

Estudo da influência das condições de queima na variação de tonalidade em monoporosas

Laura Savi Rosso ^{1*}, Juliana de Oliveira Menegon ¹, Aline Demarch ¹, Angela Waterkemper Vieira ¹, Pâmela Milak ²

¹ Eliane Revestimentos Cerâmicos, Rua Maximiliano Gaidzinski 245, 88845-000, Cocal do Sul, Santa Catarina

² Instituto Maximiliano Gaidzinski, Rua Edson Gaidzinski 352, 88845-000, Cocal do Sul, Santa Catarina

*e-mail: laurasavirosso@hotmail.com

Resumo

A variação de tonalidade é uma questão crucial e recorrente na indústria de revestimentos cerâmicos, frequentemente acarretando prejuízos consideráveis às empresas. Dentre os diversos fatores que contribuem para essa variabilidade, a temperatura e o ciclo de queima se destacam como fatores-chave. Desta forma, o objetivo do presente estudo foi explorar a variação de tonalidade de um produto cerâmico buscando padronizar variáveis como massa, engobe e esmalte, enquanto avalia-se o impacto das variáveis tempo e temperatura na variação de cor das superfícies cerâmicas. A metodologia aplicada consistiu na avaliação de peças de monoporosa, incluindo a base cerâmica sem engobe e esmalte, peças apenas com engobe e peças engobadas e esmaltadas com esmalte monocolor acetinado branco. Essa abordagem se fundamenta na medição das características de cor na superfície das peças cerâmicas amostradas por análise colorimétrica por espectrofotometria utilizando o sistema de leitura CIELab, além da medição de brilho. Os procedimentos experimentais e as análises de resultados foram conduzidos com base em um planejamento fatorial estatístico 2², com a inclusão de 3 pontos centrais, garantindo uma abordagem robusta com resultados respaldados por uma significância de 95%. Na análise dos resultados, a interação entre temperatura e ciclo influenciou todas as coordenadas colorimétricas na base cerâmica, porém isso não é preocupante, uma vez que a ênfase estética está no esmalte. Nas amostras com aplicação de engobe, temperatura e ciclo afetaram as coordenadas L* e b*, enquanto a* foi influenciada apenas pelo ciclo. Nos corpos esmaltados, as coordenadas L* e a* permaneceram inalteradas, mas b* mostrou maior intensidade da cor azul com o aumento de temperatura e ciclo, e o brilho foi afetado apenas pela temperatura. Desta forma, o presente estudo conclui que uma atenção especial deve ser direcionada ao controle de queima dos revestimentos cerâmicos, considerando seu impacto nas características colorimétricas e de brilho das superfícies cerâmicas.

Palavras-Chave: Variação de tonalidade; brilho; monoporosa; ciclo de queima; temperatura de queima.

1. INTRODUÇÃO:

Os últimos anos trouxeram avanços consideráveis dos processos utilizados na fabricação de revestimentos cerâmicos, entretanto, aumentaram consideravelmente o número de variáveis envolvidas [1]. Esse aumento na complexidade dos processos tem agravado o desafio da gestão da variação de tonalidade dos revestimentos, sendo essa uma questão crítica que exige uma considerável dedicação da indústria cerâmica [2].

Dentre as principais causas da variação de tonalidade, destacam-se a preparação e aplicação do vidrado, bem como a fase de queima [3]. Estas etapas, sem dúvida, desempenham um papel

preponderante quando se trata do fenômeno da variação de tonalidade [4][5], sendo que a fase de queima, em particular, é responsável por cerca de 90% das causas identificadas de variação de tonalidade em pisos e azulejos [4], pois é nesta etapa que minerais presentes na formulação passam por transformações físico-químicas [6]. É crucial enfatizar que a variação de tonalidade, quando derivada exclusivamente da queima, surge devido à falta de homogeneidade nessa etapa do processo, ajustes inadequados ou ao uso incorreto de matérias-primas, dadas as condições impostas durante a queima [7].

Dois parâmetros primordiais que podem induzir alterações na cor e, portanto, demandam monitoramento durante o processo de queima de revestimentos cerâmicos, são a temperatura e o ciclo de queima. Estes fatores estão sendo explorados com maior ênfase neste estudo, embora outros elementos, como pressão, taxa de resfriamento e atmosfera do forno, também mereçam consideração.

Com relação à temperatura, é relevante salientar que qualquer variação nesse parâmetro inevitavelmente resultará em flutuações na cor, embora nem todas sejam visíveis ou impactem a tonalidade final do produto. Especialmente em regimes de monoqueima, onde a cerâmica crua sofre variações abruptas na coloração quando submetida a diferentes temperaturas de queima [4], pode-se afirmar genericamente que o aumento da temperatura intensifica o brilho e a extensibilidade dos esmaltes cristalinos e brancos de zircônio, enquanto os esmaltes mates, principalmente os de zinco e cálcio, sofrem maior influência na textura, adquirindo um aspecto mais "sedoso" à medida que a temperatura aumenta [8]. Vale ressaltar que nem todas as variações de tonalidade se originam da cor, pois o brilho e a textura dos revestimentos cerâmicos também resultam em lotes distintos, devido falta de homogeneidade, influenciada diretamente pela temperatura de queima [8][4].

No ciclo de queima, ou seja, a duração necessária para que o revestimento cerâmico atravessasse todo o forno, ele deve ser suficientemente longo para garantir que todas as reações térmicas planejadas ocorram. Se o ciclo de queima for inadequadamente curto, podem surgir problemas relacionados à tonalidade, incluindo diferenças na cor do produto (e, em alguns casos, no tamanho) entre as peças nas áreas periféricas mais frias do forno em comparação com as do centro mais quente, devido ao arrasto dinâmico da temperatura [4]. Além disso, reações incompletas nos vidrados, tintas e corantes, influenciadas pelo gradiente de temperatura, podem afetar a cor, textura e brilho das superfícies dos revestimentos cerâmicos, especialmente nos vidrados mates ou brancos de zircônio [8].

Se o resfriamento mesmo não for processado de forma brusca (resfriamento rápido), com injeção de ar frio, há o risco da reoxidação do esmalte, anulando os efeitos da queima redutora. Também o brilho é influenciado pela velocidade do resfriamento, motivo pelo qual os vidrados mates requerem especial atenção nesta etapa do processo [4][9]. Por fim, com relação à queima, a pressão interna do forno também é importante para a uniformidade de tonalidade do produto final [4].

Além dos fatores relacionados ao processo de queima, a preparação do vidrado também é um fator determinante na variação de tonalidade, pois a moagem exerce influência no comportamento dos corantes. O controle granulométrico é crítico no processo de fabricação dos corantes, uma vez que influencia diretamente a tonalidade e a intensidade de cor [10].

Quanto à aplicação dos vidrados, especialmente do esmalte, os efeitos são menos perceptíveis em comparação com os fatores mencionados anteriormente. A variação na camada de vidrado aplicada sobre a peça resulta principalmente da densidade e viscosidade. Uma vez que o vidrado consiste em material sólido e água, a variação de densidade exerce uma influência direta na camada aplicada. A textura da superfície e a viscosidade também podem influenciar na tonalidade, uma vez que afetam a percepção da cor [5][7].

Para a análise da tonalidade, o sistema colorimétrico CIE Lab, recomendado pelo CIE ('Comission Internationale d'Eclairage') desde 1976, é amplamente utilizado na indústria cerâmica. Esse sistema utiliza coordenadas L^* , a^* , e b^* para definir a cor, onde L^* representa a luminosidade, desde o preto ao branco, a^* representa a variação entre verde e vermelho, e b^* representa a variação entre azul e amarelo [10][11].

Em suma, a variação de tonalidade é uma questão recorrente na indústria de revestimentos cerâmicos, que é prontamente identificada no produto final. Este desafio tem sido uma preocupação significativa para os técnicos responsáveis pela produção nas empresas de revestimentos [10].

Portanto, o objetivo deste estudo é investigar o comportamento da variação de tonalidade de um produto de monoporosa monocolor acetinado branco sob diferentes condições de queima, como

parte de uma abordagem exploratória. Além disso, busca-se padronizar os fatores, como massa, engobe e esmalte, e compreender a influência das variáveis tempo e temperatura na variação de tonalidade das superfícies cerâmicas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

Foram coletadas peças cruas que receberam engobe e esmalte mate, produzidas em escala industrial na mesma data de fabricação, com o propósito de padronizar o processo e eliminar as variáveis associadas (como variações na composição do engobe/esmalte e camadas aplicadas). Trabalhou-se com três tipos de peças: a base cerâmica sem engobe e esmalte, peças apenas com engobe, e peças com engobe e esmalte, com o objetivo de avaliar como cada um desses fatores é influenciado pela temperatura e pelo ciclo de queima. As amostras foram cortadas em tamanhos de 5×5 cm para permitir a realização do processo de queima e, posteriormente, a medição de colorimetria e brilho.

As condições de queima foram definidas com base no funcionamento do forno a rolos laboratorial (Servitech CT094). Observou-se que a temperatura ideal de queima para a massa cerâmica de monoporosa prensada em condições industriais é de 1140 °C, com um ciclo de 30 minutos.

Uma limitação do forno laboratorial é que não é possível modificar a curva de queima; apenas o tempo total do ciclo pode ser ajustado. Portanto, o tempo de ciclo foi um dos parâmetros variáveis nos testes.

Diante dessa limitação, as condições de queima no forno a rolos laboratorial foram definidas com base em um planejamento fatorial estatístico 2², com a inclusão de 3 pontos centrais. Essas condições estão apresentadas na Tab.1 e Tab.2.

Tabela 1. Planejamento fatorial para as condições de queima

Teste	Níveis/fatores	Temperatura (°C)	Ciclo (min)
1	-1 e -1	1135	25
2	-1 e +1	1135	35
3	+1 e -1	1145	25
4	+1 e +1	1145	35
5.1	0 e 0	1140	30
5.2	0 e 0	1140	30
5.2	0 e 0	1140	30

Tabela 2. Planejamento experimental: Detalhamento das condições de queima

Testes	1	2	3	4	5.1	5.2	5.3
Temp. (°C)	1135	1135	1145	1145	1140	1140	1140
Ciclo (min)	25	35	25	35	30	30	30
Base							
Engobe							
Esmalte							

Após a etapa de queima, as amostras foram medidas quanto à colorimetria e brilho, a fim de analisar o desenvolvimento de cores em cada condição testada. Com relação ao brilho, as amostras engobadas não foram analisadas, pois o engobe é um material refratário, e, desta forma, não se supõe que apresente brilho. Mesmo grandes variações de temperatura e ciclo de queima não afetam essa característica.

Também se avaliou a absorção de água (AA) das peças, buscando estabelecer uma comparação entre as condições de queima em laboratório e as condições industriais. O critério para essa comparação foi que a absorção de água deveria se aproximar de 17%, conforme as condições de produção industrial de cerâmica monoporosa. A absorção foi determinada pelo método de ensaio a vácuo, seguindo as diretrizes da norma ABNT NBR ISO 10545-3 [17].

O teste 5 foi executado em três ocasiões distintas em dias diferentes, com o objetivo de coletar dados que permitissem uma avaliação estatística do estudo. Conforme mencionado anteriormente, investigou-se a influência da temperatura e do ciclo de queima em três cenários: na base cerâmica sem engobe e esmalte, na base com engobe e na base com engobe e esmalte.

Para cada teste, foram utilizados 5 corpos de prova. Em cada um dos corpos de prova foram três medições de colorimetria e uma medição de brilho. As medições colorimétricas foram realizadas por meio de um espectrofotômetro Kônica Minolta CM-2600D, com iluminante D65, geometria esférica de diâmetro de 52 mm, e ângulo de visualização de 10° [12]. Quanto às medições de brilho, foi utilizado um glossímetro Konica Minolta BE110411 com o ângulo de 60°.

Para realizar a análise dos resultados, foi utilizada a análise estatística de variância, com o intuito de avaliar a influência da temperatura e ciclo na cor e brilho das amostras de teste, com nível de significância de 95%. Para isso, foi necessário formular uma Hipótese nula (H_0) considerando que o ciclo / temperatura influenciam na cor e brilho do produto. A forma com que H_0 é definida é muito importante, pois pode determinar a sua validade no final da análise [13].

Com H_0 definida e os dados coletados, foi realizado o teste de hipótese, cujas variáveis analisadas foram a temperatura e o ciclo, onde foi possível observar a influência da interação das variáveis e seu efeito individual pela análise de variância (ANOVA) [13][14]. O teste mostra uma probabilidade de significância, chamado de valor-p. Quando esse valor está abaixo do nível de significância, geralmente 0,05 (5%), rejeita-se H_0 , ou seja, a variável analisada é significativa para a propriedade medida [13][14].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Nesta etapa são apresentadas as tabelas da ANOVA que mostram a influência das variáveis de processo (temperatura e ciclo) nas coordenadas colorimétricas L^* , a^* e b^* e no brilho. As médias dos resultados experimentais são apresentadas na Tab.3. Os valores também foram usados para comparações e para a análise do efeito das variáveis em questão. A Tab.3 também mostra os resultados médios para absorção de água (AA), mostrando um valor equivalente a 17%, adequado para a produção industrial de cerâmica monoporosa.

Tabela 3. Resultados médios experimentais

Teste	Temp. (°C)/Ciclo (min)	Base					Engobe					Esmalte				
		a^*	b^*	L^*	Brilho	AA (%)	a^*	b^*	L^*	Brilho	AA (%)	a^*	b^*	L^*	Brilho	AA (%)
1	1135/25	15,73	25,05	61,32	0,62	15,92	0,50	2,52	91,20	0,86	16,20	-0,15	2,20	92,44	29,58	15,72
2	1135/35	13,54	22,88	59,87	0,44	15,34	0,42	2,02	90,18	0,62	15,87	-0,20	1,74	92,38	27,00	15,35
3	1145/25	14,80	23,80	60,30	0,42	15,69	0,48	2,25	90,47	0,64	16,76	-0,20	1,79	92,38	19,92	15,20
4	1145/35	15,40	24,32	60,52	0,60	15,64	0,33	1,38	88,88	0,64	14,93	-0,25	1,32	91,56	20,56	14,64
5.1	1140/30	14,80	23,81	60,58	0,54	15,25	0,39	1,94	90,21	0,82	16,37	-0,22	1,71	92,37	25,25	14,97
5.2	1140/30	14,87	23,83	60,65	0,50	15,68	0,43	1,95	89,99	0,58	15,25	-0,23	1,69	91,95	20,86	14,77
5.3	1140/30	14,93	23,72	60,54	0,40	15,51	0,42	1,97	90,11	0,58	15,48	-0,19	1,78	92,44	23,50	14,99

Para as tabelas de ANOVA, vale ressaltar a importância de avaliação do valor p; quando p for menor que 0,05, a variável do processo possui influência na coordenada colorimétrica e no brilho analisado. O valor 0,05 (5%) foi escolhido para que fosse possível apresentar os resultados com 95% de significância.

Nas tabelas também são mostradas a soma dos quadrados (SS), o grau de liberdade (DF), as médias quadráticas (MS), que estimam a variância, e F, que indica se a variável em análise é estatisticamente

igual às demais médias, ou se é diferente, ou seja, se a hipótese H_0 é verdadeira ou falsa. Quanto maior esse valor, em relação ao valor crítico ($F_{\text{crítico}}$), maior a influência daquela variável e a hipótese nula (H_0) é falsa. Com os valores de SS e MS estima-se F, e o valor de p [15][16].

3.1. Corpos de prova da base

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos nas avaliações da base, isto é, a peça de revestimento cerâmico sem as aplicações de cobertura (engobe e esmalte).

Na Tabela 4 observa-se que o ciclo de queima exerce influência sobre a coordenada b^* , um ciclo mais longo resulta em uma cor amarela menos intensa. No entanto, a temperatura de queima não apresenta a mesma influência sobre essa coordenada, sugerindo que, se necessário, a temperatura de queima da cerâmica monoporosa poderia ser ajustada sem acarretar problemas significativos. Por outro lado, é fundamental manter o ciclo de queima constante.

Entretanto, é importante destacar que a interação entre esses dois fatores demonstrou ser estatisticamente significativa. Isso significa que mudanças simultâneas na temperatura e no ciclo de queima podem afetar a cor da base cerâmica. Portanto, é essencial considerar cuidadosamente as implicações da interação entre esses fatores ao tomar decisões relacionadas ao processo de queima.

Tabela 4. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada b^* para a base; $R^2 = 0,92709$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,684	1	0,684	21,634	0,019
Temp.	0,008	1	0,008	0,262	0,644
Temp. × Ciclo	1,814	1	1,814	57,394	0,005
Erro	0,095	3	0,032		
Total	2,601	6			

Na Tabela 5 observa-se que todas as condições avaliadas exercem influência sobre a variável a^* . É notável que a cor vermelha perde intensidade à medida que tanto o ciclo quanto a temperatura aumentam. O valor F indica que a interação entre o ciclo e a temperatura tem uma influência significativamente maior do que o efeito dessas variáveis quando analisadas individualmente.

Tabela 5. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada a^* para a base; $R^2 = 0,99697$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,212	1	0,212	74,934	0,003
Temp.	0,630	1	0,630	223,257	0,001
Temp. × Ciclo	1,949	1	1,949	690,137	0,000
Erro	0,008	3	0,003		
Total	2,799	6			

Na Tabela 6 pode-se notar que tanto o ciclo de queima quanto a interação entre temperatura e ciclo exercem influência sobre a coordenada L^* . É interessante observar que a influência da interação entre esses dois fatores é mais significativa do que o efeito do ciclo por si só, como indicado pelo valor F. À medida que o ciclo de queima aumenta, a base cerâmica tende a se tornar mais escura, evidenciando o impacto dessa variável sobre a luminosidade da peça.

Tabela 6. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada L^* para a base; $R^2 = 0,98221$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,375	1	0,375	55,935	0,005
Temp	0,035	1	0,035	5,278	0,105
Temp*Temp	0,699	1	0,699	104,375	0,002
Erro	0,020	3	0,007		
Total S	1,129	6			

Na Tabela 7 é evidente que nenhuma das variáveis analisadas demonstrou influência sobre o brilho das amostras.

Tabela 7. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre o brilho para a base; $R^2 = 0,71393$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,000	1	0,000	0,000	1,000
Temp.	0,000	1	0,000	0,091	0,782
Temp. × Ciclo	0,032	1	0,032	7,396	0,073
Erro	0,013	3	0,004		
Total	0,046	6			

Ao examinar as tabelas de ANOVA referentes à base, torna-se aparente que todas as coordenadas colorimétricas foram afetadas pela interação das duas variáveis (temperatura e ciclo de queima), com a exceção do brilho. No entanto, ao analisar as variáveis separadamente em cada tabela, fica claro que todas elas exibiram comportamentos distintos em resposta às condições de temperatura e ciclo de queima.

3.2. Corpos de prova engobados:

As tabelas seguintes apresentam os resultados obtidos nas avaliações dos corpos de prova engobados.

Na Tabela 8 é perceptível que tanto o ciclo de queima quanto a temperatura têm impacto sobre a coordenada b^* das peças engobadas. Nota-se que o ciclo exerce uma influência considerável, como indicado pelo valor F. Isso sugere que o engobe tende a adquirir uma tonalidade mais amarela à medida que tanto a temperatura quanto o ciclo de queima aumentam.

Tabela 8. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada b^* para o engobe; $R^2 = 0,98209$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,469	1	0,469	108,921	0,002
Temp.	0,205	1	0,205	47,635	0,006
Temp. × Ciclo	0,034	1	0,034	7,945	0,067
Erro	0,013	3	0,004		
Total	0,722	6			

Em contraste com as tabelas mencionadas anteriormente, na Tabela 9, pode-se observar que apenas o ciclo de queima exerceu influência sobre a coordenada a^* . Essa variação específica pode ser atribuída à variação na coordenada a^* que também foi observada na análise da massa. Essa consistência de resultados é relevante, pois sugere que a influência do ciclo na coordenada a^* é uma tendência consistente, também identificada no estudo de Filho [5].

Tabela 9. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada a^* para o engobe; $R^2 = 0,9055$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,014	1	0,014	22,467	0,018
Temp.	0,003	1	0,003	4,269	0,131
Temp. × Ciclo	0,001	1	0,001	2,011	0,251
Erro	0,002	3	0,001		
Total	0,019	6			

Na Tabela 10, fica evidente que tanto o ciclo de queima quanto a temperatura exercem influência sobre a coordenada L^* . À medida que tanto o ciclo quanto a temperatura aumentam, o engobe tende a adquirir uma tonalidade mais escura. Além disso, pode-se afirmar que o ciclo de queima tem uma influência mais significativa do que a temperatura, como indicado pelo valor F. Isso sugere que, ao avaliar essas duas variáveis, o ciclo de queima desempenha um papel mais proeminente na alteração da luminosidade do engobe.

Tabela 10. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada L* para o engobe; $R^2 = 0,9878$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	1,706	1	1,706	147,070	0,001
Temp.	1,032	1	1,032	89,007	0,003
Temp. × Ciclo	0,082	1	0,082	7,053	0,077
Erro	0,035	3	0,012		
Total	2,854	6			

Ao analisar as tabelas de ANOVA referentes aos corpos de prova engobados, torna-se evidente que, em contraste com os resultados obtidos para a base cerâmica, a combinação das duas variáveis de processo não exerceu influência sobre nenhuma das coordenadas colorimétricas. Isso sugere que, para as peças com engobe, as mudanças nas condições de temperatura e ciclo de queima não resultaram em variações significativas nas características de cor avaliadas.

3.3. Corpos de prova esmaltados:

As tabelas seguintes apresentam os resultados obtidos nas avaliações dos corpos de prova esmaltados. Na Tabela 12 é possível observar que tanto a temperatura quanto o ciclo, quando analisados individualmente, exerceram influência sobre a variável b*. Esse comportamento é semelhante ao que foi observado nas peças engobadas. Essa influência encontrada na Tabela 12 pode ser explicada pelo fato de que, em certos casos, o aumento da temperatura ou do ciclo durante o processo de queima pode levar a uma redução da estabilidade da cor. Essa instabilidade cromática pode estar relacionada a mudanças nas propriedades químicas e físicas dos materiais envolvidos, explicando assim a influência detectada [9].

Tabela 12. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada b* para o esmalte; $R^2 = 0,9840$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,214	1	0,214	101,824	0,002
Temp.	0,174	1	0,174	82,596	0,003
Temp. × Ciclo	0,000	1	0,000	0,012	0,920
Erro	0,006	3	0,002		
Total	0,395	6			

A Tabela 13 e Tabela 14, referentes às coordenadas colorimétricas a* e L*, revelaram comportamentos similares. Nenhuma das variáveis analisadas demonstrou influência significativa, ou seja, nem a temperatura nem o ciclo de queima exerceram impacto na variação da cor entre tons de vermelho e verde (coordenada a*) e na luminosidade (coordenada L*). Isso indica que, para essas características colorimétricas específicas, as variações nas condições de temperatura e ciclo de queima não têm um efeito notável nas amostras esmaltadas.

Tabela 13. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada a* para o esmalte; $R^2 = 0,78772$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,002	1	0,002	4,892	0,114
Temp.	0,003	1	0,003	6,220	0,088
Temp. × Ciclo	0,000	1	0,000	0,020	0,897
Erro	0,001	3	0,000		
Total	0,006	6			

Tabela 14. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre a coordenada L* para o esmalte; $R^2 = 0,78375$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,191	1	0,191	3,898	0,143
Temp.	0,198	1	0,198	4,042	0,138
Temp. × Ciclo	0,144	1	0,144	2,932	0,185
Erro	0,147	3	0,049		
Total	0,680	6			

Assim, os problemas associados à variação de tonalidade resultantes de mudanças no ciclo e na temperatura para o esmalte testado estão predominantemente relacionados à variação entre tons de azul e amarelo, de acordo com as coordenadas de cor medidas. Pode-se notar que o aumento da temperatura e do ciclo de queima resulta em um esmalte com um tom de amarelo menos intenso. É importante ressaltar que a variação de cor observada nas coordenadas a^* e L^* na base e no engobe não se manifestou no esmalte, pois somente foram detectadas variações na coordenada b^* . As coordenadas a^* e L^* não apresentaram significância estatística devido à natureza do esmalte, que é caracterizado pela cor branca. No entanto, é evidente que o ciclo e a temperatura de queima exercem um impacto considerável na variação das propriedades colorimétricas. Apesar disso, no caso de esmaltes brancos, que não são pigmentados, as variações desses fatores tornam-se imperceptíveis.

Na Tabela 15 percebe-se que apenas a temperatura teve influência no brilho, e quanto maior a temperatura, menor o brilho desenvolvido pelo esmalte.

Tabela 15. ANOVA para o efeito da temperatura e ciclo sobre o brilho para o esmalte; $R^2 = 0,85381$

Fator	SS	Df	MS	F	p
Ciclo	0,941	1	0,941	0,241	0,657
Temp.	64,803	1	64,803	16,616	0,027
Temp. × Ciclo	2,592	1	2,592	0,665	0,475
Erro	11,700	3	3,900		
Total	80,036	6			

Por fim, ao examinar as tabelas de ANOVA relacionadas aos corpos de prova esmaltados, novamente pode-se observar que a interação entre as duas variáveis de processo não exerceu influência sobre nenhuma das coordenadas colorimétricas avaliadas.

É importante destacar que todas as análises foram conduzidas com base nas temperaturas e ciclos definidos no procedimento experimental. Portanto, é fundamental ressaltar que as influências das variáveis de processo sobre as coordenadas de cor analisadas podem variar quando se alteram os valores estabelecidos no procedimento de trabalho. Essa observação enfatiza a necessidade de um planejamento cuidadoso e ajustes nas condições de processo, a fim de alcançar os resultados desejados no contexto da produção de esmaltes cerâmicos.

4. CONCLUSÕES:

A variação de tonalidade nos revestimentos cerâmicos é uma questão de grande importância na indústria, uma vez que a aparência da superfície do revestimento é uma das características mais relevantes.

A análise dos resultados mostrou que, para a base cerâmica, apesar dos efeitos sobre as coordenadas de cor terem sido bastante distintos, em geral a interação das duas variáveis de processo (temperatura e ciclo) influenciou em todas as coordenadas colorimétricas, o que demonstra a complexidade das interações nesse contexto. No entanto, essa variação não é motivo de grande preocupação para as empresas, uma vez que a base geralmente precisa atender a critérios como resistência mecânica e absorção de água, sendo a ênfase estética direcionada para a camada vítrea final da cerâmica monoporosa, ou seja, o esmalte.

Ao examinar o comportamento do engobe, observou-se que tanto a temperatura quanto o ciclo de queima influenciaram as coordenadas b^* e L^* , enquanto a coordenada a^* foi afetada apenas pelo ciclo.

Os resultados mais relevantes se referem aos corpos de prova esmaltados, uma vez que são eles que conferem o efeito estético final ao produto cerâmico. Notou-se que as coordenadas a^* e L^* não foram afetadas pelas variáveis analisadas, enquanto a coordenada b^* foi influenciada tanto pela temperatura quanto pelo ciclo. Aumentos na temperatura e no ciclo resultaram em uma tonalidade mais azulada. Além disso, o brilho foi afetado apenas pela temperatura de queima.

Consequentemente, as notáveis variações colorimétricas identificadas destacam a necessidade de um controle rigoroso na etapa de queima, considerando variáveis como temperatura, ciclo, pressão e resfriamento. Todas essas variáveis desempenham um papel fundamental na formação da cor final

do revestimento e, por conseguinte, nos desvios identificados. Os resultados deixam claro que o controle da coordenada b^* deve ser particularmente minucioso, uma vez que pequenas variações nas condições de temperatura e ciclo podem resultar em variações significativas na tonalidade final do produto. Isso destaca a importância de um controle de qualidade preciso e rigoroso em processos industriais de produção de revestimentos cerâmicos.

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] BNDES, 2006. Panorama do setor de revestimentos cerâmicos. Brasília: Departamento de Bens de Consumo. <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15303>
- [3] Garzón E, Pérez-Villarejo L, Eliche-Quesada D, Martínez-Martínez S, Sánchez-Soto P J, 2022. Vitrification rate and estimation of the optimum firing conditions of ceramic materials from raw clays: A review. *Ceramics International* 48, 11, 15889-15898. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.02.129>
- [4] Borgert J B, 1999. A influência da queima na variação da tonalidade de revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial* 2, 1-6, 11-18.
- [5] Abril Filho O, 1999. Esmaltes, esmaltação e variação de tonalidade. *Cerâmica Industrial* 4, 1-6, 11-18.
- [6] Kazakou T, Zorba T, Vourlias G, Pavlidou E, Chrissafis K, 2019. Combined studies for the determination of the composition and the firing temperature of ancient and contemporary ceramic artefacts. *Thermochimica Acta* 682, 178412. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2019.178412>
- [7] Boschi A O, Melchiades F G, 1999. Cores e tonalidades em revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial* 2, 1-6, 11-18.
- [8] Teixeira A L, Borges D C M, Silva J A, Ferreira N M M, Cargnin M, 2012. Influência dos tipos de matérias-primas e das condições de queima na cor do suporte cerâmico. *Rev. Técnico Científica (IFSC)* 3, 1.
- [9] Earl D A, Clark D E, 2001. Efeitos da composição da frita sobre o desenvolvimento da cor em esmaltes de monoporosa com zircônio-vanádio. *Cerâmica Industrial* 6, 1, 43-50.
- [10] Machado P, Hotza D, Petter C, Bergmann C, 1997. Controle de qualidade para revestimentos cerâmicos através da análise colorimétrica de superfície vidrada monocromática. *Cerâmica Industrial* 2, 51-55, 11-18.
- [11] Gómez-Polo C, Martín-Casado A M, Montero J, 2023. Fifteen ceramic gingival samples: A proposed gingival shade guide. *Journal of Dentistry* 138, 104648. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104648>
- [12] Konica Minolta, 2018. Espectrofotômetro CM-2600D. <http://sensing.konicaminolta.com.br/products/espectrofotometro-cm-2600d>
- [13] Deviante, 2017. Hipótese nula e valor-p. <http://www.deviante.com.br/noticias/ciencia/hipotese-nula-e-valor-p>
- [14] Loureiro L M J, Gameiro M G H, 2011. Interpretação crítica dos resultados estatísticos: para lá da significância estatística. *Enfermagem Referência* 3, 151-162.
- [15] ESTGV, 2018. Análise de variância. <http://www.estgv.ipv.pt/paginaspeessoais/lucas/material/ANOVA2FAluno.pdf>
- [16] Portal Action, 2018. Teste Fisher (ou LSD). <http://www.portalaction.com.br/anova/32-teste-de-fisher>
- [17] NBR ISO 10545-3, 2020. Placas cerâmicas. Parte 3. Determinação da absorção de água, porosidade aparente, densidade relativa aparente e densidade aparente. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.