

## Estudo da viabilidade de calibração de placas padrão de duralumínio por meio de leitor automatizado

Guilherme da Roza Portella <sup>1</sup>, Laura Savi Rosso <sup>1\*</sup>, Juliana de Oliveira Menegon <sup>1</sup>, Aline Demarch <sup>1</sup>, Angela Waterkemper Vieira <sup>1</sup>, Jucilene Feltrin de Souza <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eliane Revestimentos Cerâmicos, Rua Maximiliano Gaidzinski 245, 88845-000, Cocal do Sul, Santa Catarina, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Maximiliano Gaidzinski, Rua Edson Gaidzinski 352, 88845-000, Cocal do Sul, Santa Catarina, Brasil.

\*e-mail: laurasavirosso@hotmail.com

### Resumo

Atualmente, na etapa de classificação de placas na indústria de revestimentos cerâmicos, a calibração das placas padrão de duralumínio é executada por meio de um dispositivo conhecido como "dataplucômetro". Este equipamento é empregado para aferir as propriedades dimensionais das placas cerâmicas conforme estipulado na norma ISO 10545. No entanto, é importante ressaltar que o referido dispositivo vem apresentando algumas limitações e inadequações. Dentro desse cenário, o equipamento de braço articulado de medição por coordenadas surge como uma alternativa de melhora neste processo de medição. Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar e validar uma nova metodologia para a calibração de placas padrão de duralumínio em braços de medição por coordenadas. Para isso, o estudo investigou medições pontuais em três placas de duralumínio de diferentes tamanhos (15 × 15, 60 × 60 e 60 × 120 cm) utilizando o braço de medição Faro modelo 14000. As medições foram realizadas em 21 pontos predefinidos em cada placa, com a participação de dois operadores durante dez dias, com o objetivo de avaliar a repetibilidade das medições e a influência da troca de operador nos resultados. Foram analisadas as características das placas, como tamanho, ortogonalidade, retitude lateral, curvatura lateral, curvatura central e empenamento. Os resultados evidenciaram uma alta repetibilidade nas medições das características de calibre nas placas, entretanto, para as propriedades relacionadas à planaridade, em particular o empenamento, observou-se um desvio padrão significativamente elevado. Portanto, o método demonstrou ser adequado somente para a avaliação do tamanho, ortogonalidade e retitude lateral das placas, enquanto a medição da curvatura lateral, central e empenamento requer uma análise mais aprofundada para fins de validação.

**Palavras-Chave:** Braço de coordenadas; placa padrão; medição dimensional; indústria de revestimentos cerâmicos.

### 1. INTRODUÇÃO:

Os avanços tecnológicos na indústria têm experimentado um crescimento notável, impulsionando as empresas a buscarem atualização constante, não apenas para se manterem alinhadas com as tendências emergentes, mas também para aprimorar seus processos operacionais [1]. Nesse contexto, a busca por soluções que garantam precisão e confiabilidade de acordo com as normas padrões de medição dimensional tornou-se imperativa [2][3]. Um marco fundamental nessa jornada de melhoria foi a introdução das máquinas de medição por coordenadas (CMMs) na década de 1960. Essas máquinas, com sua notável precisão, desempenharam um papel crucial na inserção da tecnologia na indústria [4].

No cenário atual, as placas padrão utilizadas nas fábricas de revestimentos cerâmicos, especialmente no setor de classificação para calibração de equipamentos de calibre e planar, são calibradas utilizando um dispositivo de medição por coordenadas conhecido como dataplucômetro, o qual segue requisitos da norma ABNT NBR ISO 10545 [5]. No entanto, esse equipamento apresenta deficiências significativas em termos de precisão e repetibilidade de medição, o que tem gerado incertezas nos resultados obtidos [6].

Em resposta a essas questões, pesquisadores e profissionais têm empenhado esforços na busca por metodologias mais eficazes para a medição de placas. Nesse contexto, o equipamento de braço articulado de medição da marca Faro (Fig.1) surge como uma solução promissora.



**Figura 1.** Braço articulado de medição Faro [1]

Os braços articulados de medição (BAMs) são compostos por uma série de articulações, oferecendo flexibilidade com 5, 6 ou 7 graus de liberdade, e medidores angulares de alta precisão (*encoders*) que desempenham o papel crucial de determinar a posição de um apalpador no espaço tridimensional. O apalpador é posicionado manualmente, e o volume de medição é esférico [7][6].

De acordo com Lima [8], esses braços articulados de medição possuem características construtivas e configurações que apresentam vantagens notáveis em situações críticas, incluindo: grande portabilidade, custos reduzidos em comparação com as máquinas de medição por coordenadas tradicionais e uma relação favorável entre o volume de medição e o tamanho do equipamento. Isso permite medições em campo e de geometrias de difícil acesso de forma relativamente fácil, do ponto de vista do operador [6].

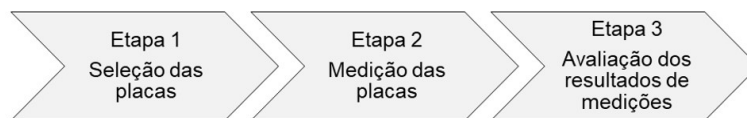
No entanto, como qualquer sistema metrológico, os braços de medição não estão isentos de limitações. Geralmente, as incertezas de medição associadas aos resultados obtidos com os BAMs tendem a ser maiores do que as observadas nas MMCs clássicas. Valores comuns de repetibilidade (95%) variam de 0,1 a 0,6 mm para volumes de medição de cerca de 2 m (diâmetro da esfera ou alcance da medição). Como resultado dessas características operacionais e metrológicas, os braços articulados de medição são mais adequados para o controle dimensional de peças com tolerâncias mais amplas, como peças plásticas, estampadas e fundidas não acabadas (peças brutas) [9].

Até 2004, dada a relativa novidade dessa tecnologia no mercado, não existia uma metodologia padronizada para avaliar o desempenho dos BAMs. Foi somente em agosto de 2005 que a ASME publicou a norma B89.4.22-2004, que se dedicou especificamente à avaliação de braços de medição articulados com volumes de medição esféricos. Além disso, a ASME B89.4.22-2004 estabeleceu padrões para outros aspectos, como especificações ambientais e classificação de tipos de equipamento [10].

Com base nesse contexto, o objetivo deste trabalho foi investigar e validar uma nova metodologia para a calibração de placas padrão de duralumínio, utilizadas para calibração do equipamento de calibre e planar na linha de produção de revestimentos cerâmicos, em braços de medição por coordenadas. Esse estudo abrange medições realizadas em placas padrão de diferentes tamanhos (60 × 120, 60 × 60, e 15 × 15 cm) com a participação de dois operadores, com o intuito de analisar a variação das leituras obtidas e sua relevância no contexto metrológico.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS:

O fluxograma da Fig.2 apresenta as etapas para desenvolvimento do trabalho proposto.

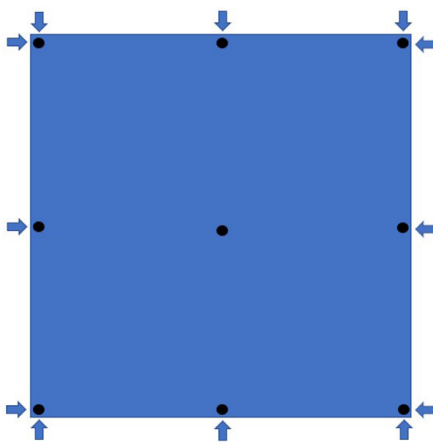


**Figura 2.** Etapas para o desenvolvimento do trabalho proposto

Antes de iniciar os procedimentos experimentais, conduziu-se uma abrangente revisão de artigos científicos, trabalhos apresentados em eventos, capítulos de livros e obras completas, com foco nas áreas de incerteza de medições e técnicas de leituras automatizadas. Essa revisão proporcionou uma base de conhecimento para a condução do estudo experimental.

Em seguida, a primeira fase dos procedimentos experimentais consistiu na escolha das placas a serem utilizadas no estudo. Esta seleção resultou na coleta de três tamanhos de placas de duralumínio, abrangendo pequeno, médio e grande porte, com dimensões de 15 × 15, 60 × 60 e 60 × 120 cm, respectivamente. Essa seleção foi feita com a finalidade de explorar possíveis variações associadas ao tamanho das placas. A hipótese subjacente era que as placas menores poderiam apresentar maior susceptibilidade a movimentos involuntários durante o procedimento de medição, ao passo que placas maiores poderiam ser menos afetadas por esses fatores.

A medição pontual foi executada em três placas de duralumínio, cada uma delas com um dos tamanhos mencionados, empregando o apalpador do braço de medição Faro, modelo 14000, que foi previamente submetido a um processo de calibração. O apalpador foi precisamente posicionado sobre os 21 pontos delineados conforme a Fig.3, permitindo a coleta direta das medidas por meio do software Faro CAM2®.



**Figura 3.** Esquema da placa padrão de duralumínio com os pontos de medição

Este processo de medição foi repetido em intervalos regulares durante um período de dez dias, envolvendo a atuação de dois operadores distintos. A principal motivação desse procedimento foi avaliar a repetibilidade das medições realizadas e analisar eventuais variações entre os operadores, com o objetivo de determinar se o braço de medição é capaz de reproduzir medidas consistentes e de identificar se a troca de operador pode influenciar nos resultados obtidos. Durante as medições, foram avaliadas diversas características das placas, incluindo tamanho, ortogonalidade, retitude lateral, curvatura lateral, curvatura central e empenamento.

Em seguida, os resultados obtidos foram submetidos a uma análise minuciosa, que incluiu a construção de gráficos para representar a média das 10 medições de cada característica avaliada para cada uma das três placas padrão, para cada um dos operadores que participaram do ensaio. Além da média, o desvio padrão das medições também foi calculado e avaliado, contribuindo para uma compreensão mais aprofundada das variações observadas durante o estudo.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

As figuras (gráficos) incluídas nesta seção de resultados e discussão mostram os resultados das medições da placa de duralumínio com dimensões de 15 × 15, 60 × 60 e 60 × 120 cm, considerando as respectivas características: tamanho, ortogonalidade, retitude lateral, curvatura lateral, curvatura central e empenamento.

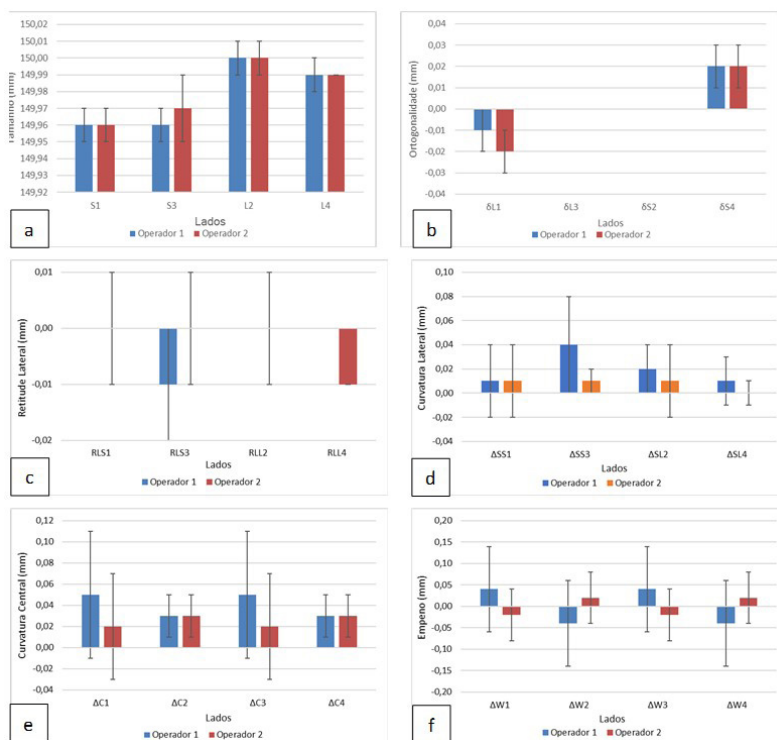
Nos gráficos, as colunas azuis correspondem às medições efetuadas pelo operador 1, enquanto as colunas vermelhas representam as medições executadas pelo operador 2. As barras de erro nas colunas indicam o desvio padrão das 10 medições, oferecendo uma visualização clara das variações observadas em cada conjunto de medições.

#### 3.1. Análise do formato 15 × 15 cm:

De acordo com as análises da Fig.4(a), a maior variação entre os operadores está no lado S3, com variação de 0,01 mm, ou seja, muito pequena. Quanto ao desvio padrão este varia em torno de ± 0,01 mm para os lados S1 e L2, e há variação de ± 0,02 mm no lado S3 na medição do operador 2.

Avaliando a Fig.4(b), os lados  $\sigma L3$  e  $\sigma S2$  não estão sendo apresentados por colunas pois a ortogonalidade apresentou valor igual a zero. Quanto aos demais lados, os valores entre operadores foram muito próximos e o desvio padrão também foi pequeno, com valor de ± 0,01 mm. Na Fig.4(c), os lados RLS1 e RLL2 não estão sendo apresentados por colunas, pois a retitude lateral apresentou valor igual a zero. Houve uma variação nos lados RLS3 e RLL4 muito pequena entre operadores. Quanto ao desvio padrão, este variou em torno de ± 0,01 mm para os lados RLS1, RLS3 e RLL2.

Como pode ser visto na Fig.4(d), os lados  $\Delta SS3$ ,  $\Delta SL2$  e  $\Delta SL4$  apresentam uma variação maior entre o operador 1 e o operador 2. Os lados  $\Delta C1$  e  $\Delta C3$  mostram uma variação maior entre o operador 1 e o operador 2 na Fig.4(e), sendo a variação de 0,03 mm entre os operadores e ± 0,06 para o operador 1 e ± 0,05 para o operador 2. Os lados  $\Delta C2$  e  $\Delta C4$  mantiveram as medidas. Na Fig.4(f) pode-se observar que os lados mostrados no gráfico apresentam uma diferença entre operadores, porém é pequena, considerando que os valores não passam de 0,05 mm. Quanto ao desvio padrão, mostra uma variação maior entre o operador 1 e o operador 2, onde o operador 1 varia em torno de ± 0,10 mm e o operador 2 varia em torno de ± 0,06 mm. Portanto, pode-se afirmar que o operador 2 aparenta ser mais habilidoso ou cuidadoso que o operador 1, pois suas medições apresentaram menor variabilidade.



**Figura 4.** Medidas de (a) tamanho; (b) ortogonalidade; (c) retitude lateral; (d) curvatura lateral; (e) curvatura central; e (f) empenamento para as placas de 15 × 15 cm

Realizando uma análise geral da placa de duralumínio com dimensões de 15 × 15 cm, foi observado que para as características de calibre que compreendem o tamanho, ortogonalidade e retitude lateral, o método de medição com o braço de coordenadas possui boa repetibilidade e pouca variação entre os operadores. Porém, ao se avaliar as medidas de planaridade, que compreende as medidas de curvatura lateral, curvatura central e empenamento, percebe-se um maior desvio padrão das medidas, com menor repetibilidade, além de também ser observada maior variação entre cada operador.

A maior variação nas medições pode ser atribuída a diversos fatores. Um deles é a possibilidade de movimentação da placa durante a medição, pois é apenas apoiada sobre uma mesa metálica plana, com fixação por ímãs. Essa configuração pode permitir deslocamentos durante a medição, afetando a precisão dos resultados.

Outra hipótese a ser considerada está relacionada à pressão de apalpação exercida por cada operador durante a coleta dos pontos de medição. A variação na pressão aplicada pode afetar tanto a estabilidade da placa quanto os valores obtidos pelo equipamento de medição. Além disso, o cuidado e o treinamento de cada operador para realização deste processo de medição desempenham um papel significativo. A escolha dos pontos de apalpação pode variar entre operadores, o que pode resultar em medições divergentes.

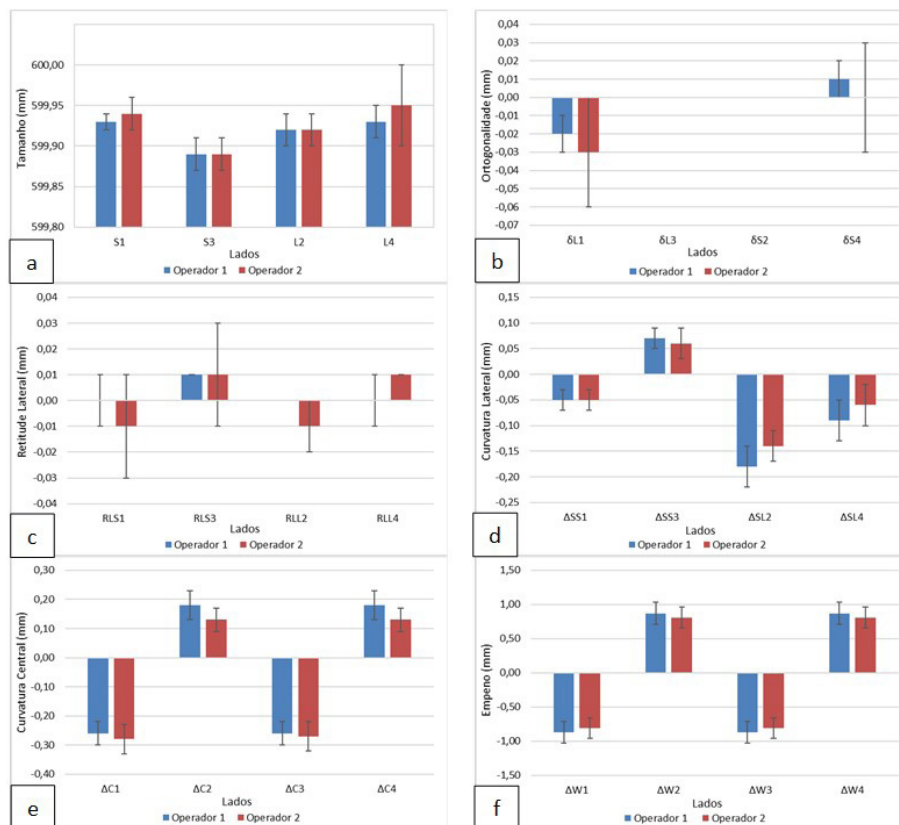
Embora menos relevantes, outros fatores, como a presença de sujidades, como poeira depositada sobre as placas, e as variações de temperatura, mesmo em uma sala climatizada por um refrigerador de ar, também podem ter influência nas medições.

### 3.2. Análise do formato 60 × 60 cm:

Na Fig.5(a) é possível perceber que os lados S1 e L4 apresentam uma diferença pequena entre os operadores, sendo que o lado L4 apresentou resultado com variação de 0,02 mm, podendo ser considerada uma variação pequena. Quanto ao desvio padrão, no lado L4 a variação do operador 2 foi de  $\pm 0,05$  mm. Na Fig.5(b) os lados  $\sigma L3$ ,  $\sigma S2$  e  $\sigma S4$  do operador 2 não estão sendo apresentados por colunas, pois a ortogonalidade apresentou valor igual a zero. Quanto às barras de desvio padrão, o operador 2 obteve uma variação maior que o operador 1, em torno de  $\pm 0,03$  mm. Na Fig.5(c) os lados RLS1 e RLL2 do operador 1 não estão sendo apresentados por colunas, pois a retitude lateral apresentou valor igual a zero. Quanto ao desvio padrão, variou em torno de  $\pm 0,02$  mm nos lados RLS1 e RLL2 nas medições do operador 2.

Como pode ser observado na Fig.5(d), os lados  $\Delta SL2$  e  $\Delta SL4$  apresentam uma variação maior entre o operador 1 e o operador 2, sendo  $\Delta SL2 = 0,04$  mm e  $\Delta SL4 = 0,03$  mm, observando que a variabilidade é pequena entre eles, pois as barras de erro que representam o desvio padrão são muito semelhantes. Quanto ao desvio padrão, este varia em torno de  $\pm 0,04$  mm para o operador 1 nos lados  $\Delta SL2$  e  $\Delta SL4$ , e a variação para os lados  $\Delta SL2$  e  $\Delta SL4$  do operador 2 é de  $\pm 0,03$  mm e  $\pm 0,04$  mm, respectivamente. Para a Fig.5(e), os lados  $\Delta C2$  e  $\Delta C4$  mostram uma variação maior entre o operador 1 e o operador 2, sendo a variação de 0,05 mm. Os lados  $\Delta C1$  e  $\Delta C3$  obtiveram uma diferença muito pequena (0,02 mm e 0,01mm). Quanto aos desvios padrão, estes são bastante semelhantes, portanto, a variação do operador 1 é muito semelhante à do operador 2. Ao se observar a Fig.5(f), percebe-se que os lados mostrados no gráfico apresentam uma diferença maior entre operadores (0,06 mm). O desvio padrão é elevado, sendo a variação do operador 1  $\pm 0,16$  mm, e para o operador 2  $\pm 0,15$  mm. Portanto, constata-se pouca repetibilidade das medições.

Em uma análise geral da placa de duralumínio com dimensões de 60 × 60 cm, foi observado que para as características de calibre, que compreendem o tamanho, ortogonalidade e retitude lateral, o método de medição com o braço de coordenadas possui boa repetibilidade, porém, há uma variação maior entre operadores. Ao se avaliar as medidas de planaridade, que compreende as medidas de curvatura lateral, curvatura central e empenamento, já se percebe uma maior variação, em especial para a característica de empeno. Outros fatores que podem influenciar nas medidas já foram mencionados anteriormente na discussão a respeito da placa 15 × 15 cm.



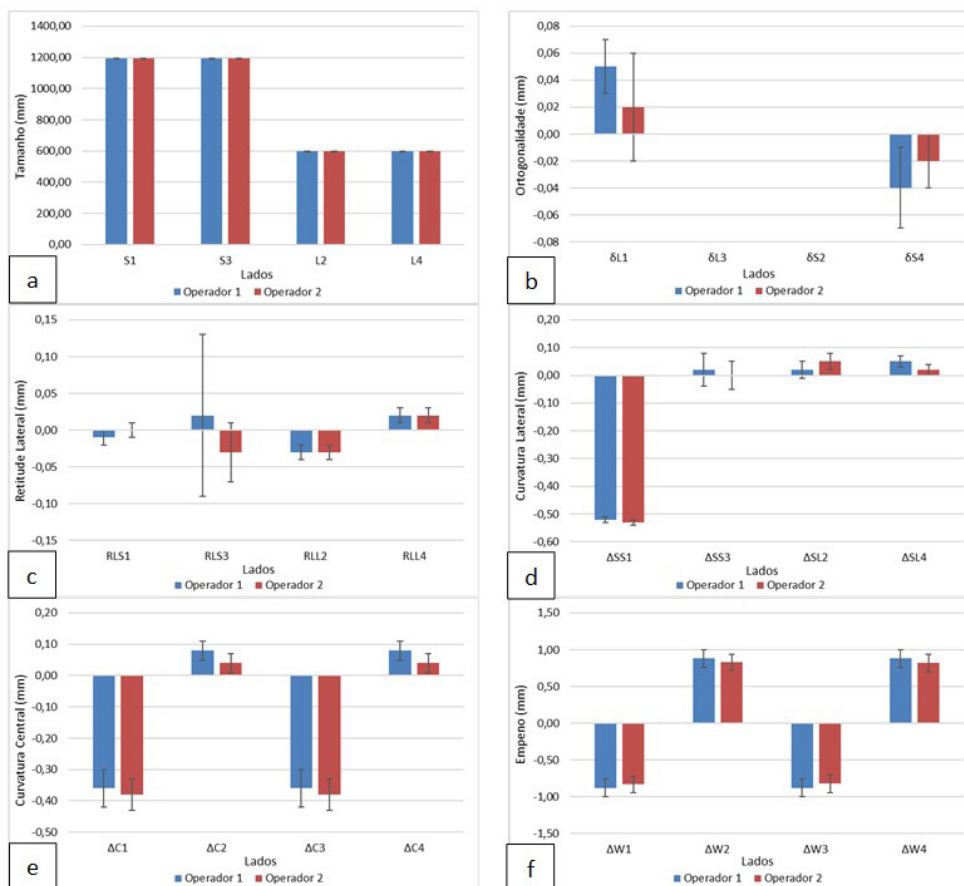
**Figura 5.** Medidas de (a) tamanho; (b) ortogonalidade; (c) retitude lateral; (d) curvatura lateral; (e) curvatura central; e (f) empenamento para as placas de 60 × 60 cm

### 3.3. Análise do formato 60 × 120 cm:

De acordo com as análises da Fig.6(a), as medições dos lados e de desvio padrão de ambos os operadores se mostraram semelhantes, não apresentando nenhuma variação. Na Fig.6(b), os lados  $\sigma L3$  e  $\sigma S2$  não estão sendo apresentados por colunas, pois a ortogonalidade apresentou valor igual a zero. Quanto às barras de desvio padrão, o operador 2 obteve uma variação maior que o operador 1, em torno de  $\pm 0,04$  mm no lado  $\sigma L1$ , e o operador 1 obteve uma variação maior que o operador 2 no lado  $\sigma S4$ , em torno de  $\pm 0,03$  mm. Na Fig.6(c) pode-se observar que o lado RLS1 do operador 2 não está sendo apresentado por coluna, pois a retitude lateral apresentou valor igual a zero. Houve uma variação maior no lado RLS3 entre operadores. O desvio padrão para o operador 1 tem variação bem alta, em torno de  $\pm 0,11$  mm no lado RLS3. A variação para o operador 2 foi menor, em torno de  $\pm 0,04$  mm. Os lados RLL2 e RLL4 se mantiveram semelhantes.

Os lados  $\Delta S3$ ,  $\Delta S2$  e  $\Delta S4$  mostrados na Fig.6(d) mostraram uma variação pequena entre os operadores. O desvio padrão também é baixo, sendo a maior variação do operador 1 no lado  $\Delta S3$  ( $\pm 0,06$  mm), retratando, portanto, uma boa repetibilidade. Conforme a Fig.6(e), os lados  $\Delta C2$  e  $\Delta C4$  mostram uma variação maior entre o operador 1 e o operador 2, sendo de 0,04 mm. Os lados  $\Delta C1$  e  $\Delta C3$  têm uma diferença muito pequena (0,02 mm). Quanto ao desvio padrão, há uma variação em torno de  $\pm 0,06$  mm (operador 1) e  $\pm 0,05$  mm (operador 2) entre os operadores nos lados  $\Delta C1$  e  $\Delta C3$ . Por fim, ao avaliar a Fig.6(f), percebe-se que os lados mostrados no gráfico apresentam uma diferença pequena entre operadores (0,06 mm). Quanto ao desvio padrão, este manteve-se semelhante ( $\pm 0,12$  mm).

Em uma análise geral para a placa de duralumínio com dimensões de 60 × 120 cm, foi observado que, para as características de calibre (tamanho, ortogonalidade e retitude lateral), o método de medição com o braço de coordenadas possui boa repetibilidade, porém, apresentando uma variação maior do desvio padrão na ortogonalidade e retitude lateral entre os operadores. Ao se avaliar as medidas de planaridade (medidas de curvatura lateral, curvatura central e empenamento), já se percebe um desvio padrão mais elevado, em especial para a medição do empeno, assim como também detectado nas demais placas.



**Figura 6.** Medidas de (a) tamanho; (b) ortogonalidade; (c) retitude lateral; (d) curvatura lateral; (e) curvatura central; e (f) empenamento para as placas de 60 × 120 cm

#### 4. CONCLUSÕES

O progresso tecnológico na indústria tem estimulado a constante busca por aperfeiçoamentos nos procedimentos operacionais, com ênfase na melhoria da técnica de medição das propriedades dimensionais das placas, particularmente as placas padrão utilizadas na fabricação de revestimentos cerâmicos. Nesse contexto, os braços de medição articulados têm surgido como uma solução em ascensão, conquistando uma posição cada vez mais proeminente. No presente trabalho foi feita uma análise abrangente das medições pontuais realizadas com o braço de medição em placas de duralumínio de três dimensões distintas: 15 × 15, 60 × 60 e 60 × 120 cm.

Foi constatado que as medições das dimensões das placas mostram excelente repetibilidade, bem como uma pequena variação entre os operadores, com um máximo de apenas 0,03 mm. No entanto, em relação às características de planaridade, observou-se uma considerável variação, evidenciada por um desvio padrão significativo, particularmente na medição do empenamento. Esse fenômeno pode ser atribuído à potencial movimentação das placas durante o processo de medição, devido à manipulação do apalpador.

Conseqüentemente, o método se mostra adequado somente para a medição de tamanho, ortogonalidade e retitude lateral, enquanto a avaliação da curvatura lateral, central e empenamento requer uma investigação mais aprofundada para a validação de sua eficácia.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Colégio Maximiliano Gaidzinski e ao Departamento de Garantia da Qualidade da Empresa Mohawk Brasil, bem como aos seus colaboradores, pela disponibilização dos equipamentos, colaboração e orientação.

## REFERÊNCIAS

- [1] Kurian M, Thankachan S, 2023. Introduction: ceramics classification and applications. *Ceramic Catalysts* 1-17. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-323-85746-8.00009-6>
- [2] Pinter Jr J, Zaccaron A, Arcaro S, Rodrigues Neto J B, Noni Jr A, Pereira F R, 2022. Novel approach to ensure the dimensional stability of large-format enameled porcelain stoneware tiles through water absorption control. *Open Ceramics* 9, 100203. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceram.2021.100203>
- [3] Ferreira AAP, 2022. Estudo das tecnologias aplicadas à gestão do processo construtivo do revestimento cerâmico. Porto Alegre: Curso de Engenharia Civil, Centro Universitário Ritter dos Reis, Ânima Educação.
- [4] Faro Technologies, 2022. <http://www.faro.com>
- [5] NBR ISO 10545, 2020. Placas Cerâmicas. Parte 2. Determinação das dimensões e qualidade superficial. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [6] Silva F D, Ticiano J, Henrique J F M, Menegazzo A P M, 2021. Método de medição de características dimensionais de placas cerâmicas. Braço tridimensional versus dataplucômetro. Bauru, SP: 28 SIMPEP 1-12.
- [7] Gisel L, 2013. Análise de sistemas de medição para peças estampadas de pequeno e médio porte. Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.
- [8] Lima C R G, 2016. Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [9] Sousa A R, Orosco D B, Giammusso L, 2003. Avaliação da incerteza volumétrica de braços de medição por coordenadas. Recife: Congresso Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia 63.
- [10] ASME B.89.4.22, 2004. Methods for performance evaluation of articulated arm. *Coordinate Measuring Machines*. New York: American Society of Mechanical Engineers.
- [11] Trid Faro do Brasil, 2022. <http://www.trid.com.br>