

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E
SISTEMAS

ANÁLISE DE ESTABILIDADE, CAPABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DE UM
SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TONALIDADE DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS

JOÃO BATISTA CORDEIRO DANTAS

JOÃO PESSOA

2023

JOÃO BATISTA CORDEIRO DANTAS

**ANÁLISE DE ESTABILIDADE, CAPABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DE UM
SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TONALIDADE DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS**

Projeto de Dissertação submetido ao
Exame de Qualificação do Mestrado no
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade
Federal da Paraíba.

Orientador: Prof.º Dr. Rogério Santana Peruchi

JOÃO PESSOA

2023



Ata da 10ª Sessão Pública de Defesa de Dissertação do Mestrando **JOÃO BATISTA CORDEIRO DANTAS**, realizada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas, na área de concentração “Sistemas de Produção” e linha de pesquisa “Gestão Integrada de Sistemas de Produção”.

No dia três do mês de março de 2023, às 14h, na plataforma Google Meet através do endereço eletrônico jpi-abmn-bun, reuniu-se a Banca Examinadora aprovada em processo administrativo pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, composta pelos seguintes membros, a saber, Prof. Rogério Santana Peruchi - Orientador, Prof. Paulo Rotella Junior – UFPB – Examinador Interno e o Prof. Luiz Moreira Coelho Júnior – CEAR/UFPB – Examinador Externo, com a finalidade de julgar a defesa de dissertação do mestrando **João Batista Cordeiro Dantas**, intitulada “**ANÁLISE DE ESTABILIDADE, CAPABILIDADE E OTIMIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TONALIDADE DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS**”, como requisito para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Produção e Sistemas. Além dos examinadores e o mestrando, compareceram, familiares, convidados e representantes do corpo discente e docente. Iniciada a sessão, o Prof. Dr. Rogério Peruchi, na qualidade de presidente da Banca Examinadora, apresentou a finalidade da reunião e os procedimentos regulamentares. Em seguida, passou a palavra ao mestrando para que, nos limites do prazo regimental, realizasse sua apresentação oral. Concluída a exposição, mediante solicitação do senhor presidente, os membros da banca examinadora teceram os devidos comentários e realizaram a arguição do expositor. Na sequência, a banca reuniu-se em caráter secreto a fim de julgar a defesa e a dissertação, decidindo atribuir-lhe o conceito **APROVADO**, concedendo, assim, o grau de mestre a **João Batista Cordeiro Dantas**. Nada mais havendo a tratar, o senhor presidente agradeceu a presença de todos e encerrou a sessão, sugerindo por recomendação dos membros da banca que o prazo máximo para providenciar as correções e entregar os volumes de versão final da dissertação na Secretaria do Programa é de 60 dias a partir desta data.



Para constar, eu, Vinícius Pinagé Alves de Lima, secretário do PPGEPS, lavrei a presente ata que assino juntamente com o candidato, o presidente e os demais membros da Banca Examinadora.

João Pessoa/PB, 03 de março de 2023.

Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi
Orientador – PPGEPS/UFPB

Prof. Dr. Paulo Rotella Junior
Examinador Interno – PPGEPS/UFPB

Prof. Dr. Luiz Moreira Coelho Júnior
Examinador Externo – CEAR/UFPB

Vinícius Pinagé Alves de Lima
Secretário do PPGEPS/UFPB

João Batista Cordeiro Dantas
Mestrando

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

D192a Dantas, João Batista Cordeiro.

Análise de estabilidade, capacidade e otimização de um sistema de medição de tonalidade de revestimentos cerâmicos / João Batista Cordeiro Dantas. - João Pessoa, 2023.

115 f. : il.

Orientação: Rogério Santana Peruchi.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Engenharia. 2. Análise - Sistema de medição. 3. Revestimentos cerâmicos. I. Peruchi, Rogério Santana. II. Título.

UFPB/BC

CDU 62(043)

AGRADECIMENTOS

A Deus por toda misericórdia e amor dispensado a mim e a toda humanidade. Por ter sido a fonte de forças e proporcionador de todo esse trabalho. O que está sendo entregue é a representação tangível dos planos divinais.

Aos meus pais, Jeandro e Emmanuela e minha irmã, Camila, que foram e são a solidez de toda minha vida e sempre me incentivaram ao caminho da educação, enchendo minha jornada de conselhos, amor e exemplos. Aos meus avós Jurandi, Elisabete, Socorro e Manoel por sempre cuidarem de mim. Aos meus tios, tias e primos por sempre estarem presentes na minha vida. À minha namorada, Debora, que foi uma base fundamental para a construção desta jornada de trabalho, me incentivando, me entendendo e me acalmando com seu jeito único em momentos árduos destes 2 anos passados. Ao meu cachorro Loki por sempre me fazer companhia em todo o silêncio da escrita.

Ao corpo docente e administrativo do PPGEPS. Em especial ao Prof. Dr. Rogério Santana Peruchi que trabalhou de forma saudável nestes dois anos como um escultor do pensamento empírico que havia em mim para a ligação ao pensamento da pesquisa científica. Obrigado por não segregar nenhuma das linhas de pensamentos, mas de mostrar como um pode agregar grandiosamente ao outro, tudo isso de forma empática, orgânica e direcionada.

Aos colegas de trabalho que foram patrocinadores desta jornada, Manfredo Gouvea, Roberto Teixeira e Rodrigo Pedrosa. À Roberta Pretti Cinti, pessoa ímpar que me incentivou e possibilitou minha entrada à pesquisa. Ao Antônio Ventin que me abriu as portas da indústria e me direcionou em dúvidas técnicas e de priorização. Ao Deivid Pontes, amigo dos tempos de Fórmula UFPB, que foi uma pessoa chave para execução de toda a pesquisa.

Aos meus amigos que sempre torceram por mim e comemoramos juntos nossas conquistas. Ao meu amigo conhecido em tempos pandêmicos do mestrado, Arthur Pires, com certeza sua ajuda e a divisão de angústias foi fundamental à finalização deste período.

Àqueles que chegaram, durante essa jornada, ao dia irremediável que está cabível a todos nós e de alguma forma estiveram presentes em minha vida. Faço questão de lembrá-los e citar nominalmente estas pessoas tão especiais que nos enchem de saudade: à minha amiga Silmara Andriola; ao meu irmão em cristo Valdir Félix; ao meu amigo José Alves; ao meu grande amigo que nos deixou de forma precoce dias antes da finalização deste trabalho, Cleanderson Lins.

“Mais tarde não é agora.”

Craibeira

RESUMO

A redução de defeitos na fabricação de revestimentos cerâmicos é um desafio para a indústria ceramista, buscando atendimento às normas e critérios de qualidade exigidos pelos órgãos regulamentadores e pelo mercado consumidor. A padronização das cores entre as peças cerâmicas produzidas é de fundamental importância e para realizar a medição da variação de cor o espectrofotômetro é utilizado. A variação de qualquer processo pode estar associada ao processo produtivo em si ou ao sistema de medição utilizado. Este trabalho apresenta uma série de estudos de análise de sistema de medição (MSA) de tonalidade de um processo de produção ceramista. Dessa forma, essa dissertação tem por objetivo minimizar as fontes de variação de um processo de medição da tonalidade de placas de revestimento cerâmico por meio de estudos de estabilidade, capacidade e otimização. Foi desenvolvida uma análise de capacidade avaliando o índice Cpk do processo de produção com foco na variação de tonalidade entre peças cerâmicas. Foi realizado um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (GR&R) e foi observado a necessidade de melhorias no sistema de medição. Dessa forma, foi realizado um estudo do Tipo 1 e realizada otimização utilizando o método desirability com base no índice Cgk. Os resultados obtidos indicaram um *setup* ótimo formado por um gabarito para centralização de medição, realização de limpeza prévia da peça, abertura ótica do espectrofotômetro em 6mm e consideração de um valor por medição. Além disso, a temperatura da peça se mostrou um fator significativo para variação da medição.

Palavras-chaves: análise de sistema de medição; análise de capacidade; revestimentos cerâmicos; tonalidade; desirability; estudo tipo 1.

ABSTRACT

The reduction of defects in the manufacture of ceramic tiles is a challenge for the ceramics industry, seeking to meet the standards and quality criteria required by regulatory agencies and the consumer market. The standardization of colors among the ceramic pieces produced is of fundamental importance and to measure the color variation the spectrophotometer is used. Variation in any process can be associated with the production process itself or with the measurement system used. This work presents a series of analysis studies of measurement system (MSA) of hue of a ceramic production process. Thus, this dissertation aims to minimize the sources of variation in a process for measuring the hue of ceramic tile tiles through stability, capability and optimization studies. A capability analysis was developed evaluating the Cpk index of the production process focusing on the shade variation between ceramic pieces. A repeatability and reproducibility (GR&R) study was carried out and the need for improvements in the measurement system was observed. Thus, a Type 1 study was carried out and optimization was performed using the desirability method based on the Cgk index. The results obtained indicated an optimal setup formed by a template for centralizing the measurement, performing previous cleaning of the part, optical aperture of the spectrophotometer at 6mm and consideration of a value per measurement. In addition, the temperature of the part proved to be a significant factor for measurement variation.

Keywords: measurement system analysis; capability analysis; ceramic tiles; tonality; desirability; type 1 study.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 – Objetivos específicos e sua relação com os artigos desenvolvidos, pg. 19
- Figura 2 – Relação e sinergia entre as propostas, pg. 23
- Figura I.1 – Processo de produção de revestimentos cerâmicos, pg. 26
- Figura I.2 – Espaço CIELAB, pg. 28
- Figura I.3 – Espectrofotômetro digital, pg. 31
- Figura I.4 – Carta de controle para variação de tonalidade, pg. 33
- Figura I.5 – Ferramenta 5 porquês para análise das causas especiais de variação, pg. 33
- Figura I.6 – Carta de controle para variação de tonalidade omitindo causas especiais, pg. 34
- Figura I.7 – Análise de capacidade para a variação de tonalidade, pg. 35
- Figura II.1 – Fluxograma de etapas do estudo GR&R, pg. 43
- Figura II.2 – Relatório Gage R&R para primeira rodada de medições, pg. 47
- Figura II.3 – Construção de gabarito para garantia de centralização de medição, pg. 49
- Figura II.4 – Relatório Gage R&R para segunda rodada de medições, pg. 50
- Figura II.5 – Medições de cada peça por operador, pg. 51
- Figura II.6 – Medições de cada peça por operador após ações, pg. 52
- Figura II.7 – Relatório Gage R&R para terceira rodada de medições, pg. 54
- Figura III.1 – Sistema CIELAB, pg. 65
- Figura III.2 – Vetor no espaço CIELAB, pg. 66
- Figura III.3 – Vetores no sistema CIELAB, pg. 66
- Figura III.4 – Espectrofotômetro. pg. 67
- Figura III.5 – Ishikawa para mapeamento de variáveis, pg. 71
- Figura III.6 – Matriz de comparação de esforço e impacto, pg. 72
- Figura III.7 – Gabarito para aferição de tonalidade feito em acrílico, pg. 73
- Figura III.8 – Cartas de tolerância com aferições de tonalidade para cada Setup, pg. 75
- Figura III.9 – Correlação entre medições com a temperatura, pg. 78
- Figura III.10 – Gráfico de efeitos principais, pg. 79
- Figura III.11 – Efeitos padronizados para o ΔE , pg. 79
- Figura III.12 – Efeitos padronizados para o $\Sigma\delta e$, pg. 81
- Figura III.13 – Carta de controle das aferições para validação, pg. 83

LISTA DE TABELAS

- Tabela I.1 – Limites de controle para carta \bar{x} -R, pg. 29
- Tabela I.2 – Limites de controle para carta \bar{x} -R de colorimetria, pg. 32
- Tabela I.3 – Limites de controle para carta \bar{x} -R de colorimetria omitidas causas especiais, pg. 34
- Tabela II.1 – Referências e diretrizes para interpretação, pg. 43
- Tabela II.2 – Indicadores para a primeira rodada de medições, pg. 46
- Tabela II.3 – P-valores para ANOVA, pg. 47
- Tabela II.4 – Ações para correções baseadas na primeira rodada de medições, pg. 48
- Tabela II.5 – Indicadores para a segunda rodada de medições, pg. 49
- Tabela II.6 – P-valores para ANOVA, pg. 50
- Tabela II.7 – Ações após a segunda rodada de medições, pg. 52
- Tabela II.8 – Indicadores finais após terceira rodada de medições, pg. 53
- Tabela II.9 – P-valores para ANOVA, 53
- Tabela III.1 – Variáveis selecionadas e seus respectivos níveis, pg. 72
- Tabela III.2 – Combinação selecionada para medição do VVC, pg. 73
- Tabela III.3 – Valores de medição para o VVC, pg. 74
- Tabela III.4 – Índices C_g e C_{gk} para cada Setup, pg. 75
- Tabela III.5 – Análise de adequação do modelo para ΔE , pg. 80
- Tabela III.6 – Análise de adequação do modelo para $\Sigma\delta e$, pg. 82
- Tabela III.7 – Resultado computacional do Desirability, pg. 82

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ANOVA	Análise de Variância
Cg Cgk	ndices de capacidade do sistema de medição
CIELAB	Sistema para medição de cor
Cp Cpk	ndices de capacidade do processo
DOE	<i>Design</i> de experimentos
GR&R	Medidor Repetibilidade e Reprodutibilidade
I, IIa, Iib, III	Grupos de absorção de gua
MAS	Análise do Sistema de Medição
R&R	Repetibilidade e Reprodutibilidade
PISMOEA	Modelo de erro (Peças, Instrumento de medição, Padrão, Método, Operador, Meio ambiente e Suposições)
PTR	ndice de Precisao  Tolerância
TH	Teste de hipótese
VVC	Valor verdadeiro convencional
Xbar &R	Média e Amplitude

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	Celsius
%	Porcentagem
mm	Milímetro
°	Grau
cm	Centímetro
L	Coordenada vertical do sistema CIELAB
a, b	Coordenadas horizontais do sistema CIELAB
ΔE	Varição entre dois vetores resultantes de cor

SUMÁRIO

PARTE I. CAPÍTULO INTRODUTÓRIO	15
1. INTRODUÇÃO GERAL	15
1.1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo geral	17
1.2.2 Objetivos específicos	17
3. CONTRIBUIÇÕES E RELEVÂNCIA	18
4. LIMITAÇÃO DA PESQUISA	20
6. SINERGIA ENTRE AS PROPOSTAS DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA	21
PARTE II – ARTIGOS NA ÍNTEGRA	23
ARTIGO I – ESTUDO DE ESTABILIDADE E CAPABILIDADE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO	23
1.1 INTRODUÇÃO	23
1.2 O PROCESSO DE PRODUÇÃO CERAMISTA E AS TIPOLOGIAS CERÂMICAS	24
1.3 O DEFEITO DE DIFERENÇA DE TONALIDADE	26
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS	27
1.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	30
1.5.1 Declaração do problema	30
1.5.2 Planejamento de coleta de dados	30
1.5.3 Cálculo dos limites iniciais de controle	31
1.5.4 Análise de estabilidade do	31
1.5.5 Análise de capacidade do processo	33
1.6 CONCLUSÕES	35
1.7 REFERÊNCIAS	36
2. ARTIGO 2 – ESTUDO DE GR&R CRUZADO	39
2.1 INTRODUÇÃO	39

	13
2.2 ESTUDO GAUGE R&R CRUZADO	40
2.3 MATERIAIS E MÉTODOS	42
2.3.1 Planejamento experimental.....	43
2.3.2 Estudo GR&R.....	44
2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
2.5 CONCLUSÕES	54
2.6 REFERÊNCIAS	56
ARTIGO 3 – UM NOVO MÉTODO PARA OTIMIZAR A CAPABILIDADE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO	58
3.1 INTRODUÇÃO	58
3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	60
3.2.1 Índices de capacidade do sistema de medição	60
3.2.2 Planejamento e análise de experimentos	61
3.2.3 <i>Método Desirability</i>	63
3.3 Materiais e métodos.....	68
3.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO NO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE TONALIDADE DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS	71
3.6 CONCLUSÕES	84
5.6 Referências	85
PARTE III – CONSIDERAÇÕES FINAIS	89
4.1 Conclusões da pesquisa	89
4.2 Propostas para trabalhos futuros.....	90
5. REFERÊNCIAS	91
6. APÊNDICES	93
6.1 APÊNDICE II.1 – TABELA DE MEDIÇÕES PARA ESTUDO DE CAPABILIDADE DE PROCESSO	93
6.2 APÊNDICE II.2 – TABELA DE MEDIÇÕES DA PRIMEIRA RODADA DO ESTUDO GR&R	99

6.3 APÊNDICE II.3 – TABELA DE MEDIÇÕES DA SEGUNDA RODADA DO ESTUDO GR&R	101
6.4 APÊNDICE II.4 – TABELA DE MEDIÇÕES DA TERCEIRA RODADA DO ESTUDO GR&R	103
6.5 APÊNDICE II.5 – ARTIGO DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA – MOAGEM DE BOLAS	105
1.1 Introdução	105
1.2 Materiais e métodos.....	107
1.3 Análise dos resultados e discussões	108
1.4 Conclusões.....	109
1.6 Referências	109
1.7 Potenciais periódicos para submissão	109
1.4 Referências	113
7. ANEXOS	115

PARTE I. CAPÍTULO INTRODUTÓRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL

1.1. INTRODUÇÃO

Cerâmicas são materiais inorgânicos e não metálicos que são consolidados e submetidos a altas temperaturas (AGRAFIOTIS, TSOUTSOS, 2001). O subsetor de revestimentos cerâmicos é o mais importante dentro do ramo cerâmico mundial e são amplamente utilizados na indústria da construção civil (WISNIEWSKA *et al*, 2021; BARALDI, 2017; CERAME UNIE, 2017). Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes Cerâmicos (ANFACER), o Brasil é o segundo país mais consumidor de revestimentos cerâmicos do mundo, ficando atrás apenas da China (ANFACER, 2018). Arelado a isso, as indústrias buscam a redução de seus desperdícios, bem como a redução da sua variabilidade no processo e defeitos associados ao produto produzido. Na indústria cerâmica, essa busca por melhoria contínua não é diferente (SANGWAN *et al*, 2014). A busca por novas estéticas e formas de acabamento, proporcionaram ao mercado ceramista uma gama de modelos de revestimentos cerâmicos. Entretanto, as mudanças e variabilidade atreladas às cores dos revestimentos não foram suficientemente exploradas (WISNIEWSKA *et al*, 2021).

O objetivo de reduzir defeitos de fabricação, desperdícios e problemas relacionados à qualidade pode ser alcançado com a implementação de técnicas de controle de qualidade. O controle estatístico de processo proporciona uma melhoria no desempenho dos processos, tudo isso apropriando-se de métodos estatísticos (CHEN *et al*, 2008). A aferição do processo com a utilização de medições numéricas pode fornecer maiores informações sobre a operação quando comparada às variáveis por atributos (WU *et al*, 2012). Assim, há possibilidade de se utilizar dos índices de capacidade para avaliar a variabilidade do processo e a capacidade do processo atual de entregar produtos finais dentro dos limites de especificação (PARK *et al*, 2018; PEARN; LIN, 2004).

Na indústria de revestimentos cerâmicos é necessário classificar as peças de acordo com sua superfície e proximidade de cor, agrupando-as em aparências globais. Para isso, a visão humana é passiva de erro e é necessário o suporte de equipamentos eletrônicos para aferição de tonalidade (LÓPEZ *et al*, 2005). Entretanto, avaliar os erros de medição é necessário para observar o impacto destes erros na variabilidade do processo (AL-REFAIE; BATA, 2010; YEH; SUN, 2013). Para que isso seja realizado é necessária

a realização de uma análise do sistema de medição (MSA). Assim, um dos estudos possíveis de realização é sobre a repetitividade e reprodutibilidade (GR&R) do sistema de medição (PERUCHI *et al*, 2016; ASPLUND; LIN, 2016). Esses estudos de GR&R vêm sendo conduzidos em diversas aplicações, haja vista às indústrias madeireira, de saúde e farmacêutica (ARAÚJO *et al*, 2019). A repetibilidade do equipamento de medição é avaliada com o uso do índice Cg. Este cálculo compara a variação das leituras do equipamento com uma porcentagem estabelecida da tolerância. Para avaliar tanto a repetibilidade quanto o vício, o índice Cgk é utilizado. Este índice compara a variação dos resultados com a margem permitida, considerando o equilíbrio do processo (CZARSKI, 2009; FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009; VAGOVSKÝ; BURANSKÝ; GÖRÖG, 2015).

O design de experimentos é um dos pilares do pensamento estatístico e aplicações industriais (POLITIS *et al*, 2017). A coleta de dados de medição ocorre ao examinar o sistema de medição selecionado para avaliação. O estudo experimental planejado oferece uma opção para obter as informações necessárias. Neste plano, algumas constantes do sistema de medição são intencionalmente alteradas e a relação da variável de resposta é analisada (MONTGOMERY; RUNGER, 2011).

O método *Desirability* é amplamente utilizado na pesquisa devido à sua simplicidade de compreensão e aplicação (MARINKOVIC, 2020). Este método permite a otimização múltipla de variáveis de resposta, procurando os melhores resultados para essa simultaneidade de otimizações (MOBIN *et al*, 2018). O método é composto por duas funções: a primeira é a função individual (d), que representa o resultado da otimização de uma variável de resposta, e a segunda é a função *Composite Desirability* (D), que transmite a qualidade geral da otimização multiobjetivo (HOSSAIN *et al*, 2021). O valor do *Composite Desirability* (D) pode variar de 0 a 1, representando, respectivamente, o pior e o melhor resultado possível (KRISHNAMOORTHY, 2018).

Dessa forma, o presente trabalho pretende responder o a seguinte questão problema: dado que o sistema de medição de tonalidade de cor de revestimentos cerâmicos tenha uma contribuição significativa na variabilidade do processo, quais as combinações de fatores do sistema de medição que otimizam a confiabilidade dos valores aferidos?

2. OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral dessa dissertação é minimizar as fontes de variação de um processo de medição da tonalidade de placas de revestimento cerâmico.

1.2.2 Objetivos específicos

Buscando o atingimento do objetivo geral exposto, este trabalho contempla os seguintes objetivos específicos (OE):

OE1: Avaliar a estabilidade e capacidade quanto ao requisito fabricação da tonalidade de cor das placas de revestimento cerâmico;

OE2: Determinar a relevância da contribuição do sistema de medição para a variabilidade do processo de fabricação ceramista através de estudos GR&R cruzados;

OE3: Identificar e validar estatisticamente as principais fontes de variação do processo de medição da tonalidade de cor de placas de revestimento cerâmico;

OE4: Propor e validar um método para minimizar erros de medição usando índices de capacidade C_{pk} e *desirability*.

Na figura 1, os objetivos específicos estão alocados em seus respectivos artigos. No artigo 1 o objetivo “OE1” foi trabalhado, avaliando a capacidade de um processo de produção ceramista com foco na diferença de tonalidade. No artigo 2, os objetivos específicos “OE2” e “OE3” tiveram seu enfoque, utilizando um estudo GR&R para avaliar a influência do sistema de medição e explicitar possíveis ações para redução da influência do sistema de medição na tolerância. O artigo 3 contemplou o objetivo específico “OE4”, propondo um modelo de otimização multiobjetivo para o sistema de medição e o validando através de teste.

Figura 1 – Objetivos específicos e sua relação com os artigos desenvolvidos

Artigo 1	OE1: Avaliar a estabilidade e capacidade quanto ao requisito fabricação da tonalidade de cor das placas de revestimento cerâmico
Artigo 2	OE2: Determinar a relevância da contribuição do sistema de medição para a variabilidade do processo de fabricação ceramista através de estudos GR&R cruzados
Artigo 3	OE3: Identificar e validar estatisticamente as principais fontes de variação do processo de medição da tonalidade de cor de placas de revestimento cerâmico
	OE4: Propor e validar um método para minimizar erros de medição usando índices de capacidade C _{pk} e desirability

Fonte: Autoria própria

3. CONTRIBUIÇÕES E RELEVÂNCIA

As principais contribuições desta pesquisa estão atreladas a avaliação de tonalidade de cor dos revestimentos cerâmicos. A variação de cor em revestimentos cerâmicos é um requisito pouco estudado (WIŚNIEWSKA *et al*, 2021).

Haja vista que os processos produtivos têm necessidade de dados precisos e confiáveis, alguns desses dados são obtidos através do sistema de medição. Dessa forma, a confiabilidade no sistema de medição deve existir. Assim, este trabalho teve seu enfoque nos seguintes tópicos:

1. O entendimento e análise do estado atual de um processo produtivo é fundamental para direcionar os esforços de melhoria. Para uma fábrica de revestimentos cerâmicos a sua capacidade também pode ser estudada. A seleção da variável Delta E foi selecionada como variável de estudo e pode ser realizada para avaliação e verificação de capacidade de medição.
2. O sistema de medição pode ser estudado. O desenvolvimento de metodologia utilizando estudos existentes é passivo de realização. O entendimento de ações a serem tomadas para redução da influência do sistema de medição na comparação com valores de tolerância de processo pode ser realizado.
3. O DOE pode ser utilizado para avaliação de sistema de medição. Os arranjos de experimentos podem ser utilizados para geração de dados para um estudo do Tipo 1.
4. O *desirability* pode ser utilizado para otimização de medições através de sistemas de medição. Seus resultados podem ser validados através de testes de bancada.

O primeiro artigo teve seu enfoque no processo. Foram coletados dados do processo produtivo utilizando o sistema de medição. O instrumento utilizado para a coleta foi um espectrofotômetro portátil e digital. Durante toda a pesquisa, todas as medições foram realizadas utilizando este mesmo instrumento. Com a coleta de dados realizada, a análise de capacidade do processo foi analisada. Foram utilizados os índices Cp e Cpk. O processo apresentou 3% de defeitos de tonalidade no lote, entretanto o limite máximo por lote para a soma de todos os tipos de defeito é de 5%. Logo, um estudo mais aprofundado do processo de medição originou os artigos 2 e 3.

O segundo artigo foi empenhado para uma análise do sistema de medição (MAS). Um estudo GR&R foi executado. Avaliou-se a influência do sistema de medição em relação à tolerância exigida para a variável em questão. Foram realizadas medições planejadas com o instrumento espectrofotômetro. Além disso, operadores foram selecionados para participar da coleta de dados. A cada rodada de medições ações foram executadas e observada a sua influência na participação da variabilidade do sistema de medição na variabilidade total. O índice de classificação do sistema de medição determinou um sistema inaceitável. Devido as limitações deste método em determinar estatisticamente as fontes de erro de medição, um DOE combinado com estudo Type 1 foi conduzido (Artigo 3).

O terceiro artigo se atentou a um estudo Tipo 1, também aplicado ao sistema de medição. Foi utilizado o design de experimentos (*Design of Experiments* – DOE) para o desenvolvimento do estudo. Uma vez elencada as variáveis que mais influenciam a resposta do sistema de medição, foi elaborado um plano utilizando o arranjo de experimentos fatorial fracionado. Após isso executou-se, para cada nível de cada um dos quatro fatos selecionados, uma coleta de medições. A partir de então foi possível observar as variáveis com maior influência e a existência de uma covariável que impactou de forma significativa as medições. Utilizando o método *desirability* o arranjo foi submetido à otimização computacional. Dessa forma, foi possível observar a combinação de níveis entre fatores que atingiram os requisitos impostos da otimização. Foi realizado um teste real para validação dos resultados computacionais e analisados os índices Cgk's de cada resultado através de um teste de hipóteses para validação estatística de igualdade de médias. Com a configuração ótima para medição, foi feita mais uma rodada de coleta de dados para o estudo GR&R e finalizado o Artigo 2.

4. LIMITAÇÃO DA PESQUISA

O enfoque desta pesquisa está na avaliação de dois escopos: a capacidade de produção de uma fábrica de revestimentos cerâmicos com base em índices de capacidade; e análise do sistema de medição (MSA) de tonalidade de cor no espaço CIELAB. A variável de processo a ser estudada em ambos os escopos é a diferença entre vetores de cor de dois objetos medidos, conhecido como Δ_E .

O processo de produção ceramista é o processo industrial sobre qual esta pesquisa foi desenvolvida. Os objetos medidos (peças) em todo o desenvolvimento desta pesquisa foram peças cerâmicas da cor branca de tamanho 50mm por 100mm. O instrumento de medição utilizado foi um espectrofotômetro portátil digital. O sistema espacial utilizado foi o CIELAB, limitado às coordenadas cartesianas L, a e b.

Nesta pesquisa há escopos não abordados para o processo e para os tipos de dados e métodos. Em termos de processo: não foram exploradas outras tonalidades (azul, amarelo, vermelho, verde, preto etc.); não foram estudados os porcelanatos e monoporosas; não foram explorados outros tamanhos, tais como 100mmx100mm, 740mmx740mm, 520mmx520mm etc.; não foram testados outros tipos de gabarito para medição. Em termos de tipos de dados e métodos: não explorou variável aleatória discreta, não explorou ensaios destrutivos, não explorou outras cartas de controle (como I-MR, Xbar-S, T2 Hotelling), nem GR&R aninhado ou expandido, nem outros métodos de otimização (NBI, MCG, etc.).

Os índices Cp e Cpk foram utilizados para avaliação da capacidade de processo. Além disso, cartas de controle para média e amplitude foram usadas, bem como a ferramenta “5 porquês” foi utilizada para avaliação do processo.

O método *GR&R* permitiu um estudo cruzado, direcionando medições dos operadores nas peças selecionadas. A utilização do modelo de análise de erro PISMOEA foi realizada, bem como a estruturação de planos de ação com o uso de ferramenta de planejamento de ações.

O design de experimentos foi utilizado para o planejamento de coleta de medições. O estudo tipo 1 realizou uma prévia dos erros aleatório e sistemático. O *desirability* foi o método usado para otimização computacional. A validação dos resultados computacionais foi realizada de forma real com base na combinação fornecida.

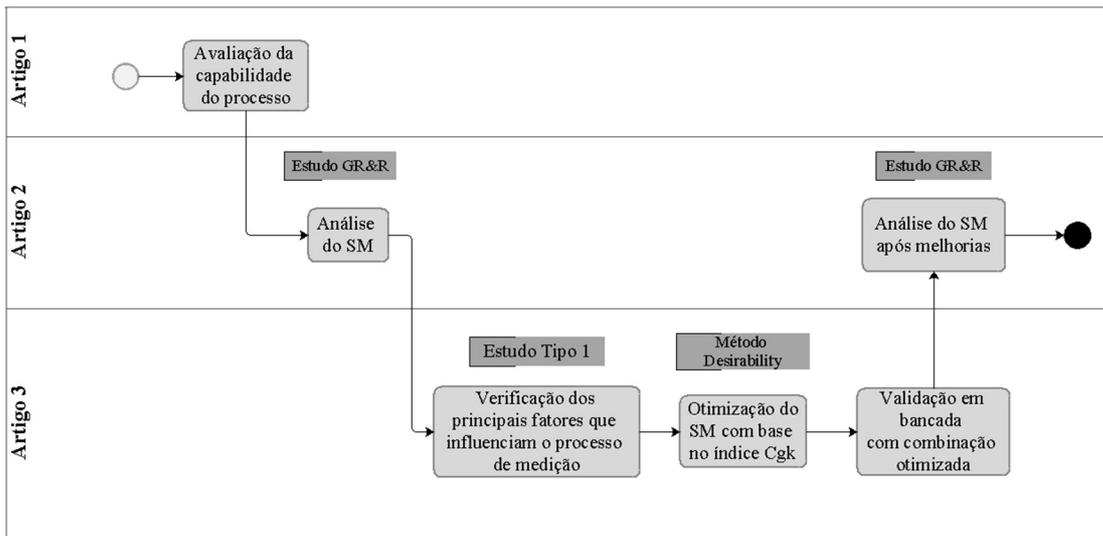
6. SINERGIA ENTRE AS PROPOSTAS DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA

É possível observar a pesquisa desenvolvida como uma espécie de processo com etapas bem definidas. Cada artigo entra em conexão com o seguinte ou o anterior, servindo como ponto de início ou recebimento de informações. Pode-se entender a sinergia entre as propostas de produção científica da seguinte forma:

1. O primeiro artigo é focado no processo de manufatura. A busca pelo entendimento da sua capacidade observando os índices Cp e Cpk é realizado. Como o índice Cpk teve seu valor em 0,72, o processo foi tido como incapaz. Dessa forma, a avaliação de sua capacidade gera um ponto de gatilho para o início de análise do sistema de medição (MSA) utilizando um estudo de GR&R.
2. Com a demanda proporcionada pelo primeiro artigo, inicia-se no artigo 2 uma análise do sistema de medição para avaliar a influência dele na variabilidade do processo. Ao se realizar uma primeira rodada do estudo é possível observar uma considerável influência do sistema. Na primeira rodada de medições, o PTR apresentou valor de 75,52%.
3. Inicia-se no artigo 3, então, o estudo do Tipo 1 focado no sistema de medição em questão. O *design of experiments* (DOE) é utilizado para a coleta de dados e avaliação dos níveis fatoriais. Nesse artigo o método *Desirability* é utilizado para otimização do sistema de medição com base no índice Cgk. Após isso é realizado um teste de hipóteses para comparar igualdade entre médias do Cgk otimizado computacionalmente e sua validação em teste de bancada.
4. O artigo 2 foi revisitado e um novo estudo GR&R foi conduzido com o setup ótimo de medição. Nesta nova rodada de medições o PTR apresentou valor de 26,28%.

Toda essa relação e sinergia explicada, pode ser facilmente entendida com a observação da figura 2. Nela é possível compreender a visão de processo que as propostas de trabalho científico estão interligadas.

Figura 2 – Relação e sinergia entre as propostas



Fonte: Autoria própria

PARTE II – ARTIGOS NA ÍNTEGRA

ARTIGO I – ESTUDO DE ESTABILIDADE E CAPABILIDADE DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

O mercado consumidor a cada dia tem sua exigência em ascensão. Na construção civil, essa demanda por um padrão que atenda às expectativas do cliente final não é diferente. A fase de finalização das construções civis exige um nível estético elevado (SÁNCHEZ et al, 2010). A indústria cerâmica é bastante representativa no Brasil, ela corresponde por aproximadamente 5,8% de toda energia consumida no setor industrial brasileiro (CIACCO et al, 2017). Os revestimentos cerâmicos, que incluem pastilhas cerâmicas, monoporosas e porcelanatos (ZANELLI et al, 2021), são muito procurados no mercado devido a suas características principais. Os requisitos procurados estão focados em: ter um baixo nível de absorção de água, alta resistência mecânica e ter estabilidade de cor em sua superfície (WIŚNIEWSKA et al, 2021).

O design de um bem de consumo é considerado importante, principalmente para artigos decorativos, tais como os revestimentos cerâmicos (GABALDÓN-ESTEVAN et al, 2014). A cor superficial para os produtos cerâmicos é um quesito tido como primordial (WIŚNIEWSKA et al, 2021). A classificação dos produtos cerâmicos durante o processo de manufatura é importante para que suas características colorimétricas sejam agrupadas em similaridade global (LÓPEZ et al, 2005). Porém, a questão de diferenças de cores em materiais cerâmicos não foi suficientemente explorada (WIŚNIEWSKA et al, 2021). A norma ABNT NBR ISO 13006:2020 em sua tabela “K.1” define o valor de 0,75 como limite máximo para a variação do vetor resultante ΔE do espaço CIELAB.

Os índices de capacidade de processo (C_p e C_{pk}) foram apresentados à indústria de manufatura objetivando o fornecimento de medidas numéricas sobre a capacidade de reproduzir itens dentro dos limites de especificação (PEAR; LIN, 2004). Os índices de capacidade foram originalmente introduzidos na década de 1980. O sucesso dos programas Seis Sigma, como a Motorola e a General Eletric, geraram inspirações e maior interesse no uso dos índices de capacidade em 1980 (PARK et al, 2018). Geralmente, quando comparado aos dados por atributos, as medições numéricas de características de qualidade apresentam mais informações sobre o processo de fabricação (WU et al, 2012).

Assim, a implementação de técnicas de controle de qualidade é uma forma de agilizar o sistema de fabricação, além de reduzir a ocorrência de defeitos. O controle estatístico de processos se enquadra como uma técnica poderosa para a melhoria de processos (CHEN et al, 2008). Na indústria ceramista, os índices de capacidade e a implementação do controle estatístico de processos também pode ser usado e alcançado resultados expressivos (MOSTAFAEIPOUR et al, 2012; STATISTI; TEHNIKE, 2009; ZAHID; SULTANA, 2009).

Dessa forma, a rotina da produção ceramista vem a cada dia buscando uma maior padronização nos seus processos para que se atenda às exigências mercadológicas. Atrelado a isso, as empresas produtoras de revestimentos buscam a obtenção da rentabilidade no investimento realizado. O objetivo desse trabalho é analisar a capacidade de um processo de produção de revestimentos cerâmicos, de produzir seu produto final com a variação de tonalidade dentro das especificações definidas pela ABNT NBR ISO 13006:2020.

Este presente trabalho inicia explicitando alguns conceitos do processo de produção ceramista, logo após explana sobre o defeito de tonalidade nas cerâmicas. Após isso é mostrado o método a ser utilizado e por fim os resultados, conclusões e algumas recomendações.

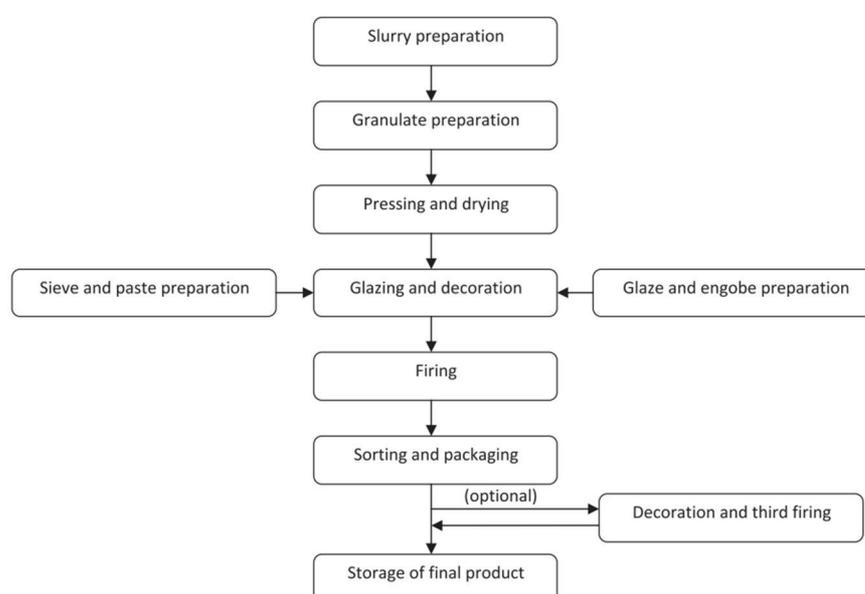
1.2 O PROCESSO DE PRODUÇÃO CERAMISTA E AS TIPOLOGIAS CERÂMICAS

A Indústria de placas para revestimentos cerâmicos vem a cada dia tendo, no Brasil, uma maior representatividade e capacidade produtiva (PRADO; BRESSIANI, 2013). O seu processo produtivo é bastante complexo, uma vez que há duas células produtivas: as fabricações de pó atomizado e de esmalte cerâmico. Essas são fornecedoras para a fábrica de cerâmicas e porcelanatos em si. Inicia-se na coleta de matéria-prima nas suas jazidas, passando pelos moinhos de bolas, atomização, decoração e queima (MOTTA et al, 2001).

O processo inicia-se na moagem, onde todas as matérias primas vindas das minas de extração são inseridas nos moinhos e submetidas à mistura para geração do líquido chamado de “barbotina”. Esse líquido é direcionado ao atomizador de pó, para que com fluxo em contracorrente de ar quente se consiga transformar a barbotina em pó atomizado (MEZQUITA et al, 2017). O subproduto “pó atomizado” é levado à prensa hidráulica, onde é prensado e recebe a primeira forma dimensional do revestimento e é levado ao secador a gás, com o objetivo de reduzir a umidade presente no pó.

Após a desumidificação, o pó prensado passa pelo processo de esmaltação, onde através de aplicações superficiais de esmaltes, as peças recebem as suas decorações (GABALDÓN-ESTEVAN et al, 2014; JOVIC et al, 2013). Ainda crua, as peças são direcionadas ao forno, e a depender da tipologia do material serão submetidas a um tempo e temperatura específica. Por fim, na saída do forno, os porcelanatos são direcionados ao setor de retífica e escolha para serem cortados e embalados; as cerâmicas de pequeno formato serão combinadas em telas e depois embaladas, como mostra a Figura I.1 (ZANELLI et al, 2021; MEZQUITA et al, 2017).

Figura I.1 – Processo de produção de revestimentos cerâmicos



Fonte: Jovic *et al*, 2013

Os revestimentos cerâmicos, segundo a ABNT NBR ISO 13006:2020 podem ser classificados de acordo às suas características de absorção d’água e ao seu método de fabricação. A absorção de água é definida pela norma ABNT NBR ISO 13006:2020 como “porcentagem de água impregnada na peça”, demonstrando o nível de porosidade existente na peça e conseqüentemente seu nível de resistência mecânica. Outro ponto de classificação dos revestimentos cerâmicos são os métodos de fabricação: placas prensadas ou placas extrudadas.

Em termos de absorção de água a norma ABNT NBR ISO 13006:2020, classifica os revestimentos cerâmicos em quatro possíveis grupos:

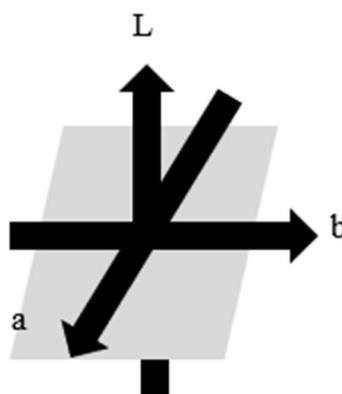
- Grupo I – absorção de água inferior à 3%. Esses produtos comercialmente são vendidos com o nome de “porcelanato”;
- Grupo IIa – absorção de água entre 3% e 6%, comercialmente são vendidos com o nome de “cerâmica”;
- Grupo IIb – absorção de água entre 6% e 10%, comercialmente são vendidos com o nome “cerâmica BIIb”;
- Grupo III – absorção de água maior que 10%, comercialmente são vendidos com o nome de “revestimentos para paredes”.

1.3 O DEFEITO DE DIFERENÇA DE TONALIDADE

De acordo a classificação proposta por Martín (2004), o defeito de diferença de tonalidade é alocado na classificação de “defeitos superficiais”. Esse defeito ocorre ao se comparar uma peça padrão de cor conhecida com peças que estão sendo produzidas no mesmo lote. Ao se comparar a peça que está sendo medida com a padrão, é buscado se definir uma variação quantitativa de cor, e a partir de então avaliar a conformidade (KIRILLOVA *et al*, 2018).

O sistema de coordenadas utilizadas para referenciar a colorimetria, para este estudo, é o CIELAB. Segundo Bernardin e Riella (1999), esse espaço de coordenadas foi desenvolvido em 1976 pela CIE (*Comission Internationale de l'Eclairage*) e é composto por três coordenadas: “L”, “a” e “b”. A coordenada “L” é uma indicação de claro ou escuro; a coordenada “a” identifica a tonalidade na direção da cor verde para o vermelho; e a coordenada “b”, identifica a tonalidade da direção azul para amarelo (ALEIXANDRE-TUDO *et al*, 2017). Esse espaço pode ser visualizado na figura I.2.

Figura I.2 – Espaço CIELAB



Fonte: Autoria própria

Ao se aferir uma cor, utilizando o espaço CIELAB, a representação acontece combinando-se as três coordenadas. O vetor resultante que se direciona da origem ao ponto em questão é intitulado de “E” (PATHARE *et al*, 2012). Segundo Bernadin e Riella (1999), o comprimento de “E” é dado pela soma dos quadrados das coordenadas L, a e b. Para fins de classificação e avaliação de conformidade das placas para revestimentos cerâmicos, para cada lote há uma peça padrão que é aferida o seu “E”, e as peças subsequentes são aferidas e comparadas com o “E” padrão. A diferença entre os “E’s” é relatada no ΔE , e será essa variação que assumiremos para avaliar o defeito de “variação de tonalidade” (ABNT NBR ISO 13006:2020).

De acordo à ABNT NBR ISO 13006:2020, a aceitação ou reprovação da variação de tonalidade dentro do mesmo lote para envio ao cliente final é condicionada a um limite superior avaliado sobre o indicador ΔE . A norma define que a variação máxima permitida dentro de um mesmo lote é de 0,75. Segundo a norma, após esse valor, as variações colorimétricas existentes no lote se tornam visíveis ao olho humano.

1.4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método utilizado é uma adaptação do que é recomendado no quesito de desenvolvimento de operação de cartas de controle para os dados de tipo contínuo por Montgomery (2009). O objeto de estudo desse trabalho trata-se da fabricação de revestimento cerâmico do tamanho 5,00cm por 10,00cm (05x10) da tonalidade branca, em uma indústria cerâmica, que não será mencionada e identificada

Se faz necessário realizar a análise de capacidade de um processo. A relação entre o desempenho real do processo e os limites de especificação tem a possibilidade de ser calculada através de índices de capacidade do processo, selecionados de forma adequada (WU et al, 2009).

Dessa forma, como proposto por Montgomery (2009), inicia-se o método através da declaração do problema. Essa definição clara é fundamental para que se tenha um norte claro e consiga embasar todo o restante do desenvolvimento do trabalho. Após a definição do problema, é necessário o desenvolvimento de um planejamento de coleta de dados. De acordo ao manual da AIAG (2005b), para se analisar um processo, a sua coleta de dados deve ser realizada de tal forma que proporcione uma boa amostragem e garanta confiabilidade nos dados a serem analisados. Assim, tendo como alguns requisitos:

- No mínimo 20 subgrupos;
- No mínimo realização de 100 medições ao total;
- Haver periodicidade na coleta entre os dados.

Após a coleta dos dados, inicia-se o trabalho propriamente dito associado às cartas de controle. Esse trabalho irá ser focado na carta de controle do tipo \bar{x} -R. Deve-se calcular os limites de controle para a carta \bar{x} -R. Os limites são encontrados através dos cálculos expressados na Tabela I.1.

Tabela I.1 – Limites de controle para carta \bar{x} -R

Limite	\bar{x} (média)	R(amplitude)	Equações
Limite superior de controle (LSC)	$\bar{x} + A_2\bar{R}$	$D_4\bar{R}$	I.1
Linha Central (LC)	\bar{x}	\bar{R}	I.2
Limite Inferior de controle (LIC)	$\bar{x} - A_2\bar{R}$	$D_3\bar{R}$	I.3

Fonte: Montgomery, 2011

Onde:

\bar{x} : média das médias amostrais dos subgrupos

\bar{R} : média das amplitudes dos subgrupos

A_2 : fator para construção de limite de controle para gráfico de médias

D_3 e D_4 : fator para construção limite de controle para gráfico de

Encontrado os limites de controles associados ao processo, o momento seguinte é de analisar a estabilidade do processo. Uma vez demonstrada a carta de controle \bar{x} -R deve-se observar a evolução das medições. Caso haja alguma medição externa aos limites de controle encontrados, diz que há existência de causa especial de variação, e deve-se investigar o motivo de seu acontecimento. Analisada as causas especiais de variação, inicia-se a etapa de análise de capacidade do processo. Utiliza-se o índice Cpk, demonstrado a seguir:

$$Cpu = \frac{LSC - \bar{x}}{0,5 * T * \sigma}$$

(Eq. I.4)

Onde:

LSC: Limite superior de controle

\bar{x} : média do processo

σ : desvio padrão

T: tolerância do processo

$$Cpl = \frac{\bar{x} - LIC}{0,5 * T * \sigma}$$

(Eq. I.5)

Onde:

LIC: Limite inferior de controle

\bar{x} : média do processo

σ : desvio padrão

T: tolerância do processo

O Cpk é o menor valor entre o Cpu e o Cpl, dado por:

$$Cpk = \min \{Cpu, Cpl\}$$

(Eq. I.6)

A partir de então, pode-se utilizar da investigação feita e da análise do Cpk para se traçar plano de ação para melhoria.

1.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

1.5.1 Declaração do problema

O problema avaliado neste trabalho, é referenciado na análise da capacidade da produção de uma indústria de revestimentos cerâmicos, fabricar cerâmicas do formato 5x10 da tonalidade branca que atendam as especificações de colorimetria propostas pela ABNT NBR ISO 13006:2020.

A norma determina que dentro de um lote produzido, a variação do vetor resultante do sistema CIELAB, quando comparada a peça padrão à peça produzida, pode ser de, no máximo, 0,75. Ao haver uma variação maior que a especificada, deve ser considerado um novo lote e um novo padrão para o lote. Isso acontece para garantia de que o cliente final irá receber o seu conjunto de produtos com pouca ou sem nenhuma diferença visual.

1.5.2 Planejamento de coleta de dados

Os dados foram coletados durante o processo produtivo. A coleta de dados foi realizada utilizando um espectrofotômetro digital, registrando a coleta em um formulário de registro e seguindo as recomendações propostas por AIAG (2005). A medição ocorre após a colocação da parte inferior do espectrofotômetro na superfície a ser analisada e comparada a uma peça padrão. O espectrofotômetro retorna as coordenadas da cor analisada e a variação do vetor resultante ΔE , conforme mostrado na figura I.3.

Figura I.3 – Espectrofotômetro digital



Fonte: Delta Color

Ao total foram 116 subgrupos, com tamanho amostral de $n=3$. Com essas informações, foram coletadas 348 medições (ver Apêndice I.1), com um período total de amostragem de 10 dias, com periodicidade horária de medição.

1.5.3 Cálculo dos limites iniciais de controle

Conforme mostrado na Tabela I.2, calcula-se os limites de controle iniciais dos dados em questão utilizando as equações I.1, I.2 e I.3.

Tabela I.2 – Limites de controle para carta \bar{x} -R de colorimetria

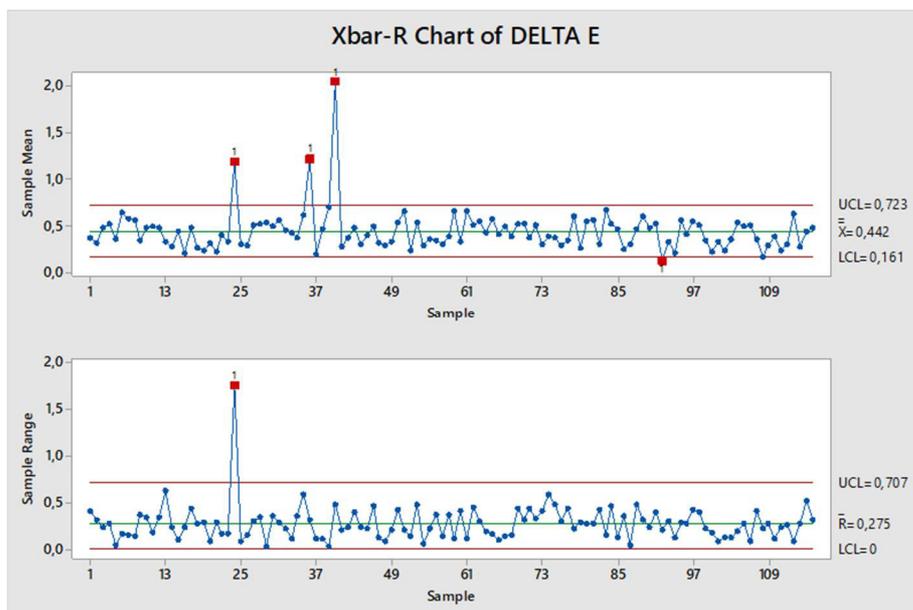
Limite	\bar{x} (média)	R(amplitude)
Limite superior de controle (LSC)	0,723	0,707
Linha Central (LC)	0,442	0,275
Limite Inferior de controle (LIC)	0,161	0,000

Fonte: Autoria própria

1.5.4 Análise de estabilidade do

Neste momento, é necessário seguir as recomendações da AIAG (2005) para analisar a existência das causas especiais de variação. Através das cartas de controle mostradas na figura I.4, pode-se observar que há 4 causas especiais de variação. Os subgrupos 24, 36, 40 e 92, se encontram fora dos limites de controle estatístico, como mostra a figura I.4, denotando, então, a existência de subgrupos com necessidade de análise de causa.

Figura I.4 – Carta de controle para variação de tonalidade



Fonte: Autoria própria

Para realizar a análise de causa, será utilizada a ferramenta de análise de causa raiz “5 porquês”. Essa ferramenta é aplicada através de perguntas que geram estratificações até a finalização, encontrando a causa raiz da questão levantada, como mostra a figura I.5.

Figura I.5 – Ferramenta 5 porquês para análise das causas especiais de variação

Os subgrupos 24, 36, 40 e 92 estão fora dos limites calculados, por quê?

Porque as suas variações estão maiores que a do próprio lote. Por quê?

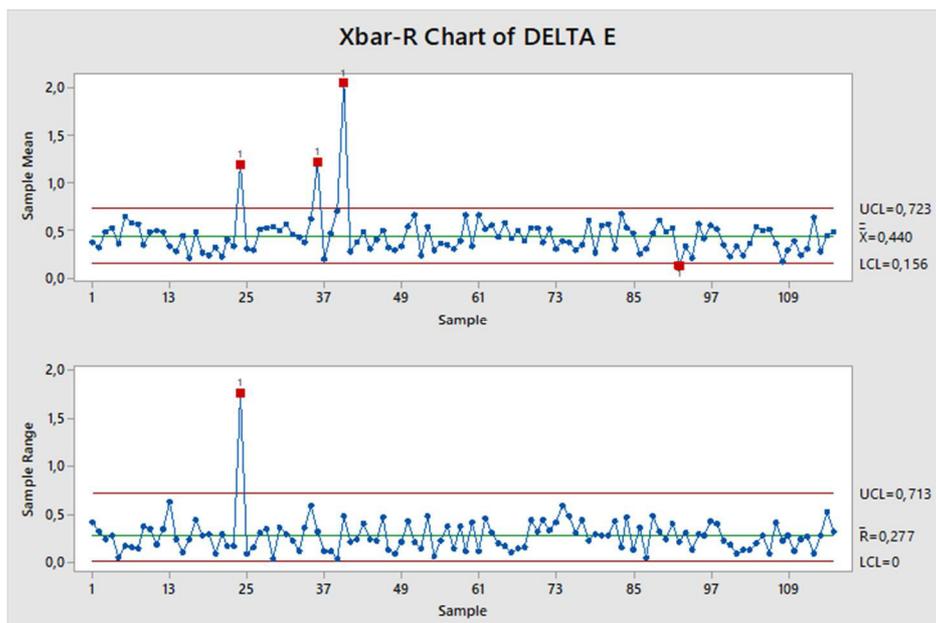
Porque, no lote, as suas posições sempre são início ou fim, denotando alta variação por ser período de troca de lote.

Fonte: Elaborado pelo autor

Foram definidas ações para não recorrência das causas especiais. As ações elencadas para solução foram: realizar inspeção visual e colorimétrica a cada produção de novo esmalte; realizar medição de tonalidade quando houver mudança na quantidade de esmalte aplicado; e medir tonalidade quando temperatura do forno for alterada.

Dessa forma, com os dados coletados, pode-se omitir os subgrupos listados acima da carta de controle. Podendo prosseguir para a análise de capacidade do processo. A carta de controle do processo com a omissão dos subgrupos é mostrada na figura I.6.

Figura I.6 – Carta de controle para variação de tonalidade omitindo causas especiais



Fonte: Autoria própria

Assim, os limites de especificação dos dados amostrados são expostos na tabela I.3.

Tabela I.3 – Limites de controle para carta \bar{x} -R de colorimetria omitidas causas especiais

Limite	\bar{x} (média)	R(amplitude)
Limite superior de controle (LSC)	0,723	0,713
Linha Central (LC)	0,440	0,277
Limite Inferior de controle (LIC)	0,156	0,000

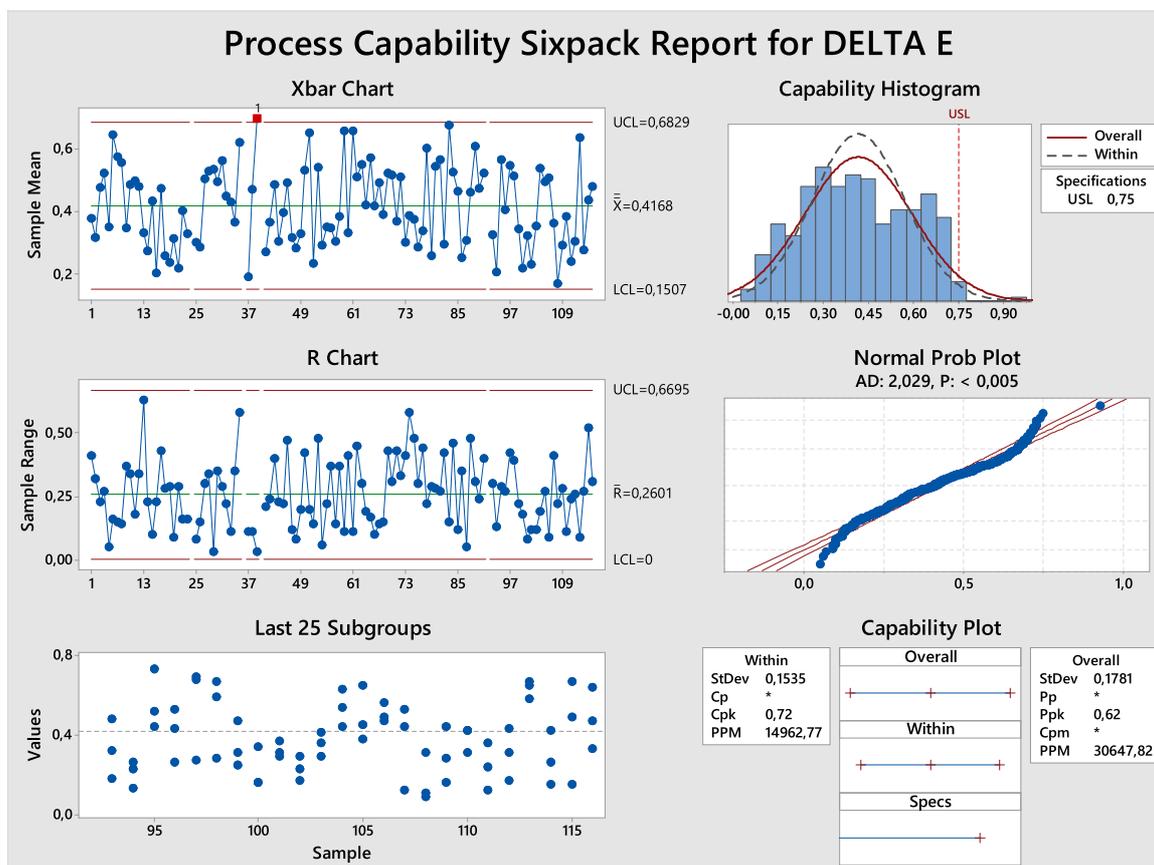
Fonte: Autoria própria

1.5.5 Análise de capacidade do processo

Com a ajuda dos cálculos propostos nas sessões anteriores, pode-se agora encontrar a capacidade do processo. Os índices de capacidade do processo a serem

utilizados serão o PPM (Parte por milhão) e o C_{pk}. Os índices podem ser observados na figura I.7.

Figura I.7 – Análise de capacidade para a variação de tonalidade



Fonte: Autoria própria

Como citado acima, os valores mais significativos para análise da capacidade são o C_{pk} e o PPM. Ao se analisar os valores encontrados se tem a confirmação que o processo atual se encontra incapaz. A literatura considera que um C_{pk} abaixo de 1,33 denota que há impossibilidade de o processo atender às especificações. O valor de C_{pk} encontrado através da equação I.6 é de 0,72. Além disso, com o valor de PPM encontrado, denota-se que aproximadamente 3% dos produtos produzidos apresentam defeito de variação de tonalidade.

1.6 CONCLUSÕES

Os índices Cp e Cpk são largamente utilizados nas indústrias e tem sua aplicabilidade também efetivada na indústria ceramista. O defeito de diferença de tonalidade é presente nos revestimentos cerâmicos e o controle de cor é crucial para a agregação de valor à peça.

O estudo foi realizado para obtenção de definição sobre a capacidade do processo atual ao se analisar a presença do defeito de variação de tonalidade nas peças cerâmicas do formato 5x10. Através da aplicação metodológica dos estudos de carta de controle, especificamente para carta do tipo \bar{x} -R, pode-se observar que de acordo aos dados coletados, o processo atual apresenta um índice Cpk de 0,72, sendo inferior ao valor de referência 1,33. Além disso, o índice PPM, apresenta um valor de 30647,82, demonstrando a presença de 3% de defeitos no volume produzido pelo processo atual. Com isso, conclui-se que, ainda sem realizar uma verificação na variação do sistema de medição, o processo se torna incapaz de fabricar cerâmicas 5x10 da tonalidade branca dentro da especificação de diferença de tonalidade proposto pela ABNT NBR ISO 13006:2020.

Dessa forma, como sugestão para trabalhos futuros, têm-se:

1. análise mais aprofundada na causa raiz desta variação;
2. busca por uma correlação entre as variáveis do processo e as coordenadas do sistema CIELAB para prever o comportamento dos defeitos com base no processo produtivo;
3. avaliar o sistema de medição para verificar se a variabilidade é exclusiva ou não do processo;
4. expandir o estudo para outros formatos de cerâmica e cores.

1.7 REFERÊNCIAS

AIAG. (2005b). Statistical Process Control SPC. In **Journal of Visual Languages & Computing** (2nd ed., Vol. 11). Michigan

ALEIXANDRE-TUDO, Jose Luis et al. Spectrophotometric analysis of phenolic compounds in grapes and wines. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 65, n. 20, p. 4009-4026, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13006: Placas cerâmicas — Definições, classificação, características e marcação**. Rio de Janeiro, 2020.

BERNARDIN, A. M.; RIELLA, H. G. Variação de Tonalidades em Placas Cerâmicas e Escalas Colorimétricas: CMC x CIELAB x CIELCH. **Cerâmica Industrial**, v. 4, n. 1-6, p. 43-46, 1999.

CHEN, Shun-Hsing et al. Performance evaluation for introducing statistical process control to the liquid crystal display industry. **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 1, p. 80-92, 2008.

CIACCO, Eduardo FS; ROCHA, Jose R.; COUTINHO, Aparecido R. The energy consumption in the ceramic tile industry in Brazil. **Applied Thermal Engineering**, v. 113, p. 1283-1289, 2017.

GABALDÓN-ESTEVAN, Daniel; CRIADO, Emilio; MONFORT, Eliseo. The green factor in European manufacturing: a case study of the Spanish ceramic tile industry. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 242-250, 2014.

JOVIC, Franjo; JOVIC, Alan; KRMPOTIC, Darko. Quality control engineering in automated ceramic tile production using a signal information content approach. **Advanced engineering informatics**, v. 27, n. 1, p. 93-107, 2013.

KIRILLOVA, Nataliya P. et al. New perspectives to use Munsell color charts with electronic devices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 378-385, 2018.

LÓPEZ, Fernando et al. Fast surface grading using color statistics in the CIE Lab space. In: Pattern Recognition and Image Analysis: Second Iberian Conference, IbPRIA 2005, Estoril, Portugal, June 7-9, 2005, Proceedings, Part II 2. **Springer Berlin Heidelberg**, 2005. p. 666-673.

MARTÍN, Fernando Lucas. Processos produtivos em revestimentos cerâmicos: variáveis de processo e possíveis causas de defeitos. **Revista Cerâmica Industrial** Setembro/Dezembro de, 2004.

MEZQUITA, A. et al. How to reduce energy and water consumption in the preparation of raw materials for ceramic tile manufacturing: Dry versus wet route. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 1566-1570, 2017.

- Montgomery, D. C. (2009). Introduction to Statistical Quality Control. Development. MOSTAFAEIPOUR, Ali et al. The use of statistical process control technique in the ceramic tile manufacturing: a case study. **International Journal of Applied Information Systems (IJAIS)**, v. 2, n. 5, p. 14-19, 2012.
- MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JÚNIOR, Marsis. As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.
- PARK, Chanseok et al. Improved bootstrap confidence intervals for the process capability index Cpk. **Communications in Statistics-Simulation and Computation**, v. 49, n. 10, p. 2583-2603, 2020.
- PATHARE, Pankaj B.; OPARA, Umezuruike Linus; AL-SAID, Fahad Al-Julanda. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. **Food and bioprocess technology**, v. 6, p. 36-60, 2013.
- PEARN, Wen Lea; LIN, P. C. Testing process performance based on capability index Cpk with critical values. **Computers & Industrial Engineering**, v. 47, n. 4, p. 351-369, 2004.
- PRADO, Ulisses Soares do et al. Panorama da indústria cerâmica brasileira na última década. 2013.
- SÁNCHEZ, E. et al. Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics International**, v. 36, n. 3, p. 831-845, 2010.
- STATISTI, UPORABO; TEHNIKE, N. Improving the process capability of a turning operation by the application of statistical techniques. **Materiali in tehnologije**, v. 43, n. 1, p. 55-59, 2009.
- WIŚNIEWSKA, Kornelia; PICHÓR, Waldemar; KŁOSEK-WAWRZYN, Ewelina. Impact of the addition of dolomite to cream-firing clays on the technological and color properties of sintered ceramics. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 18, n. 3, p. 1063-1073, 2021.
- WU, Chien-Wei; ASLAM, Muhammad; JUN, Chi-Hyuck. Variables sampling inspection scheme for resubmitted lots based on the process capability index Cpk. **European Journal of Operational Research**, v. 217, n. 3, p. 560-566, 2012.
- WU, Chien-Wei; PEARN, W. L.; KOTZ, Samuel. An overview of theory and practice on process capability indices for quality assurance. **International journal of production economics**, v. 117, n. 2, p. 338-359, 2009.
- ZAHID, Md Abu; SULTANA, Arifa. Assessment and comparison of multivariate process capability indices in ceramic industry. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 39, n. 1, p. 18-25, 2008.

ZANELLI, Chiara et al. Waste recycling in ceramic tiles: A technological outlook. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 168, p. 105289, 2021.

2. ARTIGO 2 – ESTUDO DE GR&R CRUZADO EM UM SISTEMA DE MEDIÇÃO DE TONALIDADE DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

2.1 INTRODUÇÃO

Revestimentos cerâmicos são definidos como materiais inorgânicos, não metálicos, consolidados, adquirindo suas propriedades desejadas através da sua exposição ao calor (AGRAFIOTOS; TSOUTSOS, 2001). Dessa forma, os revestimentos cerâmicos são amplamente utilizados na construção civil, devido às suas propriedades físico-químicas e à sua qualidade visual. As cerâmicas são caracterizadas pelo seu baixo nível de absorção de água e por sua estabilidade de cor ao longo do tempo (WIŚNIEWSKA *et al*, 2021).

A busca da indústria cerâmica por novas estéticas deu origem a uma ampla gama de acabamentos do produto final (SÁNCHEZ *et al*, 2010). No entanto, a questão de variações de cor nos materiais cerâmicos não foi suficientemente explorada. A cor é um ponto muito importante para a fabricação ceramista, devido à estética do produto mas também devido às propriedades mecânicas e de abrasão do material (WIŚNIEWSKA *et al*, 2021). Com isso, a classificação da superfície dos revestimentos cerâmicos é essencial para indústria (RAJA, 2018). A classificação ocorre com o objetivo de agrupar as cerâmicas em proximidade de aparência global, sendo crucial para o alcance de padrões de qualidade competitivos (LÓPEZ *et al*, 2005).

Para avaliação de tonalidade de cor, as indústrias cerâmicas utilizam equipamentos de aferição automatizados. Um equipamento possível de uso para medição de tonalidade, é o espectrofotômetro (KESER, 2010; TABATAIAN, 2021). Esse equipamento afere a tonalidade de cor dos objetos no espaço CIELAB, que é um espaço vetorial de cor utilizado internacionalmente (KIRILLOVA *et al*, 2018).

Contudo, avaliar os erros de medição associados ao sistema de medição é uma ação essencial para verificar a sua influência nos processos de fabricação. A análise do sistema de medição (MSA) vem sendo adotada com uma técnica fundamental para verificação da qualidade das medições (AL-RAFAIE; BATA, 2010; YEH; SUN, 2013). Um dos métodos de MSA mais comuns de utilização é o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (GR&R) (PERUCHI *et al*, 2016). Esses estudos têm sido conduzidos em diversas aplicações, tais como: indústria madeireira, farmacêutica, energia eólica e outros processos de fabricação (ARAÚJO *et al*, 2019). Valendo salientar a importância

da análise colorimétrica para o processo de manufatura dos revestimentos cerâmicos (WISNIEWSKA *et al.*, 2021; RAJA, 2018; LÓPEZ *et al.*, 2005). Além disso, ainda não há publicações de estudo de GR&R realizado com um sistema de medição de cor ou espectrofotômetro (SOARES *et al.*, 2022).

Todo processo de produção tem sua variabilidade advinda de duas fontes, sendo: o processo em si ou do sistema de medição (SM) utilizado. Dessa forma, a realização de um estudo GR&R tem o objetivo de avaliar a significância da influência do sistema de medição em relação à variabilidade do processo. Essa avaliação se dá através da observação dos elementos de variação de um sistema de medição (AL-REFAIE; BATA, 2010; WANG; CHIEN, 2010).

Dessa forma, esse trabalho tem por objetivo avaliar o sistema de medição de cor para avaliação de tonalidade de revestimentos cerâmicos. O método utilizado será o estudo de *gauge* R&R. Inicia-se esse trabalho expondo conceitos associados ao estudo GR&R, após isso expõe-se a metodologia utilizada. Nas sessões seguintes são discutidos os resultados e trazidos conclusões sobre o trabalho.

2.2 ESTUDO GAUGE R&R CRUZADO

A realização de um estudo de GR&R compreende experimentos fatoriais. Tais experimentos objetivam a identificação de fontes de variabilidade que afetam um sistema de medição estudado. No GR&R “m” operadores medem cada peça “n” vezes, cada nível de um fator é submetido em cada nível do outro fator n vezes (BURDICK; BORROR; MONTGOMERY, 2005).

Considerando um estudo cruzado de GR&R compreendendo i partes, j operadores e k réplicas, para um modelo geral da ANOVA, pode ser escrito conforme a equação II.1. Nesta equação y é valor medido das peças, μ é o valor da média da população da amostra, α_i é o efeito para cada peça, β_j é o efeito associado a cada operador, $(\alpha\beta)_{ij}$ é o efeito de interação e ε_{ijk} representa o erro originário do sistema de medição (AL-REFAIE; BATA, 2010; AWAD *et al.*, 2009; BURDICK; BORROR; MONTGOMERY, 2003, 2005).

$$y = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk} \begin{cases} i = 1, 2, \dots, p \\ j = 1, 2, \dots, o \\ k = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

A variabilidade total existente em um processo pode ser composta por fatores associados ao processo e a fatores advindos do sistema de medição (AL-REFAIE; BATA, 2010). Ao se avaliar a relação de operador, peça e instrumento, pode-se observar dois conceitos: a repetibilidade e a reprodutibilidade. A repetibilidade foca na determinação da variabilidade do medidor ou instrumento de medição utilizado para medir uma mesma peça. A reprodutibilidade determina a variabilidade decorrente de operadores, configurações ou tempos diferentes (AIAG, 2010; AWAD *et al.*, 2009; PERUCHI *et al.*, 2013; SAIKAEW, 2018; WEAVER *et al.*, 2012).

Dessa forma, a variação total observada na medição, exposta na equação II.2, pode ser estratificada na variação de componentes das peças (Eq. II.3) e na variação do sistema de medição (Eq. II.6) (AL-REFAIE; BATA, 2010).

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_P^2 + \sigma_{GR\&R}^2 \quad (II.2)$$

$$\sigma_P^2 = \sigma_\alpha^2 = \frac{MSP - MSPO}{or} \quad (II.3)$$

$$\sigma_{repetibilidade}^2 = \sigma_\varepsilon^2 = MSE \quad (II.4)$$

$$\sigma_{reprodutibilidade}^2 = \sigma_\beta^2 + \sigma_{\alpha\beta}^2 = \frac{MSO - MSPO}{pr} + \frac{MSPO - MSE}{r} \quad (II.5)$$

$$\sigma_{GR\&R}^2 = \sigma_{repetibilidade}^2 + \sigma_{reprodutibilidade}^2 \quad (II.6)$$

Onde:

MSP: médias quadráticas para o fator peça;

MSO: médias quadráticas para o fator operador;

MSPO: médias quadráticas para o fator de interação;

MSE: médias quadráticas para o termo de erro.

O principal índice para realizar a classificação da adequação do sistema de medição é a porcentagem de repetibilidade e reprodutibilidade, %*R&R*. Conforme é exposto na equação II.7 o índice compara a variação do sistema de medição em relação à variação total (AIAG, 2010; AL-REFAIE; BATA, 2010; LI; AL-REFAIE, 2008; MONTGOMERY, 2009; WHITE; BORROR, 2011; WOODALL; BORROR, 2008).

$$\%R\&R = \left(\frac{\sigma_{GR\&R}}{\sigma_{Total}} \right) 100\% \quad (II.7)$$

Outro índice que pode ser utilizado é o PTR, objetivando a classificação do sistema de medição (AL-REFAIE; BATA, 2010). Compara-se a variação do sistema de

medição com a tolerância do processo (T), conforme é exposto na equação II.8 (AIAG, 2010).

$$PTR = \frac{6 * \sigma_{GR\&R}}{T} \quad (II.8)$$

As referências e diretrizes para a avaliação e interpretação correta dos índices explanados nesta sessão estão expostas na tabela II.1.

Tabela II.1 – Referências e diretrizes para interpretação

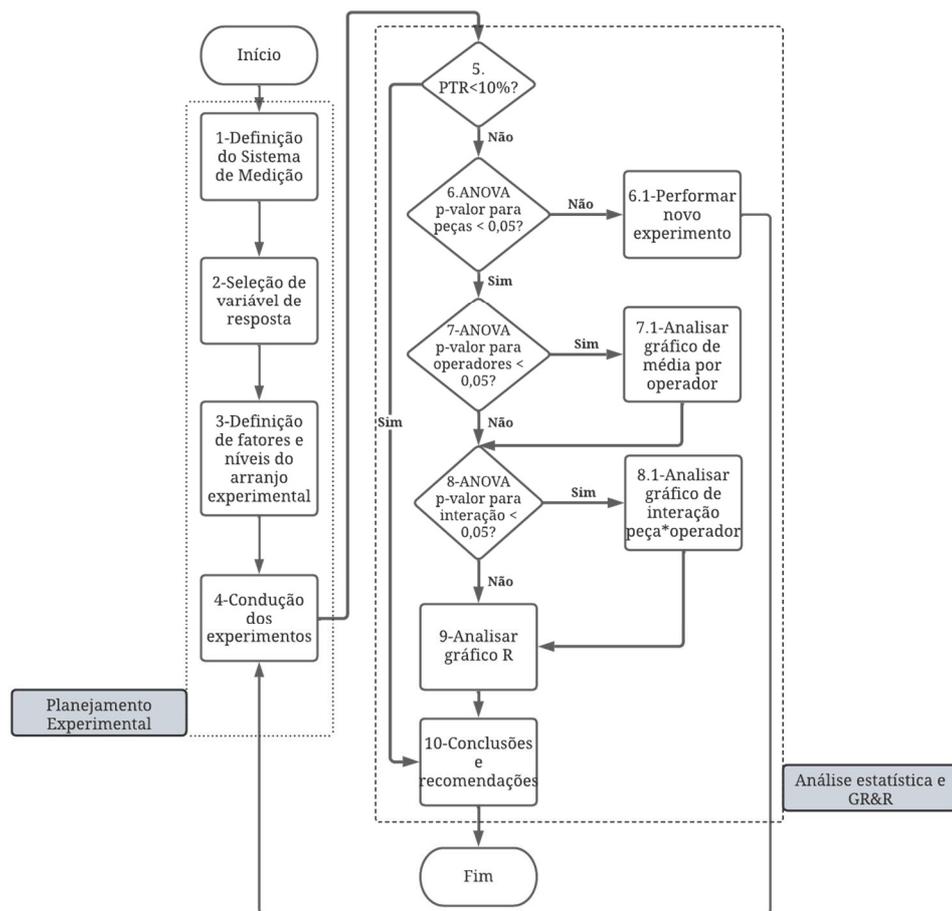
Sistema de medição	%GR&R		PTR
	%Study var	%Contribution	
Aceitável	< 10%	< 1%	< 10%
Marginal	10%-30%	1%-9%	10%-30%
Inaceitável	> 30%	> 9%	> 30%

Fonte: Adaptado de AIAG (2010); Al-Refaie e Bata (2010); Li e Al-Refaie (2008); Montgomery (2009); White e Borrer (2011) e Woodall e Borrer (2008)

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma II.1 descreve as etapas do estudo GR&R.

Figura II.1 – Fluxograma de etapas do estudo GR&R



Fonte: Autoria própria (2023)

2.3.1 Planejamento experimental

O sistema de medição a ser estudado é utilizado para realizar medições de tonalidade de cor. O instrumento utilizado para medição foi um espectrofotômetro digital. Este espectrofotômetro realiza medições dos três eixos do sistema CIELAB (L, a, b), além de conter um termômetro embutido para aferição de temperatura do objeto a ser medido. A aferição é realizada através do contato estático da parte inferior do espectrofotômetro com o objeto. Um conjunto de revestimento cerâmico na cor branca será o objeto medido. Se trata de uma tela de cerâmicas do formato 50mmx100mm.

Foi gerada uma planilha para o estudo R&R e a ordem aleatória das medições para cada operador foi imposta. Será um total de três operadores, cada um realizando três medições por peça. Dez peças serão aferidas, totalizando 90 medições. Todas essas peças serão de uma mesma tela de cerâmicas, todas na cor branca, produzidas no mesmo lote.

A variável a ser medida será o Δ_E , que é a variação do vetor resultante do sistema CIELAB da tonalidade de cor entre uma cor referência e uma cor medida. De acordo com

a ISO 13006:2020, na sua tabela K.1, o valor do Δ_E , para cerâmicas esmaltadas, deve ser menor que 0,75. Antes de iniciar todas as 90 medições, é necessário aferir a peça que será a referência para a medição do Δ_E . O procedimento utilizado é descrito a seguir para a medição de todas as outras peças:

1. Coloca-se o espectrofotômetro sobre a peça;
2. Avalia se a base do espectrofotômetro está completamente em contato com a peça;
3. Na tela *touchscreen* do espectrofotômetro seleciona-se para aferir as coordenadas CIELAB do objeto;
4. Anota-se em um formulário o valor do Δ_E em relação à peça padrão.
5. Repete-se os 4 passos anteriores para cada uma das medições.

Antes de iniciar as medições, o equipamento foi calibrado e limpo sua lente. Também foi aferida a peça definida como “referência” para que fosse possível a medição do Δ_E . Todos os operadores foram treinados no procedimento exposto. Os operadores foram avisados sobre a sensibilidade do equipamento, solicitando cuidado com possíveis vibrações ou movimentações bruscas durante a medição.

Um estudo GR&R foi utilizado para determinar a quantidade de variação do sistema de medição quando se realiza uma comparação com a variação em relação à tolerância. Foram utilizados, para tal análise, a avaliação dos indicadores PTR, p-valor da ANOVA para peças, p-valor da ANOVA para operadores e p-valor da ANOVA para interação peças*operador.

2.3.2 Estudo GR&R

A adequação do sistema de medição é avaliada pela equação II.8. Pela metodologia proposta na figura II.1, o SM será considerado dentro do limite aceitável quando o PTR for menor que 10%.

A ANOVA será conduzida para verificação dos seguintes pontos:

1. Peças: Se o P-valor $< 0,05$, o sistema de medição teve sua capacidade atestada de identificar peças diferentes, denotando a variação presente na fabricação. Em caso oposto, outro experimento deve ser conduzido;

2. Operadores: Se o P-valor $< 0,05$, há erro de reprodutibilidade devido a distinção das médias de medição entre os operadores. Dessa forma, recomenda-se a análise do gráfico de médias por operador;
3. Interação peça*operador: Se o P-valor $< 0,05$, há erro de reprodutibilidade devido às médias distintas por operador e por peça. Para especificação da fonte de variação, o gráfico de interação pode ser utilizado. Caso a necessidade seja de buscar a fonte específica do erro de repetibilidade, tal avaliação é feita por meio da análise da carta de controle de amplitude (R) por operador e por peça.

2.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as realizações das aferições de tonalidade de cor, desenvolveu-se um estudo GR&R. Inicialmente, será avaliado os indicadores:

1. *%Contribuição (%Contribution)*: comparação da variação de cada fonte de erro de medição com a variação total;
2. *%Estudo de variação (%Study Var)*: comparação da variação do SM com a variação total;
3. *%Tolerância (%Tolerance)*: razão entre a variação do estudo para cada fonte e a tolerância do processo.

Os valores referências para cada um dos indicadores foram expostos na tabela II.1. Os valores dos indicadores obtidos para a primeira rodada de medições (ver Apêndice II.1), utilizando o procedimento exposto, são mostrados na tabela II.2:

Tabela II.2 – Indicadores para a primeira rodada de medições

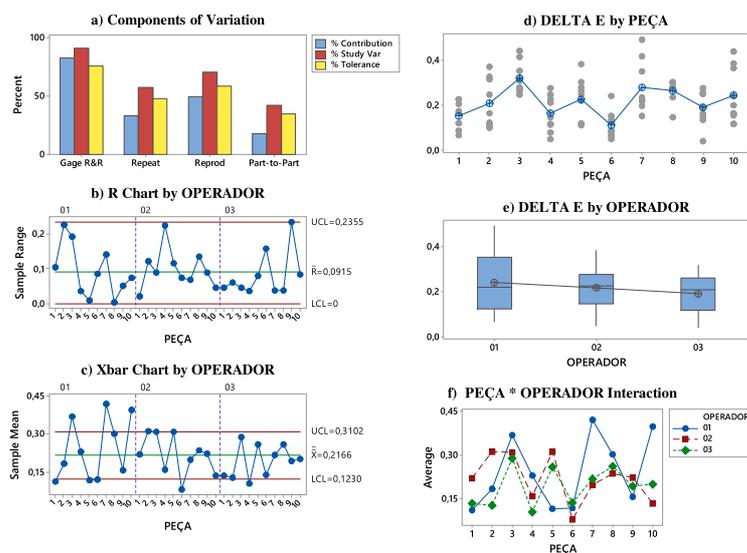
Source	<i>%Contribution</i>	<i>%Study Var</i>	<i>%Tolerance</i>
Total Gage R&R	82,48	90,82	75,56
Repeatability	32,9	57,36	47,72
Reproducibility	49,58	70,42	58,58
Operador	0	0	0
Operador*Peça	49,58	70,42	58,58
Part-To-Part	17,52	41,86	34,82
Total Variation	100	100	83,2

Fonte: Autoria própria (2023)

Com os resultados expostos na Tabela II.2, vê-se um *%Contribution* do SM elevado, indicando uma representatividade na variação total de 82,48%. Esse valor se

torna muito alto quando comparado ao *%Contribution* de 17,52% da variação originada pelas peças (*Part-To-Part*). Essa distância entre os valores também se estende ao Gage R&R total para o *%Study Var* e ao *%Tolerance*, indicando para o SM valores respectivos de 90,82% e 75,56%. É importante destacar o elevado valor do *%Tolerance*, indicando uma significativa participação da variação do SM nas medições. Essas diferenças podem ser vistas na figura II.2.

Figura II.2 – Relatório Gage R&R para primeira rodada de medições: (a) Gráfico de componentes de variação; (b) Gráfico R por Operador; (c) Gráfico Xbar por Operadores; (d) Gráfico por partes; (e) Gráfico de Operadores; (f) Interação Peças*Operadores



Fonte: Autoria própria (2023)

Assim, a maior parte da variação foi advinda da variação do sistema de medição, como pode ser observado no gráfico “a)” da figura II.2. Denota-se, então que ao sistema de medição não consegue distinguir as peças com a confiabilidade esperada. Dessa forma, inicia-se a análise de ANOVA para peça, operador e sua interação peça*operador. Os p-valores estão expostos na tabela II.3.

Tabela II.3 – P-valores para ANOVA

Source	P-valor
Peça	0,124
Operador	0,432
Peça * Operador	0,000

Fonte: Autoria própria (2023)

Conforme apresentado na figura II.1, realiza-se a análise do p-valor da ANOVA para as peças. Nota-se que seu valor é de 0,124, apresentando-se maior que 0,05. Assim, é necessário performar novo experimento. Porém, é interessante avaliar as origens de tal valor.

Dessa forma, para se entender as possíveis causas da elevada contribuição da variação do sistema de medição ao processo de medição, utilizou-se o Modelo de Erro P.I.S.M.O.E.A. (P- peças, I- instrumento de medição, S- padrão, M- método, O- operador, E- meio ambiente, A- suposições) da AIAG (2010). Observou-se, então, as seguintes possíveis causas:

1. Temperatura da peça não controlada no momento da medição;
2. medição realizada em pontos distintos da peça;
3. limpeza da peça;
4. risco de erro de anotação de valor de Δ_E .

Após o uso do modelo PISMOEA, associou-se algumas ações de correção para cada uma das causas destacadas. As ações são expostas na tabela II.4.

Tabela II.4 – Ações para correções baseadas na primeira rodada de medições

Causa identificada	Ação	Objetivo
1. Temperatura da peça não controlada no momento da medição. O resultado da medição reportado pelo equipamento é sensível às	1.1 Realizar medição em sala climatizada, alocando as peças na sala 30min antes para uniformidade de temperatura	Garantir baixa variação de temperatura de peça durante a medição

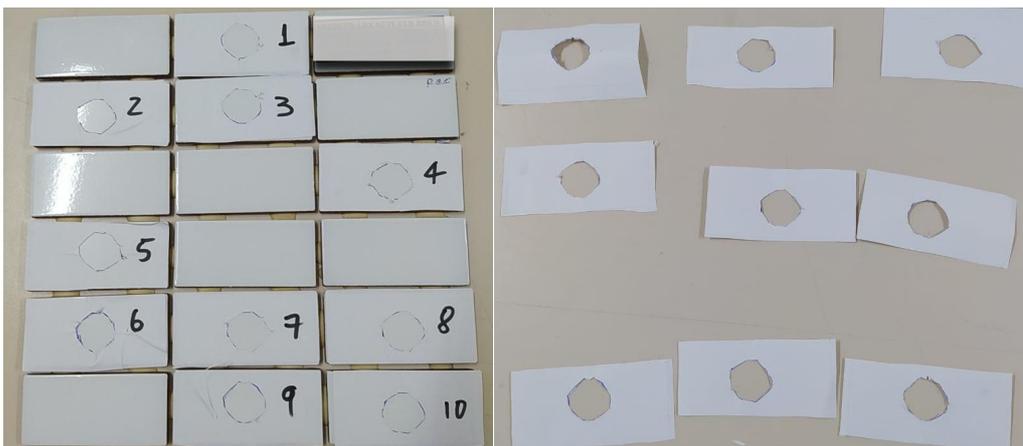
variações de temperatura na peça

2. Medição realizada em pontos distintos da peça	2.1 Prototipar acessório que garanta a centralização da medição (gabarito)	Evitar deslocamento do sensor de medição durante a aferição. Padronizar local de medição na peça.
3. Limpeza da peça	3.1 Limpar peça com pano multiuso antes de cada medição	A medição é conduzida por sistema de imagem de alta definição, dessa forma é necessário retirar possíveis impurezas existentes na superfície da peça que afetem a leitura
4. Risco de erro de anotação de valor de ΔE	4.1 Utilizar <i>software</i> original do espectrofotômetro para guarda computacional dos valores medidos através de memória embutida	Mitigar risco de erro de anotações, utilizando memória embutida do espectrofotômetro

Fonte: Autoria própria (2023)

Com as ações definidas, todas foram realizadas. Destaca-se a criação de gabarito para padronização de medição. Esse gabarito foi desenvolvido em material que pode ser aderido à superfície das cerâmicas. O diâmetro central tem sua medida igual ao do sensor do espectrofotômetro. No momento da medição, o sensor é posicionado de forma concêntrica ao furo existente no gabarito, garantindo então a padronização do local da medição. Para cada peça medida foi desenvolvido um gabarito. Esse acessório de medição é fundamental para que o local medido seja o mesmo para todas as medições em todas as peças para todos os operadores. O gabarito é mostrado na figura II.3.

Figura II.3 – Construção de gabarito para garantia de centralização de medição



Fonte: Autoria própria (2023)

Após as ações, realizou-se outra rodada de medições. A quantidade de medições não foi alterada, os operadores foram os mesmos. As peças foram alocadas na sala 30 minutos antes da aferição e utilizou-se um pano multiuso para limpeza da peça a cada medição realizada. O objetivo da nova rodada de medições (ver Apêndice II.2) continua focado no estudo GR&R conforme o método proposto, explicitado na figura II.1. Os resultados para a nova rodada de medições se encontram na tabela II.5.

Tabela II.5 – Indicadores para a segunda rodada de medições

Source	% Contribution	% Study Var	% Tolerance
Total Gage R&R	15,16	38,94	35,97
Repeatability	13,53	36,78	33,98
Reproducibility	1,63	12,78	11,8
Operador	1,63	12,78	11,8
Part-To-Part	84,84	92,11	85,09
Total Variation	100	100	92,38

Fonte: Autoria própria (2023)

Com as medições obtidas, pode-se observar na tabela II.4 os novos valores para os indicadores em análise. O *%Contribution* do SM é de 15,16%, havendo uma redução significativa quando comparado ao exposto na tabela II.2. Avaliando os valores de *%Study Var* e *%Tolerance* para o GR&R total, tem-se, respectivamente 38,94% e 35,97%. Dessa forma, é possível observar uma redução da participação da variação do SM no estudo. Entretanto, o valor *%Tolerance* ainda continua superior a 30%, mas é possível notar uma melhora no indicador quando comparado com a primeira rodada. Segue-se para a análise de p-valor da ANOVA, valores na tabela II.6.

Tabela II.6 – P-valores para ANOVA

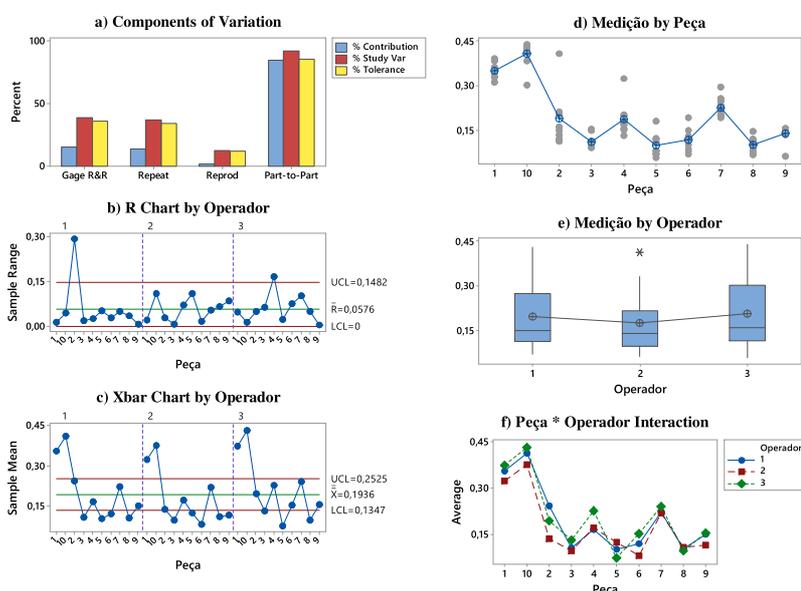
Source	P-valor
Peça	0,000
Operador	0,026
Peça * Operador	0,435

Fonte: Autoria própria (2023)

De acordo à tabela II.6, o P-valor para a ANOVA da peça e do operador se demonstra menor que 0,05. Avaliando o p-valor para ANOVA da interação, é possível verificar que seu valor é superior a 0,05.

Para avaliação do valor de $\%Tolerance$, pode-se utilizar além da tabela II.5, a figura II.4 que auxilia à análise do estudo GR&R realizado. A figura expõe o relatório GR&R, com gráficos demonstrando os dados obtidos na rodada de medições e suas relações com as peças e operadores.

Figura II.4 – Relatório Gage R&R para segunda rodada de medições: (a) Gráfico de componentes de variação; (b) Gráfico R por Operador; (c) Gráfico Xbar por Operadores; (d) Gráfico por partes; (e) Gráfico de Operadores; (f) Interação Peças*Operadores

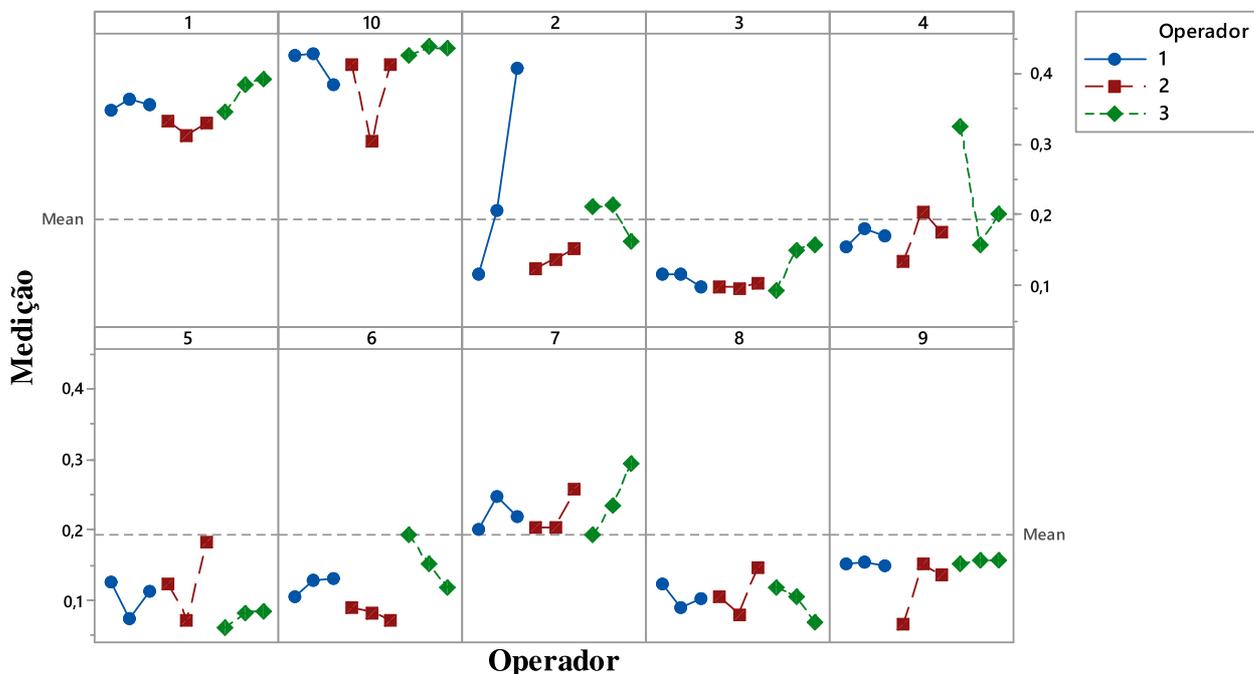


Fonte: Autoria própria (2023)

No gráfico “b) *R chart by Operator*” é possível observar a amplitude das três medições de cada peça separado por operador. Para o operador 01 na peça 2 há um pico de amplitude que supera o limite superior de controle do gráfico. Além dessa amplitude, a amplitude de medição do operador 03 para a peça 4 também superar o limite superior

de controle. Para estes dois casos, deve ser feita uma investigação para entendimento da causa. A figura II.5, expõe a medição de cada peça por operador.

Figura II.5 – Medições de cada peça por operador



Fonte: Autoria própria (2023)

Na figura II.5, cada um dos quadrantes sinaliza uma peça que foi medida. Atentando-se ao quadrante da peça 2, é possível observar que a terceira medição do operador 01 apresentou um valor consideravelmente superior quando comparada às outras 8 medições. Para a peça de número 4, a primeira medição do operador 03 apresentou um valor também superior às outras medições realizadas. Dessa forma, aplica-se, novamente, para estas duas medições o modelo de análise de erro PISMOEA, e obtém-se, junto aos especialistas de processo, as possíveis causas:

1. Vibração involuntária na base da medição;
2. limpeza incorreta da peça antes da medição.

Dessa forma, foram associadas ações para cada uma das possíveis causas. O resumo das ações é exposto na tabela II.7.

Causa identificada	Ação	Objetivo
1. Vibração involuntária na base da medição;	Garantir, no momento da medição, que não haja tremor involuntário na base da medição	Não criar ruídos no momento da captação de imagem da peça

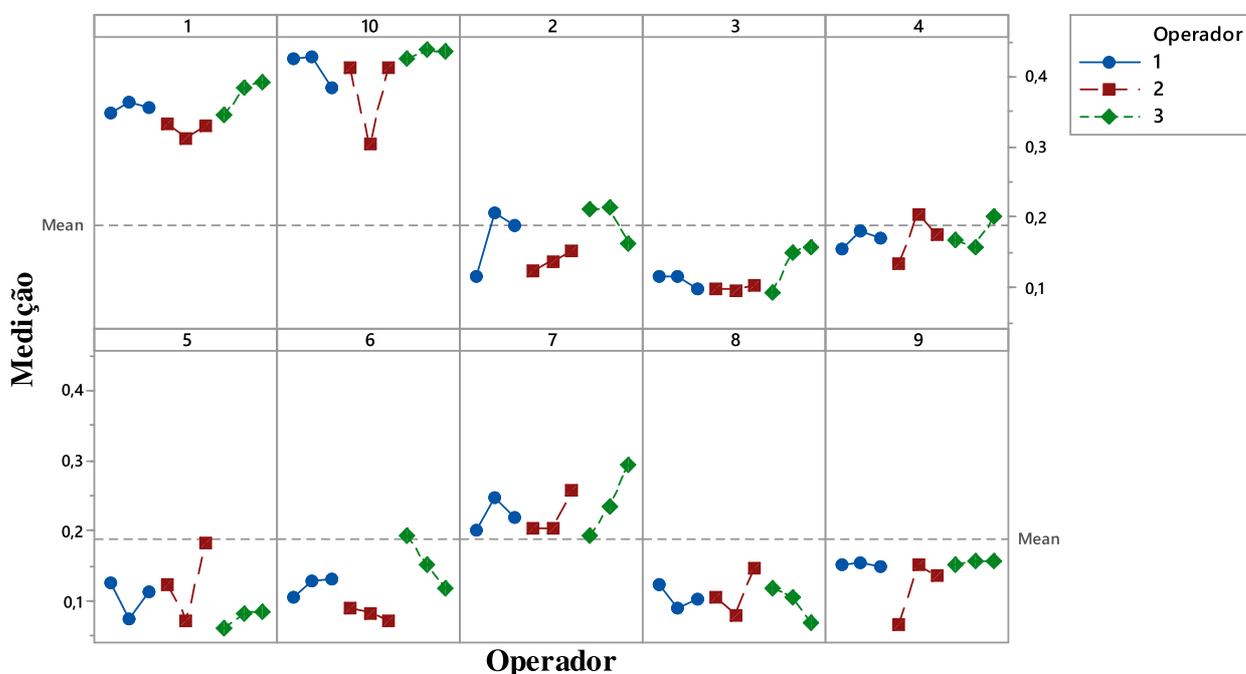
2. Limpeza incorreta da peça antes da medição.	Garantir que a limpeza da peça seja realizada de forma correta antes da medição	Não haver sujeiras na parte a ser medida da peça
--	---	--

Tabela II.7 – Ações após a segunda rodada de medições

Fonte: Autoria própria (2023)

Garantindo a realização das ações, foram realizadas novamente as medições que apresentaram alta amplitude. A terceira medição da peça 02 do operador 1 e a primeira medição da peça 4 do operador 3 foram refeitas (ver Apêndice II.3). A figura II.6 expõe o novo gráfico para o estudo, demonstrando a medição de cada peça por operador.

Figura II.6 – Medições de cada peça por operador após ações



Fonte: Autoria própria (2023)

Dessa forma, avalia-se novamente os indicadores em questão. Estes são expostos na tabela II.8.

Tabela II.8 – Indicadores finais após terceira rodada de medições

Source	% Contribution	% Study Var	% Tolerance
Total Gage R&R	8,56	29,25	26,28
Repeatability	7,33	27,08	24,33
Reproducibility	1,23	11,07	9,95
Operador	1,23	11,07	9,95
Part-To-Part	91,44	95,63	85,91
Total Variation	100	100	89,84

Fonte: Autoria própria (2023)

Obtido os resultados, avalia-se o sistema de medição. Pode-se notar que o *%Contribution* do GR&R total é de 8,56%. Observando a *%Tolerance* para o GR&R total, tem-se um valor de 26,28%, apresentando valor inferior a 30%. O *%Study Var* apresentou-se com valor de 95,63% para as peças. Nota-se um valor de *%Tolerance* inferior quando comparado à primeira e a segunda rodada de medições. Com esses valores, de acordo à metodologia proposta, analisa-se o p-valor da ANOVA para as peças, para os operadores e para a interação. Os p-valores para as ANOVA's são expostos na tabela II.9.

Tabela II.9 – P-valores para ANOVA

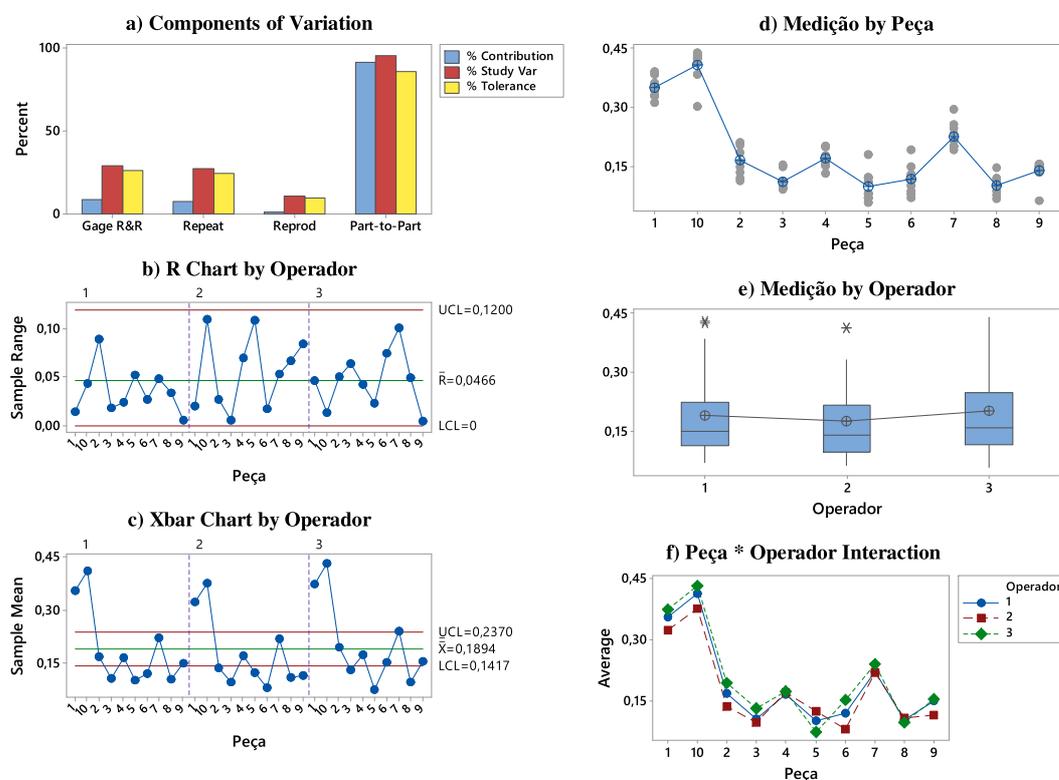
Source	P
Peça	0,000
Operador	0,019
Peça * Operador	0,234

Fonte: Autoria própria (2023)

O p-valor exposto na tabela II.9 para todas as peças foi inferior a 0,05. Dessa forma, pode-se inferir que o fator peças é significativo. Isso se dá devido à variabilidade existente no processo produtivo, fabricando-se peças com diferenças entre si.

O p-valor para o fator operador apresenta-se menor que 0,05, denotando significância para a fonte de variação. Dessa forma, não há homogeneidade entre as medidas dos operadores, rejeitando-se a hipótese de igualdade de operadores e havendo necessidade de avaliação do gráfico de média por operador (Gráfico “e” Figura II.7). Para a interação peça*operador, obteve-se um p-valor maior que 0,05, indicando ausência de erros.

Figura II.7 – Relatório Gage R&R para terceira rodada de medições: (a) Gráfico de componentes de variação; (b) Gráfico R por Operador; (c) Gráfico Xbar por Operadores; (d) Gráfico por partes; (e) Gráfico de Operadores; (f) Interação Peças*Operadores



Fonte: Autoria própria (2023)

As medições por operador (“e” da Figura II.7), também demonstraram pouca reprodutibilidade, tendo o operador 3 as maiores médias. A dispersão dos valores obtidos em cada peça, para essa característica, é observada na letra d).

O erro de reprodutibilidade entre os operadores é destacado no gráfico de interação (letra f da Figura II.7). A peça 6 apresenta maior variação.

2.5 CONCLUSÕES

Neste estudo a técnica Gage R&R foi aplicada para avaliar o desempenho do sistema de medição de tonalidade de cor para placas de revestimento cerâmico. As peças foram selecionadas em um mesmo lote do processo produtivo e aferidas por três operadores utilizando o mesmo instrumento, o espectrofotômetro.

O estudo contou com três rodadas de medições. A primeira rodada apropriou-se do procedimento utilizado no processo produtivo. Essa rodada contou com um valor do

índice de precisão para tolerância de 75,56%. Sendo considerado um sistema de medição inaceitável. Foram avaliadas as possíveis causas através do modelo de erro PISMOEA e elaboradas ações para correção. Executadas as ações, foi realizada a segunda rodada de medições, obtendo então um novo valor do índice de precisão para tolerância de 35,97%. Apesar da redução considerável em relação à primeira rodada, o índice ainda foi considerado alto. Avaliadas as medições, foi feita a análise de causas, determinadas ações corretivas para novas medições e ações preventivas para evitar recorrências, resultando em um índice de precisão para tolerância de 26,28%.

Apesar do valor final de índice de precisão para tolerância estar em uma faixa de valores tidos como “marginal”, aceita-se como um cenário melhorado em relação ao cenário inicial. Destaca-se a importância da limpeza da peça, uma vez que a retirada de impurezas e sujeiras é essencial para a boa leitura do espectrofotômetro. Além disso, a aferição deve ser feita sempre de forma centralizada na peça, devendo haver um acessório que permita esse direcionamento.

Para trabalhos posteriores recomenda-se:

1. uma análise mais minuciosa tendo como ponto de partida os valores da terceira rodada de medições para redução do índice de precisão para tolerância;
2. estudo GR&R para porcelanatos monocores de grandes formatos, para avaliação da influência do tamanho e tipologia da peça no sistema de medição;
3. comparação entre os sistemas de medição de tonalidade de cor com e sem fio.

2.6 REFERÊNCIAS

AGRAFIOTIS, Christos; TSOUTSOS, Theocharis. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. **Applied thermal engineering**, v. 21, n. 12, p. 1231-1249, 2001.

AIAG. **Measurement systems analysis: reference manual**. 4th. ed. Detroit, MI, USA: Automotive Industry Action Group, 2010.

AL-REFAIE, Abbas; BATA, Nour. Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. **Measurement**, v. 43, n. 6, p. 842-851, 2010.

ARAÚJO, Lavínia Maria Mendes et al. New indicators for measurement error detection in GR&R studies. **Measurement**, v. 140, p. 557-564, 2019.

AWAD, M. *et al.* A measurement system analysis approach for hard-to-repeat events. **Quality Engineering**, v. 21, n. 3, p. 300–305, 2009.

BURDICK, R. K.; BORROR, C. M.; MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Gauge R&R Studies: Making Decisions with Confidence Intervals in Random and Mixed ANOVA Models**. Philadelphia, ASA, Alexandria, VA: ASA-SIAM Series on Statistics and Applied Probability, SIAM, 2005.

KESER, Tomislav; HOCENSKI, Željko; HOCENSKI, Verica. Intelligent machine vision system for automated quality control in ceramic tiles industry. **Strojarstvo: časopis za teoriju i praksu u strojarstvu**, v. 52, n. 2, p. 105-114, 2010.

KIRILLOVA, Nataliya P. et al. New perspectives to use Munsell color charts with electronic devices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 378-385, 2018.

LI, M. H. C.; AL-REFAIE, A. Improving wooden parts' quality by adopting DMAIC procedure. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, n. 3, p. 351–360, 2008.

LÓPEZ, Fernando et al. Fast surface grading using color statistics in the CIE Lab space. In: **Pattern Recognition and Image Analysis: Second Iberian Conference, IbPRIA 2005, Estoril, Portugal, June 7-9, 2005, Proceedings, Part II 2**. Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 666-673.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. 6th. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.

PERUCHI, R. S. *et al.* A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics. **International Journal of Production Economics**, v. 144, n. 1, p. 301–315, 2013.

PERUCHI, Rogério Santana et al. < b> Comparisons of multivariate GR&R methods using bootstrap confidence interval. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 4, p. 489-496, 2016.

RAJA, V. L. Surface grading using deep learning approach for ceramic tiles. **International journal of advances in signal and image sciences**, v. 4, n. 1, p. 1-7, 2018.

SAIKAEW, C. An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 118, n. October 2017, p. 246–252, 2018.

SÁNCHEZ, E. et al. Porcelain tile: almost 30 years of steady scientific-technological evolution. **Ceramics International**, v. 36, n. 3, p. 831-845, 2010.

SOARES, Williane de Oliveira Silva et al. Gage R&R studies in measurement system analysis: A systematic literature review. **Quality Engineering**, v. 34, n. 3, p. 382-403, 2022.

TABATABAIAN, Farhad et al. Visual and digital tooth shade selection methods, related effective factors and conditions, and their accuracy and precision: A literature review. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, v. 33, n. 8, p. 1084-1104, 2021.

WANG, F. K.; CHIEN, T. W. Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. **Computers and Industrial Engineering**, v. 58, n. 1, p. 143–150, 2010.

WEAVER, B. P. *et al.* A Bayesian approach to the analysis of gauge R&R data. **Quality Engineering**, v. 24, n. 4, p. 486–500, 2012.

WHITE, T. K.; BORROR, C. M. Two-dimensional guidelines for measurement system indices. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 27, n. 4, p. 479–487, 2011.

WIŚNIEWSKA, Kornelia; PICHÓR, Waldemar; KŁOSEK-WAWRZYN, Ewelina. Impact of the addition of dolomite to cream-firing clays on the technological and color properties of sintered ceramics. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 18, n. 3, p. 1063-1073, 2021.

WOODALL, W. H.; BORROR, C. M. Some relationships between gage R&R criteria. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 24, n. 1, p. 99–106, 2008.

YEH, Tsu-Ming; SUN, Jia-Jeng. Using the Monte Carlo simulation methods in gauge repeatability and reproducibility of measurement system analysis. **Journal of applied research and technology**, v. 11, n. 5, p. 780-796, 2013.

ARTIGO 3 – UM NOVO MÉTODO PARA OTIMIZAR A CAPABILIDADE DE SISTEMAS DE MEDIÇÃO

3.1 INTRODUÇÃO

A coleta de dados proporciona o monitoramento efetivo do processo. Os dados são valores medidos, que advém de um processo de medição e apresentam erro de medição intrínseco (YU, 2012). As propriedades estatísticas de várias medições obtidas utilizando um sistema de medição, que se opera em condições estáveis, define a qualidade dos dados de medição (AIAG, 2010).

A variabilidade existente em um processo pode estar atrelada a inconsistências ou falhas do próprio processo analisado, ou a variações do sistema de medição utilizado. Dessa forma, peças com uma determinada conformidade, podem ser tomadas como uma conformidade oposta. Peças não conformes podem ser aceitas como conformes e vice-versa (AIAG, 2010).

Sendo assim, antes de se realizar a avaliação da capacidade de um processo de manufatura há a necessidade de se atentar ao sistema de medição. Esse foco no sistema de medição se dá em busca de analisar a confiabilidade das medidas observadas e verificar a aceitação do sistema. A partir de então, determina-se o percentual da variação do processo de medição e agrega-se à variabilidade advinda do processo de manufatura antes de se tomar ações para melhorias futuras (DESHPANDE *et al*, 2014).

A variação do sistema de medição não pode ser prejudicialmente grande quando comparada à variação do processo. Para que haja a garantia dessa premissa, utiliza-se a análise de sistema de medição (MSA) (AIAG, 2010; AL-REFAIE; BATA, 2010; LI; AL-REFAIE, 2008; MAJESKE, 2008; WANG; CHIEN, 2010; WOODALL; BORROR, 2008). A MSA possibilita o controle de processos de medição por meio de técnicas de gerenciamento e estatísticas (AIAG, 2010). A análise MSA classifica os erros de medições em: sistemáticos, quando os resultados obtidos através das medições são deslocados em conjunto, ou seja, é o desvio das medições em relação ao valor verdadeiro convencional; e aleatórios, quando os erros incidem em cada medida de forma randômica, ou seja, é o desvio das medições em relação à média (AIAG, 2010).

Peças, operadores e repetições são inseridos em uma série de estudos de medição existentes na análise de sistema de medição. Uma das etapas da análise completa de um estudo de sistema de medição é o Estudo do Tipo I (AIAG, 2010). Este estudo contribui

com uma avaliação dos efeitos dos erros aleatório e sistemático combinado. São trazidos para análise dois índices, o C_g e o C_{gk} . O índice C_g é calculado com objetivo de se comparar a variação com uma porcentagem da tolerância. O índice C_{gk} é calculado para determinar a repetibilidade e o vício juntos (AIAG, 2010; FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009; VAGOVSKÝ; BURANSKÝ; GÖRÖG, 2015).

O controle de qualidade é importante em qualquer indústria. Nas fábricas de revestimentos cerâmicos tal ponto também se encontra latente. Os defeitos superficiais visuais comprometem a qualidade, tal como a variação de cor nos revestimentos (SANGHADIYA; MISTRY, 2015). A classificação da superfície do revestimento cerâmico é essencial para a indústria, entretanto, em algumas indústrias essa classificação é realizada de forma visual (RAJA, 2018).

A percepção visual do ser humano sobre a cor da superfície de revestimentos cerâmicos é uma combinação complexa formada por cores, brilho, visão espacial e fatores psicológicos (AI *et al*, 2004). Dessa forma, as fábricas de revestimentos cerâmicos atualmente utilizam-se de equipamentos eletrônicos para aferição de cor (NANDINI *et al*, 2016). A exploração de MSA e otimização do sistema de medição de tonalidade é uma oportunidade inédita para desenvolvimento. Não foram encontrados trabalhos de validação para o sistema de medição de tonalidade.

Logo, este artigo propõe um método para planejar, executar, analisar e mitigar simultaneamente os erros sistemático e aleatório de sistemas de medição. O Projeto de experimentos combinado com índice de capacidade C_{gk} são aplicados para atender a esse objetivo. O método proposto será aplicado para validar o sistema de medição de cor de cerâmicas de pequeno formato de uma indústria de revestimentos cerâmicos. Será avaliado no processo de medição a estabilidade usando as cartas de tolerância, a capacidade pelos índices C_g e C_{gk} . Serão realizadas análises estatísticas das causas raízes das fontes de erro de medição usando projeto de experimentos e otimização da repetitividade e Bias usando o método *desirability*.

O trabalho inicia-se apresentando uma fundamentação teórica para os índices de capacidade do sistema de medição, planejamento e análise de experimentos, método *desirability* e o sistema CIELAB. Após isso, a metodologia é apresentada e demonstrada sua aplicação. Por fim, discute-se os resultados obtidos e apresenta-se as principais conclusões e recomendações.

3.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.2.1 Índices de capacidade do sistema de medição

Para se realizar uma análise completa de um estudo de medição, inicia-se pelo estudo tipo 1. Esse estudo objetiva a avaliação de efeitos combinados da tendência e da repetibilidade sobre uma quantidade de várias medições advindas de um instrumento, um operador e uma peça de referência, realizando uma avaliação na variação da resposta do sistema de medição quando comparado à especificação do instrumento (AIAG, 2010; FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009).

A repetibilidade foca na determinação da variabilidade do operador (AIAG, 2010; AWAD *et al.*, 2009; PERUCHI *et al.*, 2013; SAIKAEW, 2018; WEAVER *et al.*, 2012). Dessa forma, mesmo que um operador seja capaz, ele apresentará alguma variação na medição da peça, porém, deve ser aceitável de acordo com a tolerância da peça.

A avaliação de repetibilidade do operador é feita utilizando o cálculo do índice C_g , utilizado para comparar a dispersão das medições do medidor, com um percentual da tolerância, de acordo com a equação III.1 a seguir (CZARSKI, 2009; FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009; VAGOVSKÝ; BURANSKÝ; GÖRÖG, 2015):

$$C_g = \frac{\frac{K}{100} * T}{Ls} \quad (III.1)$$

Onde T é a tolerância do processo, K corresponde ao percentual de tolerância e normalmente o valor utilizado é igual a 20, L é número de desvios padrão que representa toda a dispersão do processo (o nível 6 é geralmente o utilizado devido aos processos de padrão *six sigma* e s é o desvio padrão das medições).

O estudo do tipo 1 compreende também o vício de medição, sendo calculado pela diferença entre a medição da média do medido e o valor de referência. A análise estatística da tendência é feita por meio de um teste de hipótese, o teste *one-sample t*. O objetivo é comparar a média de uma amostra com um valor de referência (VVC) (FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009).

$$H_0: \mu = \mu$$

$$H_1: \mu \neq \mu$$

Para se determinar a repetibilidade e o vício juntos, utiliza-se o índice C_{gk} (III.2). Este índice compara a variação do estudo com a tolerância, levando em consideração a centralização do processo (CZARSKI, 2009; FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009; VAGOVSKÝ; BURANSKÝ; GÖRÖG, 2015):

$$Cgk = \frac{\frac{K}{200} T - |\bar{x}_g - x_m|}{l_s} \quad (\text{III.2})$$

Sendo:

\bar{x}_g a média de todas as medições;

x_m o valor verdadeiro convencional (VVC); e

l o número de desvios padrão que representar metade da dispersão do processo (3 é o padrão utilizado).

Quando o índice Cgk se encontra em 1,33, denota-se um sistema de medição capaz, preciso (boa repetibilidade) e exato (tendência baixa) (FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009; GASPARIN *et al.*, 2013; MÄDER *et al.*, 2009; MEYER *et al.*, 2009; VAGOVSKÝ; BURANSKÝ; GÖRÖG, 2015).

O processo deve estar estável para aplicar a análise de capacidade, além disso, os dados de saída devem ser independentes e normalmente distribuídos (FLYNN; SARKANI; MAZZUCHI, 2009). Dessa forma, a estabilidade é observada utilizando-se a carta de tolerância. Mede-se uma peça mestra ou de controle utilizando mesmo sistema de medição ao longo do tempo. A carta de tolerância será formada por:

1. Linha central: definida pelo VVC, é a medição conhecida e correta de cada peça;
2. Limites de tolerância: calculada utilizando o valor de referência e o valor de tolerância, conforme equação III.3.

$$TL = x_m \mp 0,10 * T \quad (\text{III.3})$$

Ter conhecimento do sistema de medição é fundamental para realizar identificações de causas especiais de variação quando o sistema está instável (MINITAB, 2022).

3.2.2 Planejamento e análise de experimentos

O *Design* de experimentos (DOE) é uma ferramenta estatística largamente usada em setores de engenharia. O propósito do seu uso é identificar a influência de variáveis independentes em relação a uma ou mais variáveis de resposta. O objetivo é a otimização do processo analisado (LAYADI; CHAMPENOIS; MOSTEFAI, 2018; WEISSMAN; ANDERSON, 2015; BELLOTTI *et al.*, 2019).

A obtenção dos dados de medição é conseguida à medida que o sistema de medição selecionado para ser avaliado é estudado. O estudo experimental planejado é uma alternativa para a obtenção dos dados necessários. Nesse planejamento, algumas características que são constantes no sistema de medição são, intencionalmente, variadas e a interação da variável de resposta em questão é analisada (MONTGOMERY; RUNGER, 2011).

Uma boa representação dos sistemas reais de medição através de modelos matemáticos, pode ser construída através da realização de experimentos bem construídos (MONTGOMERY, 2013). Em geral, os sistemas e os processos podem ser analisados utilizando-se de experimentos, haja vista que esses têm a possibilidade de serem representados em função de variáveis de resposta e independentes. Os objetivos de um experimento, podem ser elencados e resumidos em (MONTGOMERY, 2013):

1. Determinar quais variáveis têm uma maior influência na variável (ou variáveis) de resposta;
2. Determinar, para um valor desejado de Y, como os fatores que influenciam a resposta podem ser configurados e definidos.

Dessa forma, a utilidade da análise de regressão é destacada como uma técnica estatística que permite identificar as relações presentes entre as variáveis (MONTGOMERY; RUNGER, 2011). Segundo Montgomery e Runger (2011), a análise de regressão múltipla é especialmente recomendada para problemas que envolvem mais de duas variáveis.

A composição do modelo de regressão é formada por variáveis dependentes e independentes. As variáveis dependentes são aquelas que representam as respostas do modelo e, em muitos casos, são associadas à variável Y. As variáveis independentes estão relacionadas às respostas do modelo e também aos coeficientes (MONTGOMERY; RUNGER, 2011), exposta pela Eq. III.4:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_KX_K \quad (\text{III.4})$$

A Eq. III.4 representa um modelo de regressão linear múltipla típica. Essa equação é composta j variáveis independentes, e parâmetros representados por $B_j, j = 1, 2, 3, \dots, k$. A mudança esperada na resposta Y é representada pelos parâmetros, ou coeficientes, quando as outras variáveis independentes são mantidas constantes.

Comumente utiliza-se o método dos mínimos quadrados para realizar a definição dos parâmetros do modelo de regressão. Dessa forma, se faz importante mencionar que modelos tidos como mais complexos são envolvidos na necessidade de incorporar o comportamento de interações entre as variáveis, também podendo ser feitas análises por meio de modelos de regressão linear múltipla (MONTGOMERY; RUNGER, 2011), como pode ser exemplificado a seguir na equação III.5:

$$Y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + B_{12}X_1X_2 \quad (\text{III.5})$$

Nesse contexto, quando da definição do modelo de regressão, é recomendado que, para selecionar as variáveis significativas do modelo e avaliar a adequação do modelo, sejam realizados testes (MONTGOMERY; RUNGER, 2011). Montgomery e Runger (2011) sugerem utilizar o *p-value* < 0,05 para se realizar um teste de significância do modelo. Dessa forma é possível indicar a rejeição da hipótese nula e realizar a aceitação da hipótese alternativa, que expõe que os valores das variáveis independentes são contribuidoras significativas para o modelo. Buscando determinar o grau de adequação do modelo, se faz recomendado a utilização do coeficiente de determinação R^2 ajustado. Além dessas duas avaliações de adequação, ainda é recomendado a análise dos resíduos padronizados, que pode ser feito através do teste de normalidade da distribuição dos resíduos (MONTGOMERY; RUNGER, 2011).

3.2.3 Método Desirability

O método Desirability é largamente utilizado no desenvolvimento de pesquisas devido a sua facilidade de entendimento e uso (MARINKOVIC, 2020). Este método proporciona uma otimização simultânea de múltiplas variáveis de resposta, buscando os melhores resultados para tal simultaneidade de otimizações (MOBIN et al, 2018). O método é composto por duas funções. A primeira função é uma função individual (*d*), que representa o resultado da otimização de uma variável de resposta. A segunda é a função Composite Desirability (*D*) que transmite a qualidade global da otimização multiobjetivo (HOSSAIN et al, 2021). O valor do Composite Desirability (*D*) pode variar entre 0 e 1, sendo, respectivamente, o pior e o melhor resultado possível (KRISHNAMOORTHY, 2018).

Para cada tipo de otimização individual, há uma forma diferente de calcular a função individual das variáveis (d). As equações III.6, III.7 e III.8 demonstram como cada caso é calculado, onde Y é o valor previsto de resposta, USL é o limite superior aceitável, LSL é o limite inferior aceitável, T é o valor alvo e w é o fator peso. O fator w irá impactar no formato da função desirability, escolhendo para cada variável de resposta se o alvo ou o limite será enfatizado ou não. Os valores possíveis ao fator de peso, w, e suas respectivas ênfases são:

- Se $w > 1$, será enfatizado a necessidade proximidade do valor alvo;
- Se $0 < w < 1$, a variável resposta terá menor importância;
- Se $w = 1$, a variável resposta terá um comportamento neutro.

Para problemas de minimização utiliza-se a equação III.6.

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0, & Y_i(x) > USL_i \\ \left(\frac{USL_i - Y_i(x)}{USL_i - T_i}\right)^{w_i}, & T_i \leq Y_i(x) \leq USL_i \\ 1, & Y_i(x) < T_i \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

Para problemas que necessitem de valor alvo utiliza-se a equação III.7.

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0, & Y_i(x) > USL_i \\ 0, & Y_i(x) < LSL_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - LSL_i}{T_i - LSL_i}\right)^{w_i}, & LSL_i \leq Y_i(x) \leq T_i \\ \left(\frac{USL_i - Y_i(x)}{USL_i - T_i}\right)^{w_i}, & T_i \leq Y_i(x) \leq USL_i \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

Para problemas de maximização utiliza-se a equação III.8.

$$d_i(Y_i) = \begin{cases} 0, & Y_i(x) < LSL_i \\ \left(\frac{Y_i(x) - LSL_i}{T_i - LSL_i}\right)^{w_i}, & LSL_i \leq Y_i(x) \leq T_i \\ 1, & Y_i(x) > T_i \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Após calcular a função individual *Desirability* (d) para cada resposta, é possível calcular o valor final da *Composite Desirability* (D), utilizando a equação III.9 (Mobin *et al*, 2018).

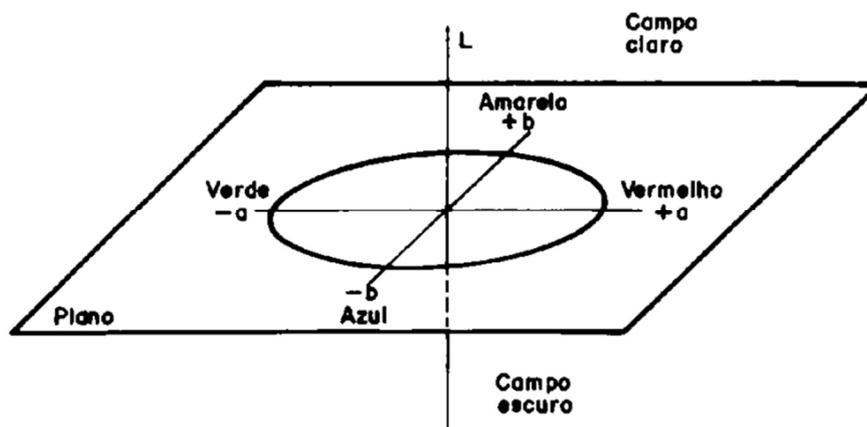
$$D = \left[\prod d_i^{\lambda_i} \right]^{\frac{1}{\sum \lambda_i}} = \left[(d_1)^{\lambda_1} * d_2^{\lambda_2} * \dots * d_q^{\lambda_q} \right]^{\frac{1}{\sum \lambda_i}} \quad (\text{III.9})$$

Onde λ_i é a importância de Y no problema de otimização, e d é o resultado da função individual *Desirability*.

3.2.4 Sistema de medição de cor CIELAB

O sistema de medição de cor CIELAB foi desenvolvido em 1976, e é mundialmente utilizado por muitos profissionais. É composto por três eixos coordenados. Ao longo de cada eixo há representação de variação da escala de cor, conforme a figura Figura III.1 (KIRILLOVA *et al*, 2018). O eixo vertical é denominado de eixo “L”, representando a variação de cor que existe entre o campo claro (+L) e o campo escuro (-L). A abscissa é denominada de eixo “a”, representando a variação entre as cores vermelha (+a) e verde (-a). O terceiro eixo é denominado de eixo “b”, representando a variação entre as cores amarela (+b) e azul (-b) (FAIRCHILD, 2010).

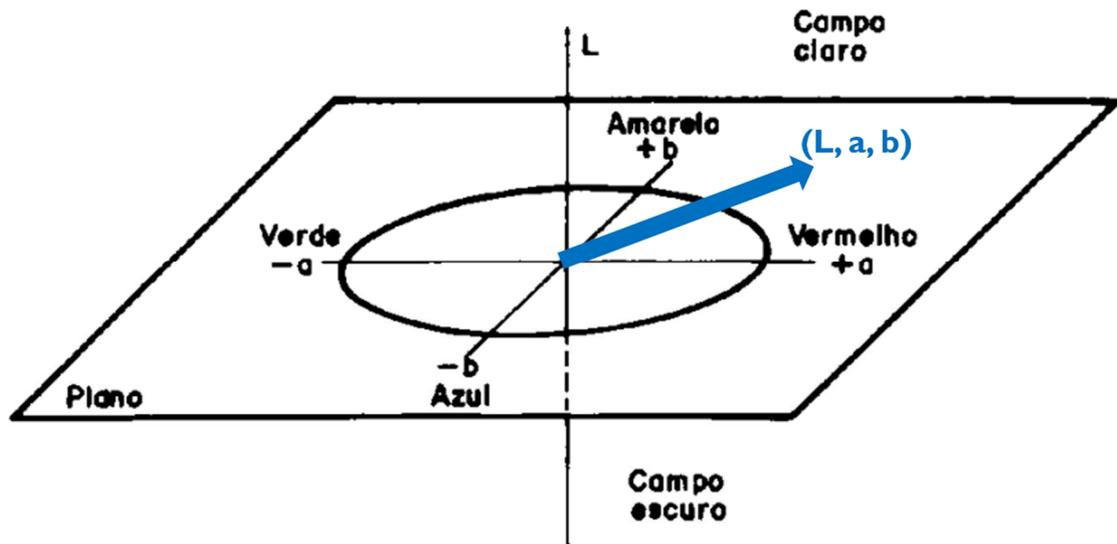
Figura III.1 – Sistema CIELAB



Fonte: NBR 13818:1997 | ISO 13006:1995

Dessa forma, as cores existentes dentro do sistema CIELAB são vetores com coordenadas L, a e b (PATHARE *et al*, 2012). Exemplifica-se na figura III.2.

Figura III.2 – Vetor no espaço CIELAB



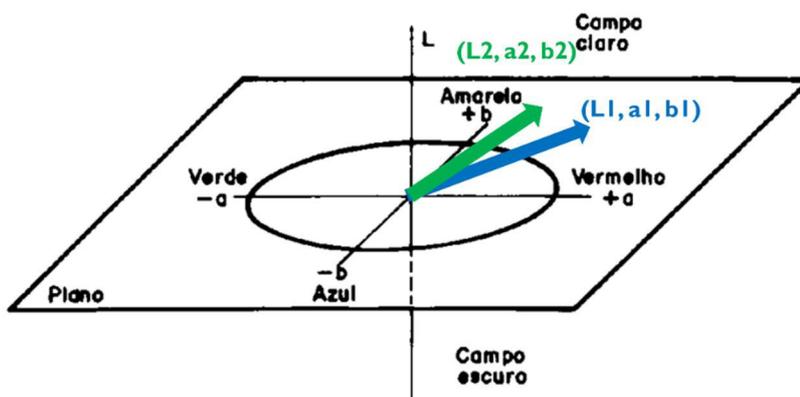
Fonte: NBR 13818:1997 | ISO 13006:1995 (adaptado)

Com a existência das três coordenadas, é possível encontrar através da fórmula do vetor resultante advinda do cálculo vetorial, um vetor resultante que para o sistema CIELAB é denominado de “E”, conforme a equação III.10.

$$E = (L^2 + a^2 + b^2)^{1/2} \quad (\text{III.10})$$

Entretanto, em alguns casos se faz necessária a comparação entre um vetor resultante cor com outro (VICHI *et al*, 2011). O objetivo é avaliar a diferença de tonalidade de cor, utiliza-se como demonstrado na figura III.3.

Figura III.3 – Vetores no sistema CIELAB



Fonte: NBR 13818:1997 (adaptado)

Dessa forma, a variação entre vetores resultantes do sistema CIELAB, denominado de ΔE , é calculado através da distância Euclidiana no espaço CIELAB (JOINER *et al*, 2008), conforme equação III.11.

$$\Delta E = (\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2)^{1/2} \quad (\text{III.11})$$

Onde:

ΔE : Variação entre vetores resultantes de tonalidade

ΔL : Variação entre as coordenadas "L" de vetores de tonalidade

Δa : Variação entre as coordenadas "a" de vetores de tonalidade

Δb : Variação entre as coordenadas "b" de vetores de tonalidade

A avaliação comparativa visual de cores pode acarretar erros. O instrumento que proporciona a captação de pequenas variações de cores é o espectrofotômetro (VICHI *et al*, 2011). Para realizar a medição colorimétrica esse equipamento mede a cor avaliando o espectro da curva de refletância. O espectrofotômetro, mostrado na figura III.4, então, converte a sua leitura espectral em coordenadas do sistema CIELAB (TABATAIAN *et al*, 2021).

Figura III.4 - Espectrofotômetro



Fonte: <https://www.deltacolorbrasil.com/>, acesso em 18/12/2022

O instrumento é colocado sobre o objeto alvo de medição e afere-se a tonalidade de cor do objeto em comparação a um padrão. Dessa forma, o espectrofotômetro mostra em sua tela o valor de variação do vetor resultante de cor (ΔE).

3.3 Materiais e métodos

Da mesma forma que há possibilidade de, no processo de manufatura, haver existência de variação, é possível encontrá-las em sistemas de medição. Todas as medições de dados têm inerência de algum grau de variância ou até mesmo erros. A robustez de um processo de controle estatístico de processo (SPC) necessita de dados precisos para existência da garantia de qualidade ao produto (UDROIU; BRAGA, 2020). Dessa forma, é necessário avaliar o sistema de medição.

Com isso, o presente artigo busca determinar o melhor sistema de medição possível apropriando-se do planejamento de experimentos (*design* de experimentos – DOE), cartas de tolerância, análise de capacidade do sistema de medição utilizando os índices Cg e Cgk e a otimização por meio do *desirability*. Para simplificar o método proposto, expõe-se um procedimento resumido com 6 passos.

1. Definição da variável de resposta e identificar fatores;
2. Avaliação das variáveis mapeadas em matriz esforço x impacto;
3. Determinação de arranjo experimental;
4. Condução de estudo Tipo 1;
5. Análise de dados obtidos utilizando métodos estatísticos;
6. Apresentação de conclusões práticas.

Cada etapa a ser executada é detalhada a seguir:

1. Definir a variável resposta e identificar os possíveis fatores que serão utilizados levando em consideração o Modelo de Erro P.I.S.M.O.E.A. (P- peças, I- instrumento de medição, S- padrão, M- método, O- operador, E- meio ambiente, A- suposições) da AIAG (2010). Este auxilia na identificação as fontes potenciais de variação, como causas comuns e especiais. Recomenda-se um Diagrama de Ishikawa capaz de identificar os fatores do modelo PISMOEA, além de categorizá-los em variáveis de controle, de ruído, constantes e blocáveis;

2. Avaliar fatores mapeados no passo anterior em uma Matriz Esforço X Impacto. Selecionar fatores que exigirão menores esforços para maiores impactos na redução dos erros de medição. Definir níveis a serem utilizados para cada um dos fatores;
3. Determinar o arranjo experimental de acordo com o tamanho da amostra (número de replicações), ordem adequada de rodadas para as tentativas experimentais, ou formação de blocos ou outras restrições de randomização envolvidas;
4. Conduzir um estudo do Tipo 1. Para cada rodada do experimento, a peça selecionada deve ser medida 50 vezes pelo operador. Finalizada as medições, o índice C_{gk} é determinado. Para a determinação de C_{gk} o valor verdadeiro convencional deve ser conhecido. Se não houver disponibilidade de uma peça padrão, uma peça da produção que se caracterize em faixas intermediárias de medições deve ser aceita como peça mestre para determinar o valor verdadeiro convencional. A peça mestre deve ser medida 10 vezes e o sistema de medição deve ser superior. Como “valor verdadeiro convencional” deve ser utilizada a média das medições (AIAG, 2010);
5. Analisar os dados obtidos utilizando meios de métodos estatísticos:
 - 5.1 Análise de estabilidade, desenvolvendo e analisando carta de tolerância; Análise de capacidade utilizando o índice C_{gk} (Eq III.2);
 - 5.2 Modelagem e otimização do índice C_{gk} (Eq. III.9);
6. Apresentar conclusões práticas extraídas dos resultados do experimento e recomendar ações associadas. Os métodos gráficos devem ser apresentados, objetivando a comprovação dos resultados.

Na etapa 5.2, se faz necessária uma modelagem para a realização da otimização. Conforme exposto na sessão 5.2.3 será utilizado o método *Desirability* para otimização. Com os conceitos do sistema CIELAB apresentados na sessão 5.2.4, a modelagem da função *desirability* é demonstrada nas equações, III.12 e III.13.

Para o erro sistemático, deseja-se que Δ_E possa convergir para o VVC. Aplica-se a equação III.8 para este caso, logo:

$$d_1 = 0, \text{ se } \mu_{\Delta E}(x) < LSL_1$$

$$d_1 = 0, \text{ se } \mu_{\Delta E}(x) > USL_1$$

$$d_1 = \left[\frac{\mu_{\Delta E}(x) - LSL_1}{VVC - LSL_1} \right], \text{ se } LSL_1 < \mu_{\Delta E}(x) < VVC$$

$$d_1 = \left[\frac{USL_1 - \mu_{\Delta E}(x)}{USL_1 - VVC} \right], \text{ se } VVC < \mu_{\Delta E}(x) < USL_1$$

onde $\mu(x)$ é o modelo de regressão da média das medições do ΔE , $LSL_1 = VVC - 0,1Tol$, $USL_1 = VVC + 0,1Tol$.

$$d_{se} = 0, \text{ se } \mu_{\Delta E} < LSL$$

$$d_{se} = 0, \text{ se } \mu_{\Delta E} > USL$$

$$d_{se} = \left(\frac{\mu_{\Delta E} - LSL}{VVC - LSL} \right)^{w_i}, \text{ se } LSL < \mu_{\Delta E} < VVC$$

$$d_{se} = \left(\frac{USL - \mu_{\Delta E}}{USL - VVC} \right)^{w_i}, \text{ se } VVC < \mu_{\Delta E} < USL$$

(III.12)

Para o erro aleatório, deseja-se que $\sigma_{\Delta E}$ seja o menor possível. Aplica-se a equação III.7 para este caso, logo:

$$d_2 = 0, \text{ se } \sigma_{\Delta E}(x) > USL_2$$

$$d_2 = \left[\frac{USL_2 - \sigma_{\Delta E}(x)}{USL_2 - T_2} \right], \text{ se } T_2 < \sigma_{\Delta E}(x) < USL_1$$

$$d_2 = 1, \text{ se } \sigma_{\Delta E}(x) < T_2$$

(Eq. III.13)

Onde $\sigma_{\Delta E}(x)$ é o modelo de regressão do desvio padrão das medições do ΔE e $USL_1 = VVC + 0,1Tol$.

Assim, aplicando as equações III.12 e III.13 na equação III.9, obtém-se a equação III.14.

$$D = \left[\prod d_i^{\lambda_i} \right]^{\frac{1}{\sum \lambda_i}} = \left[(d_1)^{\lambda_1} \times (d_2)^{\lambda_2} \right]^{\frac{1}{\sum \lambda_i}}$$

$$d_{re} = 0, \text{ se } \sigma_{\Delta E} > USL$$

$$d_{re} = \left(\frac{USL - \sigma_{\Delta E}}{USL - VVC} \right)^{w_i}, \text{ se } VVC < \sigma_{\Delta E} \leq USL$$

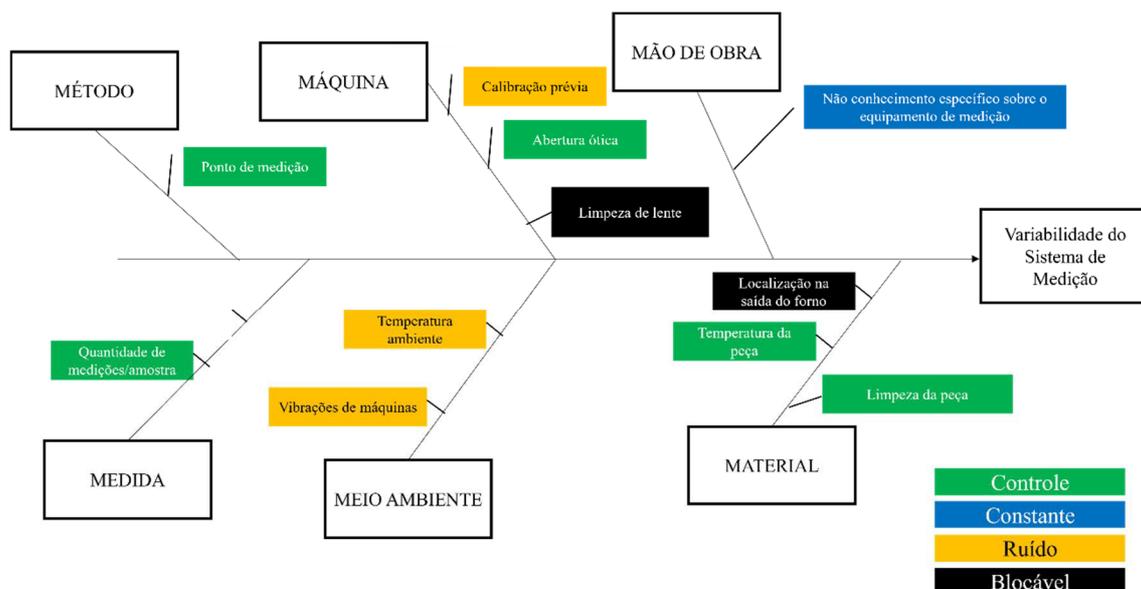
$$d_{re} = 0, \text{ se } \sigma_{\Delta E} < VVC$$

(III.14)

3.4 APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO NO PROCESSO DE MEDIÇÃO DE TONALIDADE DE REVESTIMENTOS CERÂMICOS

A aplicação do método seguiu os 6 passos demonstrados na seção 5.3. Buscando a determinação de um sistema de medição de tonalidade capaz para o processo de fabricação de revestimentos cerâmicos de pequeno formato da cor branca. Na Etapa 1 os fatores que influenciam o resultado da medição foram mapeados utilizando o modelo P.I.S.M.O.E.A. e do diagrama de Ishikawa. O levantamento das possíveis variáveis foi feito de forma multidisciplinar, consultando um time de especialistas, conforme figura III.5. A variável resposta é a variação entre o padrão e a medição do vetor resultante do sistema CIELAB de cor (ΔE).

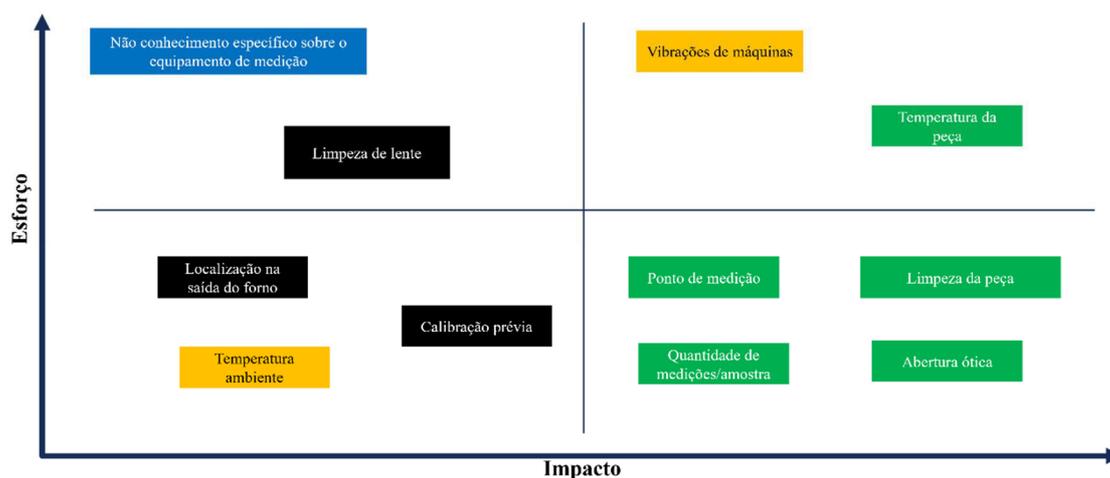
Figura III.5 – Ishikawa para mapeamento de variáveis



Fonte: Autoria própria (2022)

Conforme destacado na Etapa 2, devem ser selecionadas as variáveis que exigirão menores esforços para maiores impactos. Na figura III.6 são mostradas as variáveis advindas do Ishikawa alocadas nos quatro quadrantes da matriz esforço-impacto.

Figura III.6 – Matriz de comparação de esforço e impacto



Fonte: Autoria própria (2022)

As variáveis selecionadas são as alocadas no quadrante de menor esforço e maior impacto, sendo: ponto de medição, limpeza da peça, quantidade de medições por amostra e abertura ótica. O ponto de medição refere-se ao local da peça onde será realizada a medição, variações no local de medição interferem no resultado da aferição. A variável “limpeza da peça” se refere à realização de limpeza na superfície antes do momento da aferição. A “quantidade de medições por amostra” demonstra quantas medições serão realizadas para se definir o valor através de média simples ou se será considerado apenas o primeiro valor de aferição. Já a “abertura ótica” é o diâmetro de medição aferido sobre o objeto em questão.

Mapeadas e selecionadas, define-se os níveis dos fatores, conforme a tabela III.1.

Tabela III.1 – Variáveis selecionadas e seus respectivos níveis

Fator	Abertura ótica	Ponto de medição	Qtd. de medições/ ΔE	Limpeza da peça
Nível 1	6mm	Sem gabarito	1	Sem limpeza
Nível 2	16mm	Com gabarito	3	Com limpeza

Fonte: Autoria própria (2022)

Partindo para a Etapa 3 do processo metodológico proposto, define-se o arranjo experimental a ser utilizado. O número de fatores é igual a 4, e número de níveis é igual a 2. Dessa forma, para cada rodada de experimento são exigidas 50 medições, será utilizado um arranjo fatorial fracionado com 4 fatores e 2 níveis ($2^{\frac{1}{2} * k}$, onde K representa o número de fatores). Haja vista o elevado número de medições, resultando em 8 combinações para avaliação do Cgk através do DOE.

Para garantia do Nível 2 do ponto de medição (Com gabarito), foi desenvolvido um suporte em acrílico utilizando corte a laser, para que o ponto medido da peça sempre seja o mesmo, conforme mostrado na figura III.7.

Figura III.7 – Gabarito para aferição de tonalidade feito em acrílico



Fonte: Autoria própria (2022)

Para a Etapa 4, além da execução dos experimentos e realização das medições, se faz necessário encontrar o valor verdadeiro convencional (VVC). Para se determinar tal valor, se utilizará a combinação demonstrada na tabela III.2, considerada como superior ao cenário atual de medição segundo os especialistas de processo consultados.

Tabela III.2 – Combinação selecionada para medição do VVC

Fator	Abertura ótica	Ponto de medição	Qtd. de medições/ ΔE	Limpeza da peça
Nível	16mm	Com gabarito	3	Com limpeza

Fonte: Autoria própria (2022)

Para realizar a determinação do VVC, foi selecionada uma peça do formato 5cm x 10cm da cor branca. A medição foi realizada em três pontos da peça, cada ponto foi

medido 10 vezes e considerada a média das medições. Os dados de medição são expostos na tabela III.3.

Tabela III.3 – Valores de medição para o VVC

L*	a*	b*	ΔE
90,028	-1,101	2,833	0,9760
90,022	-1,070	2,799	1,0008
90,025	-1,064	2,771	1,0131
90,615	-1,047	2,658	0,7924
90,923	-1,042	2,602	0,7149
90,914	-1,027	2,588	0,7320
90,791	-1,009	2,649	0,7280
90,410	-0,914	2,997	0,6238
90,394	-0,897	2,981	0,6509
90,401	-0,896	2,968	0,6532
VVC			0,7885

Fonte: Autoria própria (2022)

O estudo Tipo 1 foi conduzido levando em consideração o arranjo experimental adotado. A peça escolhida foi medida 50 vezes por um único operador em cada uma das rodadas de experimento. Vale ressaltar que a peça cerâmica foi a mesma para todas as medições, havendo variação apenas na combinação entre os fatores de medições através do DOE. As etapas 5 e 6 do método proposto serão descritas na seção 5.5.

3.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez realizada a seleção dos fatores, determinada a resposta e objetivo da melhoria do sistema de medição, o arranjo fatorial fracionado foi elaborado. Inicia-se então a Etapa 5 do processo metodológico proposto, na sua Subetapa 5.1. A intenção é de verificar as interações entre as variáveis, verificando os fatores com maior significância que impactam o índice Cgk expostos na tabela III.4. A primeira ação para se definir a estabilidade do sistema de medição foi o desenvolvimento de cartas de tolerância para cada uma das 8 rodadas de medição (Combinação 01, Combinação 02, Combinação 03, Combinação 04, Combinação 05, Combinação 06, Combinação 07 e Combinação 08), utilizando valores obtidos a cada uma das 50 medições por rodada. A tolerância é dada pela NBR 13006:2020 que define o limite máximo aceitável para ΔE em 0,75.

Tabela III.4 – Índices C_g e C_{gk} para cada Setup

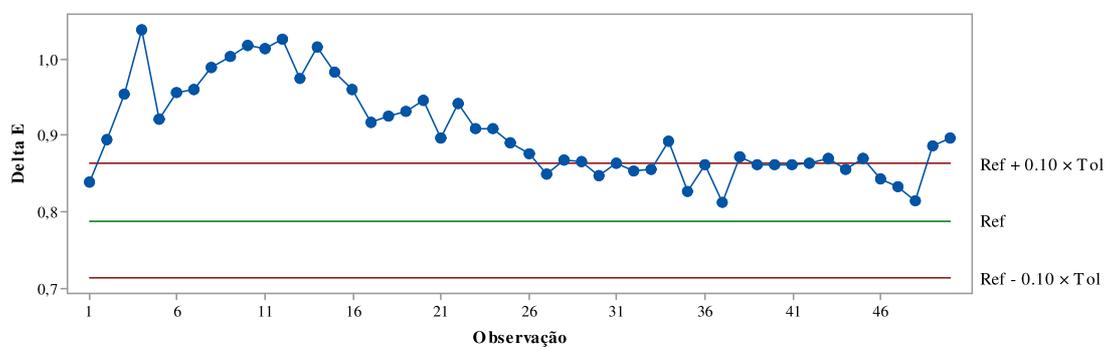
Setup	Limpeza da peça	da Abertura da lente	da Gabarito	Qtd de medições	C_g	C_{gk}
1	Limpa peça	6	Sem gabarito	1	0,41	-0,75
2	Não limpa peça	6	Sem gabarito	3	0,71	-1,84
3	Limpa peça	16	Sem gabarito	3	0,30	-0,49
4	Não limpa peça	16	Sem gabarito	1	0,32	-1,66
5	Limpa peça	6	Com gabarito	3	0,37	-0,16
6	Não limpa peça	6	Com gabarito	1	0,33	0,17
7	Limpa peça	16	Com gabarito	1	0,65	-2,83
8	Não limpa peça	16	Com gabarito	3	0,60	-0,34

Fonte: Autoria própria (2022)

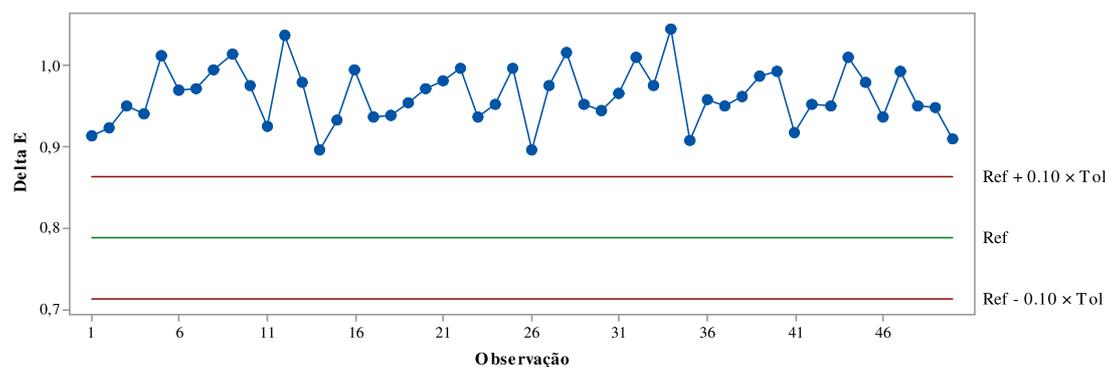
A figura III.8 expõe as cartas de tolerância obtidas através das medições realizadas para cada uma das combinações. Observe que apenas a Combinação 6 demonstrou um resultado de C_{gk} positivo. Além disso, as combinações 04, 05, 07 e 08 demonstraram uma forte tendência crescente temporal ao aumento do ΔE .

Figura III.8 – Cartas de tolerância com aferições de tonalidade para cada Setup

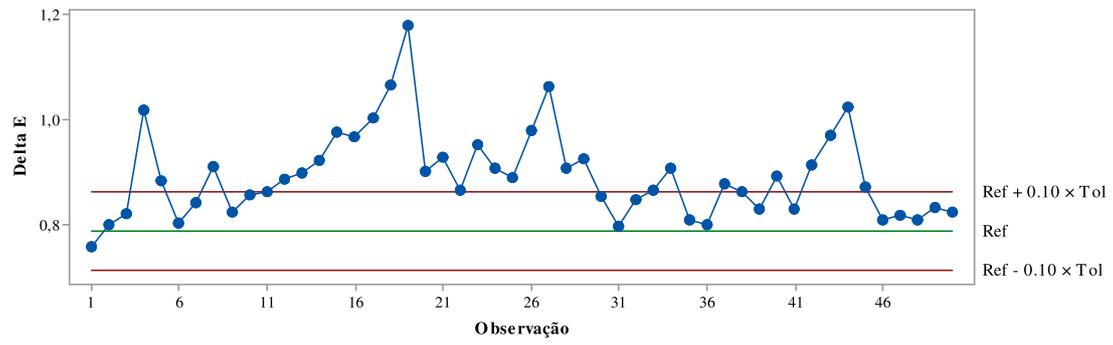
a)



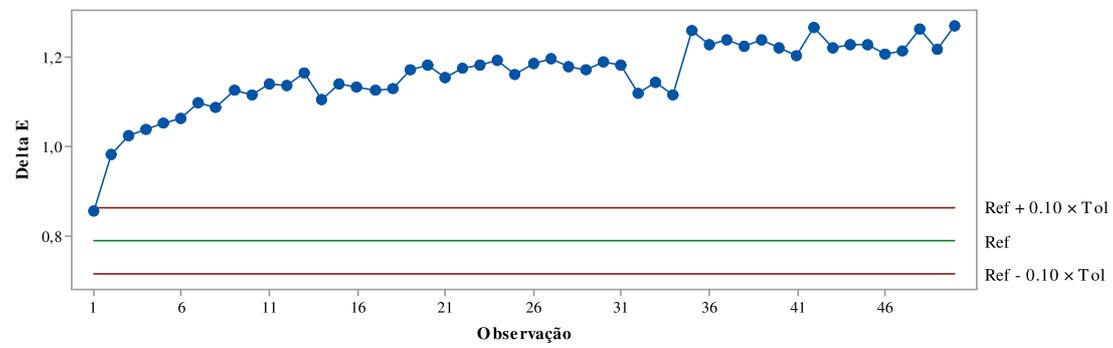
b)



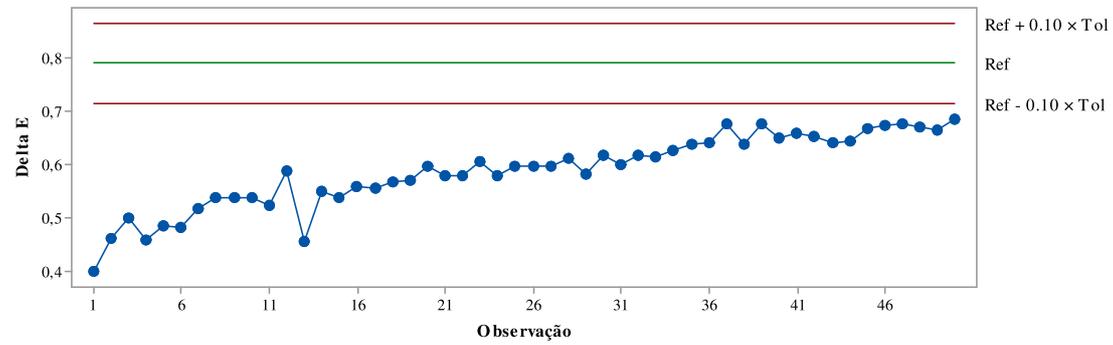
c)



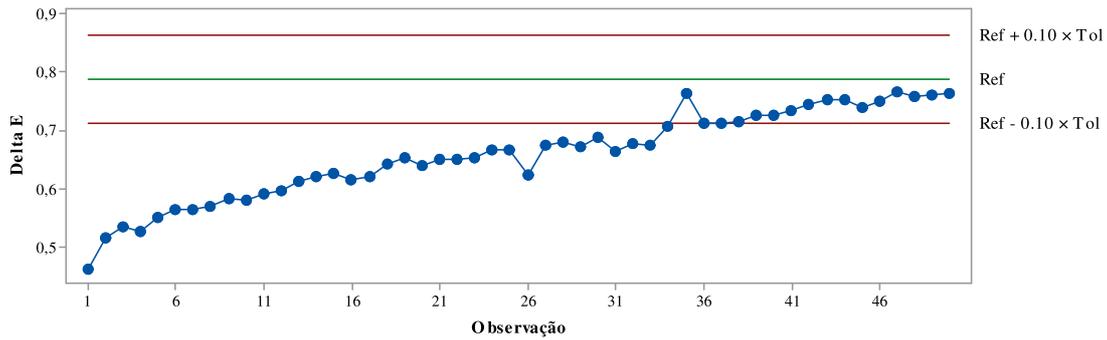
d)



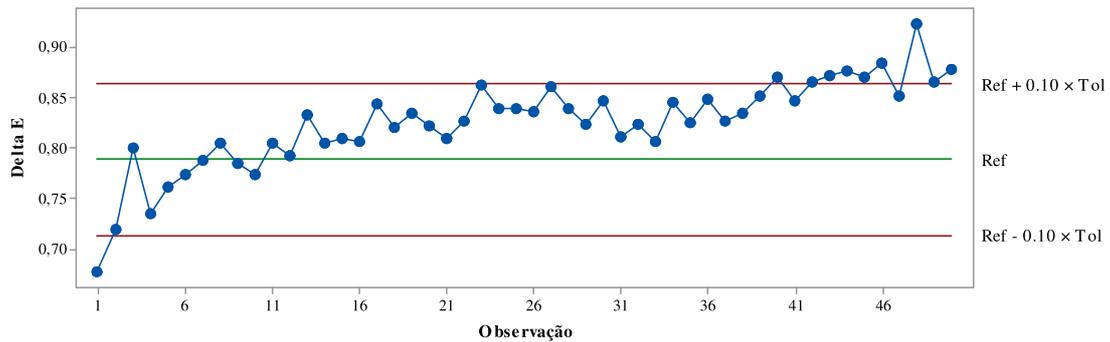
e)



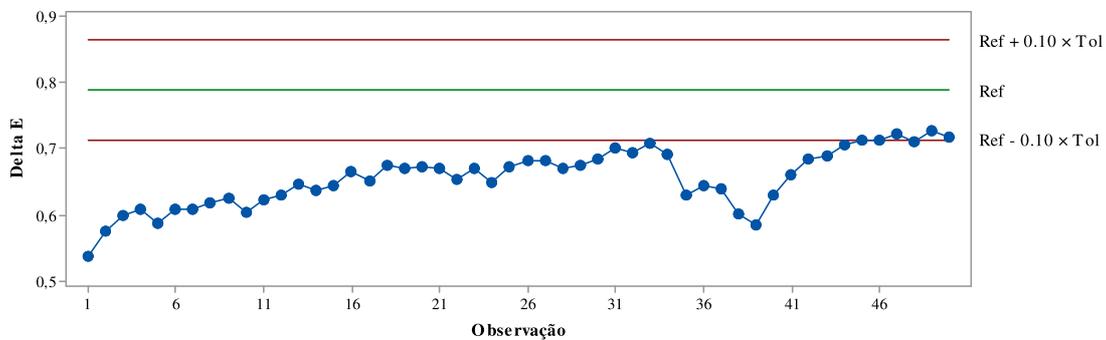
f)



g)



h)

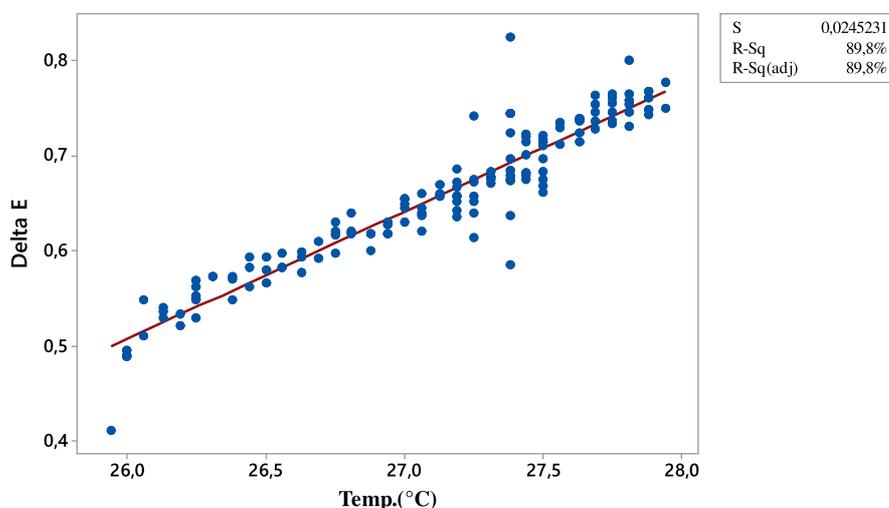


Fonte: Autoria Própria (2023).

Para análise de estabilidade do Delta E, pode-se notar que todas os *setups* apresentaram totalidade ou parcialidade dos dados fora dos limites de tolerância. Além disso, através dos gráficos expostos na figura III.8, observa-se uma forte tendência do Delta E com o sequenciamento das medições. Como exemplo, pode-se avaliar a combinação 06, que inicia sua medição com Delta E na ordem de 0,5 e finaliza na ordem de 0,8. Com esses valores da combinação 06 é proporcionado à peça uma rejeição, ao final, devido ao erro associado ao sistema de medição.

Visto que existe algum fator, até então, não trazido ao escopo de pesquisa e estudo no DOE que proporciona uma tendência nas medições, é necessário reavaliar o modelo desenvolvido na figura III.6. A variável “temperatura da peça”, classificada como variável de ruído, agora é analisada sua correlação com o Delta E no *setup* 6, a única com Cgk positivo. A análise de correlação é demonstrada na figura III.9. Observa-se pela Figura III.9 que o coeficiente de determinação ajustado, $R\text{-sq}(\text{adj}) = 89,9\%$, evidencia forte correlação positiva e significativa entre DeltaE e a temperatura da peça.

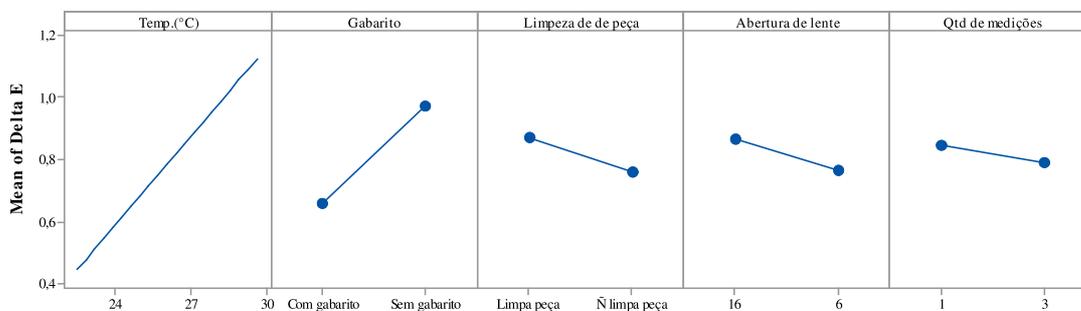
Figura III.9 – Correlação entre medições com a temperatura



Fonte: Autoria própria (2022)

Além disso, na figura III.10, é visto o gráfico de efeitos principais associados ao Delta E, considerando a variável ruído que é a temperatura da peça. Note a sua forte influência, através da inclinação da reta, na variação da medição do Delta E.

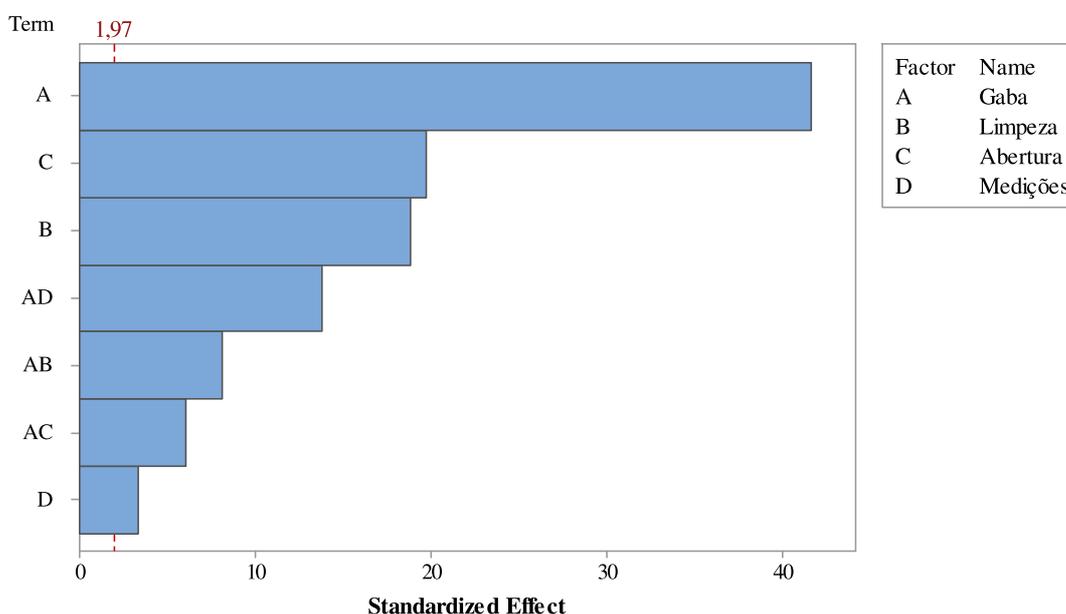
Figura III.10 – Gráfico de efeitos principais



Fonte: Autoria própria (2022)

Dessa forma, a variável temperatura da peça deve ser considerada e levada em consideração na busca pela redução do erro de sistema de medição e, conseqüentemente, otimização do índice Cgk. Inicia-se, então, a Subetapa 5.2 do método proposto. Analisando o gráfico de efeitos padronizados, é possível observar, através da figura III.11, as variáveis gabarito, limpeza e abertura e a combinação entre gabarito e quantidade de medições como as mais significativas.

Figura III.11 – Efeitos padronizados para o ΔE



Fonte: Autoria própria (2022)

Identificado os fatores mais significativos, foi obtido modelo de regressão codificado tendo como variável de resposta o Delta E. Vale salientar que, para o modelo, foi considerada a variável temperatura como uma covariável, devido a sua forte influência conforme já demonstrada neste trabalho.

$$\begin{aligned} \text{Delta E} = & -0.299 + 0.04284 \text{ Temp.}(\text{°C}) - 0.13774 \text{ Gabarito} + 0.06084 \text{ Limpeza} \\ & - 0.07500 \text{ Abertura} - 0.01608 \text{ Medições} - 0.03680 \text{ Gabarito*Limpeza} \\ & + 0.04940 \text{ Gabarito*Abertura} - 0.05244 \text{ Gabarito*Medições} \end{aligned}$$

A análise de adequação dos modelos pode ser verificada com o auxílio dos testes de adequação. Para tal, é possível utilizar as análises de variância, teste de normalidade

dos resíduos, coeficiente R-quadrado ajustado e fator de inflação da variância, visto na tabela III.5.

Tabela III.5 – Análise de adequação do modelo para ΔE

Delta E	DF	Adj SS	Adj MS	F-valor	P-valor
Modelo	7	12,8160	1,8309	523,78	0,0000
Covariável	1	0,0321	0,0321	9,17	0,0030
Temperatura da peça	1	0,0321	0,0321	9,17	0,0030
Linearidade	4	11,8049	2,9512	844,30	0,0000
Gabarito	1	8,2884	8,2884	2.371,18	0,0000
Limpeza da peça	1	1,8592	1,8592	531,90	0,0000
Abertura	1	1,3331	1,3331	381,39	0,0000
Qtd de medições	1	0,0134	0,0134	3,82	0,0510
Interações bidirecionais	2	0,5703	0,2852	81,58	0,0000
Gabarito*Limpeza da peça	1	0,0923	0,0923	26,42	0,0000
Gabarito*Qtd de medições	1	0,5219	0,5219	149,31	0,0000
Erro	390	1,3632	0,0035		
Total	397	14,1792			
R_{adj}^2		88,66%			
AD ^a		0,556			
p-valor ^b		0,150			

^a Estatística Anderson-Darling do teste de normalidade para resíduos padronizados

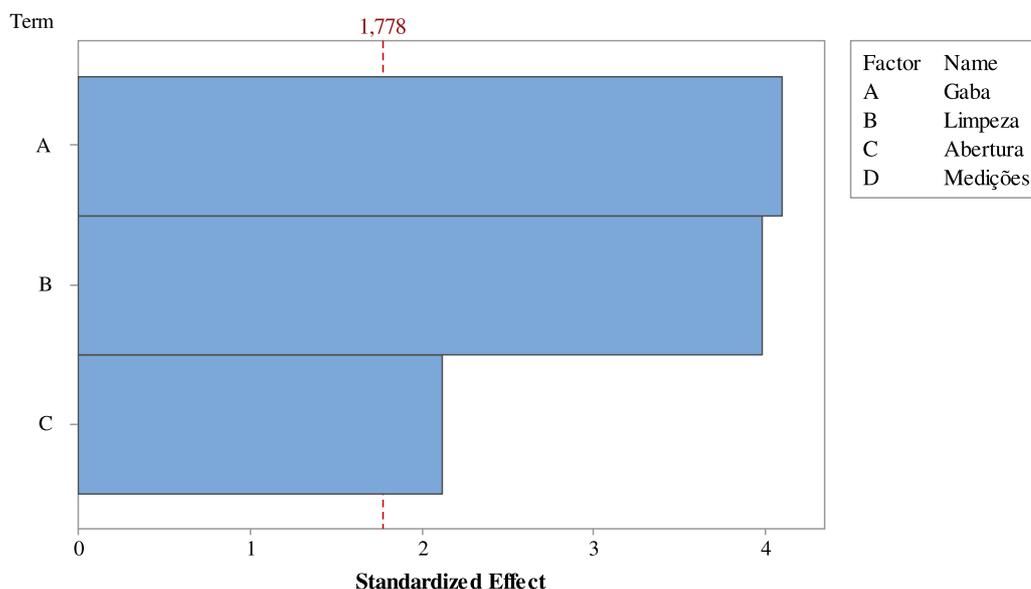
^b p-valor do teste de normalidade para resíduos padronizados

Fonte: Autoria própria (2022)

Para o teste de adequação do modelo de regressão simples, tendo como variável de resposta o Delta E, a hipótese nula foi rejeitada para ΔE , pois o P-valor $< 0,05$. Assim, possibilita-se inferir que os fatores influenciam nas respostas.

O coeficiente R-quadrado ajustado é observado para o teste, tendo seu valor em 88,66%. Com esse resultado, é possível concluir que os pontos se ajustam na reta de regressão, uma vez que a sugestão da literatura é que o indicador em questão seja maior que 70%.

O teste de Anderson-Darling, ainda analisando a normalização dos resíduos, indicou que a distribuição normal modela os dados avaliados. Essa conclusão é tomada avaliando o P-valor, para esta análise apresentado no valor de 0,150, sendo superior a 5%. Também foi desenvolvida uma análise dos efeitos padronizados para o desvio padrão associado às medições. É possível observar na III.12 que as variáveis “Gabarito”, “Limpeza” e “Abertura” têm grande representatividade.

Figura III.12 – Efeitos padronizados para o $\sigma_{\Delta E}$ 

Fonte: Autoria própria (2022)

Realizada a identificação dos fatores mais significativos, foi obtido modelo de regressão (Eq. III.15) codificado tendo como variável de resposta o desvio padrão.

$$\text{Ln}(\text{SD}_{\Delta E}) = -2.9583 - 0.1821 \text{ Gabarito} - 0.1769 \text{ Limpeza} - 0.0941 \text{ Abertura} \quad (\text{III.15})$$

Foi realizado teste de adequação do modelo. Na tabela III.6, é possível observar o indicador de R-quadrado ajustado. Demonstrando uma adequação considerável, uma vez que espera-se um valor superior a 70%.

Tabela III.6 – Análise de adequação do modelo para $\sigma_{\Delta E}$

Delta E	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	3	56,146	18,715	12,39	0,017
Linearidade	3	56,146	18,715	12,39	0,017
Gabarito	1	25,328	25,328	16,77	0,015
Limpeza da peça	1	23,918	23,918	15,84	0,016
Abertura	1	6,766	6,766	4,48	0,102
Erro	4	6,041	1,510		
Total	7	62,187	0,000		
R^2_{adj}	83,00%				
AD ^a	0,556				
p-valor ^b	0,150				

Fonte: Autoria própria (2022)

Visto que o modelo gerado é confiável para demonstração do problema em questão, inicia-se a Etapa 5.2. A otimização a ser realizada será com vistas à elevação do índice Cgk. Para atingimento de tal objetivo, será aplicada a equação III.14 aos 9 cenários de otimização. Cada cenário contará com a covariável “temperatura da peça” elevada de forma unitária. A temperatura da peça será variada em um intervalo de 22°C a 30°C. Serão avaliadas duas variáveis de resposta: o ΔE tendo seu objetivo atingir o VVC; o desvio padrão do ΔE com objetivo de minimização.

Após as definições iniciais, foi gerado a otimização utilizando como covariável cada uma das 9 temperaturas em análise. O resultado da otimização, demonstrando o *setup* de fatores otimizada para cada temperatura é exposta na tabela III.7.

Tabela III.7 – Resultado computacional do *Desirability*

Temperatura da peça (°C)	Gabarito	Limpeza da peça	Abertura da lente (mm)	Qtd. medições	de ΔE Otimizado	$\sigma_{\Delta E}$ Otimizado	Desirability
22,0	Sem gabarito	Limpa peça	6,0	3	0,7909	0,0405	0,9721
23,0	Sem gabarito	Limpa peça	6,0	1	0,7610	0,0383	0,9619
24,0	Sem gabarito	Limpa peça	6,0	1	0,8038	0,0388	0,9764
25,0	Com gabarito	Limpa peça	16,0	1	0,7525	0,0376	0,9526
26,0	Com gabarito	Limpa peça	16,0	1	0,7953	0,0381	0,9926
27,0	Com gabarito	Limpa peça	6,0	1	0,7870	0,0354	0,998
28,0	Com gabarito	Limpa peça	6,0	1	0,8298	0,0359	0,9564
29,0	Com gabarito	Limpa peça	16,0	3	0,7868	0,0424	0,9511
30,0	Com gabarito	Limpa peça	6,0	3	0,7784	0,0397	0,9696

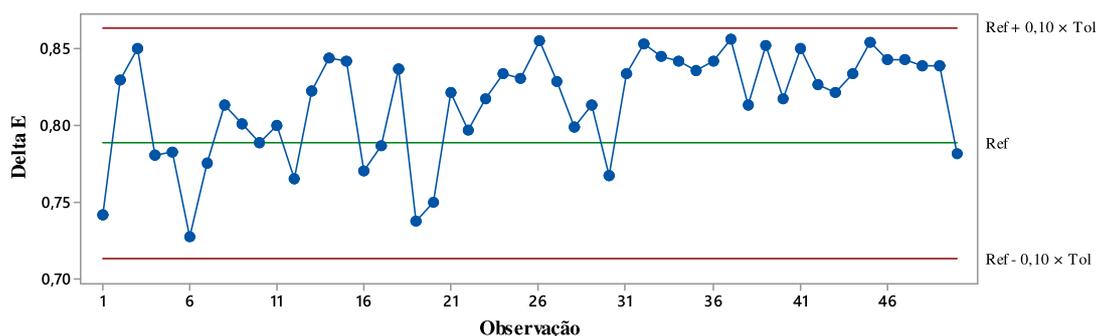
Fonte: Autoria própria (2022)

Desenvolvida as otimizações, foi possível observar a variação de combinações ótimas para cada uma das temperaturas. Se fez necessário realizar uma validação de que as combinações demonstradas, de fato, direcionam a medição para o Target (VVC). A validação também engloba a minimização da variabilidade do processo de medição através da suavização do desvio padrão.

Uma nova rodada de medições pode ser executada para validação da otimização computacional. A combinação selecionada para validação foi aquela que apresentou a maior média de *Desirability*, sendo o *setup*: com gabarito, com limpeza de peça, quantidade de medições igual a um e abertura ótica de 6mm. Além disso, o intervalo de temperatura para essa combinação de fatores para medição selecionado é passivo de controle. Para este caso, o intervalo de 27°C a 28°C é de fácil manutenção, devido a possibilidade de execução da medição em sala climatizada, proporcionando estabilidade à temperatura da peça.

O *setup* a ser validado, não foi contemplado no DOE. Dessa forma, a peça foi colocada em uma sala climatizada com temperatura ambiente de 27°C por um período de 30 minutos para que sua temperatura fosse estabilizada. Aferiu-se sua temperatura com um pirômetro para garantia que a temperatura estivesse dentro da esperada. A partir de então foram realizadas 50 medições em ambiente com temperatura controlada. Na figura III.13 é mostrada os resultados das medições.

Figura III.13 – Carta de controle das aferições para validação



Fonte: Autoria própria (2022)

Pode-se notar, com a nova combinação para validação, que a tendência antes existente, mostrada na figura III.8 para as rodadas de teste executadas, não está mais presente. Além disso, a dispersão de forma aleatória dos valores em torno do VVC existe e se encontra dentro dos limites de tolerância para o estudo tipo 1.

Dessa forma, é necessário observar e comparar o valor de Cgk calculado com os valores obtidos da otimização computacional através da Eq. CGK e o Cgk da nova combinação para validação. O índice Cgk para o resultado computacional foi de 0,37 e o encontrado na validação foi de 0,48.

Para realizar essa comparação, o teste de hipótese pode ser utilizado. Como em ambos os casos o Cgk é calculado utilizando a média dos ΔE 's o teste de hipóteses pode ser conduzido em torno dos seus valores. A variável observada será a média dos 50 valores de DeltaE obtidos nas aferições para validação já expostos na figura III.13. A comparação se dará em relação à média dos DeltaE's expostos na tabela III.7 das temperaturas 27°C e 28°C obtidos computacionalmente. Sendo $H_0: \mu_{50\Delta E} = \mu_{\Delta E^*}$ e $H_1: \mu_{50\Delta E} \neq \mu_{\Delta E^*}$, onde:

$\mu_{\Delta E^*}$: média dos valores computacionais de otimização de ΔE 's utilizando *Desirability*;
 $\mu_{50\Delta E}$: média das 50 medições de ΔE aferidas para validação da combinação otimizada.

Realizado o teste de hipóteses, foi obtido um p-valor para o teste de hipótese de 0,195. Dessa forma, o p-valor para o teste de hipóteses se apresentou com valor superior a 0,05 (p-valor > 0,05). Assim, mesmo com tamanho amostral de 50, não houve evidência estatística suficiente para se rejeitar H_0 . Com isso, pode-se assumir que os dois C_{gk} são estatisticamente iguais, considerando um nível de significância de 5%. Validam-se os valores de aferição de ΔE em relação aos valores computacionais otimizados com a combinação de fatores encontrada no modelo.

3.6 CONCLUSÕES

A tomada de decisão é prejudicada quando em um sistema de medição a variação é tida como considerável. Com isso, a variação de características inerentes às peças pode ser interpretada como originária do processo de fabricação, quando, na verdade, está sendo proporcionada por falhas no sistema de medição. Nesse sentido, o objetivo do estudo em questão foi propor um método para planejar, executar, analisar e mitigar simultaneamente o erro sistemático e aleatório, otimizando o SM. Foi utilizado o *design* de experimentos, cartas de tolerância e índices de capacidade para que o *desirability* fosse realizado. Uma peça do processo foi selecionada para que todas as medições fossem realizadas e foi utilizado um mesmo equipamento de medição, o espectrofotômetro, para coleta de dados e validação do sistema de medição. Após a análise dos dados, as principais contribuições são destacadas:

1. O modelo PISMOEA é significativo para identificar as fontes críticas de erro de medição;
2. A matriz esforço x impacto proporciona uma necessária base para priorização dos fatores a serem estudados;
3. A inserção de classificação dos tipos de variáveis no ishikawa promove uma fácil identificação das principais variáveis de ruído que podem interferir no processo de medição;
4. O índice C_{gk} é a métrica principal para avaliar a performance de medição, considerando os erros aleatórios e sistemáticos;

5. O *design* experimental foi essencial para validar as fontes vitais de erro de medição. Nessa pesquisa, o *design* experimental foi aplicado, testando, através da estrutura de fatorial fracionado, combinações do sistema de medição, objetivando a redução do erro de medição, conseqüentemente elevando o índice Cgk;
6. Para minimizar erros sistemáticos e aleatórios de medição de tonalidade de peças de revestimentos cerâmicos de pequeno formato na cor branca, a temperatura da peça, uma variável de ruído com alta correlação com a variação do Delta E, deve ser controlada. Foi visto que, havendo variação de temperatura em 1°C, para uma faixa de 22°C a 30°C, o sistema de medição pode agir de forma errônea a reprovar ou aprovar a peça.
7. A utilização de um gabarito para garantir a centralização da medição na peça se mostrou importante;
8. A melhor combinação a ser utilizada para minimizar erros sistemáticos e aleatórios da medição, deve ser: com gabarito, abertura ótica em 6mm e realização de limpeza de peça antes da medição, mantendo uma temperatura controlada da peça entre 27°C e 28°C.

Para trabalhos futuros recomenda-se:

1. Avaliar o sistema de medição para outras tonalidades de cerâmica: azul, verde, vermelho, preto e amarelo;
2. Desenvolver um modelo de gabarito de medição que possibilite uma maior facilidade para ser utilizado na linha de produção;
3. Avaliar outros tipos de espectrofotômetros, comparando os índices Cgk de cada um deles;
4. Estender o estudo de erro de sistema de medição para porcelanatos de grandes formatos.

5.6 Referências

AI, Jiaoyan; LIU, Di; ZHU, Xuefeng. Combination of Wavelet Analysis and Color Applied to Automatic Color Grading of Ceramic Tiles. In: **ICPR (3)**. 2004. p. 235-238.

AIAG. **Measurement systems analysis: reference manual**. 4th. ed. Detroit, MI, USA: Automotive Industry Action Group, 2010.

AL-REFAIE, A.; BATA, N. Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 43, n. 6, p. 842–851, 2010.

AWAD, M. *et al.* A measurement system analysis approach for hard-to-repeat events. **Quality Engineering**, v. 21, n. 3, p. 300–305, 2009.

BELLOTTI, D. *et al.* RSM approach for stochastic sensitivity analysis of the economic sustainability of a methanol production plant using renewable energy sources. **Journal of Cleaner Production**, v. 240, p. 117947, dez. 2019.

CZARSKI, A. Comparative analysis of methods of hardness assessment. **Archives of Materials Science and Engineering**, v. 40, n. 2, p. 94–97, 2009.

DESHPANDE, A. A. *et al.* Applications of Gage Reproducibility & Repeatability (GRR): Understanding and Quantifying the Effect of Variations from Different Sources on a Robust Process Development. **Organic Process Research & Development**, v. 18, n. 12, p. 1614–1621, 19 dez. 2014.

FAIRCHILD, Mark D. Color appearance models and complex visual stimuli. **Journal of Dentistry**, v. 38, p. e25-e33, 2010.

FLYNN, M. J.; SARKANI, S.; MAZZUCHI, T. A. Regression analysis of automatic measurement systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 58, n. 10, p. 3373–3379, 2009.

GASPARIN, S. *et al.* Quality control and process capability assessment for injection-moulded micro mechanical parts. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 66, n. 9–12, p. 1295–1303, 2013.

HOSSAIN, S.M.Z.; SULTANA, M.M.N; HOSSAIN, S.A.R. Optimization of microalgal biomass and lipid productivities for bioenergy production using central composite design with desirability function, **Int. J. Energy Res.** 45 (2021) 17342–17357.

JOINER, Andrew *et al.* A review of tooth colour and whiteness. **Journal of dentistry**, v. 36, p. 2-7, 2008.

KIRILLOVA, Nataliya P. *et al.* New perspectives to use Munsell color charts with electronic devices. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 155, p. 378-385, 2018.

KRISHNAMOORTHY, M.; MALAYALAMURTHI, R.; SHAMEER, P.M. RSM based optimization of performance and emission characteristics of DI compression ignition engine fuelled with diesel/aegle marmelos oil/diethyl ether blends at varying compression ratio, injection pressure and injection timing, **Fuel**. 221 (2018) 283–297.

LAYADI, T. M.; CHAMPENOIS, G.; MOSTEFAI, M. Economic and ecological optimization of multi-source systems under the variability in the cost of fuel. **Energy Conversion and Management**, v. 177, p. 161–175, dez. 2018.

MÄDER, O. *et al.* Metrology study of high precision mm parts made by the deep x-ray lithography (LIGA) technique. **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 2, 2009.

MAJESKE, K. D. Approval Criteria for Multivariate Measurement Systems. **Journal of Quality Technology**, v. 40, n. 2, p. 140–153, 21 abr. 2008.

MARINKOVIC, V. A novel desirability function for multi-response optimization and its application in chemical engineering, **Chem. Ind. Chem. Eng. Q.** 26 (2020) 309–319.

MEYER, P. *et al.* Comparison of measurement methods for microsystem components: Application to microstructures made by the deep x-ray lithography process (x-ray LIGA). **Measurement Science and Technology**, v. 20, n. 8, 2009.

MINITAB. **A type 1 gage study**. Disponível em: <<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/measurement-system-analysis/supporting-topics/other-gage-studies-and-measures/type-1-gage-study/>>. Acesso em: 19 jan. 2023.

MOBIN, M.; MOUSAVI, S.M.; KOMAKI, M.; TAYANA, M. A hybrid desirability function approach for tuning parameters in evolutionary optimization algorithms, **Measurement**. 114 (2018) 417–427.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8th. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. v. 2

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5th. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.

NANDINI, V. *et al.* A review on applications of machine vision systems in industries. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 9, n. 48, p. 1-5, 2016.

PATHARE, Pankaj B.; OPARA, Umezuruike Linus; AL-SAID, Fahad Al-Julanda. Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: a review. **Food and bioprocess technology**, v. 6, p. 36-60, 2013.

PERUCHI, R. S. *et al.* A new multivariate gage R&R method for correlated characteristics. **International Journal of Production Economics**, v. 144, n. 1, p. 301–315, 2013.

RAJA, V. L. Surface grading using deep learning approach for ceramic tiles. **International journal of advances in signal and image sciences**, v. 4, n. 1, p. 1-7, 2018.

SAIKAEW, C. An implementation of measurement system analysis for assessment of machine and part variations in turning operation. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 118, n. October 2017, p. 246–252, 2018.

SANGHADIYA, Foram; MISTRY, Darshana. Surface defect detection in a tile using digital image processing: Analysis and evaluation. **International Journal of Computer Applications**, v. 116, n. 10, 2015.

TABATABAIAN, Farhad *et al.* Visual and digital tooth shade selection methods, related effective factors and conditions, and their accuracy and precision: A literature review. **Journal of Esthetic and Restorative Dentistry**, v. 33, n. 8, p. 1084-1104, 2021.

UDROIU, R.; BRAGA, I. C. System performance and process capability in additive manufacturing: Quality control for polymer jetting. **Polymers**, v. 12, n. 6, 2020.

VAGOVSKÝ, J.; BURANSKÝ, I.; GÖRÖG, A. Evaluation of measuring capability of the optical 3D scanner. **Procedia Engineering**, v. 100, n. January, p. 1198–1206, 2015.

VICHI, Alessandro et al. Color related to ceramic and zirconia restorations: a review. **Dental materials**, v. 27, n. 1, p. 97-108, 2011.

WANG, F. K.; CHIEN, T. W. Process-oriented basis representation for a multivariate gauge study. **Computers and Industrial Engineering**, v. 58, n. 1, p. 143–150, 2010.

WEAVER, B. P. et al. A Bayesian approach to the analysis of gauge R&R data. **Quality Engineering**, v. 24, n. 4, p. 486–500, 2012.

WEISSMAN, S. A.; ANDERSON, N. G. Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications. **Organic Process Research & Development**, v. 19, n. 11, p. 1605–1633, 20 nov. 2015.

YU, N. *et al.* Effects of auxiliary heat on warpage and mechanical properties in carbon fiber/ABS composite manufactured by fused deposition modeling. **Materials and Design**, v. 195, p. 108978, 2020.

PARTE III – CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1 Conclusões da pesquisa

Neste trabalho foi possível observar, utilizando ferramentas e indicadores de controle estatístico de processo, que o processo produtivo em questão não se encontra como um processo capaz. Entretanto, essa incapacidade associada ao processo gerou um questionamento quanto à influência do sistema de medição na variabilidade do indicador avaliado, o ΔE .

Foi iniciado um estudo GR&R para o sistema de medição, avaliando sua repetibilidade e reprodutibilidade. O estudo foi composto por três rodadas de medições. Na primeira, apropriou-se do processo produtivo, obtendo um índice de precisão para tolerância de 75,56%, considerado inaceitável. Análise das causas através do modelo PISMOEA e correções foram feitas. Na segunda rodada, com as ações corretivas, o índice melhorou para 35,97%, mas ainda considerado alto. Duas medições adicionais foram realizadas, resultando em 26,28% de índice de precisão para tolerância.

Embora o índice de precisão para tolerância final esteja em uma faixa "marginal", é considerado um melhoramento em comparação ao início. É fundamental destacar a limpeza da peça, pois a remoção de impurezas é crucial para uma leitura precisa do espectrofotômetro. Além disso, aferições devem ser sempre centralizadas na peça, utilizando um acessório que permita esse direcionamento.

O terceiro artigo contou com um estudo tipo 1. A importância do design experimental foi crucial na verificação das fontes de erro na medição. Neste estudo, aplicou-se o design experimental, utilizando uma estrutura fatorial fracionada para testar combinações do sistema de medição, com o objetivo de minimizar o erro de medição e, consequentemente, aumentar o índice C_{gk}. Para reduzir erros sistemáticos e aleatórios na medição da tonalidade de revestimentos cerâmicos pequenos na cor branca, é necessário controlar a temperatura da peça. Isso porque a temperatura é uma variável ruidosa que tem forte correlação com a variação do Delta E. Observou-se que variações de temperatura de apenas 1°C, entre 22°C e 30°C, podem levar ao funcionamento incorreto do sistema de medição, resultando em aprovação ou reprovação equivocadas das peças. A melhor combinação a ser utilizada para minimizar erros sistemáticos e aleatórios da medição, deve ser: com gabarito, abertura ótica em 6mm e realização de limpeza de peça antes da medição, mantendo uma temperatura controlada da peça entre 27°C e 28°C.

4.2 Propostas para trabalhos futuros

Para que se evolua com a pesquisa e com o acréscimo de conhecimento nos itens pesquisados, recomendam-se algumas propostas para trabalhos futuros:

1. análise mais aprofundada na causa raiz da variação no processo;
2. busca por uma correlação entre as variáveis do processo e as coordenadas do sistema CIELAB para prever o comportamento dos defeitos com base no processo produtivo;
3. expandir o estudo para outros formatos de cerâmica e cores (azul, verde, vermelho, preto e amarelo);
4. uma análise mais minuciosa tendo como ponto de partida os valores da terceira rodada de medições do estudo GR&R do artigo 2, para redução do índice de precisão para tolerância;
5. comparação entre os sistemas de medição de tonalidade de cor com e sem fio;
6. Desenvolver um modelo de gabarito de medição que possibilite uma maior facilidade para ser utilizado na linha de produção;
7. Estender o estudo de erro de sistema de medição para porcelanatos de grandes formatos.

5. REFERÊNCIAS

AGRAFIOTIS, Christos; TSOUTSOS, Theocharis. Energy saving technologies in the European ceramic sector: a systematic review. **Applied thermal engineering**, v. 21, n. 12, p. 1231-1249, 2001.

AL-REFAIE, Abbas; BATA, Nour. Evaluating measurement and process capabilities by GR&R with four quality measures. **Measurement**, v. 43, n. 6, p. 842-851, 2010.

ARAÚJO, Lavínia Maria Mendes et al. New indicators for measurement error detection in GR&R studies. **Measurement**, v. 140, p. 557-564, 2019.

ASPLUND, Matthias; LIN, Jing. Evaluating the measurement capability of a wheel profile measurement system by using GR&R. **Measurement**, v. 92, p. 19-27, 2016.

CHEN, Shun-Hsing et al. Performance evaluation for introducing statistical process control to the liquid crystal display industry. **International Journal of Production Economics**, v. 111, n. 1, p. 80-92, 2008.

CZARSKI, A. Comparative analysis of methods of hardness assessment. **Archives of Materials Science and Engineering**, v. 40, n. 2, p. 94-97, 2009.

FLYNN, M. J.; SARKANI, S.; MAZZUCHI, T. A. Regression analysis of automatic measurement systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 58, n. 10, p. 3373-3379, 2009.

HOSSAIN, S.M.Z.; SULTANA, M.M.N; HOSSAIN, S.A.R. Optimization of microalgal biomass and lipid productivities for bioenergy production using central composite design with desirability function, **Int. J. Energy Res.** 45 (2021) 17342-17357.

KRISHNAMOORTHY, M.; MALAYALAMURTHI, R.; SHAMEER, P.M. RSM based optimization of performance and emission characteristics of DI compression ignition engine fuelled with diesel/aegle marmelos oil/diethyl ether blends at varying compression ratio, injection pressure and injection timing, **Fuel**. 221 (2018) 283-297.

LÓPEZ, Fernando et al. Fast surface grading using color statistics in the CIE Lab space. In: **Pattern Recognition and Image Analysis: Second Iberian Conference, IbPRIA 2005, Estoril, Portugal, June 7-9, 2005, Proceedings, Part II 2**. Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 666-673.

MARINKOVIC, V. A novel desirability function for multi-response optimization and its application in chemical engineering, **Chem. Ind. Chem. Eng. Q.** 26 (2020) 309-319.

MOBIN, M.; MOUSAVI, S.M.; KOMAKI, M.; TAYANA, M. A hybrid desirability function approach for tuning parameters in evolutionary optimization algorithms, **Measurement**. 114 (2018) 417-427.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 5th. ed. [s.l.] John Wiley & Sons, 2011.

N. POLITIS, Stavros et al. Design of experiments (DoE) in pharmaceutical development. **Drug development and industrial pharmacy**, v. 43, n. 6, p. 889-901, 2017.

PARK, Chanseok et al. Improved bootstrap confidence intervals for the process capability index Cpk. **Communications in Statistics-Simulation and Computation**, v. 49, n. 10, p. 2583-2603, 2020.

PEARN, Wen Lea; LIN, P. C. Testing process performance based on capability index Cpk with critical values. **Computers & Industrial Engineering**, v. 47, n. 4, p. 351-369, 2004.

PERUCHI, Rogerio Santana et al. < b> Comparisons of multivariate GR&R methods using bootstrap confidence interval. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 38, n. 4, p. 489-496, 2016.

VAGOVSKÝ, J.; BURANSKÝ, I.; GÖRÖG, A. Evaluation of measuring capability of the optical 3D scanner. **Procedia Engineering**, v. 100, n. January, p. 1198–1206, 2015.

WIŚNIEWSKA, Kornelia; PICHÓR, Waldemar; KŁOSEK-WAWRZYN, Ewelina. Impact of the addition of dolomite to cream-firing clays on the technological and color properties of sintered ceramics. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, v. 18, n. 3, p. 1063-1073, 2021.

WU, Chien-Wei; ASLAM, Muhammad; JUN, Chi-Hyuck. Variables sampling inspection scheme for resubmitted lots based on the process capability index Cpk. **European Journal of Operational Research**, v. 217, n. 3, p. 560-566, 2012.

YEH, Tsu-Ming; SUN, Jia-Jeng. Using the Monte Carlo simulation methods in gauge repeatability and reproducibility of measurement system analysis. **Journal of applied research and technology**, v. 11, n. 5, p. 780-796, 2013.

6. APÊNDICES

6.1 APÊNDICE II.1 – TABELA DE MEDIÇÕES PARA ESTUDO DE CAPABILIDADE DE PROCESSO

Nº Medição	DELTA E
1	0,62
2	0,30
3	0,21
4	0,12
5	0,39
6	0,44
7	0,60
8	0,37
9	0,46
10	0,42
11	0,45
12	0,69
13	0,34
14	0,38
15	0,33
16	0,67
17	0,55
18	0,71
19	0,63
20	0,48
21	0,61
22	0,53
23	0,50
24	0,64
25	0,37
26	0,52
27	0,15
28	0,31
29	0,65
30	0,49
31	0,42
32	0,60
33	0,47
34	0,32
35	0,46
36	0,66
37	0,27
38	0,05
39	0,68
40	0,33
41	0,36
42	0,13
43	0,44
44	0,38
45	0,48
46	0,32
47	0,09
48	0,20

49	0,63
50	0,59
51	0,20
52	0,16
53	0,18
54	0,44
55	0,16
56	0,42
57	0,13
58	0,33
59	0,35
60	0,26
61	0,07
62	0,36
63	0,23
64	0,41
65	0,48
66	0,32
67	0,24
68	0,40
69	0,35
70	1,62
71	1,85
72	0,10
73	0,25
74	0,32
75	0,33
76	0,27
77	0,37
78	0,22
79	0,63
80	0,33
81	0,55
82	0,67
83	0,33
84	0,58
85	0,52
86	0,55
87	0,53
88	0,59
89	0,62
90	0,27
91	0,71
92	0,55
93	0,42
94	0,42
95	0,35
96	0,57
97	0,39
98	0,50
99	0,40
100	0,18
101	0,53
102	0,39
103	0,93
104	0,35
105	0,58
106	1,17
107	1,09
108	1,40

109	0,16
110	0,15
111	0,26
112	0,52
113	0,48
114	0,41
115	0,71
116	0,70
117	0,68
118	1,94
119	1,85
120	2,33
121	0,41
122	0,20
123	0,20
124	0,32
125	0,51
126	0,27
127	0,70
128	0,45
129	0,30
130	0,28
131	0,43
132	0,20
133	0,31
134	0,35
135	0,53
136	0,64
137	0,18
138	0,65
139	0,37
140	0,33
141	0,25
142	0,32
143	0,24
144	0,29
145	0,41
146	0,37
147	0,21
148	0,31
149	0,73
150	0,55
151	0,67
152	0,54
153	0,74
154	0,31
155	0,17
156	0,22
157	0,22
158	0,70
159	0,70
160	0,30
161	0,26
162	0,32
163	0,43
164	0,41
165	0,21
166	0,49
167	0,43
168	0,12

169	0,39
170	0,25
171	0,27
172	0,60
173	0,32
174	0,23
175	0,61
176	0,64
177	0,72
178	0,39
179	0,10
180	0,51
181	0,61
182	0,64
183	0,72
184	0,26
185	0,71
186	0,56
187	0,55
188	0,70
189	0,40
190	0,39
191	0,34
192	0,53
193	0,47
194	0,64
195	0,60
196	0,37
197	0,41
198	0,47
199	0,58
200	0,44
201	0,45
202	0,46
203	0,40
204	0,31
205	0,26
206	0,61
207	0,69
208	0,65
209	0,56
210	0,34
211	0,62
212	0,30
213	0,19
214	0,54
215	0,33
216	0,66
217	0,29
218	0,51
219	0,10
220	0,46
221	0,06
222	0,64
223	0,60
224	0,40
225	0,12
226	0,30
227	0,43
228	0,13

229	0,59
230	0,15
231	0,27
232	0,68
233	0,66
234	0,46
235	0,13
236	0,42
237	0,23
238	0,53
239	0,41
240	0,69
241	0,50
242	0,46
243	0,73
244	0,27
245	0,52
246	0,10
247	0,75
248	0,60
249	0,67
250	0,69
251	0,65
252	0,23
253	0,43
254	0,42
255	0,54
256	0,45
257	0,10
258	0,21
259	0,33
260	0,31
261	0,28
262	0,62
263	0,14
264	0,62
265	0,72
266	0,69
267	0,41
268	0,54
269	0,56
270	0,32
271	0,27
272	0,67
273	0,62
274	0,09
275	0,05
276	0,25
277	0,32
278	0,18
279	0,48
280	0,13
281	0,26
282	0,23
283	0,73
284	0,44
285	0,52
286	0,53
287	0,26
288	0,43

289	0,69
290	0,68
291	0,27
292	0,59
293	0,28
294	0,67
295	0,31
296	0,25
297	0,47
298	0,16
299	0,34
300	0,16
301	0,29
302	0,37
303	0,31
304	0,29
305	0,17
306	0,23
307	0,29
308	0,41
309	0,36
310	0,63
311	0,44
312	0,54
313	0,38
314	0,65
315	0,45
316	0,47
317	0,56
318	0,49
319	0,53
320	0,12
321	0,44
322	0,11
323	0,09
324	0,31
325	0,44
326	0,28
327	0,16
328	0,42
329	0,31
330	0,42
331	0,24
332	0,12
333	0,36
334	0,43
335	0,17
336	0,31
337	0,65
338	0,58
339	0,67
340	0,42
341	0,26
342	0,15
343	0,15
344	0,67
345	0,49
346	0,64
347	0,33
348	0,47

6.2 APÊNDICE II.2 – TABELA DE MEDIÇÕES DA PRIMEIRA RODADA DO ESTUDO GR&R

PEÇA	OPERADOR	DELTA E
1	01	0,17
2	01	0,33
3	01	0,42
4	01	0,25
5	01	0,11
6	01	0,14
7	01	0,49
8	01	0,30
9	01	0,15
10	01	0,44
10	01	0,36
8	01	0,30
9	01	0,19
7	01	0,35
5	01	0,12
6	01	0,07
3	01	0,25
2	01	0,10
4	01	0,23
1	01	0,07
9	01	0,14
10	01	0,39
5	01	0,12
6	01	0,15
7	01	0,42
8	01	0,30
4	01	0,21
3	01	0,44
2	01	0,12
1	01	0,09
1	02	0,23
2	02	0,37
3	02	0,35
4	02	0,28
5	02	0,38
6	02	0,06
7	02	0,15
8	02	0,27
9	02	0,25
10	02	0,12
10	02	0,12
8	02	0,15
9	02	0,25
7	02	0,22
5	02	0,28
6	02	0,05
3	02	0,31
2	02	0,25
4	02	0,05
1	02	0,23
9	02	0,16
10	02	0,16
5	02	0,27
6	02	0,12

7	02	0,22
8	02	0,28
4	02	0,15
3	02	0,26
2	02	0,32
1	02	0,21
1	03	0,16
2	03	0,11
3	03	0,32
4	03	0,08
5	03	0,25
6	03	0,08
7	03	0,24
8	03	0,27
9	03	0,26
10	03	0,20
10	03	0,24
8	03	0,27
9	03	0,04
7	03	0,22
5	03	0,30
6	03	0,24
3	03	0,28
2	03	0,17
4	03	0,12
1	03	0,12
9	03	0,28
10	03	0,16
5	03	0,22
6	03	0,09
7	03	0,20
8	03	0,24
4	03	0,12
3	03	0,27
2	03	0,10
1	03	0,12

Fonte: Autoria própria (2023)

6.3 APÊNDICE II.3 – TABELA DE MEDIÇÕES DA SEGUNDA RODADA DO ESTUDO GR&R

Operador	Peça	Medição
1	4	0,15
1	1	0,35
1	5	0,12
1	6	0,10
1	7	0,20
1	9	0,15
1	2	0,11
1	8	0,12
1	10	0,42
1	3	0,11
1	10	0,43
1	8	0,09
1	6	0,13
1	5	0,07
1	7	0,25
1	3	0,11
1	4	0,18
1	2	0,20
1	1	0,36
1	9	0,15
1	2	0,41
1	7	0,22
1	4	0,17
1	1	0,35
1	5	0,11
1	10	0,38
1	9	0,15
1	6	0,13
1	8	0,10
1	3	0,10
2	1	0,33
2	9	0,06
2	6	0,09
2	3	0,10
2	5	0,12
2	8	0,10
2	4	0,13
2	2	0,12
2	10	0,41
2	7	0,20
2	7	0,20
2	3	0,09
2	9	0,15
2	5	0,07
2	8	0,08
2	6	0,08
2	1	0,31
2	2	0,14
2	10	0,30
2	4	0,20
2	3	0,10
2	2	0,15
2	9	0,13
2	8	0,15

2	5	0,18
2	4	0,17
2	1	0,33
2	6	0,07
2	7	0,26
2	10	0,41
3	2	0,21
3	7	0,19
3	8	0,12
3	3	0,09
3	5	0,06
3	1	0,34
3	6	0,19
3	4	0,33
3	9	0,15
3	10	0,42
3	2	0,21
3	7	0,23
3	9	0,16
3	6	0,15
3	5	0,08
3	10	0,44
3	4	0,16
3	3	0,15
3	1	0,38
3	8	0,10
3	10	0,43
3	3	0,16
3	9	0,16
3	5	0,08
3	4	0,20
3	1	0,39
3	2	0,16
3	8	0,07
3	7	0,29
3	6	0,12

Fonte: Autoria própria (2023)

6.4 APÊNDICE II.4 – TABELA DE MEDIÇÕES DA TERCEIRA RODADA DO ESTUDO GR&R

Operador	Peça	Medição
1	4	0,152971
1	1	0,348326
1	5	0,124032
1	6	0,10282
1	7	0,199025
1	9	0,148982
1	2	0,114455
1	8	0,121935
1	10	0,42473
1	3	0,113669
1	10	0,428184
1	8	0,08787
1	6	0,126617
1	5	0,071259
1	7	0,247586
1	3	0,113669
1	4	0,177482
1	2	0,204695
1	1	0,362651
1	9	0,152176
1	2	0,185529
1	7	0,216988
1	4	0,167631
1	1	0,35448
1	5	0,110835
1	10	0,384193
1	9	0,146579
1	6	0,130127
1	8	0,099743
1	3	0,095148
2	1	0,331964
2	9	0,064031
2	6	0,08775
2	3	0,096437
2	5	0,12083
2	8	0,10247
2	4	0,133041
2	2	0,122066
2	10	0,412795
2	7	0,202237
2	7	0,202485
2	3	0,09434
2	9	0,148997

2	5	0,070711
2	8	0,07874
2	6	0,08124
2	1	0,31209
2	2	0,135647
2	10	0,302655
2	4	0,203224
2	3	0,1
2	2	0,148997
2	9	0,134536
2	8	0,146287
2	5	0,180555
2	4	0,174642
2	1	0,328177
2	6	0,070711
2	7	0,256125
2	10	0,412432
3	2	0,209045
3	7	0,192354
3	8	0,117047
3	3	0,091104
3	5	0,06
3	1	0,344238
3	6	0,192094
3	4	0,165081
3	9	0,151327
3	10	0,424264
3	2	0,211896
3	7	0,233452
3	9	0,156205
3	6	0,15
3	5	0,08124
3	10	0,437493
3	4	0,156525
3	3	0,148661
3	1	0,384838
3	8	0,103441
3	10	0,434626
3	3	0,155563
3	9	0,156205
3	5	0,083066
3	4	0,199499
3	1	0,391024
3	2	0,161555
3	8	0,067823
3	7	0,294279
3	6	0,117047

6.5 APÊNDICE II.5 – ARTIGO DE REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA – MOAGEM DE BOLAS

MOAGEM DE BOLAS A ÚMIDO: UMA REVISÃO

1.1 Introdução

A Indústria de placas para revestimentos cerâmicos vem a cada dia tendo, no Brasil, uma maior representatividade e capacidade produtiva (Prado *et al* 2012). O seu processo produtivo é bastante complexo, uma vez que há duas células produtivas: as fabricações de pó atomizado e de esmalte cerâmico. Essas são fornecedoras para a fábrica de cerâmicas e porcelanatos em si. Inicia-se na coleta de matéria-prima nas suas jazidas, passando pelos moinhos de bolas, atomização, decoração e queima (Motta *et al* 2001). Para se conseguir obter um produto que atenda às normas regulamentadores e as expectativas dos clientes, o processo produtivo deve buscar uma sintonia entre suas operações. A operação de moagem é crucial para o atendimento dos critérios técnicos de qualidade (Neto 1994).

A moagem de bolas é um processo que se utiliza do equipamento moinho de bolas, que é um tambor rotativo revestido, tendo no seu interior um carregamento de esferas nominadas de corpos moedores e com o material a ser moído (Neto 1994). A operação de moagem pode ser classificada, segundo critérios de dimensões iniciais e finais de suas partículas, em três grandes grupos: Britagem, moagem fina e micronização. Para a moagem fina, sua classificação é dividida em duas subclasificações: moagem a seco e moagem úmida. A moagem a úmido tem sua principal característica pela presença de um elemento aquoso como componente do material a ser moído, tendo sua dimensão final micrométrica. A moagem a seco não tem presença de elemento aquoso, proporcionando ao final do processo um produto a nível de pó (Neto 1994).

A partir disso, alguns autores buscaram entender como as variáveis do processo de moagem impactam em resultados dessa operação (Broseghini *et al* 2016; Joyce *et al* 2021; Makokha *et al* 2012; Amirjan 2014). Muitos destes estudos, que são estatísticos, são desenvolvidos para materiais minerais isolados, tais como Quartzo (Tangsathitkulchai, C 2003), Calcita (Toraman *et al* 2011) e Gibbsita (Mori *et al* 2004). Porém, há oportunidade de desenvolver uma análise da distribuição destes estudos ao longo do tempo, identificando quais os principais materiais e métodos estatísticos utilizados.

O método da Revisão Sistemática da Literatura pode ser aplicado para que se tenha um arsenal de respostas propostas a uma série de diferentes questões, tais questões respondidas que contribuam para o desenvolvimento internacional (Snilstveit *et al* 2012). Além disso, a abordagem sistemática para revisão foca sua atenção em sintetizar evidências qualitativas, aplicando princípios-chaves para se obter uma revisão abrangente, sistemática e transparente (Snilstveit *et al* 2012). Dessa forma, Tranfield e seus colaboradores (Tranfield *et al* 2003) propõem um método de Revisão Sistemática dividido em três estágios: Estágio 1: Planejando a Revisão; Estágio 2: Conduzindo a Revisão; e Estágio 3: Relatórios e disseminação.

No estágio 1, o planejamento da revisão deve ser feito analisando os principais autores e experts da área em estudo. Deve-se listar as principais linhas de pesquisas, e considerar estudos a serem incluídos ou não no desenvolvimento da revisão. Este estágio é constantemente realizado seguindo um fluxo de definição, clareamento e refinamento (Tranfield *et al* 2003).

Para o estágio 2, a revisão inicia através da definição das palavras chaves, dos termos de pesquisa, escopo de estudo e as discussões dentro do time de revisão. Depois decide-se as principais *strings* para pesquisa. Após a realização da pesquisa com base nas *strings* deve haver uma lista de artigos nos quais a revisão deve ser baseada. Assim, deve-se definir quais artigos serão inseridos ou não na revisão. Como se trata de uma definição muito subjetiva, essa classificação de inclusão deve ser feita não apenas por um revisor, mas por um time de revisão. Todos os objetos excluídos devem ser justificados. A partir daí, a análise qualitativa dos artigos refere-se à validação de que o artigo em questão tem seu design, conduta e análise buscando a minimização de erros. O julgamento de inclusão ou não do estudo deve ser feito com base em um conjunto de critérios pré-determinados que auxiliem o processo. Esses estudos serão relevantes à revisão se também forem relevantes à questão de pesquisa (Tranfield *et al* 2003).

E, por fim, no estágio 3, deve-se sempre buscar proporcionar ao leitor uma facilidade de entendimento, através de síntese dos extensos artigos iniciais. Para proporcionar essa facilidade, pode-se desenvolver um relatório em dois estágios. O primeiro estágio traria uma análise descritiva total dos estudos. O segundo seria uma realização de uma análise temática. Pode ser traçada uma estratégia para que a pesquisa realizada consiga ser substancialmente utilizada em problemas práticos (Tranfield *et al* 2003).

Dessa forma, é possível observar a importância do processo de moagem de bolas para a indústria cerâmica, bem como as suas classificações. Além disso, entendido o método de Revisão Sistemática da Literatura proposto por Tranfield e todos os seus estágios, define-se então os objetivos deste presente trabalho:

1. Resgatar o histórico de publicações científicas associadas ao processo de moagem utilizando bases confiáveis de informações;
2. Analisar quais os principais materiais minerais processados via moagem de bolas que foram estudados ao longo dos anos;
3. Analisar quais as principais variáveis estudadas para materiais minerais processados via moagem de bolas ao longo dos anos.

1.2 Materiais e métodos

1.2.1 Tipo de estudo

Trata-se de uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) que será desenvolvida baseada em: Definição clara, objetiva e estratégica das questões de pesquisa; Busca por informações em bases de dados confiáveis e relevantes; Adoção de critérios de seleção e exclusão de potenciais referências; Análise quantitativa de fatores já estudados que se tornam impactantes ao cenário.

1.2.2 Definição das questões de pesquisa

Para que se tenha um norte bem definido dentro de qualquer pesquisa, é necessário definir de forma clara qual questão de pesquisa busca-se responder. Na Revisão Sistemática da Literatura não é diferente, dessa forma o objetivo desta revisão é: Analisar, para o processo de moagem de bolas à úmido, quais materiais moídos e variáveis de processos foram estudados ao longo do tempo.

1.2.3 Definição de Strings de pesquisa

O processo de moagem na literatura tem uma variação de nomenclaturas, alguns autores (Heim, A et al 2003) utilizam "grinding" e outros utilizam "ball mill" (Broseghini, M et al 2016). Além disso, a moagem é utilizada para produção de diversos produtos, como chocolate e celulose, por isso limitamos aos produtos finais ou intermediários que se encaixam com o escopo da pesquisa: placas para revestimentos cerâmicos. Assim, foi

realizada combinações entre Processo e Produto para a realização das pesquisas na base de dados "Web of science".

PROCESSO	PRODUTO	STRING UTILIZADA
BALL MILL	TILE	BALL MILL AND TILE
GRIND*	PORCELAIN	BALL MILL AND PORCELAIN
	CERAMICS	BALL MILL AND CERAMICS
	SLURRY	BALL MILL AND SLURRY
	SLIP CASTING	BALL MILL AND SLIP CASTING
		GRIND* AND TILE
		GRIND* AND PORCELAIN
		GRIND* AND CERAMICS
		GRIND* AND SLURRY
		GRIND* AND SLIP CASTING

1.2.4 Definição de critérios de inclusão e exclusão

Os critérios de inclusão ou exclusão são baseados na questão de pesquisa. Dessa forma, foram incluídos apenas artigos científicos. Estes tratavam do processo de moagem de bolas via úmida, em forma de revisão ou não. Não houve limitação quanto às datas de publicação ou autores.

Foram excluídos artigos que se referiam aos métodos e processos de fabricação e projetos mecânicos de moinho de bolas. Também foram excluídos trabalhos que estudavam a operação de moagem a seco. Não foram incluídos trabalhos que englobavam a moagem de alimentos ou celulose.

1.3 Análise dos resultados e discussões

Com o levantamento bibliográfico utilizando as *strings* já informadas foram encontrados 507 resultados (Figura 2). Após a aplicação de critérios de inclusão e exclusão restaram 47 trabalhos. Com a leitura de seus resumos, a amostra de trabalhos limitou-se a apenas 20 trabalhos. Todos estes restantes atendem aos critérios de inclusão propostos neste trabalho.

Desenvolvendo-se uma análise bibliométrica, podemos ver a evolução de publicação ao longo dos anos. No eixo "x" há a representação de cada ano com presença de publicação, e no eixo "y" representa-se a quantidade de publicações por cada ano específico. Pode-se observar que há uma constância no número de publicações de 1985 à

2021. Vale salientar que os dados para o ano de 2021 ainda não estão finalizados devido a pesquisa ter sido realizada em 03/05/2021 via a base de dados da *Web Of Science*.

Publicações sobre Moagem de Bolas a úmido

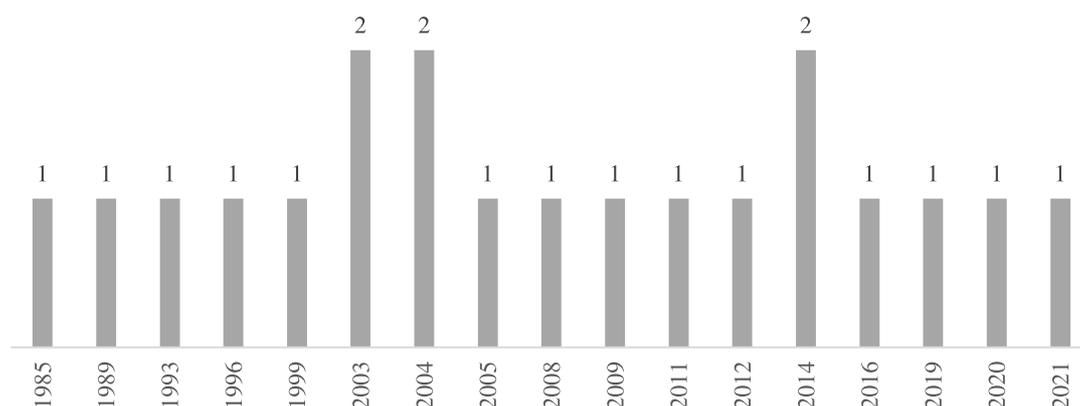


Figura 1: Análise bibliométrica por ano de publicação

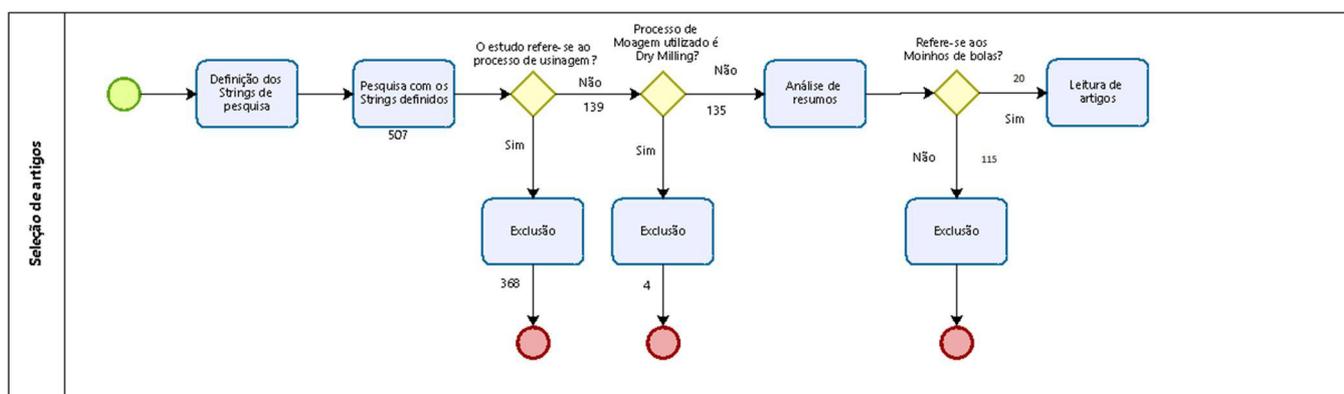


Figura 2: Fluxo de inclusões e exclusões de artigos da base de dados

A partir dos 20 artigos selecionados, buscou-se entender as relações e interligações entre si. Para isso, foi utilizado o programa computacional VosViewer, nele foi inserida a base de dados obtida através da plataforma *Web Of Science* utilizando um diagrama de redes. Neste diagrama, foram consideradas todas as palavras chaves de todos os 20 artigos. Assim, foi gerado o diagrama de redes mostrado na Figura 3. Pode-se notar

algumas palavras chaves que não foram inseridas nas *strings* de pesquisa mas que foram notadas após o diagrama de redes, tais como: *rheology*, *simulation* e *modeling*.



Figura 3 – Análise de redes

Dessa forma, foi desenvolvida uma matriz (Tabela 2) para se ter uma visão global da distribuição de trabalhos associando tipo de material e variáveis de processos. Para facilitar a visualização foi gerado um gráfico que elenca de forma decrescente a quantidade de estudos direcionados a determinadas variáveis.

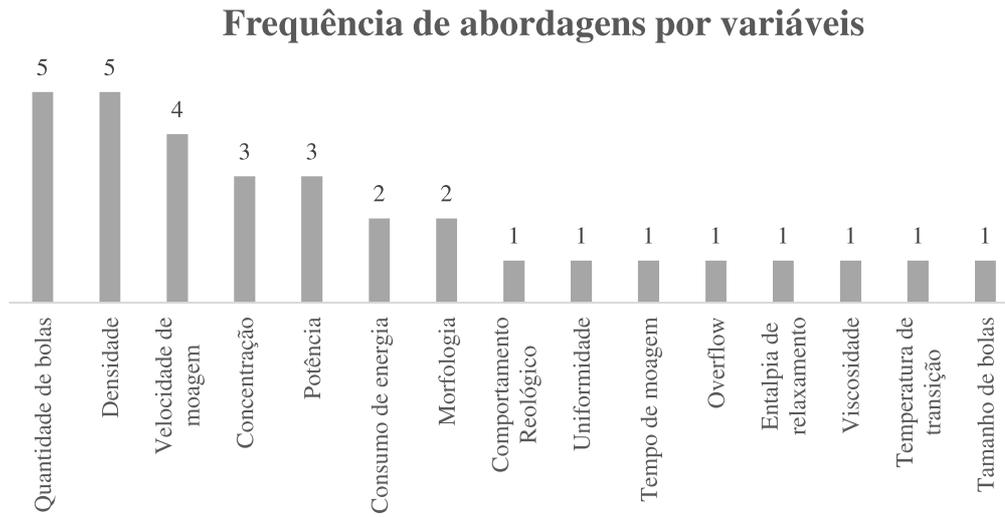


Figura 4 – Frequência de abordagens por variáveis

	Tamanho de bolas	Quantidade de bolas	Velocidade de moagem	Tempo de moagem	Temperatura de transição	Entalpia de relaxamento	Densidade	Viscosidade	Uniformidade	Morfologia	Consumo de energia	Overflow	Concentração	Potência	Comportamento Reológico
Fluoreto de cálcio	Broseghini, M <i>et al</i> 2016 [60 mm]	Broseghini, M <i>et al</i> 2016 [20%]	Broseghini, M <i>et al</i> 2016 [320, 600, 800 RPM]												
Vidro					Joyce, A <i>et al</i> 2021	Joyce, A <i>et al</i> 2021									
		Makokha, AB <i>et al</i> 2012 [20% a 35%]													
Mistura de argilas	Mulenga, FK <i>et al</i> 2014 [10 mm]	Mulenga, FK <i>et al</i> 2014 [20%]	Mulenga, FK <i>et al</i> 2014 [37,3, 40,5, 43,3, 45,9, 48,5 rpm]				GAO, MW <i>et al</i> 1993								
					Shi, FN <i>et al</i> 1999			Shi, FN <i>et al</i> 1999							
Alumínio				Amirjan, M <i>et al</i> 2014 [120 mm]					Amirjan, M <i>et al</i> 2014	Amirjan, M <i>et al</i> 2014					
Cerâmica	L.V. JX <i>et al</i> 2020 [20, 40, 60 mm]	L.V. JX <i>et al</i> 2020 [20%]	L.V. JX <i>et al</i> 2020 [15,8 rpm]	L.V. JX <i>et al</i> 2020 [9 horas]							L.V. JX <i>et al</i> 2020				
Minério de ferro	Faria, PMC <i>et al</i> 2020 [12,7, 17,0, 25,4, 30,0 mm]	Faria, PMC <i>et al</i> 2020 [31%]	Faria, PMC <i>et al</i> 2020 [46,5 rpm] [12,7 rpm]									Faria, PMC <i>et al</i> 2020	Faria, PMC <i>et al</i> 2020		
Pó inorgânico	Choi, H <i>et al</i> 2009 [1 mm]	Choi, H <i>et al</i> 2009 [1,2%]		Choi, H <i>et al</i> 2009 [14 a 73 mm]							Choi, H <i>et al</i> 2009		Choi, H <i>et al</i> 2009		
Dolomita															Matijevic, G <i>et al</i> 2008
Quartzo	Tangsatitkulchai <i>et al</i> , C. 2013 [25,4 mm]	Tangsatitkulchai <i>et al</i> , C. 2013 [30%]	Tangsatitkulchai <i>et al</i> , C. 2013 [70 rpm]				Tangsatitkulchai, C. 2013						Tangsatitkulchai , C 2003	Tangsatitkulchai <i>et al</i> , C 2003	
Enxofre puro	Yalcin, T <i>et al</i> 2004 [25,4 e 38 mm]	Yalcin, T <i>et al</i> 2004 [40%]		Yalcin, T <i>et al</i> 2004 [37,5 a 120 mm]									Yalcin, T <i>et al</i> 2004		
Gibbsita														Mon, H <i>et al</i> 2004	
Alumina hidratada							Frances, C <i>et al</i> 1996								
Feldspato															Heim, A <i>et al</i> 2005
Calcita		Toramam, OU <i>et al</i> 2011 [40% a 60%]	Toramam, OU <i>et al</i> 2011 [300, 400 e 500 rpm]	Toramam, OU <i>et al</i> 2011 [10 a 20 mm]			Toramam, OU <i>et al</i> 2011								

7 10 6 6 1 1 4 1 1 2 2 1 3 3 1

Tabela 2 - Matriz resumo de estudos com seus respectivos materiais e variáveis

1.4 Referências

AMIRJAN, Mostafa; KHORSAND, Hamid. Processing and properties of Al-based powder suspension/slurry: A comparison study of aqueous binder systems, stability and film uniformity. **Powder technology**, v. 254, p. 12-21, 2014.

BROSEGHINI, M. et al. Modeling of the planetary ball-milling process: The case study of ceramic powders. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 36, n. 9, p. 2205-2212, 2016.

HEIM, Andrzej; OLEJNIK, Tomasz P.; PAWLAK, Agnieszka. Using statistical moments to describe grinding in a ball mill for industrial-scale process. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 44, n. 2, p. 263-266, 2005.

JOYCE, Adriana; KMIEC, Steven; MARTIN, Steve W. Glass transition temperature studies of planetary ball milled glasses: Accessing the rapidly cooled glassy state in $\text{Na}_4\text{P}_2\text{S}_7-x\text{O}_x$, $0 \leq x \leq 7$, Oxy-thio phosphate glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 551, p. 120462, 2021.

MAKOKHA, Augustine B.; MOYS, Michael H. Multivariate approach to on-line prediction of in-mill slurry density and ball load volume based on direct ball and slurry sensor data. **Minerals Engineering**, v. 26, p. 13-23, 2012.

MORI, Hiroto et al. Ball mill simulation in wet grinding using a tumbling mill and its correlation to grinding rate. **Powder Technology**, v. 143, p. 230-239, 2004.

MOTTA, José Francisco Marciano; ZANARDO, Antenor; CABRAL JÚNIOR, Marsis. As matérias-primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.

PRADO, Ulisses Soares do et al. Panorama da indústria cerâmica brasileira na última década. 2013.

RODRIGUES NETO, João Batista et al. Caracterização e otimização do processo de moagem de uma massa cerâmica grês. 1994.

SNILSTVEIT, Birte; OLIVER, Sandy; VOJTKOVA, Martina. Narrative approaches to systematic review and synthesis of evidence for international development policy and practice. **Journal of development effectiveness**, v. 4, n. 3, p. 409-429, 2012.

TANGSATHITKULCHAI, C. Effects of slurry concentration and powder filling on the net mill power of a laboratory ball mill. **Powder Technology**, v. 137, n. 3, p. 131-138, 2003.

TORAMAN, O. Y.; KATIRCIOGLU, D. A study on the effect of process parameters in stirred ball mill. **Advanced Powder Technology**, v. 22, n. 1, p. 26-30, 2011.

TRANFIELD, David; DENYER, David; SMART, Palminder. Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. **British journal of management**, v. 14, n. 3, p. 207-222, 2003.

7. ANEXOS

