

Estudo da influência de variáveis de produto e execução de ensaio na resistência ao impacto de porcelanatos

Laura Savi Rosso ^{1*}, Juliana de Oliveira Menegon ¹, Aline Demarch ¹, Angela Waterkemper Vieira ¹, Débora Juliani Zuchinalli 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 comercialização de revestimentos cerâmicos exige estrita conformidade com normas para garantir a qualidade e confiabilidade da empresa fabricante. Nesse cenário, o ensaio de resistência ao impacto desempenha um papel crucial na busca pela excelência na qualidade dos produtos cerâmicos. Esse ensaio avalia a energia dissipada pelo conjunto composto por peça cerâmica, argamassa e bloco de concreto, juntamente com a energia restituída por uma esfera de aço após o impacto. O impacto na superfície do revestimento pode resultar em defeitos superficiais, cujos efeitos variam conforme as variáveis do produto testado e a execução do ensaio. Portanto, o objetivo deste estudo foi avaliar como as variáveis do produto e do ensaio influenciam os resultados do coeficiente de restituição e os danos na superfície testada. Para este fim, o estudo avaliou a resistência ao impacto de quatro tipos de porcelanatos (técnicos natural e polido, esmaltado acetinado e granilhado). Após a preparação das amostras, o ensaio de impacto foi conduzido de acordo com a ABNT NBR ISO 10545, e as amostras foram analisadas visualmente em busca de trincas e lascamento do esmalte. A análise foi dividida em duas fases, uma avaliando variáveis do produto, incluindo a espessura da base do porcelanato e da camada de esmalte, e a outra avaliando variáveis do ensaio, incluindo altura de queda e massa da esfera impactante. 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 analisados para uma significância de 95%. Com base nos ensaios de impacto realizados em porcelanatos para avaliar a influência da espessura da base e da camada de esmalte no coeficiente de restituição e no tamanho do dano, observa-se que a espessura da base exerceu uma influência significativa nos resultados do porcelanato esmaltado acetinado. Além disso, os ensaios que variaram a altura de queda e a massa do corpo impactante influenciaram os resultados, especialmente no porcelanato esmaltado acetinado e no porcelanato técnico natural, onde o valor de "p" foi inferior a 0,05 na relação entre altura e massa, destacando a importância da interação entre essas variáveis nos resultados. No entanto, os produtos com granilha, como o porcelanato esmaltado granilhado, parecem apresentar resultados positivos nos testes, possivelmente devido à granilha atuar como um "amortecedor".

Palavras-Chave: Resistência ao impacto; porcelanato; revestimento cerâmico; variáveis.

1.1. INTRODUÇÃO:

A comercialização de revestimentos cerâmicos exige a estrita conformidade com normas estabelecidas, garantindo, assim, a qualidade dos produtos entregues aos clientes e, por conseguinte, a confiabilidade da empresa fabricante [1][2]. No contexto da busca pela excelência na qualidade dos produtos cerâmicos, destaca-se o ensaio de resistência ao impacto como um dos procedimentos essenciais [3].

A resistência ao impacto de um material está ligada às propriedades de ligações químicas intermoleculares e à estrutura deste [4]. A capacidade de um material absorver a energia resultante de um impacto está relacionada com sua tenacidade e resiliência, que, por sua vez, estão diretamente associadas à resistência do material [5].

Desta forma, a tenacidade desempenha um papel crucial ao permitir que um material absorva a energia mecânica necessária para romper suas ligações químicas constituintes e, em última instância, resistir ao impacto [6]. Por outro lado, a resiliência representa a capacidade de um material absorver energia durante uma deformação elástica, sem sofrer ruptura [7].

Com relação aos materiais cerâmicos, por estes apresentarem uma notável dureza e baixa tenacidade, são propensos à fragilidade [6]. Em vez de deformar sob forças que causariam alteração em outros materiais, eles tendem a fraturar, devido a ligações iônicas e covalentes que formam planos de deslizamento independentes e não coesos entre as partículas, levando à quebra e formação de trincas [6][5]. Além disso, esses materiais não exibem alta resiliência, uma vez que suas ligações químicas não permitem a absorção de energia sem que ocorra a quebra de algumas ligações ou a formação de trincas, resultando em grande parte das ligações primárias, como covalentes e iônicas, que não estão fortemente interconectadas devido à sua natureza [7].

Neste sentido, o ensaio de resistência ao impacto é um procedimento crucial realizado em revestimentos cerâmicos para avaliar a capacidade do material de suportar impactos sem que haja alteração perceptível em sua superfície [3][5]. Este ensaio desempenha um papel importante na determinação dos locais mais apropriados para a aplicação de revestimentos cerâmicos em diversas condições de uso [8]. Os produtos destinados ao revestimento de pisos requerem uma atenção especial, uma vez que estão particularmente suscetíveis a quedas de objetos e impactos [3].

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 10545[9], esse ensaio consiste na avaliação da quantidade de energia dissipada pelo conjunto composto pela peça cerâmica, argamassa e bloco de concreto, bem como da energia que é restituída por uma esfera de aço. Para realização deste ensaio, utiliza-se um objeto impactante esférico de tamanho e massa predefinidos e um equipamento cujo esquema é mostrado na Fig.1.

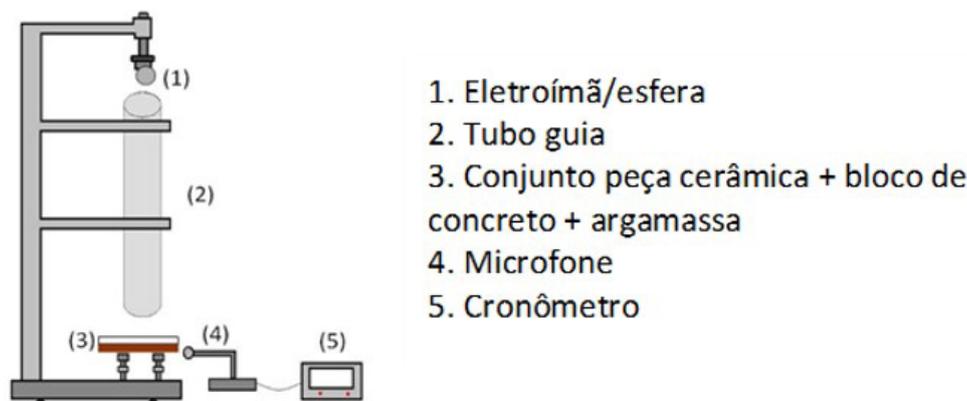


Figura 1. Impactrômetro

O impacto na superfície do revestimento cerâmico resulta na criação de defeitos superficiais, que podem assumir a forma de rachaduras radiais ou mesmo no lascamento do esmalte [3]. Esses defeitos oferecem informações essenciais sobre a capacidade de resistência ao impacto do material cerâmico [3]. No entanto, é crucial destacar que o resultado do impacto pode ser significativamente influenciado por variáveis do produto a ser ensaiado, como a espessura do revestimento cerâmico e de sua camada de cobertura (esmalte) e por variáveis de execução de ensaio, como a massa do objeto impactante esférico e sua altura de queda.

Desta forma, o objetivo deste estudo foi avaliar a resistência ao impacto de porcelanatos, com ênfase na investigação de como algumas características podem influenciar os resultados. Essas características incluem a espessura do revestimento cerâmico e de sua camada de cobertura (esmalte), a massa do objeto impactante esférico e sua altura de queda.

2. MATERIAIS E MÉTODOS:

Foram coletadas peças da tipologia porcelanato produzidas em escala industrial na mesma data de fabricação, com o propósito de padronizar o processo e eliminar as variáveis associadas. Trabalhou-se com dois porcelanatos técnicos (natural e polido) e dois porcelanatos esmaltados (acetinado e granilhado).

Após a seleção e coleta dos materiais, estes foram cortados em amostras de 75 × 75 mm, cada amostra foi assentada e o ensaio de impacto foi realizado de acordo com a ABNT NBR ISO 10545 [9]. Após o assentamento as amostras permaneceram à temperatura ambiente para a cura da argamassa, e em seguida foram submetidas ao ensaio de resistência ao impacto no impactômetro. Com a realização do ensaio, os corpos foram analisados visualmente quanto ao aparecimento de trincas e lascamento do esmalte.

As análises foram divididas em duas etapas. Inicialmente foram avaliadas as variáveis do produto que poderiam interferir na sua resistência ao impacto. Num segundo momento, foram avaliadas as variáveis de ensaio, altura de queda e massa da esfera.

O aplicativo utilizado para analisar os dados obtidos foi o Statistica. A ênfase foi dada aos parâmetros F, p e R², sendo "F" o controlador da taxa de erro do experimento, "p" um valor utilizado para representar a chance ou a probabilidade, e "R²" o coeficiente de determinação [10].

2.1. Análise das variáveis de ensaio:

O planejamento experimental mostrado na Tab.1 teve como objetivo conhecer melhor o método pela análise de algumas variáveis de ensaio. Foram selecionadas como principais variáveis a massa do objeto que irá impactar sobre o corpo de prova de ensaio, e a altura em que o mesmo irá cair. O planejamento fatorial foi do tipo 2² com três pontos centrais.

Tabela 1. Planejamento experimental para análise das variáveis de ensaio

Teste	Níveis/Fatores	Altura (m)	Massa (g)
1	-1 e -1	1	30
2	-1 e +1	1	270
3	+1 e -1	2	30
4	+1 e +1	2	270
5.1	0 e 0	1,5	150
5.2	0 e 0	1,5	150
5.3	0 e 0	1,5	150

Foi quantificado o coeficiente de restituição seguindo o procedimento especificado na ABNT NBR ISO 10545 [9]. Foi avaliado e calculado também o coeficiente de restituição do corpo de prova e o tamanho do dano causado pelos elementos impactantes na superfície das amostras. O tamanho do dano foi medido com paquímetro digital (Mitutoyo).

Após a conclusão dos ensaios, o tratamento dos dados foi realizado (Statistica) com nível de confiança de 95% por análise de variância (ANOVA) para verificação da influência das variáveis de ensaio no coeficiente de restituição e tamanho do dano causado no produto.

2.2. Análise das variáveis do produto:

Essa etapa do trabalho teve o objetivo de avaliar a influência da espessura do produto na resistência ao impacto, ou coeficiente de restituição do mesmo. Para isso foi necessário confeccionar os corpos de prova em laboratório com diferentes espessuras. Foi verificada a influência da espessura da base e do esmalte. A espessura do esmalte foi modificada pelo peso da camada da aplicação do mesmo sobre a peça. Essa análise foi realizada apenas com um produto, da tipologia de porcelanato esmaltado com acabamento acetinado. A Tab.2 mostra o planejamento experimental fatorial para essa etapa da análise, que foi do tipo 2² com três pontos centrais.

Tabela 2. Planejamento experimental para a análise das variáveis do produto

Teste	Níveis/Fatores	Espessura base (cm)	Camada de esmalte (g/cm ²)
1	-1 e -1	8,5	0,03
2	-1 e +1	8,5	0,05
3	+1 e -1	10,5	0,03
4	+1 e +1	10,5	0,05
5.1	0 e 0	9,5	0,04
5.2	0 e 0	9,5	0,04
5.3	0 e 0	9,5	0,04

Da mesma forma, a análise destes resultados foi realizada no aplicativo Statistica para análise da variância com nível de confiança de 95%, como citado anteriormente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A discussão dos resultados foi segmentada em duas partes: a primeira aborda as análises das variáveis do produto, que compreendem a espessura e a camada de esmalte do revestimento cerâmico; a segunda parte se concentra nas variáveis do ensaio, que incluem a massa do objeto impactante esférico e sua altura de queda.

Para a discussão dos resultados, foram utilizadas as tabelas ANOVA, que mostram a influência das variáveis avaliadas nos resultados de resistência ao impacto dos revestimentos cerâmicos. Vale ressaltar a importância de avaliação do valor p. Quando este estiver abaixo de 0,05, a variável possui influência nos resultados de resistência ao impacto. O valor 0,05 (5%) foi escolhido para que fosse possível apresentar os resultados com 95% de significância.

3.1. Variáveis do produto:

As Tab.3 e Tab.4 mostram os resultados que destacam a influência da espessura da base do revestimento cerâmico e da camada de esmalte nos parâmetros de resistência ao impacto, incluindo o coeficiente de restituição e as dimensões do dano resultante.

Tabela 3. Influência das variáveis no coeficiente de restituição

Fatores	F	p	R ²	F _{crítico}	
Coef. Rest.	Esp. Base (mm)	10,642	0,047	0,811	10,13
	Cam. Esmalte (g/cm ³)	0,105	0,767		
	Camada × Esp.	2,158	0,238		

Tabela 4. Influência das variáveis no tamanho do dano

Fatores	F	p	R ²	F _{crítico}	
Tam. Dano	Esp. Base (mm)	14,282	0,032	0,848	10,13
	Cam. Esmalte (g/cm ³)	1,228	0,349		
	Camada × Esp.	1,228	0,349		

Com base nos resultados apresentados nas Tab.3 e Tab.4, é possível afirmar, com 95% de confiança, que a espessura da base exerce uma influência significativa sobre o coeficiente de restituição e o tamanho do dano, onde o valor de “p” foi inferior a 0,05. Esse efeito é corroborado pelo alto valor de “F” atribuído à espessura da base, evidenciando sua considerável influência nos resultados. Em contrapartida, a camada de esmalte e a relação entre camada e espessura da base do revestimento não demonstraram uma influência significativa em nenhum dos parâmetros analisados, quer se trate do coeficiente de restituição ou das dimensões do dano. Ademais, os dados coletados no ensaio revelam que o coeficiente de restituição aumenta com o incremento da espessura da base, enquanto ele se mantém praticamente inalterado com o aumento da camada, validando as conclusões extraídas a partir das análises ANOVA realizadas.

Os resultados obtidos neste estudo corroboram as afirmações de Enríquez et al. [3], que a resistência ao impacto depende a espessura do revestimento, sendo mais resistente quanto maior a espessura.

3.2. Variáveis de ensaio:

As Tab.5 e Tab.6 mostram a influência da massa do objeto impactante esférico e da altura de queda nos parâmetros de resistência ao impacto, incluindo o coeficiente de restituição e as dimensões do dano resultante, para diferentes tipos de revestimentos cerâmicos. Tab.5 e Tab.6 mostram os resultados dos testes realizados com o porcelanato esmaltado granilhado. As variáveis relacionadas com a massa, 'massa' e 'alt. × massa', apresentaram um elevado valor de "p" indicando que, em princípio, essas variáveis não tiveram um efeito estatisticamente significativo nos resultados. No entanto, na análise do coeficiente de restituição a variável 'altura' tem valor de p próximo a 0,05, e esta variável pode ser considerada significativa para o coeficiente de restituição.

Tabela 5. Influência das variáveis no coeficiente de restituição do porcelanato esmaltado granilhado

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Coef. Rest.	Altura (m)	9,534	0,054	0,781	10,13
	Massa (g)	0,118	0,754		
	Alt. × Massa	1,059	0,379		

Tabela 6. Influência das variáveis no tamanho do dano do porcelanato esmaltado granilhado

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Tam. Dano	Altura (m)	2,098	0,243	0,785	10,13
	Massa (g)	4,113	0,136		
	Alt. × Massa	4,767	0,117		

Tab.7 e Tab.8 mostram os resultados para o porcelanato esmaltado acetinado, que, embora seja o mesmo produto analisado nas Tab.5 e Tab.6, tem modificações em seu acabamento. Devido ao efeito final acetinado, este produto demonstrou um comportamento distinto em comparação ao granilhado, com um valor de "p" inferior a 0,05 na relação entre a Alt. × Massa, ao se avaliar o coeficiente de restituição. Além disso, o valor de "F" para esse parâmetro foi significativamente elevado. Por outro lado, na análise do tamanho do dano, os valores de "p" nas tabelas superaram 0,05, indicando que as variáveis investigadas não têm influência estatisticamente significativa nos resultados.

Tabela 7. Influência das variáveis no coeficiente de restituição do porcelanato esmaltado acetinado

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Coef. Rest.	Altura (m)	7,647	0,070	0,891	10,13
	Massa (g)	4,161	0,134		
	Alt. × Massa	12,825	0,037		

Tabela 8. Influência das variáveis no tamanho do dano do porcelanato esmaltado acetinado

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Tam. Dano	Altura (m)	1,253	0,344	0,415	10,13
	Massa (g)	0,150	0,724		
	Alt. × Massa	0,727	0,457		

Ao examinar as Tab.9 e Tab.10 para o ensaio com o porcelanato técnico polido, destaca-se a significância do valor de "p" na relação entre a altura e a massa ao avaliar o coeficiente de restituição.

Embora o valor não seja exatamente inferior a 0,05, ele se aproxima significativamente, tornando sua análise interessante. Por outro lado, para a Tab.10, para o tamanho do dano, todos os valores de p apresentaram-se superiores a 0,05, sugerindo que as variáveis investigadas não exercem um efeito estatisticamente significativo nos resultados.

Tabela 9. Influência das variáveis no coeficiente de restituição do porcelanato técnico polido

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Coef. Rest.	Altura (m)	2,890	0,188	0,827	10,13
	Massa (g)	2,388	0,220		
	Alt. × Massa	9,082	0,057		

Tabela 10. Influência das variáveis no tamanho do dano do porcelanato técnico polido

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Tam. Dano	Altura (m)	0,655	0,478	0,524	10,13
	Massa (g)	2,377	0,221		
	Alt. × Massa	0,275	0,636		

Conforme observado nas Tab.11 e Tab.12, o comportamento do porcelanato técnico polido assemelha-se ao comportamento do porcelanato técnico natural apresentado nas Tab.9 e Tab.10. Na Tab.11, o valor de “p” na relação entre altura e massa foi inferior a 0,05. Isso indica que a interação entre essas duas variáveis tem efeito significativo sobre o resultado. O alto valor de “F” enfatiza o efeito significativo da interação entre as variáveis nos resultados. Na Tab.12, por outro lado, não foram observados resultados de p iguais ou inferiores a 0,05. Não houve efeito das variáveis analisadas para o tamanho do dano no ensaio de impacto realizado com esse produto.

Tabela 11. Influência das variáveis no coeficiente de restituição do porcelanato técnico natural

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Coef. Rest.	Altura (m)	5,196	0,107	0,907	10,13
	Massa (g)	2,514	0,211		
	Alt. × Massa	21,697	0,019		

Tabela 12. Influência das variáveis no tamanho do dano do porcelanato técnico natural

Fatores		F	p	R ²	F _{crítico}
Tam. Dano	Altura (m)	2,728	0,197	0,709	10,13
	Massa (g)	2,804	0,193		
	Alt. × Massa	1,770	0,275		

De modo geral, ao analisar a influência das variáveis de ensaio nos resultados, observa-se que as variáveis relacionadas à altura a partir da qual o objeto impactante cai, ou seja, ‘altura’ e ‘altura × massa’, têm efeito significativo sobre o coeficiente de restituição. Entretanto, a variável isolada ‘massa’ não teve efeito significativo. Isso está de acordo com a literatura. Enríquez et al. [3] ressalta que a altura de queda da esfera pode afetar os resultados, pois a modificação da altura afeta energia de impacto.

4. CONCLUSÃO:

Com base nos resultados obtidos nos ensaios de impacto realizados em porcelanatos, específicos para avaliar a influência da espessura da base e da camada de esmalte no coeficiente de restituição

e no tamanho do dano, observa-se que o valor de “p” foi inferior a 0,05 em relação à espessura da base para ambos os parâmetros analisados no porcelanato esmaltado acetinado. Isso indica uma forte influência da espessura da base nos resultados dos ensaios, dado pelo alto valor de “F” observado em ambos os casos para a espessura da base. Portanto, para obter um produto com alta resistência ao impacto, é essencial considerar uma espessura significativa, uma vez que maior espessura resultará em maior resistência.

Além disso, em relação aos ensaios que envolveram a variação na altura de queda e na massa do corpo impactante, houve uma influência significativa nos resultados para o porcelanato esmaltado acetinado quando se avaliou o coeficiente de restituição, bem como para o porcelanato técnico natural. Em ambos os casos, o valor de “p” foi inferior a 0,05 na relação entre altura e massa. Isso sugere que, ao considerar a interação entre essas duas variáveis, os resultados podem ser substancialmente afetados, uma vez que altura e massa demonstraram ter uma influência direta sobre os resultados dos ensaios.

Por outro lado, os demais produtos, como o porcelanato esmaltado granilhado e o porcelanato técnico polido não apresentaram valores de “p” inferiores a 0,05 em seus resultados. Vale ressaltar que a presença de granilha no porcelanato esmaltado granilhado provavelmente atuou como um “amortecedor”, explicando os resultados positivos obtidos nos testes com esse tipo de produto.

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] Lu Q, Lin J, Luo L, Zhang Y, Zhu W, 2022. A supervised approach for automated surface defect detection in ceramic tile quality control. *Advanced Engineering Informatics* 53, 101692. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aei.2022.101692>
- [2] Altenhofen V S, Pilz S E, Costella M F, 2020. Avaliação de ensaios relacionados aos pisos cerâmicos de acordo com a norma de desempenho. *Revista de Engenharia e Tecnologia* 12, 2, 25-33.
- [3] Enríquez E, Fuertes V, Cabrera M J, Seores J, Muñoz D, Fernández J F, 2019. Absence of surface flaking in hierarchical glass-ceramic coating.:High impact resistant ceramic tiles. *Journal of The European Ceramic Society* 39, 14, 4450-4456. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2019.05.047>
- [4] Tamsu S N, 2022. Relationship between microstructure and the impact resistance of porcelain stoneware tiles. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio* 61, 3, 210-219. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bsecv.2020.10.001>
- [5] Andraskar N D, Tiwari G, Goel M D, 2022. Impact response of ceramic structures. A review. *Ceramics International* 48, 19, 27262-27279. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.313>
- [6] Zhong X, Cao L, Huang J, Liu Y, Shen X, Wang Q, Wu C, Shen T, Hu Y, Niu W, 2023. Improved toughness and impact resistance of bio-inspired porcelain ceramic composites with shell-like structure. *Construction and Building Materials* 384, 131399. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131399>
- [7] Garbelott RA, De Noni A, Rocha A S, 2014. Avaliação de propriedades mecânicas de porcelanato reforçados com fibras metálicas. *Cerâmica Industrial* 19, 1, 24-27. <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2014.061>
- [8] Silva M N P, Silva M N P, Barrionuevo B U S, Feitosa I M, Silva G S, 2015. Revestimentos cerâmicos e suas aplicabilidades. *Caderno de Graduação, UNIT* 2, 3, 87-97. <https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/2138>
- [9] NBR ISO 10545, 2017. Placas cerâmicas. Parte 5. Determinação da resistência ao impacto pela medição do coeficiente de restituição. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- [10] Pacheco J A, 2011. Análise estatística usando o Statistica. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.