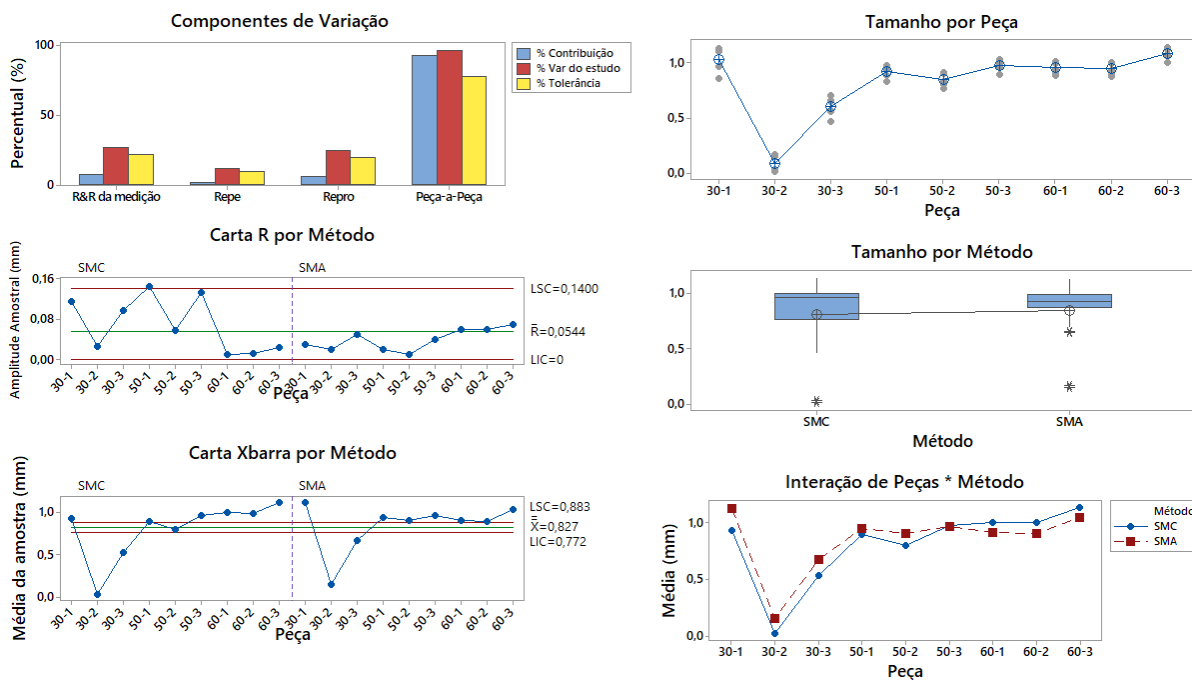
O desvio de R&R em relação à tolerância foi de 21,7%, valor abaixo do especificado na Tabela 17. Adicionalmente, na Tabela 19, pode-se observar um desvio de repetitividade de 9,4% e uma reprodutibilidade de 19,5%. Esses dados indicam que a reprodutibilidade emerge como a principal fonte de variação no estudo, enquanto os desvios de repetitividade sugerem que os sistemas de medição individuais ostentam elevado grau de qualidade.

Tabela 19 - Avaliação das medições – Tamanho das placas em mm

Fonte	Desv- Pad (DP)	Var. do estudo (5,15 x DP)	%Var. do estudo (%VE)	%Var. de Tol. (VE/Tol.)
Total de R&R da medição	0,084	0,433	26,81	21,67
Repetitividade	0,036	0,187	11,59	9,37
Reprodutibilidade	0,076	0,391	24,17	19,54
Método	0,006	0,031	1,91	1,55
Método x Peça	0,076	0,389	24,10	77,87
Peça a Peça	0,302	1,557	96,34	77,87
Variação Total	0,314	1,616	100,00	80,82

Fonte: Autor, 2023

Figura 30 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Tamanho



Fonte: Autor, 2023

Na análise gráfica, figura 30, observa-se nos gráficos de tamanho por peça e carta R por método, maior variação em peças de menor tamanho no SMC. Esta variação pode ser explicada devido ao uso de uma ponta esférica de 6 mm, que é mais sensível às variações na microforma das bordas não retificadas (peça 30 cm e 50 cm). Em contraste, o método SMA, com uma ponta cilíndrica de 10 mm, reduziu esse efeito. Uma solução possível é a criação de gabaritos calibrados para coleta de pontos e a compensação das dimensões. Ao analisar a Carta \bar{X} , o gráfico tamanho por método e de interação entre peças e método, constatou-se que os valores encontrados se mantiveram próximos. Isso, aliado ao valor de R&R abaixo do limite especificado, indica a compatibilidade entre os métodos empregados.

4.2.4.2 Análise da compatibilidade – Retitude lateral

Os resultados da ANOVA da retitude lateral, apresentados na tabela 20, apresentam p-valor menor que 0,05, revelando interação entre peça e método. Portanto rejeita-se a hipótese H_0 , indicando uma influência significativa da interação entre peça e método na variação.

Tabela 20 - ANOVA com 2 fatores com interação – Retitude lateral

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	P-valor
Peça	8	1,84	0,23	17,67	0,00
Método	1	0,04	0,04	3,08	0,12
Peça x método	8	0,10	0,01	21,34	0,00
Repetitividade	36	0,02	0,00		
Total	53	2,00			

Fonte: Autor, 2023

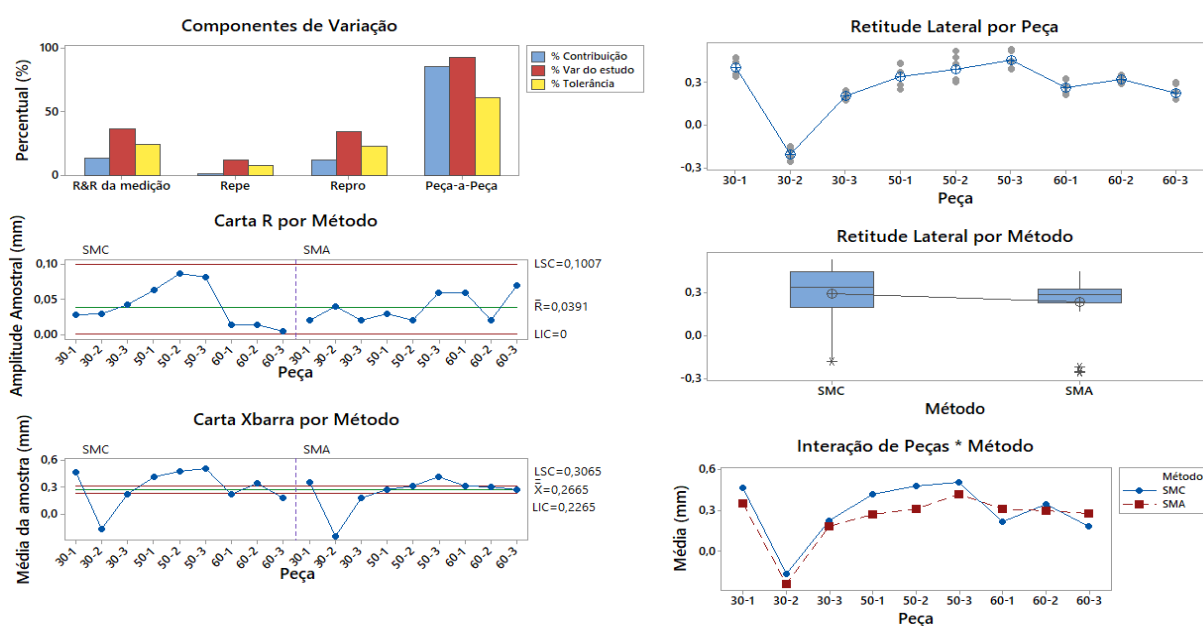
O desvio de %RR em relação à tolerância foi de 24,38% (tabela 21), dentro do esperado, conforme estabelecido por esta pesquisa. Observamos que o desvio de repetitividade foi de 7,94%, o qual é inferior a 10%, conforme recomendado pelo AIAG (2010). Isso evidencia a qualidade dos SM empregados. Já o desvio de reprodutibilidade atingiu 23,05%, sendo os SM a principal fonte de variação.

Tabela 21 - Avaliação das medições – Retitude lateral

Fonte	DesvPad (DP)	Var. do estudo (5,15 x DP)	%Var. do estudo (%VE)	%Var. de Tol. (VE/Tol.)
Total de R&R da medição	0,076	0,390	37,03	24,38
Repetitividade	0,025	0,127	12,06	7,94
Reprodutibilidade	0,072	0,369	35,01	23,05
Método	0,032	0,163	15,47	10,18
Método x Peça	0,064	0,331	31,41	20,68
Peça a Peça	0,190	0,979	92,89	61,16
Varição Total	0,205	1,053	100,00	65,84

Fonte: Autor, 2023

Figura 31 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Retitude lateral



Fonte: Autor, 2023

Nos gráficos que representam a retitude por peça e a carta R, conforme apresentados na Figura 31, foi observado um efeito semelhante ao identificado na análise do tamanho. Notou-se que as peças de menor dimensão exibiram uma ligeira variação, possivelmente devido às mesmas razões mencionadas anteriormente na análise da característica de tamanho. Contudo, é relevante ressaltar que não foram encontrados pontos fora da carta R, cujo LSC foi calculado em 0,1 mm. Os demais gráficos corroboram a consistência dos resultados obtidos nos estudos de R&R.

4.2.4.3 Análise da compatibilidade – Ortogonalidade

Assim como ocorreu na análise de tamanho e retitude lateral, os resultados da ANOVA para a ortogonalidade, conforme apresentados na Tabela 22, indicam que há uma interação significativa entre a peça e o método utilizado, corroborando os maiores índices de reprodutibilidade nas análises.

Tabela 22 - ANOVA com 2 fatores com interação – Ortogonalidade

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	P-valor
Peça	8	7,541	0,943	36,00	0,00
Método	1	0,002	0,002	0,09	0,77
Peça x método	8	0,210	0,026	12,80	0,00
Repetitividade	36	0,074	0,002		
Total	53	7,862			

Fonte: Autor, 2023

Tabela 23 - Avaliação das medições – Ortogonalidade

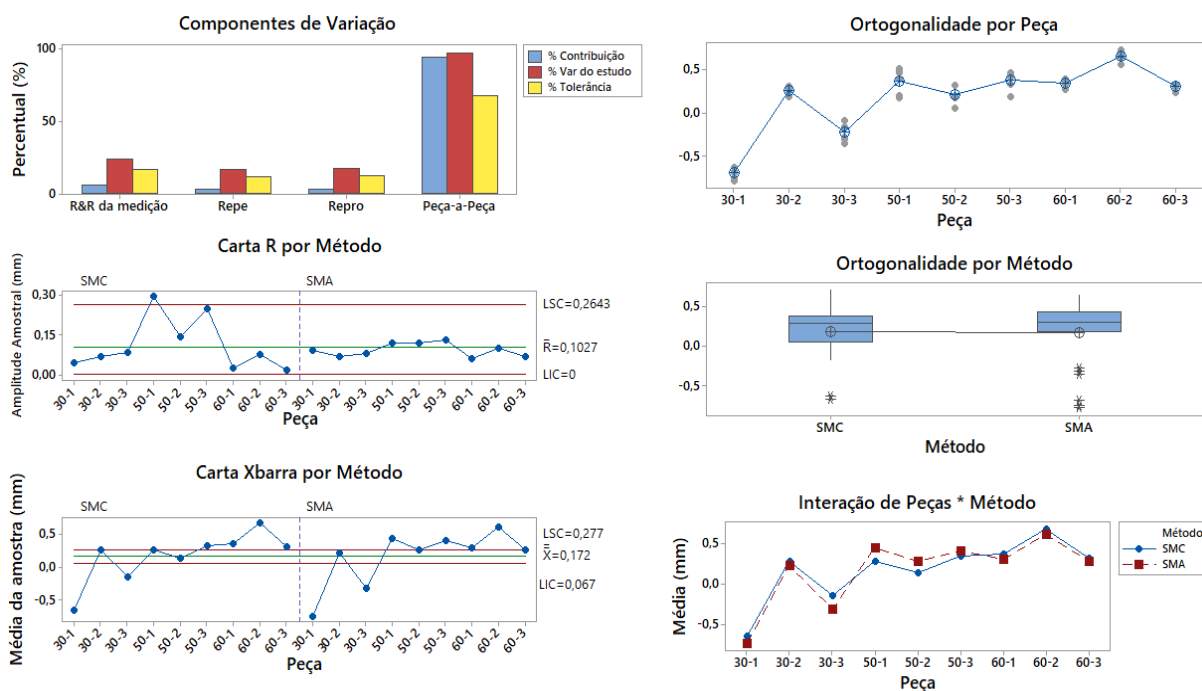
Fonte	Desv- Pad (DP)	Var. do estudo (5,15 x DP)	%Var. do estudo (%VE)	%Var. de Tol. (VE/Tol.)
Total de R&R da medição	0,101	0,519	24,90	17,29
Repetitividade	0,045	0,234	11,21	7,78
Reprodutibilidade	0,090	0,463	22,23	15,43
Método	0,000	0,000	0,00	0,00
Método x Peça	0,090	0,463	22,23	15,43
Peça a Peça	0,392	2,017	96,85	67,24
Variação Total	0,404	2,083	100,00	69,43

Fonte: Autor, 2023

Constatou-se um desvio de R&R em relação à tolerância de 17,29%, o qual se encontra abaixo do limite estabelecido (tabela 23). É importante ressaltar que a reprodutibilidade também se encontra abaixo de 10%, o que evidencia a qualidade

dos métodos utilizados. Por outro lado, o desvio de reprodutibilidade atingiu 15,43%, destacando-se como a principal fonte de variação no presente estudo.

Figura 32 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Ortogonalidade



Fonte: Autor, 2023

Os gráficos gerados estão apresentados na figura 32. No gráfico sequencial, observou-se uma variação maior no formato de 50 cm. Na Carta R, todos os pontos se mantiveram dentro do limite. Na Carta \bar{X} , no diagrama de caixa e no gráfico de interação entre peças e operadores, verificou-se que os valores encontrados permaneceram próximos, com exceção da peça 50-1, que apresentou uma pequena diferença. Os dados indicaram a compatibilidade entre os métodos empregados.

4.2.4.4 Análise da compatibilidade – Curvatura Central

Os resultados da ANOVA apresentados na tabela 24, revelam que a interação entre peça e método apresentou um valor de $p < 0,05$, o que rejeita a hipótese H_0 , evidenciando uma influência significativa da interação entre peça e método na variação.

Tabela 24 - ANOVA com 2 fatores com interação – Curvatura Central

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	P-valor
Peça	8	6,692	0,837	126,17	0,00
Método	1	0,000	0,000	0,01	0,93
Peça x método	8	0,053	0,007	2,79	0,02
Repetitividade	36	0,086	0,002		
Total	53	6,831			

Fonte: Autor, 2023

A curvatura central destacou-se como a característica que obteve os melhores resultados de R&R, registrando um índice de 8,81%, valor inferior ao limite estabelecido pelo estudo e enquadrado na faixa recomendada pelo AIAG (2010), que recomenda como melhores sistemas de medição os que apresentam valores inferiores a 10%. Além disso, pode-se observar na Tabela 25 que os resultados individuais de repetitividade (6,97%) e reprodutibilidade (5,39%) são próximos, o que evidencia uma sólida correlação entre os métodos e a qualidade dos sistemas de medição.

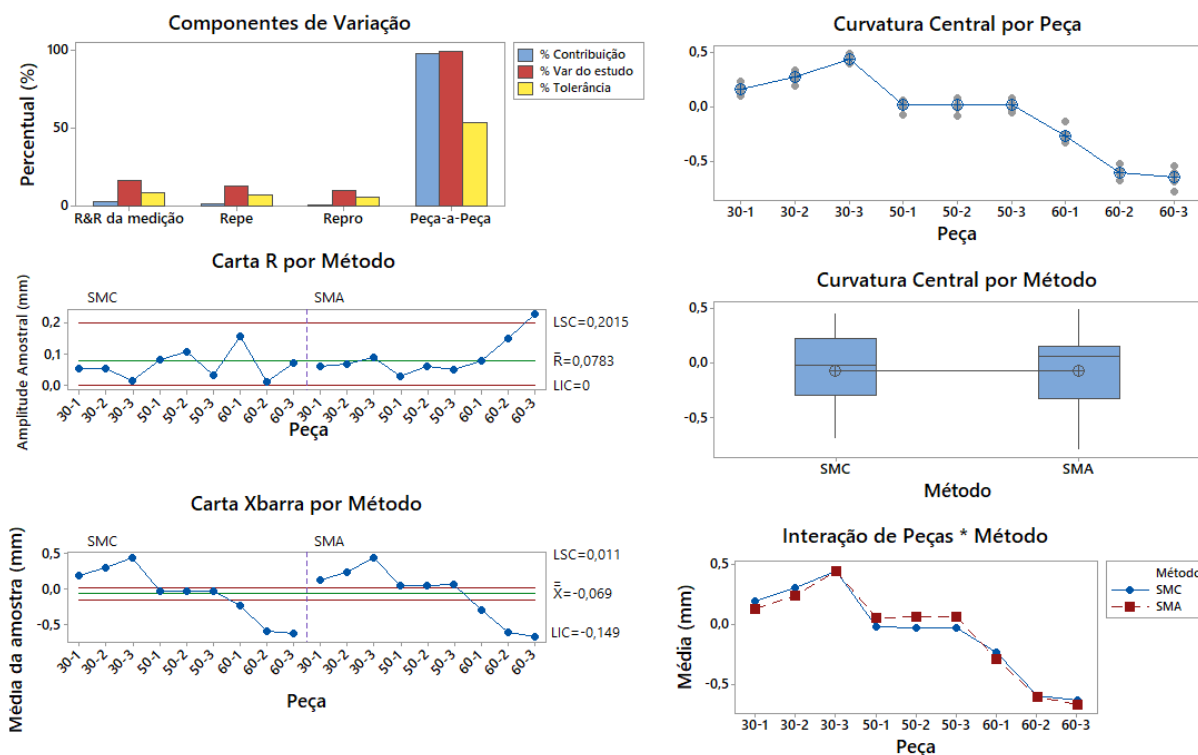
Tabela 25 - Avaliação das medições – Curvatura Central

Fonte	Desv-Pad (DP)	Var. do estudo (5,15 x DP)	%Var. do estudo (%VE)	%Var. de Tol. (VE/Tol.)
Total de R&R da medição	0,062	0,317	16,34	8,81
Repetitividade	0,049	0,251	12,93	6,97
Reprodutibilidade	0,038	0,194	9,99	5,39
Método	0,000	0,000	0,00	0,00
Método x Peça	0,038	0,194	9,99	5,39
Peça a Peça	0,372	1,915	98,66	53,20
Variação Total	0,377	1,941	100,00	53,93

Fonte: Autor, 2023

Os resultados apresentados nos gráficos da figura 33, curvatura central por peça e na carta R, indicam que o formato de 60 cm demonstrou uma variação ligeiramente mais acentuada no SMA. No entanto, é relevante observar que somente um ponto ultrapassou o LSC de 0,2 mm. Os demais gráficos, juntamente com o índice reduzido de R&R, corroboram a compatibilidade dos Sistemas de Medição utilizados.

Figura 33 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Curvatura Central



Fonte: Autor, 2023

4.2.4.5 Análise da compatibilidade – Curvatura Lateral

Os resultados da ANOVA indicam uma influência significativa da interação entre a peça e o método na variação, como evidenciado na Tabela 26 por meio de um p-valor inferior a 0,05, o que leva à rejeição da hipótese nula (H_0).

Tabela 26 - ANOVA com 2 fatores com interação – Curvatura Lateral

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	P-valor
Peça	8	10,686	1,336	57,61	0,00
Método	1	0,011	0,011	0,49	0,50
Peça x método	8	0,186	0,023	12,44	0,00
Repetitividade	36	0,067	0,002		
Total	53	10,950			

Fonte: Autor, 2023

O desvio de R&R em relação à tolerância, tabela 27, ficou em 13,55%, situando-se abaixo do limite estabelecido no presente estudo. Adicionalmente, verificou-se um desvio de 6,18% para a repetitividade, o que indica a alta qualidade dos métodos utilizados. Por outro lado, a reprodutibilidade destacou-se como a

principal fonte de variação, registrando um valor de 12,06%.

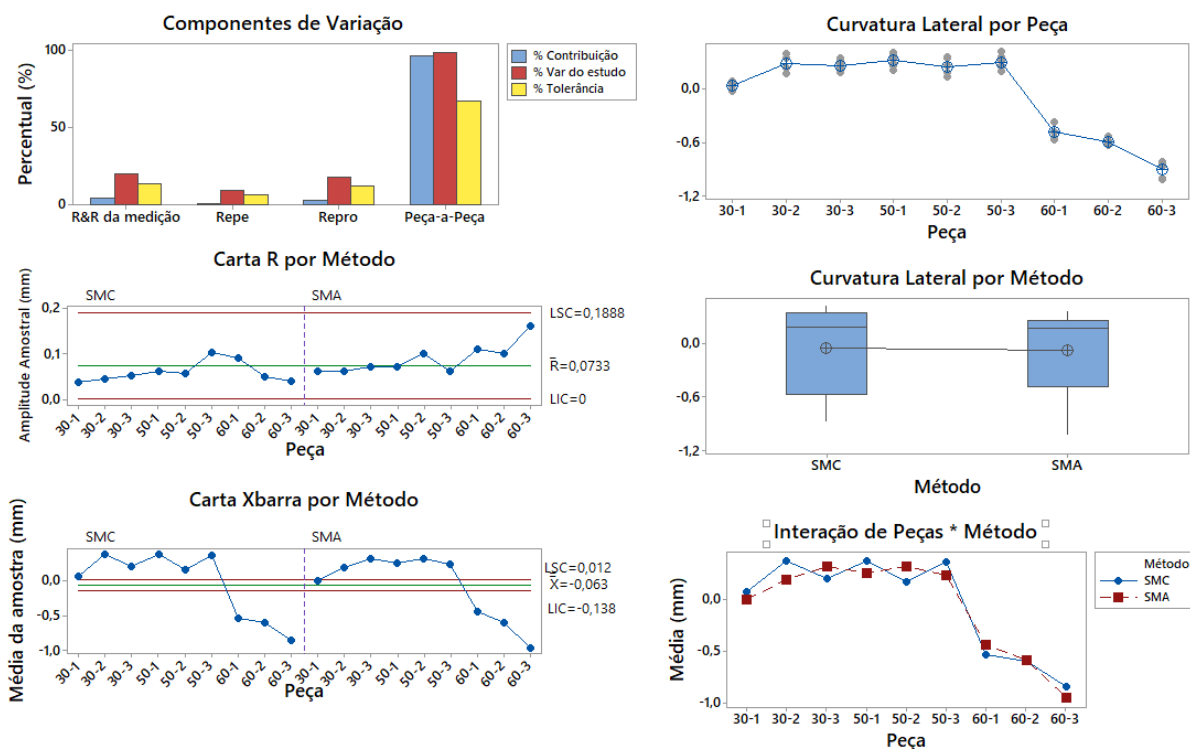
Tabela 27 - Avaliação das medições – Curvatura Lateral

Fonte	Desv- Pad (DP)	Var. do estudo (5,15 x DP)	%Var. do estudo (%VE)	%Var. de Tol. (VE/Tol.)
Total de R&R da medição	0,095	0,488	19,85	13,55
Repetitividade	0,043	0,222	9,05	6,18
Reprodutibilidade	0,084	0,434	17,67	12,06
Método	0,000	0,000	0,00	0,00
Método x Peça	0,084	0,434	17,67	12,06
Peça a Peça	0,468	2,409	98,01	66,91
Varição Total	0,477	2,458	100,00	68,27

Fonte: Autor, 2023

Os gráficos gerados (Figura 34) não evidenciam pontos fora do limite de controle na carta R. Entretanto, observa-se um leve aumento nas amplitudes conforme o formato aumenta no SMA. Nos gráficos de curvatura lateral por método, carta \bar{X} e interação entre peças e métodos, juntamente com o valor encontrado de R&R, fica evidente a compatibilidade entre os SM.

Figura 34 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Curvatura Lateral



Fonte: Autor, 2023

4.2.4.6 Análise da compatibilidade – Empeno

O empeno, assim como as demais características, apresentou interação entre a peça e o método, com p-valores inferiores a 0,05, o que resultou na rejeição da Hipótese nula, H0. Isso evidencia que a escolha do método tem certo impacto nas medições de todas as características. Pode-se concluir que, em geral, o SMA produz melhores resultados para peças não retificadas nas características de tamanho, retitude lateral e ortogonalidade, enquanto o SMC apresenta melhores resultados para peças retificadas de maior formato.

Tabela 28 - ANOVA com 2 fatores com interação – Empeno

Fonte	GL	SQ	QM	Valor-F	P-valor
Peça	8	10,414	1,302	40,98	0,00
Método	1	0,005	0,005	0,15	0,71
Peça x método	8	0,254	0,032	9,14	0,00
Repetitividade	36	0,125	0,003		
Total	53	10,798			

Fonte: Autor, 2023

Os resultados da Tabela 29 revelam um desvio de 16,25% em relação à tolerância no R&R, o qual se mantém dentro dos limites definidos para este estudo. A repetitividade encontrada foi de 8,43%, o que demonstra a qualidade dos métodos. Por outro lado, a reprodutibilidade se destaca um pouco mais, atingindo 13,89% e contribuindo de forma um pouco mais significativa para a variação no estudo.

Tabela 29 - Avaliação das medições – Empeno

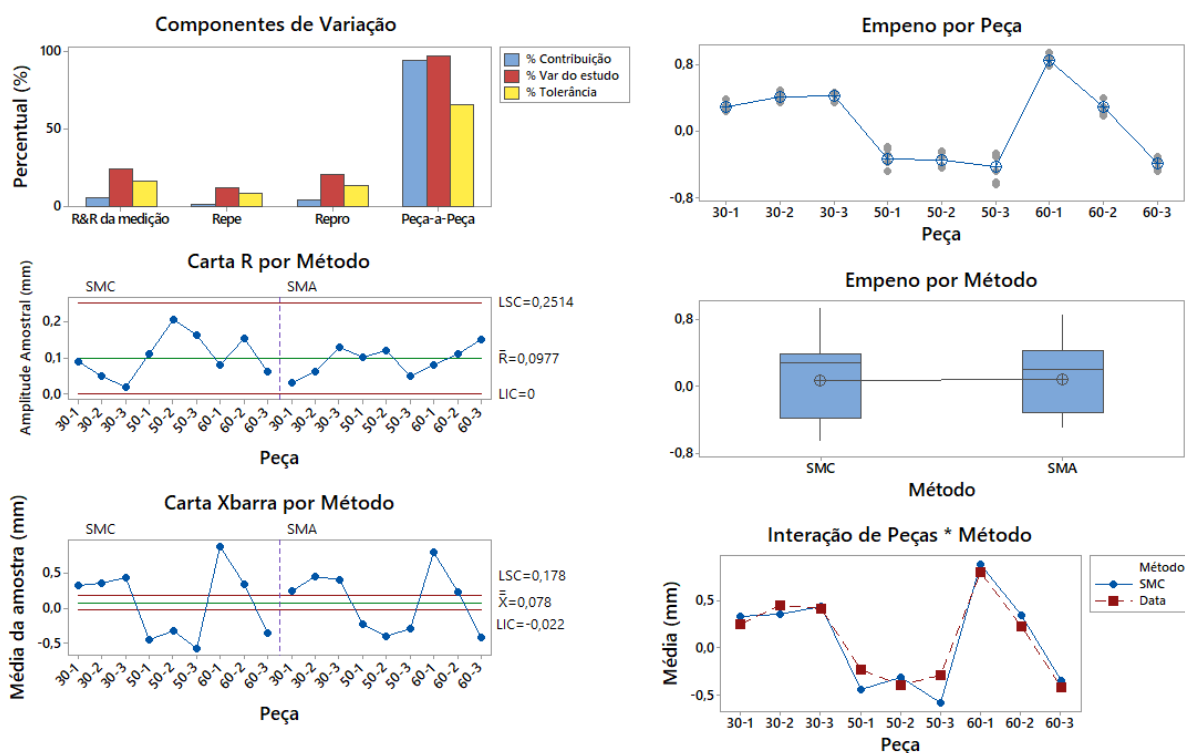
Fonte	Desv-Pad (DP)	Var. do estudo (5,15 x DP)	%Var. do estudo (%VE)	%Var. de Tol. (VE/Tol.)
Total de R&R da medição	0,114	0,585	23,97	16,25
Repetitividade	0,059	0,304	12,44	8,43
Reprodutibilidade	0,097	0,500	20,49	13,89
Método	0,000	0,000	0,00	0,00
Método x Peça	0,097	0,500	20,49	13,89
Peça a Peça	0,460	2,369	97,08	65,81
Variação Total	0,474	2,440	100,00	67,79

Fonte: Autor, 2023

Na análise gráfica dos resultados, figura 35, notamos que a peça com formato de 50 cm apresentou um pouco mais de variação, especialmente no SMC, conforme

evidenciado nos gráficos de empeno por peça e na Carta R. É fundamental destacar que nenhum ponto se situou fora do limite de controle. Nos demais gráficos, observamos uma boa compatibilidade entre os métodos, o que é respaldado pelo desvio de R&R encontrado.

Figura 35 - Relatório de R&R da medição (ANOVA) para Empeno



Fonte: Autor, 2023

Tanto o empeno quanto as demais características analisadas apresentaram valores de R&R inferiores aos limites estabelecidos neste estudo. Embora tenha sido registrada interação entre peça e métodos, essa interação não foi significativa a ponto de influenciar negativamente a qualidade dos métodos e sua compatibilidade. Isso leva à conclusão de que o SMC é uma alternativa viável para as medições de placas cerâmicas. Devido à sua versatilidade em relação ao volume de medição e à independência de placas padrões, ele se mostra um método adequado para peças de grandes formatos.

5 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve o objetivo de propor e avaliar um sistema de medição baseado em coordenadas para avaliação de placas cerâmicas de diferentes tamanhos. Inicialmente foi avaliado o efeito da deformação em relação ao formato, tipologia e espessura em diferentes inclinações. Os resultados desta análise indicaram que a inclinação de 83° se mostrou mais adequada para o processo de medição de placas cerâmicas de formatos superiores a 30 cm. Em seguida foram efetuadas várias análises do sistema proposto por coordenadas, SMC, em relação ao sistema de medição atual, SMA.

Após a análise dos resultados, pode-se afirmar que o sistema de medição desenvolvido nesta pesquisa (SMC), mostrou-se capaz de medir as características dimensionais de placas cerâmicas com repetitividade e reprodutibilidade (R&R) compatíveis com o método atual, eliminando o efeito da deformação planar, possibilitando assim a medição de peças de grande formato. Como resultado do desenvolvimento obteve-se um sistema de medição composto por 3 elementos: o equipamento de medição (máquina de medição por coordenadas), o programa de medição detalhado no apêndice D e o painel inclinado a 83°.

A grande vantagem evidenciada pelo sistema de medição desenvolvido em relação ao atual reside em sua maior capacidade de medir peças de grande formato, contanto que o painel projetado e a máquina de medição por coordenadas atendam às dimensões da placa. Vale ressaltar que, caso a placa apresente deformações também quando posicionada de forma inclinada, não é recomendável a determinação das características planares desse tipo de material. Isso ocorre porque a característica da peça é ser flexível e se ajustar ao substrato de instalação, tornando os desvios das características planares irrelevantes para a aplicação e uso do produto. Isso pode ser exemplificado pelos produtos conhecidos como lâminas, que possuem flexibilidade intencional.

Para determinar os efeitos do formato, espessura e tipologia das placas cerâmicas nas deformações planares quando submetidas ao ensaio de medição das características dimensionais em plano horizontal, conforme a norma ISO 10545-2 (2018a), foi realizado na primeira etapa deste estudo, medições variando a inclinação das placas cerâmicas para avaliar o impacto das variáveis mencionadas na deformação elástica. Concluindo-se que todas essas variáveis afetam a deformação,

com o formato registrando 1,42 mm no maior, a espessura com 0,8 mm nas placas finas e a tipologia com 0,77 mm na B11b. A interação entre as variáveis é significativa, especialmente em tamanhos maiores. Comparando as medições no plano horizontal e inclinado a 83°, observou-se deformação elástica nas placas, destacada pela curvatura central e pelo empeno.

As descobertas apontam que o método da ISO 10545-2 (2018a) na posição horizontal é adequado apenas para peças de até 30x30 cm e para peças B1a com espessas de até 40x40 cm. Com base no estudo paralelo realizado no CCB e nos resultados da segunda etapa, é possível afirmar que o método atual pode ser utilizado para peças de até 60x60 cm quando inclinado a 83°. Assim, conclui-se que é viável utilizar ambos os sistemas de medição inclinados a 83°, com o sistema atual para peças com comprimento de até 60 cm e o sistema proposto para peças maiores.

No desenvolvimento do sistema de medição, o braço FaroArm® foi escolhido devido à sua relação de custo-benefício. O programa desenvolvido permite replicar as medições do sistema de medição atual sem a necessidade de girar manualmente a peça, enquanto o painel inclinado com uma estrutura robusta que não permite a movimentação do mesmo e pinos de apoio para cada ponto de medição que não permitem a movimentação da peça, elimina a deformação elástica. Destaca-se que o tempo dedicado ao desenvolvimento foi insuficiente, e a não aplicação de ferramentas como o FMEA resultou na identificação de falhas pós-construção. Isso enfatiza a importância de investir mais tempo na etapa de desenvolvimento e de aplicar ferramentas que auxiliem a antecipar e mitigar possíveis problemas.

Conclui-se também que os sistemas de medição atual e proposto são compatíveis. Isso foi evidenciado no estudo de R&R, onde as diferenças médias entre eles variaram de 0,013 mm a 0,075 mm, e os desvios padrões do estudo variaram de 0,062 mm a 0,114 mm, todos abaixo da resolução exigida pelas normas. Além disso, os resultados de R&R obtidos para o tamanho e retitude lateral foram de 22% e 24%, respectivamente, abaixo do limite de aceitação estabelecido de 30%. Os desvios de ortogonalidade, empeno, curvatura central e lateral também foram inferiores aos limites estabelecidos, sendo de 17%, 16%, 9% e 14%, respectivamente, demonstrando a conformidade dos sistemas de medição.

Destaca-se também que os desvios de repetitividade das características ficaram entre 7% e 9%, todos abaixo de 10%. Além disso, não foram evidenciados

desvios sistemáticos de estabilidade, e o sistema de medição proposto não apresentou desvios de tendência. Apenas o sistema de medição atual mostrou alguns desvios de tendência, mas que não comprometem o seu uso. Portanto, pode-se concluir que ambos os sistemas de medição possuem qualidade aceitável para determinar as características dimensionais de placas cerâmicas.

As implicações teóricas desta pesquisa revelam que, conforme evidenciado por Fazio et al. (2018), as placas cerâmicas apresentam deformações elásticas que comprometem o ensaio dimensional. No entanto, esta pesquisa demonstra que a deformação elástica influencia peças não apenas acima de 60 cm, como previamente sugerido, mas também aquelas acima de 30 cm. No ramo cerâmico, é comum o estudo das deformações permanentes, como as piropelásticas, mas esta pesquisa também contribui com dados sobre a deformação elástica das placas cerâmicas, que até então não haviam sido abordados na literatura.

As implicações práticas deste estudo são significativas para a indústria cerâmica. Este estudo apresenta um sistema de medição eficaz para placas cerâmicas de grande formato, superando os desafios da deformação elástica. Ele beneficia a indústria cerâmica ao permitir inspeções mais precisas, economizando recursos e reduzindo custos de produção. Além disso, destaca a importância de investir em desenvolvimento e ferramentas de análise, oferecendo diretrizes para futuras pesquisas. Esse avanço é fundamental para garantir a qualidade dos produtos, aumentar a satisfação do cliente e manter a competitividade no mercado.

As limitações deste estudo incluem a avaliação de peças com comprimento superior a 60 cm, devido à limitação do equipamento dataplucômetro disponível no laboratório. No entanto, uma vez que o objetivo consistia em validar a compatibilidade dos sistemas de medição, o método pode ser generalizado, pois o princípio se mantém para qualquer formato. Além disso, as lâminas, que possuem espessura inferior a 5 mm, não foram avaliadas devido à sua falta de estabilidade mínima para qualquer sistema de apoio, se moldando facilmente à superfície em que serão apoiadas ou instaladas.

A principal contribuição deste estudo reside na concepção e validação de um sistema de medição eficaz que elimina as variáveis relacionadas à deformação elástica em placas cerâmicas, sendo compatível com o método atual, oferecendo estabilidade, repetitividade e reprodutibilidade (R&R). Este sistema, emprega

equipamentos mais modernos, abrindo caminho para novas técnicas de medição. Além disso, este estudo expande o conhecimento sobre deformações elásticas, mostrando que elas impactam peças menores do que anteriormente considerado, tornando essencial o uso de métodos de medição como o proposto. Para pesquisas futuras, sugere-se:

- Desenvolver um sistema de medição que mitigue os problemas de medição apresentados no item 2.3.3, com conceitos mais modernos de metrologia dimensional;
- Avaliar o desempenho do material instalado, verificando se o método normativo representa a realidade do produto instalado;
- Revisar as tolerâncias normativas, tornando-as mais adequadas a realidade do produto, sua finalidade e atendendo aos requisitos dos consumidores, dentro de uma boa relação de custo-benefício;

REFERÊNCIAS

- ABELLÁN-NEBOT, J. V. Derivation and application of the stream of variation model to the manufacture of ceramic floor tiles. **Quality Engineering**, Castellón de la Plana (Spain), v. 30, n. 4, p. 713-729, jan. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08982112.2017.1385078>. Acesso em: 10 nov. 2022.
- ALBERTAZZI, A.; SOUSA, A. R. **Fundamentos de metrologia científica e industrial**. 1 ed. [S. l.]: Manole, 2008. 485 p.
- ALI, S. H. R.; BUAJARERN, J. New method and uncertainty estimation for plate dimensions and surface measurements. **Journal of Physics: Conference Series**, Taipei (Taiwan), v. 483, n. 012014, p. 1-14, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/483/1/012014>. Acesso em: 30 jun. 2021.
- ANFACER - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA PARA REVESTIMENTOS, LOUÇAS SANITÁRIAS E CONGÊNERES. **Números do Setor Cerâmico**. São Paulo, 2022. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>. Acesso em: 25 set. 2022.
- ARENHART, R. S.; PIZZOLATO, M. Análise de Sistemas de Medição em uma Máquina de Medir por Coordenadas. **Revista FSA**, Teresina, v. 17, n. 6, p. 182-203, jun. 2020. Disponível em: <http://www4.unifsa.com.br/revista/index.php/fsa/article/view/2035>. Acesso em: 26 set. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. Norma ABNT NBR NM-ISO 1: Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento. Rio de Janeiro, RJ, p. 1-2, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. Norma. ABNT **NBR 14081: Argamassa colante industrializada para assentamento de placas cerâmicas**: Parte 4: Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro - RJ, p. 1-8, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. Norma. **ABNT NBR 15270: Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria** Parte 2: Métodos de ensaios, Rio de Janeiro - RJ, p. 1-29, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. Norma. **ABNT NBR 15310: Componentes cerâmicos - Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**, Rio de Janeiro - RJ, p. 1-47, 2009.
- AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP (AIAG) (ed.). **Measurement Systems Analysis (MSA)**: Reference Manual. 4. ed. Michigan, USA: AIAG, 2010. 231 p.

BADUGE, S. K. et al. Artificial intelligence and smart vision for building and construction 4.0: Machine and deep learning methods and applications. **Automation in Construction**, Australia, v. 141, n. 104440, p. 1-26, Set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104440>. Acesso em: 11 nov. 2022.

BAENA, O. J. R. **Baldosas cerâmicas y gres porcelánico**: Un mundo en permanente evolución. 1. ed. Medellín, Colombia: Centro Editorial Facultad de Minas, 2011. 123 p.

BARBA, A. et al. **Materias Primas**: Para la Fabricacion de Soportes de Baldosas Ceramicas. 2. ed. Espanha: Instituto de Tecnologia Cerâmica (ITC), 2002. 292 p.

BIFFI, G. **Defeitos de Fabricação de placas cerâmicas**. 1. ed. Rio Claro, Brasil: Faenza Editrice do Brasil, 2000. 120 p.

BÓ, M. D. et al. Efeito das propriedades dos esmaltes e engobes sobre a curvatura de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica**, v. 58, n. 345, p. 118-125, Mar. 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0366-69132012000100019>. Acesso em: 6 nov. 2022.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. Londres: Unwin Hyman, 1989.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES - BIPM (France). JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY (JCGM). **International vocabulary of metrology**: Basic and general concepts and associated terms (VIM). 3. ed. [S. l.]. 2012. 91 p.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES. **The International System of Units (SI)**. 9. ed. França: Creative Commons, 2019. 117-216 p.

CENTRO CERÂMICO DO BRASIL. CCB. Parecer técnico. **Programa Setorial da Qualidade de Placas Cerâmicas para Revestimento**: Relatório Setorial nº42. Santa Gertrudes - São Paulo, p. 1-70, Set. 2022. Disponível em: <https://pbqp-h.mdr.gov.br/psq/placas-ceramicas-para-revestimento/>. Acesso em: 9 out. 2022.

COESIA. System ceramics. **Planar**. Modena (Itália): System ceramics, 2022. 5 p. Disponível em: https://repository.systemceramics.com/content/uploads/2022/06/BROCHURE_PLANAR_PTBR.pdf. Acesso em: 7 nov. 2022.

DEDHIA, N. S. Global perspectives on quality. **Total Quality Management**, v. 12, n. 6, p. 657-668, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09544120120075299>. Acesso em: 20 nov. 2022.

DEJAEGER, B. et al. Improving method capability of a drug substance HPLC assay. **Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis**, [s. l.], v. 42, ed. 2, p. 155-170, 2006. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2006.01.001>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jpba.2006.01.001>. Acesso em: 30 ago. 2022.

DEMARCH, A. **Análise da relação entre rugosidade superficial e resistência ao escorregamento de revestimentos cerâmicos submetidos ao desgaste**. 2019. 225 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), Criciúma, 2010.

EMAM, S.M.; SAYYEDBARZANI, S.A. Dimensional deviation measurement of ceramic tiles according to ISO 10545-2 using the machine vision, **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 100, n. 5, p. 1405–1418, fev. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2781-4>. Acesso em: 30 jun. 2021.

FANTON, J. P. A brief history of metrology: past, present, and future. **International Journal of Metrology and Quality Engineering**, Paris (France), v. 10, n. 5, p. 8, abr. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/ijmqe/2019005>. Acesso em: 17 ago. 2022.

FARAGO, F. T.; CURTIS, M. A. **Handbook of Dimensional Measurement**. 3. ed. New York, EUA: Industrial Press Inc., 1994. 608 p.

FAZIO, S. et al. New instruments for determining dimensional characteristics of large size tiles. QUALICER: World Congress on Ceramic Tile Quality, Castellón - Spain, p. 1-11, 2018.

GARCÍA, A. C.; RÍO, A. G. Number of distinct data categories and gage repeatability and reproducibility: A double (but single) requirement. **Measurement**, Valencia, Spain, v. 46, ed. 8, p. 2514-2518, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.065>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.065>. Acesso em: 30 maio 2022.

GIJO, E. V.; SCARIA, J. Process improvement through Six Sigma with Beta correction: a case study of manufacturing company. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s. l.], p. 717–730, 2014. DOI <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5483-y>.

GUPTA, S. V. Metrology Through Ages. *In: Units of Measurement: Past, Present and Future*. International System of Units. 1. ed. Berlin, Germany: Springer Berlin, Heidelberg, 2009. v. 122, cap. 1, p. 1-14. ISBN 978-3-642-00738-5. *E-book*.

HAIPOUR, V. *et al.* A fuzzy expert system to increase accuracy and precision in measurement system analysis. **Measurement**, Qazvin, Iran, v. 46, ed. 8, p. 2770-2780, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.015>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.04.015>. Acesso em: 31 jul. 2022.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO. Norma. ISO 10545 Ceramic tiles — Part 2: Determination of dimensions and surface quality. Geneva, Switzerland, p. 1-13, 2018a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO. Norma. ISO 10545 Ceramic tiles — Part 3: Determination of water absorption, apparent porosity, apparent relative density and bulk density. Geneva, Switzerland, p. 1-8, 2018b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO. Norma. ISO 10545 Ceramic tiles — Part 4: Determination of modulus of rupture and breaking strength. Geneva, Switzerland, p. 1-8, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO. Norma. ISO 10545 Ceramic tiles — Part 13: Determination of chemical resistance, Geneva, Switzerland, p. 1-9, 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO. Norma. ISO 13006: Ceramic tiles — Definitions, classification, characteristics and marking, Geneva, Switzerland, p. 1-53, 2018c.

KINGERY, W. D. **Ceramic Fabrication Processes**. 1. ed. Massachusetts, EUA: The MIT Press, 1958. 235 p. ISBN 0262110059.

KLAPUT, P. et al. Problems of application of measurement system analysis (MSA) in metallurgical production. *Metallurgija*, Ostrava, Czech Republic, v. 55, ed. 3, p. 535-537, 2016. Disponível em: <https://hrcak.srce.hr/153705>. Acesso em: 20 nov. 2022.

KUO, C.; HUANG, P. Repeatability and reproducibility study of thin film optical measurement system. *Optik: International Journal for Light and Electron Optics*, [s. l.], v. 124, ed. 18, p. 3489-3493, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2012.10.015>. Acesso em: 25 set. 2022.

LEACH, R.; FERRUCCI, M.; HAITJEMA, H. Dimensional Metrology. In: CHATTI, S.; TOLIO, T. **CIRP Encyclopedia of Production Engineering**. Berlin: Springer, 2019.

LEONEL, R. F. *Polímeros e Cerâmicas*. 1. ed. [S. l.]: Editora Intersaberes, 2020. 262 p. ISBN 9786555176575.

MARQUES, C. et al. Improving operator evaluation skills for defect classification using training strategy supported by attribute agreement analysis. *Measurement*, Portugal, v. 119, p. 129-141, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.034>. Acesso em: 20 nov. 2022.

MARTINS, R.A. Abordagens Quantitativa e Qualitativa. In: CAUCHICK-MIGUEL, P.A. *et al.* *Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações*. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier Editora Ltda, 2018. Cap. 3. p. 47-62.

MENEGAZZO, A. P. M. **Estudo da correlação entre a microestrutura e as propriedades finais de revestimentos cerâmicos do tipo grês porcelanato**. Orientador: Dr. José Octavio Armani Paschoal. 2001. 291 f. Tese (Doutorado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2001.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6. ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2009. ISBN 978-0-470-16992-6.

OLIVEIRA, A. P. N.; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. rev. Florianópolis: Editora da UFSC, 2015. 118 p. ISBN 978-85-328-0710-6.

PEREIRA, R. B. D. et al. Combining Scott-Knott and GR&R methods to identify special causes of variation. *Measurement*, Brasil, v. 82, p. 135-144, 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.033>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.12.033>. Acesso em: 20 nov. 2022.

PERUCHI, R. S. et al. A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics. *International Journal of Production Economics*, Itajubá, MG, v. 144, ed. 1, p. 301-315, 2013. DOI <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.018>. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.02.018>. Acesso em: 9 jun. 2022.

PIZZOLATO, M. *et al.* Análise dos sistemas de medição no setor de usinagem de uma empresa metal mecânica. **Engevista**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 193-209, 2019. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/340101490>. Acesso em: 4 set. 2022.

PROGRAMA BRASILEIRO DA QUALIDADE E PRODUTIVIDADE DO HABITAT (PBQP-H). Sistema de Qualificação de Empresas de Materiais, Componentes e Sistemas Construtivos (SiMaC). Placas Cerâmicas para Revestimento: Resumo Executivo. *In*: MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL. Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) (ed.). **Site PBQP-H: Ferramenta do Governo Federal que induz qualidade e produtividade na habitação social**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://pbqp-h.mdr.gov.br/psq/placas-ceramicas-para-revestimento/>. Acesso em: 16 out. 2022.

PRZYKLENK, A. *et al.* New European Metrology Network for advanced manufacturing. **Measurement Science and Technology**, [s. l.], v. 33, n. 11, p. 1-14, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac0d25>. Acesso em: 25 set. 2022.

RAAB, S. Coordinate measurement machine with articulated arm and software interface. Depositante: Faro Technologies Inc. US 6,366,831 B1. Depósito: 12 jan. 1999. Concessão: 2 abr. 2002.

SAIKAEW, C. An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. **Measurement**, Khon Kaen, Thailand, v. 118, p. 246-252, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.008> Acesso em: 25 set. 2022.

SÁNCHEZ, E. *et al.* Deformação de Queima em Grés Porcelanato de Grande Formato: Efeito das Variáveis de Composição e de Processo. **Cerâmica Industrial**, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 7-16, 2018. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/doi/10.4322/cerind.2018.011>. Acesso em: 7 nov. 2022.

SANTOS, J. O. Metrologia e Normalização. 1. ed. São Paulo, Brasil: Pearson, 2016. 124 p. ISBN 9788543016757. E-book.

SECCO, A. R. **Tolerância geométrica**. São Paulo, SP: SENAI-SP editora, 2019. 144 p. ISBN 978-85-8393-136-2.

SHI, L. *et al.* An Approach for Simple Linear Profile Gauge R&R Studies. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, [s. l.], 2014. DOI <https://doi.org/10.1155/2014/597980>. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/597980>. Acesso em: 28 ago. 2022.

SIOMA, A. Automated Control of Surface Defects on Ceramic Tiles Using 3D Image Analysis. **Materials**, Poland, v. 13, n. 1250, ed. 5, p. 1-13, 2020. DOI <https://doi.org/10.3390/ma13051250>. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ma13051250>. Acesso em: 8 nov. 2022.

STOJADINOVIC, S. M. *et al.* Development of a Coordinate Measuring Machine: Based Inspection Planning System for Industry 4.0. **Applied Sciences**, Switzerland, v. 11, ed. 18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app11188411>. Acesso em: 25 set. 2022.

TAYMANOV, R.; SAPOZHNIKOVA, K. Metrology challenges of Industry 4.0. **Journal of Physics: Conference Series**, Rússia, v. 1065, ed. 7, p. 1-4, 2018. Disponível em: [doi:10.1088/1742-6596/1065/7/072044](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1065/7/072044). Acesso em: 25 set. 2022.

TOLEDO, J. C. Sistema de medição e metrologia. 1. ed. Curitiba, PR: Intersaberes, 2014. 190 p. ISBN 987-85-8212-942-5.

VALLEJO, M. *et al.* Soft metrology based on machine learning: a review. **Measurement Science and Technology**, Colombia, v. 31, n. 3, p. 1-16, 2020. DOI <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ab4b39>. Acesso em: 25 set. 2022.

VERMULM, R. Políticas para o desenvolvimento da indústria 4.0 no Brasil. São Paulo, SP: IEDI, 2018. 30 p.

WEAVER, B. P. *et al.* A Bayesian Approach to the Analysis of Gauge R&R Data. *Quality Engineering*, EUA, v. 24, ed. 4, p. 486-500, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/08982112.2012.702381>. Acesso em: 9 set. 2022.

WERKEMA, M. C. C. Avaliação de Sistemas de Medição. 1. ed. Belo Horizonte, MG: Werkema Editora, 2006. 116 p. v. 5. ISBN 85-98582-05-0.

ZANOBINI, A. *et al.* Repeatability and Reproducibility techniques for the analysis of measurement systems. **Measurement**, [s. l.], v. 86, p. 125-132, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.041>. Acesso em: 27 set. 2022.

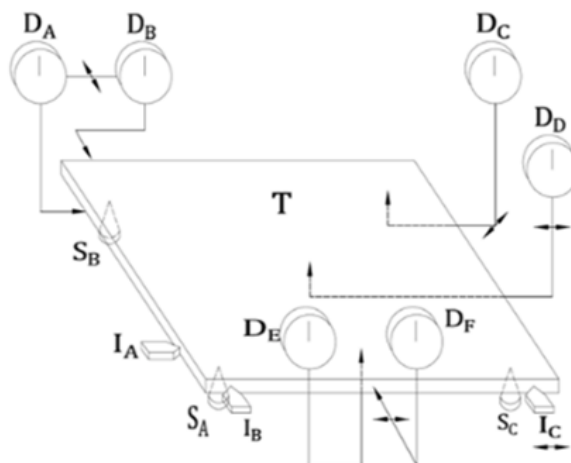
ZHU, X. *et al.* A new method to measure fat content in coconut milk based on Y-type optic fiber system. *Optik*, Nanjing, China, v. 125, ed. 20, p. 6172-6178, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.115>. Acesso em: 1 out. 2022.

ZUIN, E. S. L. *Pelas Trilhas Históricas do pesas e do medir*. Pará, Brasil: SBEM, 2019. 78 p. v. 12. ISBN 978-65-5076-000-7. E-book.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO DATAPLUCÔMETRO

A Figura 36 apresenta o esquema do dataplucômetro definido pela norma e traz as identificações de cada suporte e relógio, utilizados para descrever o método.

Figura 36 - Esquema Dataplucômetro



T	Placa
S_A, S_B, S_C	Suportes inferiores
I_A, I_B, I_C	Suportes de posição
D_A	Relógios comparadores da ortogonalidade
D_B	Relógios comparadores do tamanho
D_C	Relógios comparadores do empeno
D_D	Relógios comparadores da curvatura central
D_E	Relógios comparadores da curvatura lateral
D_F	Relógios comparadores da retitude lateral

Fonte: ISO 10545-2 (2018a)

Realizar o ajuste do dataplucômetro de acordo com as dimensões da placa. Por exemplo, se o comprimento da peça é de 600 mm, as bases móveis devem ser abertas a 300 mm do centro, alinhando o centro da peça com o centro da mesa.

Os suportes de posição (I_A, I_B, I_C) devem ser posicionados a 5 mm dos vértices e os suportes inferiores (S_A, S_B, S_C) colocados a 10 mm das bordas.

O relógio D_A (ortogonalidade) deve ser posicionado a 5 mm do vértice oposto aos suportes de posição I_A e I_B e o relógio D_B (tamanho) posicionado a 5 mm do vértice da face paralela ao suporte de posição I_B , mantendo alinhamento.

O relógio D_C (empeno) deve ser posicionado a 10 mm das bordas do vértice oposto aos suportes de posição I_A e I_B . O relógio D_D (curvatura central) colocado no centro da peça. O relógio D_E (curvatura lateral) posicionado no meio do lado a ser medido. Por exemplo, se o comprimento da peça é de 600 mm, o relógio deve ficar a

300 mm do vértice e a 10 mm da borda.

O relógio DF (retitude lateral) deve ser colocado no meio do lado a ser medido.

Após a mesa e os relógios serem ajustados, a placa padrão deve ser colocada sobre os suportes inferiores e encostada nos suportes de posição para alinhar a placa nas 3 dimensões (X, Y, Z). Os relógios devem ser ajustados para zero, um valor conhecido.

Com os relógios ajustados, a placa cerâmica, com a face de uso voltada para baixo (exceto peças com relevo agressivo), deve ser posicionada sobre os suportes inferiores e encostada nos suportes de posição. Os valores dos relógios devem ser registrados.

Quando as placas possuem relevos na superfície que interferem na medição, sempre que possível, devem ser posicionadas com o tardez voltado para baixo e o sinal dos relógios da planeza invertidos.

No caso de placas quadradas, a placa deve ser girada para obter quatro conjuntos de medidas. Para placas retangulares, o procedimento de ajuste deve ser repetido duas vezes, uma para cada par de lados.

Após o registrar todos os valores, correções devem ser aplicadas com base nos relatórios de calibração das placas padrões.

A espessura das placas cerâmicas pode ser determinada por dois procedimentos, porém neste estudo não foi avaliada esta característica. Para peças lisas, as diagonais são traçadas e o ponto mais espesso em cada vértice é medido seguindo a linha da diagonal. Para peças com superfícies irregulares, quatro linhas são traçadas em ângulos retos na face, à distância de 12,5%, 37,5%, 62,5% e 87,5% do comprimento. O ponto mais espesso de cada linha é medido, considerando as nervuras e garras do tardez.

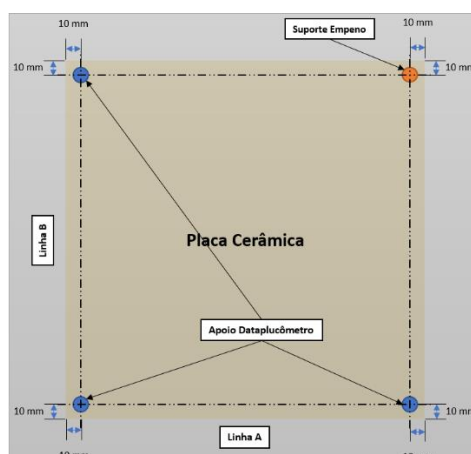
Após a medição, os cálculos devem ser realizados para determinar os desvios em milímetros e porcentagem.

Embora não especificado em norma o CCB como boa prática metrológica define como padrão o ensaio em sala climatizada a (20 ± 2) °C.

APÊNDICE B – PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO PRIMEIRA ETAPA

O empeno de cada condição deve ser determinado por meio do scanner do BMT. Antes de dar início às medições, o BMT deve passar por um processo de calibração, abrangendo tanto o scanner quanto a medição por contato. Os quatro vértices de cada placa devem ser devidamente identificados em seus tardozes, marcando cada ponto a uma distância de 10 mm a partir da borda, conforme ilustrado na Figura 37, a fim de possibilitar uma comparação com o suporte do dataplucômetro.

Figura 37 - Esquema para marcação das peças



Fonte: Autor, 2022

A sala deve ser climatizada a (20 ± 2) °C antes de iniciar as medições.

Disponha as placas sobre a mesa com a face de uso voltada para cima. Em seguida, os apoios do dataplucômetro devem ser posicionados sob a placa a ser medida, alinhando cada um deles com três dos quatro pontos identificados no tardoz. No quarto ponto, o suporte de medição do empeno deve ser colocado para auxiliar na sustentação da peça, simulando o ensaio de acordo com a norma.

Caso ocorra instabilidade das placas sobre os apoios, uma fixação mecânica adicional deve ser aplicada. Essa fixação consiste na utilização de um grampo no vértice oposto, situado na mesma diagonal do suporte do empeno.

O alinhamento do sistema de coordenadas deve ser efetuado utilizando duas linhas, denominadas A e B, bem como o ponto de interseção entre essas linhas e o plano formado por três pontos previamente coletados em cada ponto de apoio do dataplucômetro. A peça deve ser escaneada.

Posteriormente, a placa deve ser posicionada sobre o painel inclinado, e as etapas de digitalização e análise repetidas. Por meio do software, procedeu-se ao tratamento das imagens, o que possibilitou a determinação do desvio de empeno da placa.

Registrar o desvio de empeno, a espessura e o tamanho da diagonal. Além disso, o arquivo do software Faro CAM2® deve ser salvo para registro e análise posterior.

APÊNDICE C – CHECKLIST DE DESENVOLVIMENTO DO SMC

Checklist dos elementos do sistema de medição		
Questões do design e desenvolvimento do sistema de medição:		
O que deve ser medido?	Tipo de característica:	Determinar as características dimensionais de placas cerâmicas, sendo elas tamanho, perpendicularidade, retitude dos lados, curvatura central, curvatura lateral e empeno.
	É propriedade mecânica?	Não.
	Dinâmico ou estacionário?	Estacionário. Embora o braço de medição seja considerado um sistema dinâmico, por ser portátil, este sistema de medição pode ser classificado como estacionário, pois dependerá do conjunto “braço de medição + Painel de fixação”.
	É uma propriedade elétrica?	Não.
	Existe variação significativa dentro da peça?	Sim, principalmente nas bordas das peças não retificadas.
Para qual finalidade os resultados (saída) do processo de medição serão usados?	Avaliação da conformidade.	
Quem usará o processo?	Técnicos e especialistas.	
Treinamento exigido:	Operação do equipamento de medição, configuração do software faroCAM2, realização das medições.	
As fontes de variação foram identificadas?	Sim. Foi construído um modelo de erro S.W.I.P.E., através de um brainstorming realizado com a equipe (técnicos, analistas e coordenadores), manual do equipamento e construção de um diagrama de causa e efeito (figura 38).	
Foi desenvolvido um FMEA para o sistema de medição?	Não.	
Sistemas de medição flexíveis x dedicados:	Dedicado. Considerando o sistema de medição (Painel de apoio e fixação + Braço tridimensional);	
Contato versus não contato:	Medição por contato	
Ambiente:	Aplicação em Laboratório. Não é necessária uma sala limpa, mas é necessário limpar com frequência, para evitar o acúmulo de particular de poeira nas amostras e dispositivos. Temperatura controlada não variando mais de 3°C em uma faixa de 5 minutos (especificação do fabricante).	
Pontos de medição e localização:	Figura 39 apresenta os pontos de medição. São necessários 21 pontos para extrair as características definidas pela ISO 10545-2. Os pontos de fixação, 2 pontos inferiores e 3 pontos no tardo da peça.	
Método de fixação:	Peça colocada sobre os apoios	
Orientação da peça:	Peças lisas devem ser colocadas no painel com a face de uso virada para o técnico. Peças com relevo, quando estes forem muito agressivos e dificultarem a medição devem ser colocadas no painel com o tardo virado para o técnico, e os resultados planares deverão ser invertidos.	
Preparação da peça:	A peça deve estar limpa, sem presença de argamassa, colas ou resinas nos pontos de medição. A cerâmica tem pouca expansão térmica, não sendo necessário aclimatar a peça.	
Localização do Equipamento de medição:	Em frente ao painel, a altura próxima ao meio da peça, maximizando o seu volume de medição.	

Checklist dos elementos do sistema de medição (continuação)

Questões da construção do sistema de medição (equipamento, padrão, instrumento):		
Problema de correlação nº 1 medição duplicada:	Medidores duplicados (ou mais) são necessários dentro ou entre plantas para atender aos requisitos?	Sim. Por se tratar de um método normativo os medidores podem ser considerados duplicados.
	Considerações de construção	- A estrutura do painel deve ter entre 80° a 86°, mitigando o efeito da deformação em função do peso e evitando que a peça caia durante a medição. Também deve ter bases moveis para acomodar os diversos tamanhos de peça;
	Considerações de erro de medição	- A base e os pinos não podem ter folgas que permitam variabilidade entre as medições; - O braço ou outro equipamento deve ser calibrado periodicamente, sendo recomendado anualmente; - O equipamento deve ser instalado em base rígida que não permita o aumento do erro de compensação; - A estrutura do painel deve ser rígida o suficiente para evitar a movimentação durante a medição; - A temperatura da sala deve ser controlada minimizando o efeito de dilatação dos componentes;
	Considerações de manutenção	- Após cada manutenção no equipamento de medição o mesmo deve ser calibrado; - Após cada manutenção/modificação no painel de suporte, ao menos um estudo de repetitividade e estabilidade deve ser conduzido;
	Qual é considerado o padrão?	Por se tratar de empresas não vinculadas não é possível determinar um SM como padrão.
	Como cada um será qualificado?	A qualificação deverá ser realizada através de uma análise do sistema de medição, considerando ao menos a estabilidade e desvio de R&R.
Problema de correlação nº 2 - divergência de métodos:	SMC versus SMA. O método tradicional previsto em norma é o dataplucômetro, sendo necessário para efeito de aprovação do método a correlação entre eles.	
Automatizado vs. manual:	Coleta dos pontos manual.	
Medição destrutiva versus não destrutiva:	Não destrutivas.	
Faixa de medição potencial:	As peças atuais que são enviadas ao LabCCB têm formatos de até 160 cm de largura por 320 cm de comprimento; O Painel atual do CCB é capaz de medir peças de 30 cm até 180 cm; O BMT atual do CCB permite a medição de peças quadradas até (120x120) cm e retangulares até (80x180) cm; Entretanto com a compra de um painel maior e um BMT com maior capacidade ou um tripe que permita a movimentação é possível medir peças de até 320 cm;	
Resolução efetiva:	A norma especifica equipamento com resolução de 0,1 mm, o braço possui resolução de 0,001 mm. Sendo sensível à mudança física, ou seja, capaz de detectar variação de processo ou produto.	
Sensibilidade:	O fabricante especifica uma precisão de 0,029 mm, considerada no cálculo de incerteza de medição.	
As fontes de variação identificadas no projeto do sistema foram abordadas? Revisão do projeto; verificar e validar	Sim.	
Sistema de calibração e controle:	Fechado o pacote de garantia " <i>Ultimate Uptime</i> " que inclui: Peças e Horas de Laboratório (mão de obra), calibração / certificação do Equipamento anual, equipamento reserva calibrado (enviado no próximo dia útil, para calibrações / certificações e reparos) e custo de transporte (da origem para FARO e retorno).	
Requisitos de entrada:	Mecânico:	A base de fixação do braço deve ser rígida evitando movimentações durante o uso (deve passar pelos testes de compensação do equipamento). O painel deve ser rígido para não movimentar ou tombar quando colocado a peça sobre ele.
	Elétricos/filtros:	Equipamentos bivolt (computador e braço), mas devem possuir um nobreak na entrada de energia.
	Problemas de configuração:	Deve-se criar uma rotina de medição que correlacione os 21 pontos de modo a reproduzir as medições do método data. Esta rotina de medição é descrita no apêndice D
	Operação:	A sala deve ser equipada com ar-condicionado capaz de manter a temperatura a (20±2) °C.

Checklist dos elementos do sistema de medição (continuação)

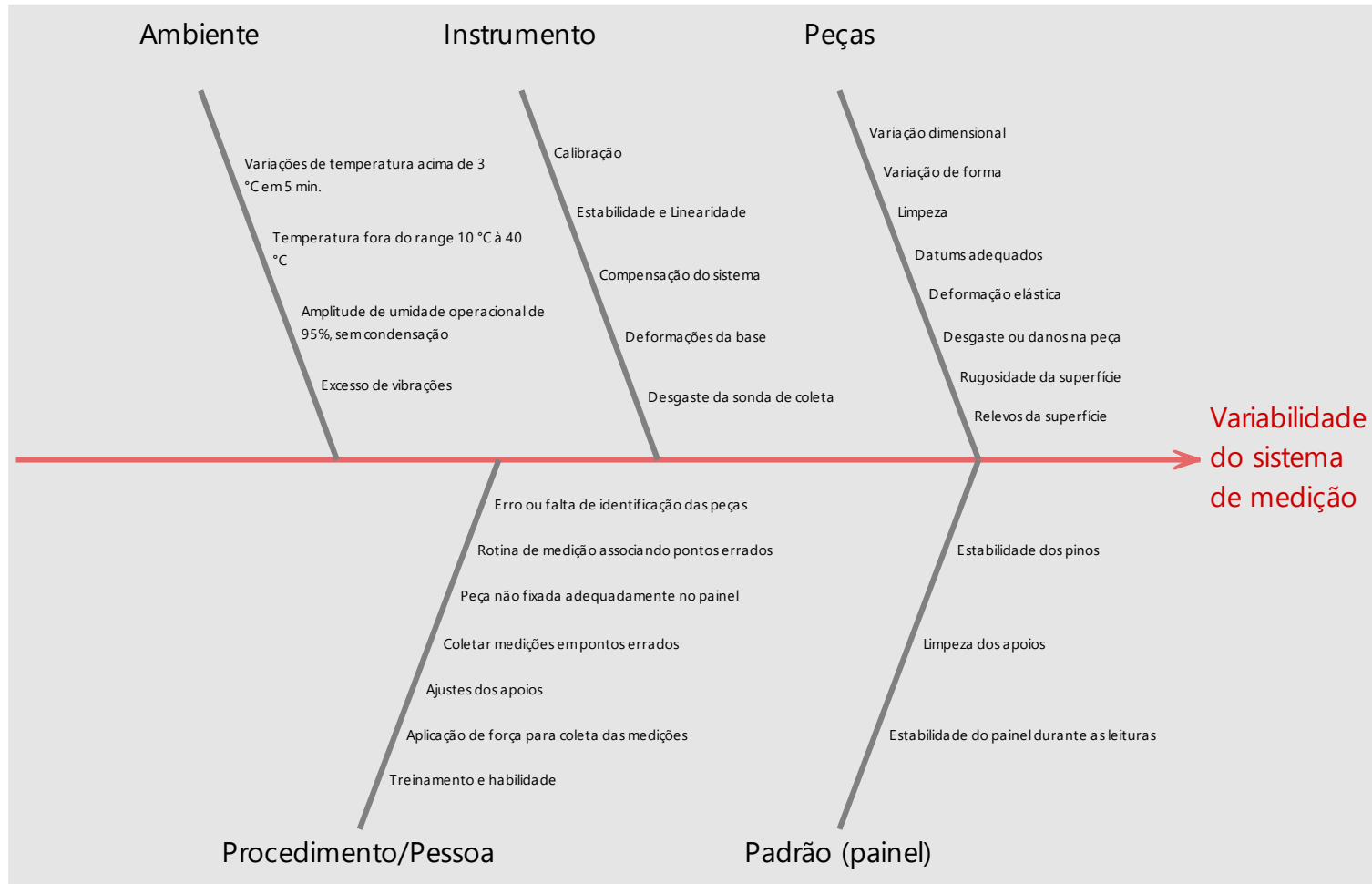
Questões da construção do sistema de medição (equipamento, padrão, instrumento):	
Requisitos de saída:	Resultados digitais. Registrados no documento “Planilha dimensional”, arquivada no servidor com back-up diário.
Custo:	Braço: R\$ 400.000,00 (incluindo treinamento e suporte para instalação); Computador: R\$ 35.000,00; Painel: R\$ 30.000,00; Custo para implementação do método: R\$ 465.000,00. Horas de desenvolvimento aproximadamente 150 horas da equipe gerencial e técnica.
Manutenção preventiva:	Braço – Incluído na garantia. Computador – limpeza e revisão semestral por terceiro, sistema de backup interno do servidor; Painel – Manutenção semestral interna, incluindo avaliação da integridade dos componentes, limpeza e lubrificação;
Facilidade de manutenção:	Braço – Manutenção externa, coberta pelo pacote de manutenção. Computador – Manutenção externa, coberta pelo contrato de manutenção de TI. Painel – Manutenção interna, com disponibilidade de peças de reposição
Ergonomia:	Medição:
	Movimentação das placas:
Considerações de segurança:	O Braço é relativamente leve não gerando riscos de lesões por esforço ao longo do tempo. Peças com mais de 120 cm de largura, geram condições de medições incomodas (agachados, para coleta dos pontos inferiores). Para mitigar este desconforto deve-se realizar intercalação entre peças maiores e menores que 120 cm e quando não for possível incluir revezamento entre os técnicos que realizam o ensaio.
Armazenamento e localização:	Peças com até 10 kg, podem ser manuseadas em uma pessoa, peças com mais de 10 kg devem ser manuseada em 2 pessoas. Utilizar ventosas para auxiliar na movimentação das peças. Durante todo o processo de medição deve-se utilizar os EPI's: Cinto lombar (carregamento de pesos), sapato de segurança (risco de queda de objetos pesados), luvas (risco de cortes).
Tempo de ciclo de medição:	O braço e seus acessórios devem permanecer na sala de medição dimensional. Todos os acessórios incluindo o laser deve ser armazenado na “maleta de armazenamento” do equipamento quando não estiverem sendo usados. O braço pode ficar na base de medição fixa, uma vez que o risco de danos ao colocar e tirar da base todos os dias será maior que o de mantê-lo exposto. Uma capa protetora flexível deve ser colocada sobre o braço sempre que ele não estiver sendo usado.
Haverá alguma interrupção no fluxo do processo, integridade do lote, para capturar, medir e devolver a peça?	Uma amostra completa (5 a 7 peças) leva em torno de 30 a 40 minutos para ser mensurada.
Manuseio de materiais:	Não aplicável as medições de laboratório terceiro, caso do CCB.
Questões ambientais:	Será necessário a utilização de racks de transporte e ventosas para movimentação.
Existem requisitos ou considerações especiais de confiabilidade?	Necessário controle de temperatura.
Peças sobressalentes:	Deve ser realizado análise da compensação da esfera ao menos uma vez por semana e o teste de articulação de ponto único (SPAT) sempre que for movimentado o equipamento ou sempre que houver dúvida sobre o resultado.
Instruções do usuário:	Braço – Fabricante é fornecedor exclusivo (fechado contrato de garantia). Computador – utiliza peças padrões, facilmente encontradas na internet, não há estoque de peças sobressalentes, mas existem 2 terminais capaz de rodar o programa. Painel, possui sistema adequado de fornecimento com disponibilidade a um prazo de entrega inferior a 10 dias.
Documentação:	Elaborada instrução de trabalho contendo a sequência de marcação, fixação e medição, procedimentos de limpeza, interpretação de dados e recursos visuais. Ela está disponível no servidor e na sala de operação.
Calibração:	No servidor estão armazenados os manuais do equipamento (braço) em português, normas técnicas e os desenhos da construção do painel.
À prova de erro/erro:	Realizada anualmente pelo fabricante com acreditação RBC.
	É possível identificar apenas erros grosseiros, como inversão de pontos de medição.

Checklist dos elementos do sistema de medição (continuação)

Questões de implementação do sistema de medição (processo):		
Suporte:		O fornecedor do equipamento fornece suporte técnico e treinamentos de operação e configuração; A rotina de medição e a planilha de dados possuem backup caso os arquivos sejam corrompidos;
Treinamento:		Para o técnico é necessário realizar o treinamento de operação do equipamento, conforme instrução de trabalho interna. Para o Gerente ou coordenador responsável pela construção do programa é necessário treinamento do fornecedor sobre a operação e configuração do BMT.
Gestão de dados:		Os dados gerados serão lançados diretamente em planilha de excel que já realizará a correção dos sinais e compensação necessárias. Em seguida eles serão salvos no servidor do laboratório, que conta com backup periódico e as proteções necessárias exigidas pela acreditação na ISO 17025.
Pessoal:		2 técnicos para medições devido ao peso da peça e etapa complementar de espessura.
Métodos de melhoria:	Quem irá melhorar o processo de medição ao longo do tempo?	Gerente do laboratório, apoiado pelos coordenadores e técnicos que realizam os ensaios.
	Que métodos de avaliação serão usados?	Serão utilizados os métodos incluídos no SGQ do laboratório.
	Existe um sistema para identificar as melhorias necessárias?	Sim, integrado ao SGQ do laboratório.
Estabilidade a longo prazo:		A estabilidade do equipamento ao longo do prazo é garantida pela calibração periódica que já faz uma revisão dos componentes. A integridade dos componentes do painel faz parte do programa de manutenção preventiva do laboratório, com periodicidade semestral.
Considerações especiais:	Atributos do inspetor	Os técnicos precisam ter habilidades com informática, noções sobre medições dimensionais e coordenadas.
	limitações físicas ou problemas de saúde	Os técnicos envolvidos na operação devem ter condições físicas para levantar peças de até 40 kg (em duas pessoas). Devido ao peso das amostras, buscando evitar problemas de saúde e acidentes, fica definido a necessidade da utilização de cinta lombar ergonômica, sapato de segurança com biqueira de aço, óculos de segurança. A movimentação das amostras com mais de 15 kg ou formatos maiores que 80 cm devem ser realizadas por duas pessoas e com auxílio de ventosas a vácuo.

Fonte: Autor, 2022

Figura 38 – Diagrama de causa e efeito baseado no modelo de erro S.W.I.P.E.

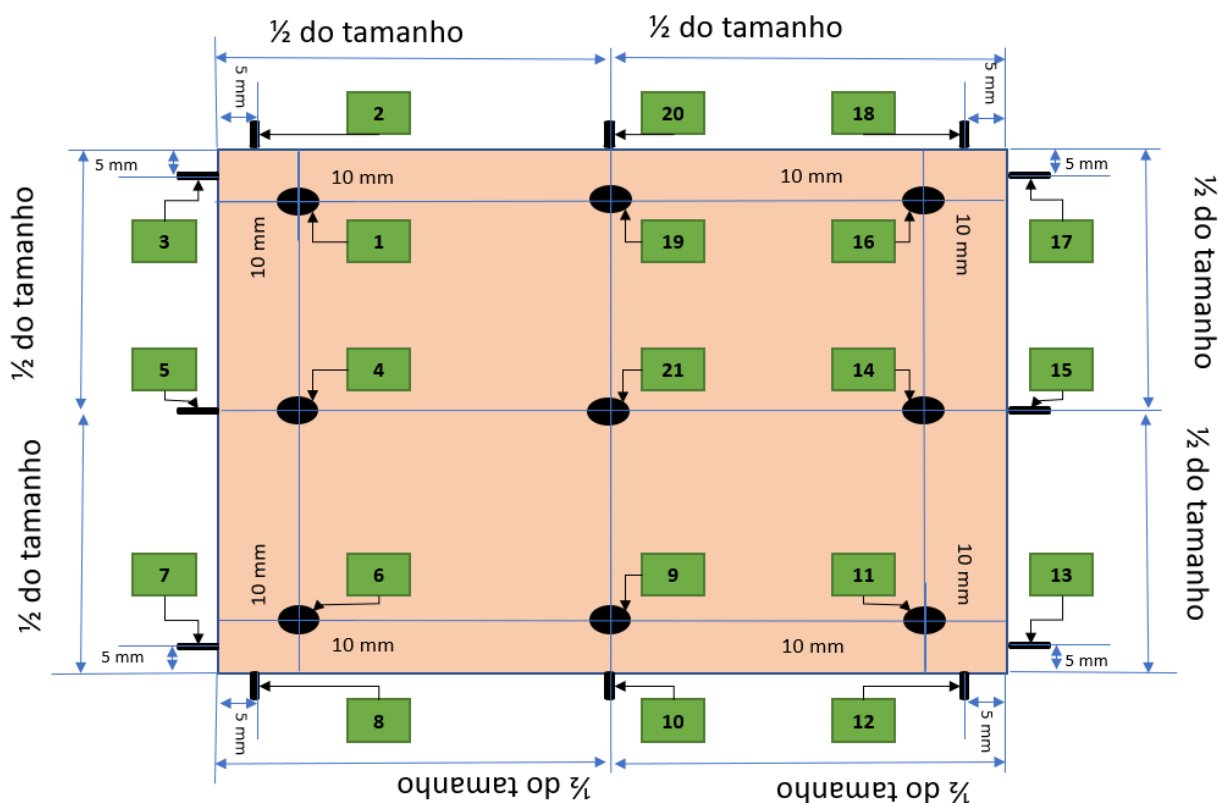


Fonte: Autor, 2022

APÊNDICE D - PROGRAMA DE MEDIÇÃO DO SMC

Neste estudo, um programa (rotina) de medição foi desenvolvido no software FARO CAM2®. Esse programa permitiu a predefinição dos pontos de medição a serem coletados, incluindo a combinação dos pontos a serem utilizados para extrair as medições das características predefinidas. Embora essa definição tenha sido realizada no software FARO CAM2®, os princípios da construção podem ser replicados em qualquer equipamento de medição por coordenadas. A Figura 39 mostrou os pontos onde as 21 leituras deveriam ser realizadas, sendo recomendado marcar fisicamente na placa ou utilizar sistemas a laser que permitam a coleta dos pontos sempre no mesmo local. Para replicar a medição do SMA, é necessário realizar 4 alinhamentos utilizando os pontos coletados.

Figura 39 - Pontos de coleta



Fonte: Autor, 2023

PRIMEIRO ALINHAMENTO

Para realizar o alinhamento plano-linha-ponto, é necessário seguir os passos a seguir:

- Criar uma linha X1 com os pontos 3 e 7.
- Criar uma linha Y1 com os pontos 2 e 18.
- Criar um plano Z1 com os pontos 1, 6 e 16.
- Gerar um ponto de intersecção entre as linhas X1 e Y1 e nomeá-lo como "Origem 1".
- Estabelecer o alinhamento, utilizando o plano Z1, a linha X1 e o ponto "Origem 1".

Após concluir o alinhamento, extrair os dados necessários para a análise:

- **Tamanho:** Determinado pelo afastamento no eixo X dos pontos 2 e 8.
- **Retitude lateral:** É o desvio do ponto 20 no eixo X.
 - O sinal é considerado positivo quando o ponto está à esquerda da linha e negativo quando está à direita. Nesse caso, é necessário inverter o sinal obtido pelo programa.
- **Ortogonalidade:** Perpendicularidade entre a linha X1 e a linha Y1 (Datum).
 - O sinal é considerado positivo quando o ângulo formado é maior que 90° e negativo quando é menor que 90° .
- **Curvatura central:** Calculada com base no desvio do ponto 21 no eixo Z.
- **Empeno:** Obtido através do desvio do ponto 11 no eixo Z.
- **Curvatura lateral:** Calculada com base no desvio do ponto 19 no eixo Z.
 - Para as 3 características planares o sinal é considerado positivo quando o ponto da superfície da placa está acima do plano de referência e negativo quando está abaixo.

A regra dos sinais se mantém em todos os 4 alinhamentos.

SEGUNDO ALINHAMENTO

Para realizar o alinhamento plano-linha-ponto, é necessário seguir os passos a seguir:

- Criar uma linha X2 com os pontos 8 e 12.
- Criar uma linha Y2 com os pontos 7 e 3.
- Criar um plano Z2 com os pontos 1, 6 e 11.
- Gerar um ponto de intersecção entre as linhas X2 e Y2 e nomeá-lo como "Origem 2".
- Estabelecer o alinhamento, utilizando o plano Z2, a linha X2 e o ponto "Origem 2".

Após concluir o alinhamento, extrair os dados necessários para a análise:

- **Tamanho:** Determinado pelo afastamento no eixo X dos pontos 7 e 13.
- **Retitude lateral:** É o desvio do ponto 5 no eixo X.
- **Ortogonalidade:** Perpendicularidade entre a linha X2 e a linha Y2 (Datum).
- **Curvatura central:** Calculada com base no desvio do ponto 21 no eixo Z.
- **Empeno:** Obtido através do desvio do ponto 16 no eixo Z.
- **Curvatura lateral:** Calculada com base no desvio do ponto 4 no eixo Z.

TERCEIRO ALINHAMENTO

Para realizar o alinhamento plano-linha-ponto, é necessário seguir os passos a seguir:

- Criar uma linha X3 com os pontos 13 e 17.
- Criar uma linha Y3 com os pontos 12 e 8.
- Criar um plano Z3 com os pontos 6, 11 e 16.
- Gerar um ponto de intersecção entre as linhas X3 e Y3 e nomeá-lo como "Origem 3".
- Estabelecer o alinhamento, utilizando o plano Z3, a linha X3 e o ponto "Origem 3".

Após concluir o alinhamento, extrair os dados necessários para a análise:

- **Tamanho:** Determinado pelo afastamento no eixo X dos pontos 12 e 18.
- **Retitude lateral:** É o desvio do ponto 10 no eixo X.
- **Ortogonalidade:** Perpendicularidade entre a linha X3 e a linha Y3 (Datum).
- **Curvatura central:** Calculada com base no desvio do ponto 21 no eixo Z.
- **Empeno:** Obtido através do desvio do ponto 1 no eixo Z.
- **Curvatura lateral:** Calculada com base no desvio do ponto 9 no eixo Z.

QUARTO ALINHAMENTO

Para realizar o alinhamento plano-linha-ponto, é necessário seguir os passos a seguir:

- Criar uma linha X4 com os pontos 18 e 2.
- Criar uma linha Y4 com os pontos 17 e 13.
- Criar um plano Z4 com os pontos 1, 11 e 16.
- Gerar um ponto de intersecção entre as linhas X4 e Y4 e nomeá-lo como "Origem 4".
- Estabelecer o alinhamento, utilizando o plano Z4, a linha X4 e o ponto "Origem 4".

Após concluir o alinhamento, extrair os dados necessários para a análise:

- **Tamanho:** Determinado pelo afastamento no eixo X dos pontos 3 e 17.
- **Retitude lateral:** É o desvio do ponto 15 no eixo X.
- **Ortogonalidade:** Perpendicularidade entre a linha X4 e a linha Y4 (Datum).
- **Curvatura central:** Calculada com base no desvio do ponto 21 no eixo Z.
- **Empeno:** Obtido através do desvio do ponto 6 no eixo Z.
- **Curvatura lateral:** Calculada com base no desvio do ponto 14 no eixo Z.