



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

Talita Rosa

**Análise de método de avaliação de resistência ao impacto de superfícies de
porcelanato destinado ao uso como peças de mobiliário**

FLORIANÓPOLIS

2025

Talita Rosa

**Análise de método de avaliação de resistência ao impacto de superfícies de
porcelanato destinado ao uso como peças de mobiliário**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Dachamir Hotza
Coorientador: Prof. Dr. Agenor De Noni Junior

FLORIANÓPOLIS

2025

Rosa, Talita

Análise de método de avaliação de resistência ao impacto de superfícies de porcelanato destinado ao uso como peças de mobiliário / Talita Rosa ; orientador, Dachamir Hotza, coorientador, Agenor de Noni Junior, 2025.

86 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Ciência e Engenharia de Materiais. 2. revestimento cerâmico; porcelanato; resistência ao impacto. I. Hotza, Dachamir. II. de Noni Junior, Agenor. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. IV. Título.

Talita Rosa

Análise de método de avaliação de resistência ao impacto de superfícies de porcelanato destinado ao uso como peças de mobiliário

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 09 de maio de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.Dachamir Hotza, Dr
Instituição EQA/UFSC

Prof. Marcelo Dal Bó, Dr.
Instituição IFSC/Criciúma

Marcelo Daniel Barros, Dr.
Instituição SEPLAN/SC

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Ciência e Engenharia dos Materiais.

Insira neste espaço a
assinatura digital

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Dachamir Hotza, Dr.
Orientador(a)

Insira neste espaço a
assinatura digital

Prof. Agenor de Noni Junior, Dr.
Coorientador(a)

Florianópolis, 2025.

À minha mãe, ao meu filho, e aos amigos que caminharam comigo nesta jornada,
oferecendo apoio, escuta e incentivo nos momentos em que mais precisei;
E a mim mesma, por não desistir, por enfrentar cada obstáculo com determinação e
transformar esforço em conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Cerâmica Portobello e a Officina Portobello pela parceria e pela infraestrutura disponibilizada para a realização desta pesquisa.

Manifesto minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Dachamir Hotza, orientador deste trabalho, pela orientação dedicada e pelo constante incentivo ao desenvolvimento da pesquisa. Estendo meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Agenor De Noni Junior, coorientador, pelas contribuições técnicas e pelo suporte essencial durante todas as etapas do estudo.

Agradeço ainda aos colegas do Produto Acabado pelas colaborações enriquecedoras. Por fim, agradeço à minha família, meu namorado e amigos pelo apoio incondicional, paciência e encorajamento contínuo.

Não sabendo que era impossível, ele foi lá e fez.

Jean Cocteau

RESUMO

Este estudo teve como objetivo principal desenvolver e validar um método para a avaliação da resistência ao impacto em peças de mobiliário confeccionadas em porcelanato. Espera-se contribuir para proporcionar aos usuários e fabricantes informações confiáveis sobre o desempenho do material em condições análogas à de uso. A pesquisa fundamenta-se na análise de normas técnicas aplicáveis, como a NBR 15845-8, voltada para rochas, e a ABNT NBR 10545-5, específica para placas cerâmicas, a fim de compreender os requisitos e especificações para testes de impacto. Além disso, foram considerados estudos que aplicam métodos não normativos para avaliar a resistência ao impacto e qualificar os danos resultantes. Para a validação do método, foram realizados ensaios em amostras de porcelanato destinadas ao uso em bancadas, com o objetivo de compreender a influência de diferentes parâmetros na propagação dos danos. A metodologia adotada seguiu princípios semelhantes aos métodos normativos, com a execução de impactos sucessivos no mesmo ponto, aumentando progressivamente a altura de queda até que um dano visível fosse identificado na superfície do revestimento. A normativa aplicada às rochas para revestimento aplica energia mínima de 0,9 J, podendo chegar a 9,1 J. A norma aplicada de acordo com a normativa para revestimentos cerâmicos, gera uma energia de 0,275 J. Os resultados demonstraram que, para o porcelanato avaliado, a energia média de impacto foi de 1,12 J, com desvio padrão de 0,09 J. A relevância desta pesquisa se sustenta na crescente demanda por materiais de construção que apresentem alta performance e durabilidade, assim como na necessidade de um aprofundamento teórico e experimental sobre os mecanismos de falha por impacto em porcelanatos. O estudo contribui para o desenvolvimento de um método confiável e padronizado para a avaliação dessa propriedade, permitindo a obtenção de dados mais precisos sobre o comportamento mecânico do material.

Palavras-chave: revestimento cerâmico; porcelanato; resistência ao impacto.

ABSTRACT

This study aimed to develop and validate a method for evaluating the impact resistance of furniture components made of porcelain tile. The objective is to provide users and manufacturers with reliable information about the performance of the material under conditions analogous to real use. The research is based on the analysis of applicable technical standards, such as NBR 15845-8, which focuses on natural stone, and ABNT NBR 10545-5, specific to ceramic tiles, in order to understand the requirements and specifications for impact testing. Additionally, studies that employ non-standardized methods to assess impact resistance and qualify the resulting damage were considered. For the validation of the method, tests were conducted on porcelain tile samples intended for countertop use, aiming to understand the influence of different parameters on damage propagation. The adopted methodology followed principles similar to those of standardized methods, with successive impacts being applied to the same point, progressively increasing the drop height until visible damage was identified on the surface of the tile. The standard applied to natural stone for cladding imposes a minimum energy of 0.9 J, which can reach up to 9.1 J. The standard for ceramic tiles, on the other hand, generates an impact energy of 0.275 J. The results showed that, for the evaluated porcelain tile, the average impact energy was 1.12 J, with a standard deviation of 0.09 J. The relevance of this research lies in the growing demand for construction materials that offer high performance and durability, as well as the need for a deeper theoretical and experimental understanding of impact failure mechanisms in porcelain tiles. This study contributes to the development of a reliable and standardized method for evaluating this property, enabling the acquisition of more accurate data on the material's mechanical behavior.

Keywords: ceramic tile; porcelain tile; impact resistance.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. OBJETIVO GERAL.....	15
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3. PORCELANATO: PROCESSAMENTO, APLICAÇÕES E PROPRIEDADES.....	15
3.1. PROCESSAMENTO DO PORCELANATO.....	18
3.2. PORCELANATOS COMO ELEMENTOS DO MOBILIÁRIO.....	27
3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PORCELANATO.....	32
3.4. NORMAS DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	35
3.4.1. Resistência ao impacto de corpo duro.....	37
3.4.2. Resistência ao impacto pela medição do coeficiente de restituição.....	39
3.4.3. Ensaio de dureza Vickers.....	41
3.4.4. Ensaio de dureza ao Risco de Mohs.....	43
3.5. MÉTODOS NÃO NORMATIVOS PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	45
3.5.1. Método do pêndulo com dardo.....	46
3.5.2. Método da queda livre com esfera.....	52
3.5.3. Análise da resistência ao impacto de porcelanatos de grandes formatos...	55
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	62
4.1. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL.....	69
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO REVESTIMENTO.....	71
5.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	72
5.3. OBSERVAÇÕES QUANTO À QUALIDADE DO ASSENTAMENTO.....	78
CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	83

1. INTRODUÇÃO

Atualmente a escolha de bancadas de cozinha com materiais diversos vem se destacando. Entre os principais materiais aplicados para essa finalidade temos: o granito por ser durável, resistente ao calor e impactos, fácil manutenção, mas pode ser sensível a produtos ácidos. As pedras artificiais, como quartzo e mármore industrializado, são padronizadas, não porosas, fáceis de limpar e possuem ampla variedade de cores e acabamentos, mas têm alto custo, baixa resistência ao calor e abrasão. O aço inox por ser extremamente higiênico, prático e resistente ao calor e bactérias, sendo ideal para cozinhas industriais, mas risca com facilidade e tem custo elevado. O vidro, quando temperado, é seguro, resistente a manchas, fácil de limpar e combina com diversos estilos de acabamento, mas apresenta alto custo de fabricação e instalação. O porcelanato vem ganhando espaço, oferecendo infinitas opções de acabamento, podendo imitar outros materiais como madeira e mármore (MIGLIANI,2025).

O porcelanato tem se consolidado como uma opção sofisticada e moderna para cozinhas, sendo altamente valorizado por sua versatilidade e ampla gama de cores, padrões e acabamentos, superando materiais como pedras naturais e granitos. As bancadas de porcelanato são produzidas a partir de grandes formatos, cortados e ajustados conforme o projeto, o que possibilita aplicações versáteis, inclusive em mobiliário. Seu design, inspirado em materiais naturais como mármore, pedra, madeira e concreto, agrega sofisticação aos ambientes. No entanto, apesar de sua durabilidade, o porcelanato pode apresentar danos em caso de impactos (CAZA MODERNA, 2023; BIANCOGRES, 2024)

Os porcelanatos são placas cerâmicas de alta qualidade, comumente utilizadas em revestimentos de pisos e paredes, em ambientes internos e externos, devido à sua durabilidade, resistência e apelo estético. Esses revestimentos cerâmicos do tipo porcelanato também são chamados de grés porcelânico, se refere a materiais altamente compactados compostos por diversas fases cristalinas dispersas em fase vítrea (CARTY; SENAPATI, 1998). No Brasil, o uso do porcelanato tem se expandido significativamente, não só como revestimento tradicional, mas também em aplicações inovadoras, como em fachadas ventiladas, bancadas de cozinha, bancadas de banheiro, tampos de mesa e objetos decorativos 3D. Essa versatilidade se deve à combinação entre resistência

mecânica, design variado assim como tecnologia de corte e colagem (BIANCOGRES, 2019).

A sinergia entre a tecnologia de produção e as propriedades físico-mecânicas deste material, como densidade, resistência à flexão, dureza e resistência ao desgaste, o torna adequado para aplicações em ambientes internos e externos. Sua confiabilidade, durabilidade e resistência a condições adversas, aliadas a um custo compatível com os benefícios, o destacam no mercado e impulsionam sua produção (WIGGERS entre outros, 2007).

De acordo com a norma de revestimentos cerâmicos ABNT ISO 13006 (2020), o porcelanato é constituído por matérias-primas inorgânicas entre elas as argilas e os feldspatos. Para Carty e Senapati (1998), os porcelanatos são classificados como cerâmicas tradicionais, pertencem ao grupo das cerâmicas triaxiais, são constituídas pela combinação de três classes de matérias primas: os argilominerais, os fundentes e os inertes.

A produção de cerâmicas envolve processos fundamentais, como coleta e preparação das matérias-primas, conformação das peças, secagem e queima (OLIVEIRA, 2000). Segundo Gasch (2007), o processamento cerâmico pode ser dividido em seis etapas. A primeira é a preparação das matérias-primas, na qual argila, minerais, água e aditivos são cuidadosamente cominuídos e misturados até formar uma massa homogênea e fluida, garantindo a uniformidade da peça final. A segunda etapa envolve a conformação da massa, utilizando técnicas como prensagem e extrusão. Em seguida, ocorre a secagem, na qual a peça moldada passa por um processo de eliminação da umidade para evitar deformações durante a queima. A quarta etapa é a esmaltação, onde uma camada de esmalte é aplicada sobre a peça seca, proporcionando acabamento desejado (mate, brilhante ou acetinado) e maior resistência. Posteriormente, a peça passa pela queima, etapa em que os fornos atingem altas temperaturas, permitindo a fusão do esmalte e conferindo dureza e resistência ao material. Por fim, realiza-se o controle de qualidade, no qual as peças são rigorosamente inspecionadas para assegurar que atendam aos padrões exigidos. Após a aprovação, são embaladas e preparadas para distribuição.

O porcelanato destaca-se como um material durável e versátil para a fabricação de móveis, em especial nas substituições às pedras ornamentais naturais. Sua baixa

porosidade facilita a limpeza e proporciona alta resistência a manchas, enquanto a ampla variedade de acabamentos permite a personalização de diferentes ambientes. Além disso, a possibilidade de esculpir cubas no próprio material flexibiliza e aumenta as opções quanto ao design do mobiliário (ELIANE, 2021).

O processo de manufatura de mobília em porcelanato tem como base as técnicas utilizadas em marmorarias. O processo inclui o corte de placas pré-polidas por meio de máquinas com discos diamantados rotativos. Em seguida pelo polimento e acabamento manual, utilizando lixadeiras, politrizes e ferramentas abrasivas para garantir a qualidade no acabamento das peças. Esses mobiliários podem ser confeccionados de forma simples, com apenas o revestimento, ou em versão composta, integrando o revestimento a outros materiais. A montagem final geralmente ocorre no local de instalação, especialmente para móveis como pias, bancadas e mesas (CAZA MODERNA, 2023).

Nesse contexto, o porcelanato tem se consolidado como um material versátil e resistente, difundido na produção de mobiliário. No entanto, apesar de suas propriedades, a resistência ao impacto ainda é sua maior limitação técnica e pouco explorado na literatura científica. Diante disso, esta pesquisa busca aprofundar o conhecimento sobre os mecanismos de falha por impacto em porcelanatos, com o objetivo de identificar, avaliar e propor adequações a um método de avaliação dessa propriedade, contribuindo para a otimização de sua aplicação na fabricação de mobiliários e outros produtos (PORTOBELLO, 2019).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é estudar uma nova metodologia de medição da resistência ao impacto aplicado a peças de mobiliário em porcelanato, ou em outros materiais, que seja capaz de fornecer ao usuário uma referência fidedigna de desempenho em condições reais de uso.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os respectivos objetivos específicos são:

- Analisar as normas relevantes, como a NBR 15845-8 (*Impacto de corpo duro em rochas para revestimento*), ABNT NBR 10545-5 (*Resistência ao impacto de placas cerâmicas pela medição do coeficiente de restituição*) e ISO 6507 (*Dureza Vickers*), a fim de compreender os requisitos e especificações que regem os métodos de teste de resistência ao impacto do porcelanato.
- Avaliar a repetibilidade dos testes de resistência ao impacto, realizando múltiplas medições em amostras utilizadas em bancadas para verificar a confiabilidade dos resultados.
- Sugerir possíveis melhorias e atualizações nas técnicas de medição e nas normas existentes, acompanhando as inovações tecnológicas e as necessidades do mercado.

3. PORCELANATO: PROCESSAMENTO, APLICAÇÕES E PROPRIEDADES

Revestimentos cerâmicos são elementos construtivos versáteis e duráveis, comumente usados na arquitetura e decoração de ambientes. Essencialmente, são peças compostas por um corpo principal, geralmente fabricado a partir de argilas e feldspatos, cuja porosidade pode variar de acordo com as condições de processamento e sua aplicação (BARBA, 1997).

As propriedades dos materiais cerâmicos são diretamente influenciadas pelas ligações químicas, que podem ser iônicas ou covalentes. A força dessas ligações desempenha um papel fundamental na resistência mecânica do material, enquanto sua densidade é determinada pela estrutura cristalina. Essa estrutura, por sua vez, é influenciada pela massa e pelo raio atômico dos elementos constituintes, bem como pelo número de coordenação dos átomos na rede cristalina (BRITO, 2012). A microestrutura também afeta o desenvolvimento de suas propriedades, sendo porosidade, tamanho e dispersão de partículas, composição das fases, microfissuras e estado de tensões residuais os principais fatores intervenientes (CALLISTER, 2016).

De acordo a norma ABNT ISO 13006 (2020), uma placa cerâmica para revestimento é definida como:

Placa fina e composta de argilas e/ou outras matérias-primas inorgânicas, geralmente usada como revestimento de pisos e paredes, usualmente conformada por extrusão (A) ou prensagem (B) à temperatura ambiente, mas podendo ser conformada por outros processos (C), subsequentemente é secada e queimada a temperaturas suficientes para desenvolver as propriedades requeridas. As placas podem ser esmaltadas (GL) ou não esmaltadas (UGL).

Os revestimentos cerâmicos podem ser categorizados conforme as normas técnicas ou as demandas do mercado, levando em consideração o índice de absorção de água e o método de fabricação utilizado, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos revestimentos cerâmicos (ABNT 13006, 2020).

Grupo	Processo de conformação	Absorção de água
Ala	Extrusão	$\leq 0,5$
Alb		$> 0,5$ a $\leq 3,0$
All _a		$> 3,0$ a $\leq 6,0$
All _b		$> 6,0$ a $\leq 10,0$
All		$> 10,00$
Bla	Prensagem a seco	$\leq 0,5$
Blb		$> 0,5$ a $\leq 3,0$
Blla		$> 3,0$ a $\leq 6,0$
Bllb		$> 6,0$ a $\leq 10,0$
Blll		$> 10,00$

Fonte: Autora, 2025.

A classificação dos revestimentos cerâmicos apresentada na Tabela 1 estabelece categorias com base no processo de conformação e no índice de absorção de água, sendo esse último um fator determinante para a resistência e o desempenho do material em diferentes aplicações. O porcelanato se enquadra no Grupo Bla, caracterizado por processo de conformação por prensagem a seco e absorção de água igual ou inferior a 0,5% (ABNT NBR ISO 13006, 2020). Essa baixa porosidade confere ao porcelanato alta resistência mecânica e química, tornando-o um material altamente durável e adequado para aplicações que exigem desempenho superior, como revestimentos e mobiliário.

A origem do porcelanato remonta à Itália no final dos anos 1970, e sua produção foi justamente inspirada na estética das rochas naturais, aliada à tecnologia de conformação cerâmica. Sua estrutura compacta e vitrificada o diferencia dos demais grupos de revestimentos cerâmicos, garantindo resistência ao desgaste, impactos, variações térmicas em especial o congelamento (SÁNCHEZ e outros, 2010). Assim, fica evidente que o porcelanato pertence à categoria de materiais cerâmicos de mais alto desempenho, destacando-se pela baixa absorção de água e elevada resistência,

características essenciais para sua utilização em revestimentos sofisticados e mobiliário de alto padrão.

O porcelanato é um tipo de revestimento cerâmico, geralmente esmaltado, que se tornou popular como alternativa aos materiais naturais. É apreciado por sua estética visual e suas excelentes propriedades mecânicas. Suas características principais incluem alta resistência ao desgaste, baixa absorção de água, alta resistência mecânica, resistência a produtos químicos, dureza superficial, resistência ao congelamento e resistência à compressão. (OLIVEIRA; HOTZA, 2015)

Sua resistência ao desgaste o torna ideal para áreas de alto tráfego, como centros comerciais, aeroportos e espaços públicos. Além disso, apresenta alta resistência a manchas e produtos químicos, facilitando a limpeza e a manutenção. A variedade de acabamentos disponíveis, incluindo polido, semi-polido (acetinado), natural e rústico, proporciona versatilidade estética para diferentes aplicações (PORTOBELLO, 2019).

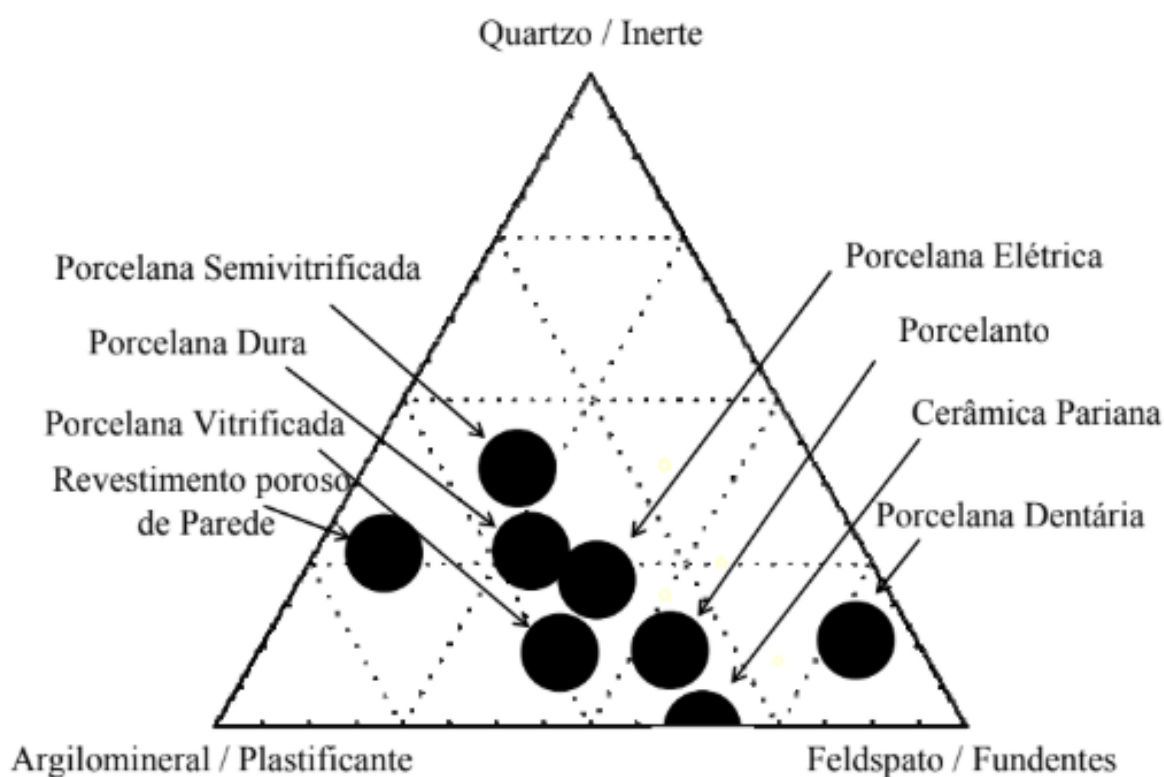
O anexo G da ABNT ISO 13006 (2020) estabelece os requisitos dimensionais, de qualidade superficial e de propriedades físicas e químicas para porcelanatos (Grupo Bla). Em relação à carga de ruptura, as especificações determinam que peças com espessura menor ou igual a 7,5 mm devem suportar uma carga mínima de 700 N, enquanto aquelas com espessura superior a 7,5 mm devem resistir a pelo menos 1300 N. No entanto, para os ensaios de resistência à abrasão superficial e resistência ao impacto, a norma não estabelece limites específicos.

3.1. PROCESSAMENTO DO PORCELANATO

Os revestimentos cerâmicos são preparados a partir da mistura de diversas matérias-primas com diferentes características, entre elas a plasticidade, fundentes e modificadores de fundência (EMILIANI; CORBARA, 1999).

Os corpos cerâmicos tradicionais possuem composição triaxial, composta por argilas, quartzo e feldspato, sendo estes últimos silicatos e aluminossilicatos de cálcio, potássio e sódio. As argilas desempenham um papel essencial na formação de fases durante a sinterização e conferem plasticidade à mistura antes desse processo (DE NONI JR, 2007 e CALLISTER, 2012).

Figura 1. Diagrama de composições de produtos cerâmicos triaxiais em comparação com a composição do porcelanato.



Fonte: DE NONI JR, (2007).

Existem dois tipos principais de argilas: plásticas e não plásticas. As argilas não plásticas são originadas em depósitos residuais de argilas caulínicas, caracterizando-se por uma cristalização mais desenvolvida e partículas de maior tamanho. Já as argilas plásticas são formadas por caulinitas sedimentares, ilitas e montmorilonitas, cuja plasticidade está associada a imperfeições estruturais, baixo índice de cristalização, maior quantidade de água adsorvida, alta área superficial, granulometria fina e distorções no arranjo da estrutura folhear (BROWN, 1995; CALLISTER, 2016; DE NONI JR, 2005)

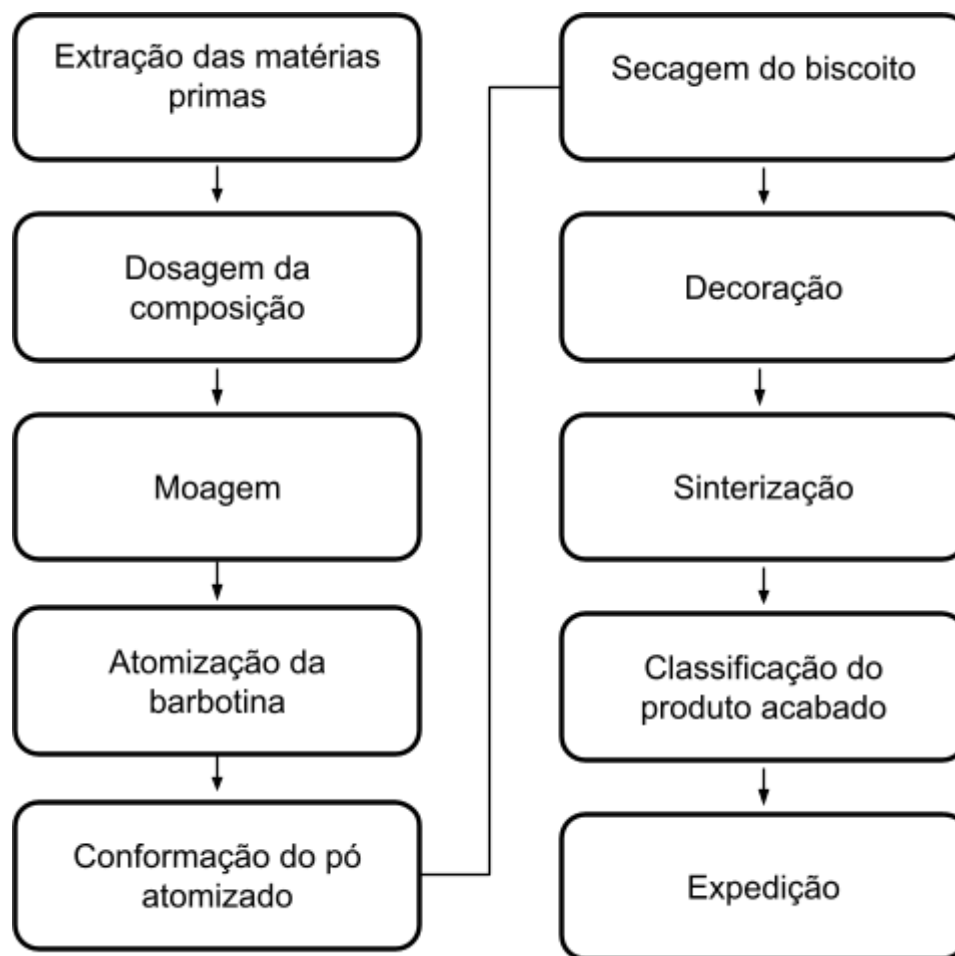
Os feldspatos pertencem ao grupo dos silicatos de alumínio contendo potássio, sódio, cálcio e, em raras ocasiões, bário. Sua principal característica é a fusão em temperaturas relativamente baixas em comparação com os demais componentes da mistura cerâmica, o que possibilita interações químicas e físicas essenciais no processo de sinterização. Dessa forma, os feldspatos atuam como ligantes vítreos, promovendo a coesão entre as substâncias e partículas cristalinas. Além disso, esses minerais representam a maior parte das rochas aflorantes da crosta terrestre (BROWN, 1995).

O quartzo em geral participa das composições por ser uma fase comum nas argilas e feldspatos. Além disso, pode ser adicionado sob forma de areia moída. Desempenha um papel fundamental na composição de massas e esmaltes cerâmicos. Sua aplicação na cerâmica deve-se à capacidade de formar vidros, ao baixo custo, à alta dureza e à elevada temperatura de fusão. Além disso, o quartzo fornece SiO_2 à composição cerâmica, atuando como carga para reduzir a plasticidade, minimizar a deformação piropiástica, diminuir o tempo de secagem e, durante a queima, aumentar a resistência mecânica e a porosidade do material (FERREIRA; DAITX, 2000).

A fabricação de revestimentos cerâmicos em larga escala começa com a extração das matérias-primas naturais. As jazidas são identificadas através de levantamentos topográficos, seguidos por sondagens das áreas selecionadas e formação de lotes para utilização. Após a definição da formulação da massa conforme o tipo de produto desejado, as matérias-primas são dosadas utilizando pás carregadeiras que transportam os insumos até a balança. Os materiais são então transportados por correias até uma caçamba dosadora, que carrega os moinhos. Essa etapa é crucial, pois qualquer imprecisão na dosagem pode afetar tanto a produção quanto o produto final. (HENRIQUE, 2013)

A produção cerâmica exige um controle rigoroso e preciso das variáveis do processo em cada etapa da fabricação. O fluxo produtivo envolve, de forma resumida, as seguintes etapas: preparação da composição, moagem da massa, conformação, secagem, decoração e queima. A Figura 2 ilustra de maneira integrada o processo produtivo.

Figura 2. Processo de produção de revestimentos cerâmicos por via úmida.



Fonte: Adaptado de DE NONI JR, 2005.

O processo inicia-se com a extração das matérias-primas nas jazidas, onde são homogeneizadas para assegurar padrões de qualidade consistentes. Os fornecedores adotam a prática de formação de lotes, garantindo a constância das propriedades dos materiais. A extração é realizada por meio de equipamentos como tratores de esteira e retro escavadeiras (DE NONI JR, 2005).

Após a extração, as matérias-primas passam por beneficiamento e homogeneização, etapas que podem ocorrer tanto na própria jazida quanto no pátio da empresa. Durante a formação de lotes, especialmente no caso das argilas, é comum submetê-las ao processo de sazonalidade, que consiste na exposição aos agentes climáticos (chuva, vento e sol). Esse procedimento auxilia na eliminação de matéria orgânica e sais contaminantes, podendo durar de um mês a um ano, dependendo do nível de impurezas presentes (DE NONI JR, 2005).

Com os lotes formados, as matérias-primas são transportadas para o local de consumo e armazenadas em áreas conhecidas como “box”. Essa área tem a função de garantir um estoque suficiente de material, evitando interrupções no processo produtivo por falta de insumos. As matérias-primas passam por processo de caracterização e após serem aprovadas estão liberadas para dosagem que é realizada de acordo com a fórmula pré estabelecida, a composição varia de acordo com a aplicação, com dosagem de diferentes matérias primas. (SOUZA, 2003)

A dosagem da composição é feita por meio da pesagem individual das matérias-primas em balanças, seguindo as especificações da ficha de produção. O carregamento dessas balanças é realizado com o auxílio de pás carregadeiras, garantindo a precisão na formulação da mistura. Quando a moagem ocorre de forma contínua, as matérias-primas de maior percentual podem ser divididas em etapas para otimizar a homogeneização da composição, assegurando uma distribuição mais uniforme dos componentes e melhorando a qualidade do material final (DE NONI JR, 2005).

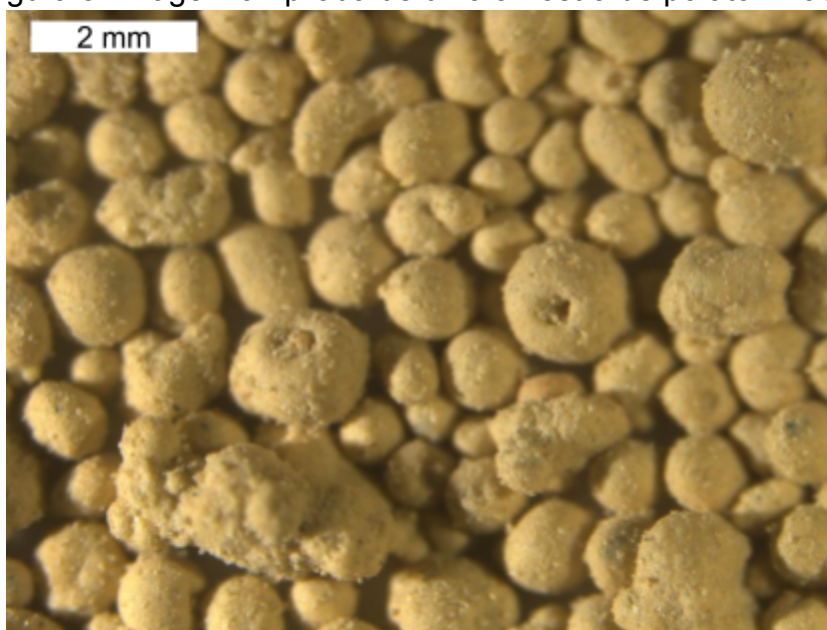
A moagem tem como objetivo homogeneizar e cominuir a composição dosada, promovendo maior reatividade entre os diversos componentes durante a sinterização. Esse processo favorece a formação de compostos com diferentes níveis de reatividade, contribuindo para o desenvolvimento de cristais que melhoram as propriedades mecânicas do material sinterizado (OLIVEIRA, 2000).

No caso do porcelanato, a moagem é predominantemente úmida, resultando em uma suspensão densa usualmente chamada pelo termo proveniente do italiano *barbotina*. Esse processo pode ocorrer de forma contínua ou descontínua. Na moagem descontínua, uma carga específica da composição é preparada e moída até atingir a granulometria desejada. Após a moagem, o moinho é descarregado, e a *barbotina* é transferida para um tanque de homogeneização. Já na moagem contínua, o sistema geralmente conta com dois moinhos interligados, nos quais a alimentação de matéria-prima, água e aditivos ocorre de maneira ininterrupta. O primeiro moinho realiza uma moagem mais intensa, reduzindo a granulometria das matérias-primas maiores, enquanto o segundo, conhecido como refinador, promove uma moagem menos intensa, com controle periódico do resíduo para garantir a granulometria adequada. Após essa

etapa, a barbotina é direcionada para o tanque de homogeneização (DE NONI JR, 2005).

A secagem por pulverização em atomizador é o processo utilizado para reduzir significativamente a umidade da barbotina. Nesse método, a barbotina é pulverizada em pequenas gotas, que secam em queda livre, formando grãos esféricos com alta fluidez e facilidade de escoamento (SOUZA, 2003). A Figura 3 apresenta uma ampliação de 32 vezes do pó atomizado, obtida por meio de um estereoscópio.

Figura 3. Imagem ampliada de uma amostra de pó atomizado.



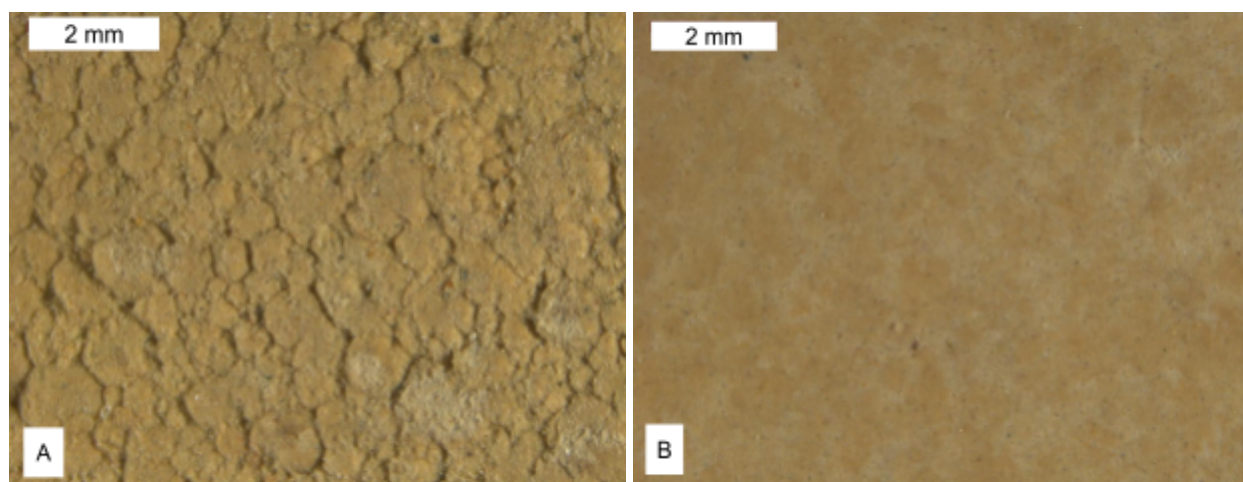
Fonte: Autora, 2025.

A conformação do pó atomizado tem como objetivo obter um corpo cerâmico denso, com densidade aparente verde entre 1980 e 2000 g/cm³. Essa característica garante a resistência mecânica à flexão necessária para que a peça não quebre durante as etapas de secagem e esmaltação, até chegar à queima (DEORRISTT, 2024).

Para grandes formatos, a conformação pode ser realizada por meio de prensagem à rolos em esteira compactadora (PCR), na qual a pressão é aplicada continuamente sobre a camada de pó atomizado. Esse método permite alcançar uma elevada compactação com menor consumo de energia. Já a prensagem uniaxial, a técnica mais amplamente utilizada, consiste na compactação do pó atomizado dentro de uma cavidade metálica ou rígida, aplicando pressão em uma única direção. Esse processo confere ao material comportamento plástico (DE NONI JR, 2005), preservando parcialmente o formato original dos grãos, como ilustrado na Figura 4A.

Embora ambos os métodos resultem em densidades similares, a prensagem uniaxial mantém o formato dos grãos e apresenta uma variação de densidade aparente de até $0,100 \text{ g/cm}^3$. Em contrapartida, a prensagem a rolos gera uma amplitude menor, de até $0,030 \text{ g/cm}^3$, pois os grânulos são arrastados pelos rolos e perdem sua estrutura original. A Figura 4B ilustra as peças conformadas por rolos, permitindo a observação das diferenças nos grãos resultantes de cada método.

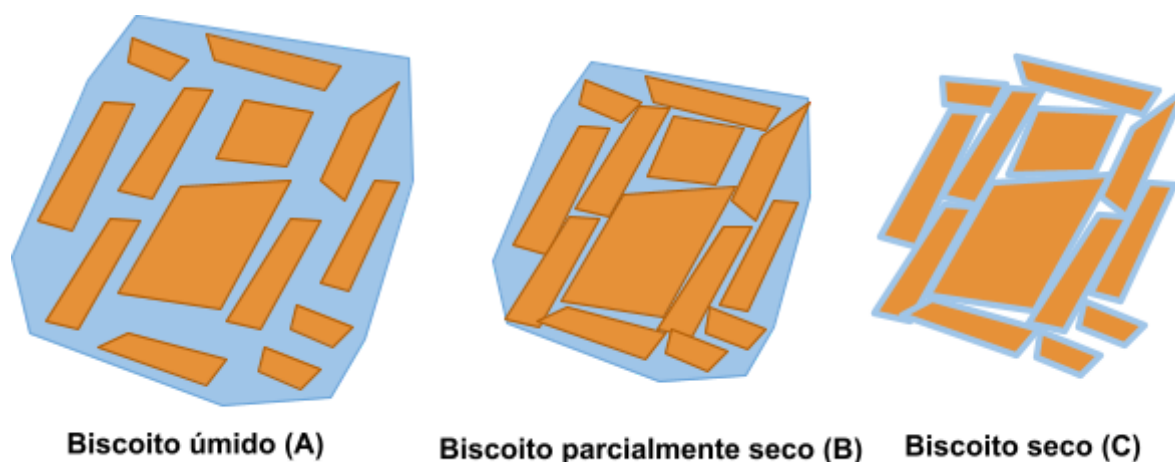
Figura 4. Biscoito prensado em prensa uniaxial (A) e conformação na PCR (B).



Fonte: Autora, 2025.

A secagem é o processo no qual a água é removida, reduzindo a separação entre as partículas e resultando na contração da peça, conforme ilustrado na Figura 5. No estágio inicial da secagem (A), as partículas plásticas estão envolvidas por uma fina camada de água. A secagem interna ocorre por difusão das moléculas de água em direção à superfície, onde são eliminadas por evaporação. No estágio intermediário (B), correspondente ao biscoito parcialmente seco, há uma maior aproximação entre as partículas e uma redução significativa do conteúdo de água. Já no estágio final (C), o biscoito seco apresenta espaços vazios entre as partículas, que agora estão ainda mais próximas, com uma quantidade mínima de água residual. Essa fase corresponde à retração por secagem, um fenômeno essencial para garantir a integridade estrutural da peça antes das etapas seguintes (CALLISTER, 2012).

Figura 5. Estágios da remoção de água nas partículas plásticas durante o processo de secagem.



Fonte: Adaptado de Callister (2012).

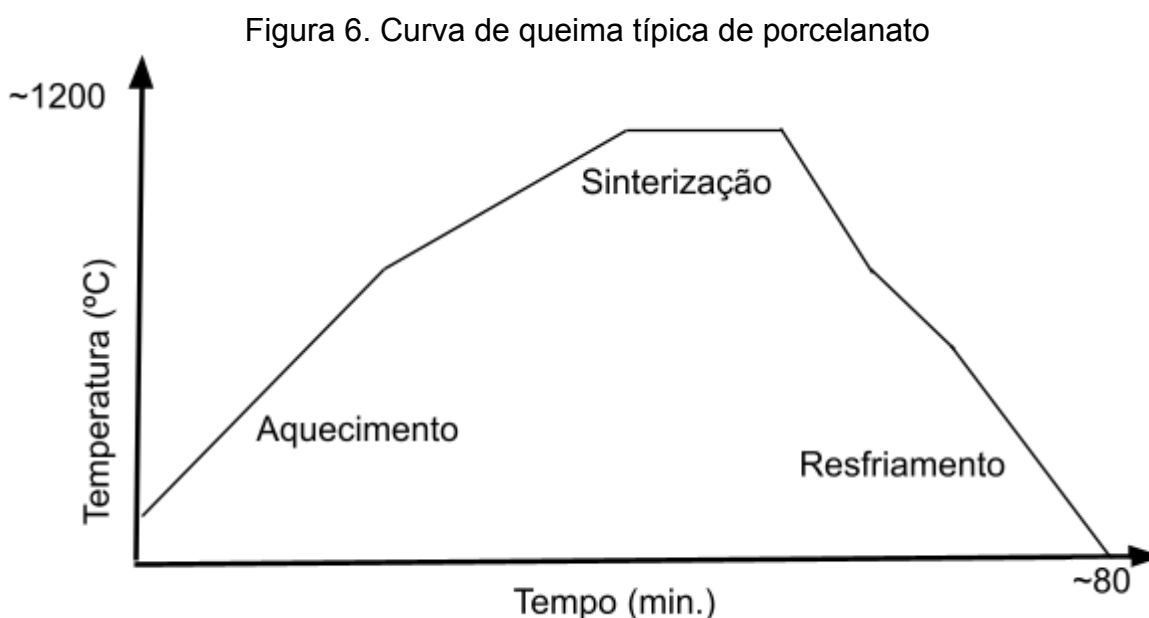
A decoração na produção cerâmica é, essencialmente, composta pela esmaltação. Um processo no qual uma camada de material em suspensão é aplicada sobre a superfície do corpo conformado. Após a sinterização, essa camada adquire características vítreas, conferindo ao produto não apenas um acabamento estético, mas também propriedades como resistência ao manchamento e ao ataque químico (DEORRISTT, 2024).

Geralmente, a esmaltação é realizada por meio de técnicas de aplicação via úmida, como pulverização, cabine de pistolas ou campana (cortina contínua) (DEORRISTT, 2024). Além dos métodos tradicionais, atualmente são empregadas tecnologias avançadas, similares às impressoras de papel, para criar desenhos em 2D. Essas técnicas permitem reproduzir imagens com alta fidelidade, especialmente em decorações que imitam materiais naturais, como madeira e rochas, ampliando as possibilidades estéticas e funcionais do produto.

Na sequência da esmaltação e decoração, ocorre a etapa de queima, na qual o corpo cerâmico passa por transformações físicas e químicas que resultam em um material denso e resistente. É durante esse processo que as propriedades do porcelanato se tornam evidentes. As principais transformações térmicas incluem:

- <math> < 200 \text{ }^\circ\text{C}</math> – eliminação da água livre absorvida;
- $300 \text{ }^\circ\text{C}$ a $650 \text{ }^\circ\text{C}$ – combustão de matérias orgânicas, decomposição de hidróxidos e desidroxilação de minerais argilosos;
- $573 \text{ }^\circ\text{C}$ – transformação alotrópica do quartzo α em β ;
- $800 \text{ }^\circ\text{C}$ a $950 \text{ }^\circ\text{C}$ – decomposição de carbonatos de cálcio e magnésio, combustão de restos carbonosos e formação de fases cristalinas e vítreas;
- $1100 \text{ }^\circ\text{C}$ – decomposição de sulfatos e incremento da formação de fases vítreas.

A sinterização é influenciada por diversos fatores, como taxas de aquecimento e resfriamento, atmosfera do forno, temperatura máxima e tempo de patamar (SOUZA, 2003). A Figura 6 ilustra um exemplo de curva de queima típica para porcelanato.



Fonte: Adaptado de DE NONI JR, 2007.

Na etapa de classificação, os produtos são avaliados conforme critérios pré-estabelecidos na ABNT ISO 13006 (2020) e em normas internas de cada indústria. Entre os principais aspectos analisados estão defeitos superficiais, variação de tonalidade e defeitos dimensionais (DE NONI JR, 2005). Os dois primeiros são verificados visualmente, enquanto os defeitos dimensionais são medidos por equipamentos automáticos e inspecionados periodicamente com o auxílio de instrumentos como paquímetro, relógio comparador e régua.

A classificação é dividida em três categorias: “extra”, que inclui produtos dentro dos padrões normativos. O “comercial”, que abrange itens que não atenderam a algum

parâmetro estabelecido, mas ainda podem ser comercializados. O “caco”, que corresponde a peças sem condições de venda (DE NONI JR, 2005). Após essa triagem, os produtos classificados são armazenados em estoque até sua destinação ao cliente final, podendo ser aplicados como revestimento ou utilizados na fabricação de mobiliário.

Ao longo de todas as etapas do processo produtivo, são realizados controles de produção rigorosos. Cada fase conta com um conjunto específico de ensaios de controle, que, em conjunto, asseguram a uniformidade dos diferentes lotes fabricados, garantindo que apresentem as mesmas características físicas e atendam aos padrões de qualidade estabelecidos (DE NONI JR, 2005).

3.2. PORCELANATOS COMO ELEMENTOS DO MOBILIÁRIO

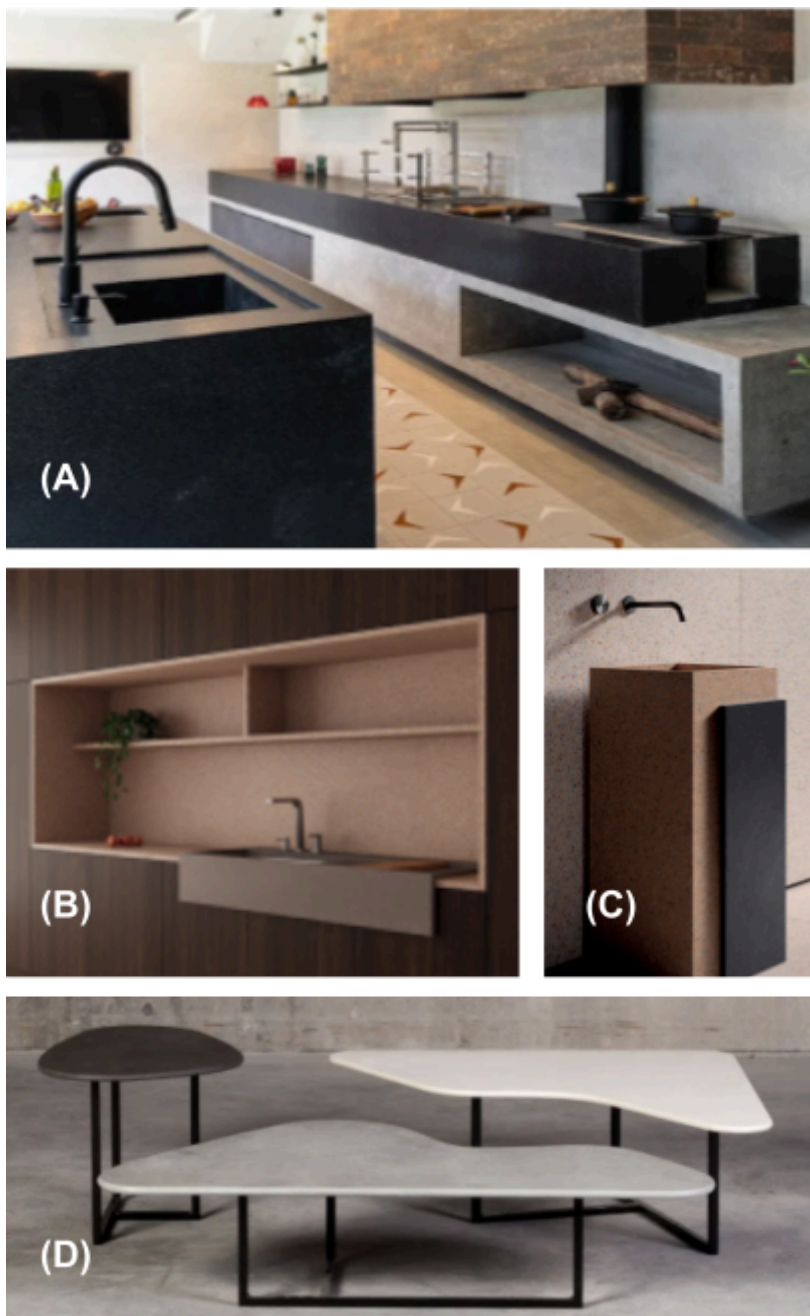
O porcelanato tem se tornado uma escolha popular para conferir modernidade e sofisticação à casa. Sua versatilidade é um dos principais atrativos, oferecendo uma ampla variedade de cores, padrões e acabamentos. Além disso, possui baixa porosidade, tornando-se altamente resistente à manchas e facilitando a manutenção. Outra vantagem é sua resistência à altas temperaturas e ao choque térmico, além de apresentar maior resistência à arranhões, calor e desgaste diário quando comparado a pedras naturais e granitos. No entanto, apesar de sua rigidez, pode sofrer danos em caso de impactos (CAZA MODERNA, 2023).

As bancadas são, geralmente, fabricadas a partir de porcelanatos de grandes formatos, que são cortados e ajustados conforme o projeto. Suas tecnologias de acabamento permitem aplicações versáteis, favorecendo seu uso em mobiliário. Essa aplicação ganhou destaque principalmente devido à sua elevada resistência, versatilidade e facilidade de manutenção. Além disso, seu design é inspirado em insumos naturais, como mármore, pedras, madeiras e concretos, agregando valor estético aos ambientes (BIANCOGRES, 2024).

O uso do porcelanato tem se expandido para além do revestimento de pisos, tornando-se um material apreciado por arquitetos e designers pela sua versatilidade. Atualmente, é aplicado em diferentes tipos de mobiliário, como bancadas, nichos, cubas, luminárias e mesas, possibilitando projetos criativos e multifuncionais, a Figura 7 apresenta uma cozinha em porcelanato, onde o mobiliário e o piso são de porcelanato.

Suas principais vantagens incluem durabilidade, qualidade estética e facilidade de limpeza, tornando-o uma alternativa sofisticada e funcional para diversos ambientes.

Figura 7. Mobiliário fabricado em porcelanato: (A) cozinha com bancada e pia, (B) nicho, (C) pia de banheiro, (D) mesa.



Fonte: PORTOBELLO (2019).

A variedade de acabamentos, cores e texturas dos porcelanatos possibilita a criação de projetos únicos e personalizados. A capacidade de montar cubas no próprio material amplia ainda mais as possibilidades de design. Além de ser amplamente

utilizado como revestimento de pisos e paredes, o porcelanato vem ganhando espaço na decoração ornamental e no mobiliário, permitindo o revestimento de nichos, estantes e prateleiras, conferindo exclusividade a qualquer ambiente (ELIANE, 2021).

Os projetos em bancadas podem ser especificados para diversas aplicações, incluindo cozinhas, banheiros, áreas de preparação de alimentos, escritórios, lavanderias e demais espaços que exigem superfícies resistentes e de fácil limpeza. Além disso, podem ser utilizadas em áreas que necessitam de apoio para objetos, como nichos, prateleiras e mesas.

Embora o porcelanato apresenta qualidades notáveis, é importante ponderar sobre suas desvantagens como seu peso, fragilidade ao impacto, desafios de corte e sensação tátil.

Devido a sua composição com matérias primas cerâmicas, que após a sinterização apresentam elevada densidade resultando em uma peça de mobília com peso elevado significativo, sendo necessário aplicar reforços estruturais para suportar a carga estática e dinâmica. Os porcelanatos são fabricados com diversas espessuras, em geral entre 7 e 10 mm, sendo mais comum peças em grandes formatos aplicadas para evitar os recortes e emendas, desta forma impactam na ergonomia e logística de movimentação (PORTOBELLO, 2019).

O porcelanato, como todo material cerâmico, apresenta fratura de natureza frágil. Solicitações mecânicas de impacto podem gerar a propagação de trincas e fraturas, em especial em bordas e cantos. A resistência ao impacto é um indicativo da tenacidade do porcelanato, embora seja um material de estrutura rígida. O porcelanato é frágil ao impacto e pode sofrer danos como lascas, trincas e até quebra no local do impacto. Seus danos costumam ser irreparáveis, sendo necessário a troca da peça danificada (CAZA MODERNA. 2023). A queda acidental de um objeto sobre uma bancada, mesa ou pia e dependendo da altura da queda e do peso do objeto este pode causar algum dano ao revestimento, danos estes que podem ser ou não visíveis a olho.

O corte do porcelanato é realizado com ferramentas diamantadas, jato de água e técnicas de corte precisas, devido a sua dureza e elevada abrasão. Durante o corte as tensões residuais geradas durante o resfriamento da queima, podem comprometer a integridade da peça, exigindo processos de alívio de tensão. Tensões de tração

presentes na superfície do material tendem a comprometer sua integridade, reduzindo sua resistência mecânica. Por outro lado, tensões de compressão superficiais atuam de forma benéfica, reforçando o material, ao investigarem o impacto das tensões residuais na curvatura de porcelanatos, sugerem que, dependendo da intensidade e do perfil dessas tensões, diversos problemas podem surgir: variações na curvatura após a queima, devido ao alívio das tensões residuais; fraturas ou cortes com trajetórias indesejadas durante os processos de corte na instalação das peças; alterações na curvatura decorrentes da eliminação de regiões tensionadas durante o processo de retificação (CANTAVELLA, V. e outros, 2008).

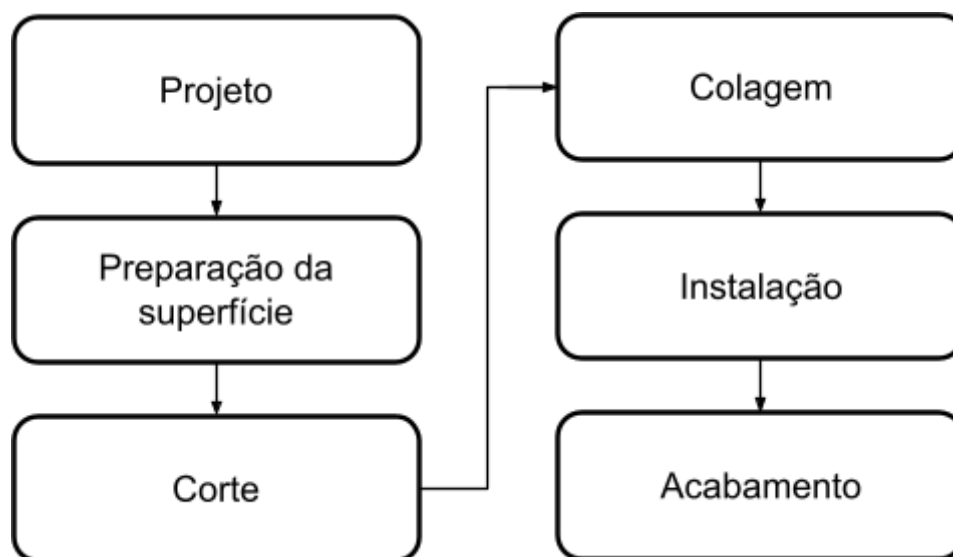
O alívio de tensão pode ser realizado com furos ou cortes superficiais antes de realizar o corte final. Essas tensões são oriundas do processo de sinterização e não existe uma forma de controle desta propriedade. Algumas indústrias cerâmicas incluíram em seu controle de produção o teste de corte e desta forma conseguem minimizar que seus clientes recebam peças com dificuldade de corte.

A sensação tátil, crucial em móveis, é marcada pela alta condutividade térmica, resultando em um toque frio do porcelanato, especialmente em regiões de climas amenos, o que pode ser desconfortável em superfícies de contato frequente com a pele. A temperatura ambiente também modula essa experiência, com o porcelanato absorvendo e refletindo o calor, tornando-se mais frio ou quente conforme o clima (SUZANA, 2023).

A estrutura da bancada de porcelanato é um aspecto importante a ser considerado. Existem diversas opções disponíveis no mercado, sendo as mais comuns aquelas fixadas sobre outra superfície estruturada, como madeira compensada ou MDF, alvenaria ou tela de fibra aderida. A fixação das peças de mobiliário é geralmente realizada com adesivos específicos, garantindo maior aderência e estabilidade ao conjunto (ROCA, 2023).

A produção de mobiliário em porcelanato envolve diversas etapas que garantem a qualidade e a durabilidade das peças finais, a Figura 8 apresenta o fluxograma da fabricação de mobiliário.

Figura 8. Processo de fabricação de um mobiliário em porcelanato.



Fonte: Autora (2025).

A primeira etapa do processo é o projeto, no qual são definidas as dimensões, o design, o local de instalação e a quantidade necessária de revestimento. Nesse momento, também é escolhido o porcelanato a ser utilizado, levando em consideração aspectos como cor, textura, tipo de superfície e a resistência necessária para suportar impactos, manchas e altas temperaturas (ELIANE, 2021).

A preparação da superfície é fundamental para garantir a aderência adequada do material. Essa etapa envolve o nivelamento da área onde a bancada será instalada, além da limpeza e remoção de resíduos como poeira, tinta e impurezas. A superfície deve estar seca, estável e livre de irregularidades antes da instalação (MIGLIANI, 2025).

O corte do porcelanato é feito conforme as dimensões estabelecidas no projeto, utilizando ferramentas especializadas, como serra diamantada e serra mármore, para garantir cortes precisos.

A colagem corresponde à pré-montagem, onde algumas partes do mobiliário são unidas previamente, enquanto outras são finalizadas no local de instalação (*in loco*). A instalação consiste na aplicação de adesivos específicos para porcelanato e no posicionamento adequado das peças, garantindo a fixação correta do mobiliário.

Na etapa final, são realizados os acabamentos, que podem incluir o preenchimento das juntas com argamassa, a aplicação de impermeabilizantes para proteção da superfície e a instalação de acessórios, como torneiras e pias. Essa fase

exige conhecimento técnico e habilidade especializada para garantir um acabamento preciso e durável.

3.3. PROPRIEDADES MECÂNICAS DO PORCELANATO

A busca por materiais cerâmicos cada vez mais resistentes e duráveis impulsiona a investigação dos mecanismos que regem seu comportamento mecânico. No caso específico das porcelanas triaxiais, amplamente utilizadas em revestimentos cerâmicos, a compreensão dos fatores que contribuem para seu reforço é de suma importância.

Os mecanismos das propriedades que geram interações simultâneas, tornam a distinção da contribuição individual um desafio complexo, estes mecanismos são:

- a dispersão de fases cristalinas que limitam o defeito natural de Griffith;
- a interconexão dos cristais aciculares de mullita;
- o reforço da matriz por partículas de segunda fase;
- as diferenças nos coeficientes de expansão térmica linear.

Em outras palavras, é difícil isolar e quantificar o impacto específico de cada mecanismo de reforço devido à sua atuação conjunta e interdependente (DE NONI, 2007).

Após seu processo produtivo, o porcelanato pode ficar submetido a tensões residuais macroscópicas, semelhantes às encontradas no vidro temperado. Isso ocorre devido ao rápido resfriamento durante a queima e à alta quantidade de fase vítrea em sua composição (50 - 60%).

Essas tensões não são exclusivas do porcelanato, sendo observadas em outros materiais cerâmicos expostos a choques térmicos. Durante o resfriamento acelerado, a transformação alotrópica do quartzo gera tensões de tração na superfície do material. A partir da temperatura de transformação alotrópica, essas tensões podem levar ao crescimento de fissuras periféricas, comprometendo a microestrutura e o desempenho mecânico do porcelanato (DE NONI, 2007).

Considerando a mecânica da fratura linear elástica, a resistência mecânica de um material (σ_f) se define matematicamente de acordo com a Equação 1.

$$\sigma_f = \frac{K_{1c}}{Y \cdot a^{1/2}} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde:

σ_f , resistência mecânica (MPa);

K_{1c} , é a tenacidade à fratura ($\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$);

a , o tamanho do defeito natural de Griffith (mm);

Y , o fator de calibração da mecânica da fratura.

Dois fatores controlam a resistência mecânica de um material cerâmico: o tamanho do defeito natural e a tenacidade à fratura. A existência de um perfil de tensão residual macroscópica ao longo da espessura do material, provoca uma alteração na tenacidade. A modificação na tenacidade de acordo com a espessura do material pode ser representada matematicamente pela Equação 2.

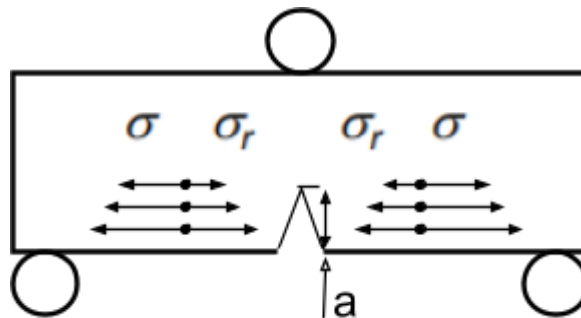
$$K_{r} = \frac{Y}{\pi \cdot a^{1/2}} \cdot \int_0^a \sigma_r g(z) \cdot dz \quad (\text{Eq. 2})$$

onde:

$g(z)$, é a função de Green, que é dependente da configuração particular do sistema de aplicação de tensão e propagação da trinca. Conforme sistema da Figura 9.

$$g(z) = 2a / (a^2 - z^2)^{1/2} \text{ e } Y = 1,985 .$$

Figura 9. Propagação da fratura sob um esforço.

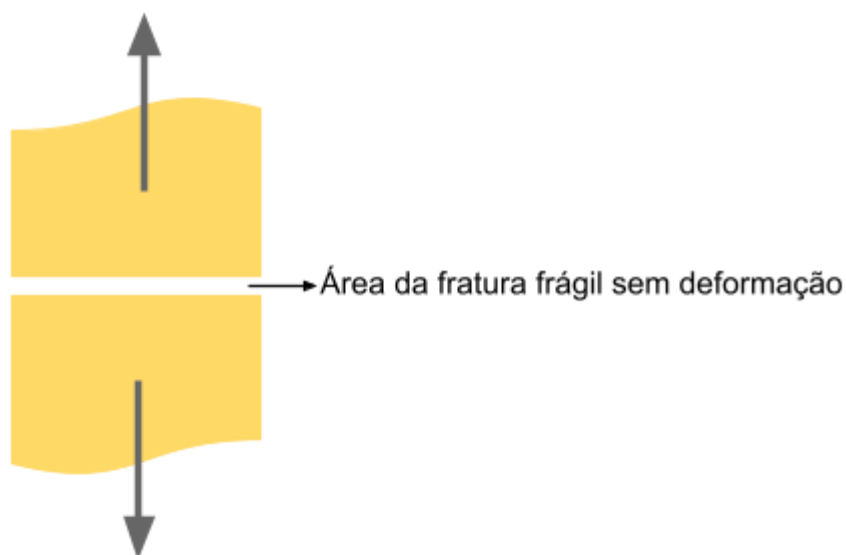


Fonte. Adaptado DE NONI, 2007.

Os porcelanatos possuem fratura frágil, caracterizada pela ausência de deformação visível antes da ruptura. Segundo Callister (2012), essa fratura ocorre devido à rápida propagação da trinca, cuja direção é perpendicular à força de tração

aplicada. O resultado é uma superfície de fratura relativamente plana, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10. Fratura frágil sem deformação plástica.



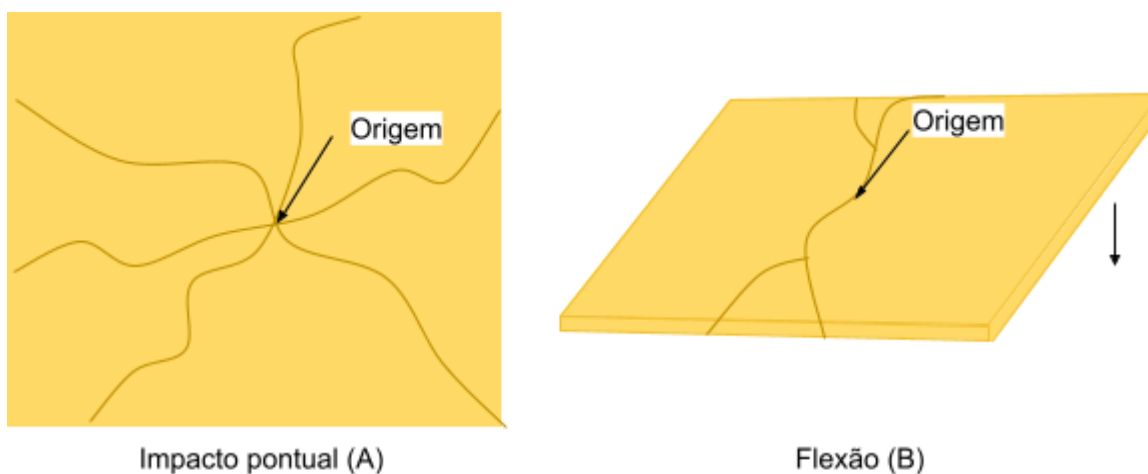
Fonte: Adaptado de Callister (2012).

As medidas de resistência à fratura dos materiais cerâmicos costumam ser inferiores aos valores teóricos calculados com base nas ligações atômicas. Essa diferença ocorre devido à presença de defeitos ou trincas microscópicas na superfície ou no interior do material, que comprometem sua resistência mecânica. Esses defeitos funcionam como pontos de concentração ou amplificação da tensão aplicada, facilitando a propagação das trincas e reduzindo a resistência à fratura (CALLISTER, 2012).

A fractografia da cerâmica analisa a natureza da fratura, considerando o percurso de propagação da trinca e suas características microscópicas. Além disso, busca determinar a localização, o tipo e a origem dos defeitos responsáveis pela falha do material. Essas investigações podem ser realizadas com equipamentos acessíveis, como lentes de aumento e microscópios ópticos binoculares estéreo de baixa potência (CALLISTER, 2012).

A Figura 11 ilustra as origens e as configurações das trincas em materiais frágeis, apresentando diferentes padrões de propagação conforme as condições de aplicação de carga (CALLISTER, 2012).

Figura 11. Representação das origens e configurações das trincas em cerâmica.



Fonte: Adaptado de Callister (2012).

Os porcelanatos são produzidos por meio da conformação de pós, um processo que, inicialmente, resulta na presença de porosidade ou espaços vazios no material. Durante a queima, essa porosidade é reduzida, porém não completamente eliminada. A porosidade remanescente tem impacto negativo sobre a resistência mecânica e as propriedades elásticas do porcelanato, a Teoria de Griffith relaciona a porosidade com a resistência do material, indica que quanto mais poros em sua maioria grandes, menor será a resistência do material (CARTY e SENAPATI, 1998).

A determinação precisa da dureza em materiais cerâmicos é desafiadora devido à sua fragilidade inerente e à suscetibilidade à fratura sob penetração. A formação de trincas formadas pelo ensaio interfere na leitura das medições, comprometendo a exatidão dos resultados.

3.4. NORMAS DE MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A Tabela 2 apresenta um compilado das normas técnicas que estabelecem critérios para a determinação da dureza, da resistência ao risco e da resistência ao impacto.

Tabela 2. Resumo das normas de dureza e impacto.

Título	Número de referência	Ano da publicação	Equipamento	Energia de impacto	Material indicado
Rochas para revestimento Parte 8: Determinação da resistência ao impacto de corpo duro	ABNT NBR 15845-8:2015	2015	Aparelho conforme Figura 10 e esfera de aço com diâmetro de 60 mm de diâmetro e massa de 1 kg	Mínima de 0,49 J (0,05 m de altura) até 9,81 J (1 m de altura)	Produtos acabados de rochas que se destinam ao uso como materiais de revestimento de edificações.
Determinação da resistência ao impacto pela medição do coeficiente de restituição	ABNT NBR ISO 10545-5:2017	2017	Dispositivo para liberação da esfera conforme Figura 11, esfera de aço-cromo, com diâmetro de 19 mm e dispositivo temporizador eletrônico	0,275 J	Placas cerâmicas
Materiais metálicos - Ensaio de dureza Vickers Parte 1: Método de ensaio	ABNT NBR ISO 6507-1:2019	2019	Penetrador de diamante na forma de uma pirâmide reta com base quadrada	Não aplicável	Materiais metálicos, incluindo os metais duros e outros carbonetos cementados
Determinação de Dureza segundo escala Mohs.	NBR 13818:1997	1997	Minerais da escala Mohs	Não aplicável	Superfícies duras
<i>Standard Test Method for Determination of Mohs Scratch Hardness</i>	ASTM C 1895 – 20	2020	Pontas de dureza e suporte conforme Figura 10	Não aplicável	Superfícies duras

Fonte: Autora, 2025.

Essas normas desempenham um papel fundamental em diversos setores, influenciando diretamente a qualidade, segurança e eficiência de produtos e processos. As normas que estabelecem os critérios de dureza e resistência ao risco não se correlacionam diretamente com a resistência ao impacto, uma vez que avaliam

propriedades distintas, voltadas à performance superficial dos materiais em aplicações específicas, como o uso em mobiliário.

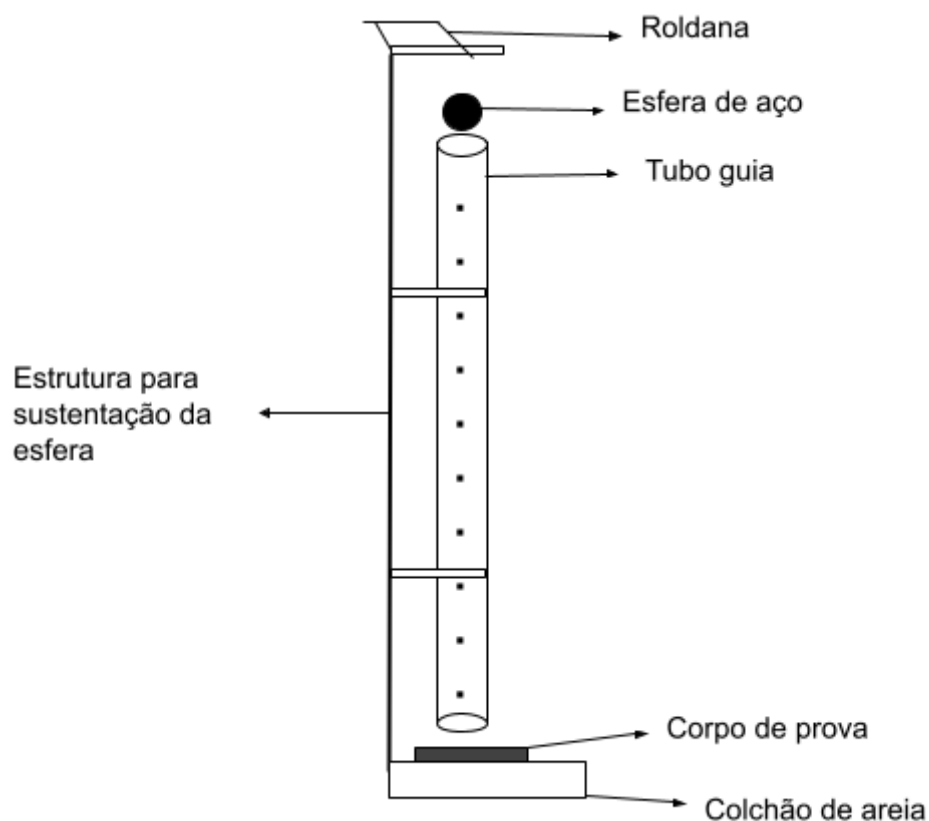
As normas abrangem diferentes tipos de materiais, incluindo metálicos, não metálicos, rochas naturais e placas cerâmicas. As normas são aplicadas conforme as características específicas de cada material. A dureza Vickers, por exemplo, é amplamente utilizada em materiais metálicos devido ao tipo de deformação elástica que ocorre nesse tipo de ensaio.

No caso da avaliação da resistência ao impacto, a principal diferença entre os métodos aplicados às rochas naturais e às placas cerâmicas está no peso da esfera utilizada, na altura da queda e no método de impacto por queda livre. Essas diferenças são necessárias devido à variação estrutural entre os materiais, exigindo adaptações nos ensaios para garantir medições precisas e representativas de suas propriedades mecânicas.

3.4.1. Resistência ao impacto de corpo duro

De acordo com a ABNT NBR 15845-8 (2015), o método de determinação da resistência ao impacto de corpo duro é aplicado a materiais provenientes de rochas naturais utilizados como revestimentos em construções. A análise é realizada por meio de um ensaio padronizado, utilizando um aparelho específico, ilustrado na Figura 12, e uma esfera de aço com 60 mm de diâmetro e massa de 1 kg. Esse método permite avaliar a capacidade do material em resistir a impactos mecânicos, contribuindo para a determinação de sua durabilidade e desempenho em aplicações estruturais.

Figura 12. Ilustração do ensaio de impacto de corpo duro.



Fonte: Adaptado de ABNT 15845-8 (2015).

O ensaio, de acordo a ABNT 15845-8, consiste na avaliação de um corpo de prova com dimensões de 20 cm × 20 cm, utiliza-se uma placa previamente acabada, com a espessura final correspondente àquela em que o material é usualmente comercializado, a qual varia, em geral, entre 10 mm e 40 mm. O corpo de prova é posicionado sobre um colchão de areia, com a face aparente voltada para cima e devidamente nivelado. Em seguida, a esfera de aço é liberada em queda livre a partir de uma altura inicial de 20 cm.

A queda é repetida sucessivamente no mesmo corpo de prova, aumentando a altura em incrementos de 5 cm, até que a amostra apresente a ruptura (quebra) completa do corpo de prova, o resultado é determinado com a média das alturas de queda em que a esfera foi liberada. Esse procedimento permite determinar a resistência do material ao impacto do corpo duro, fornecendo informações sobre sua durabilidade e desempenho em aplicações reais.

O método normativo de medição da resistência ao impacto de corpo duro foi aplicado por AGRIZZI (2020) em quatro tipos de rochas: rocha artificial de quartzito com

resina epóxi (RAQ - EP), rocha artificial de quartzito com resina poliuretana vegetal de mamona (RAQ - PUV), com 10 mm de espessura, o quartzito natural comercializado (RN - quartzito) e rocha artificial comercial, para efeito de comparação (RAC - BRANCA) com 30 mm de espessura. As amostras ensaiadas possuíam as dimensões de acordo com a metodologia normativa e espessura de comercialização.

Os resultados obtidos foram de energia média entre 1,96 e 19,61 J com altura média entre 0,2 e 2,0 m. A norma ABNT NBR 15844 (2015) estabelece um mínimo de 0,30 m de altura de resistência ao impacto para um material rochoso ser utilizado como revestimento.

O autor concluiu que as amostras RAQ - EP e RAQ - PUV tiveram a resistência ao impacto de corpo duro superior ao exigido norma, mesmo os corpos de prova tendo 10 mm de espessura, a rocha artificial comercial (RAC- Branca) e a rocha natural de quartzito (RN - quartzito) com 30 mm de espessura. Os resultados obtidos estão na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados encontrados no ensaio de impacto de corpo duro.

Materiais	Espessura (mm)	Altura de ruptura média (m)	Energia de ruptura (J)
RN - quartzito	30	0,2	1,961
RAC - Branca	30	> 2,0	> 19,612
RAQ - EP	10	0,393	9,856
RAQ - PUV	10	1,725	16,915

Fonte: Adaptado de AGRIZZI, 2020.

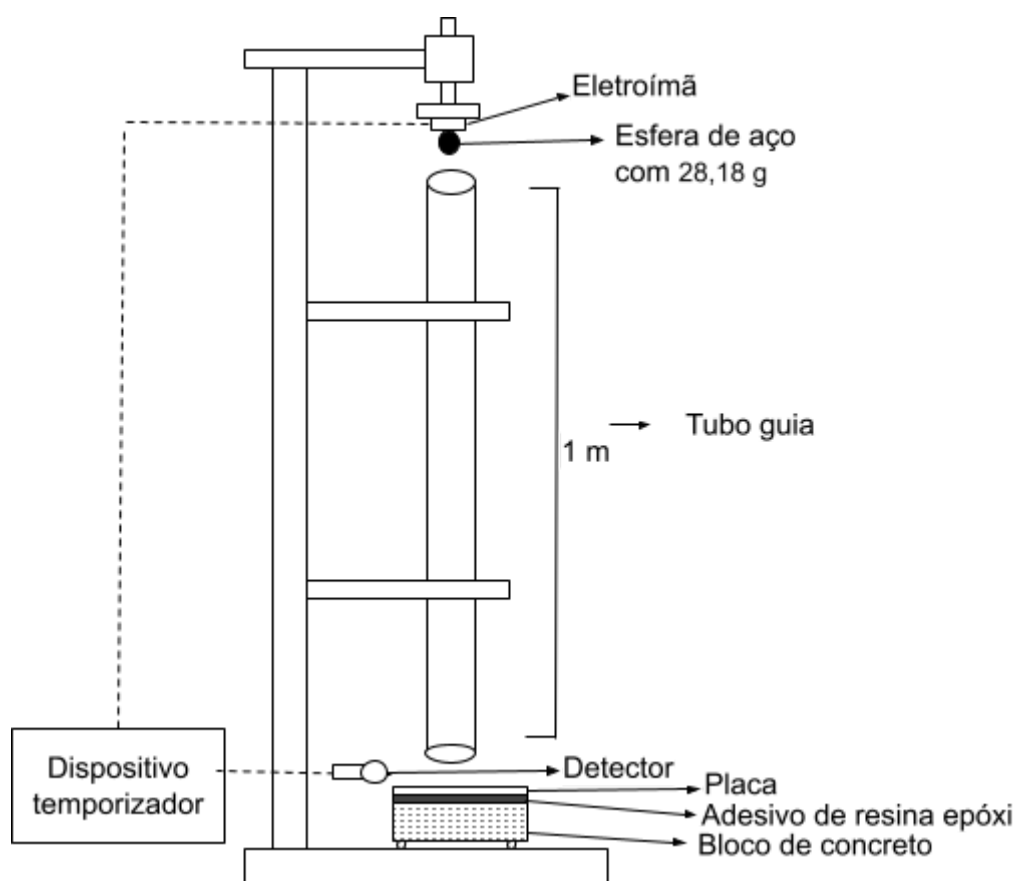
3.4.2. Resistência ao impacto pela medição do coeficiente de restituição

De acordo com a ABNT ISO 10545-5 (2017), o método de determinação da resistência ao impacto por meio da medição do coeficiente de restituição é aplicado a placas cerâmicas. O coeficiente de restituição é definido como a razão entre a velocidade relativa de partida e a velocidade de aproximação no impacto.

A análise é realizada utilizando um dispositivo de liberação de esfera disposto na Figura 13, no qual uma esfera de aço-cromo, com diâmetro de $(19 \pm 0,05)$ mm e peso de

28,18 g, calculado considerando a densidade do aço-cromo de $7,85 \text{ g/cm}^3$, sendo liberada em queda livre com um metro de altura. Esse ensaio permite avaliar a capacidade do material cerâmico de absorver impactos sem comprometer sua integridade estrutural.

Figura 13. Ilustração do ensaio de impacto de corpo duro aplicado em placas cerâmicas.



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 10545-5, 2017.

A análise é realizada em cinco corpos de prova com dimensões de $7,5 \text{ cm} \times 7,5 \text{ cm}$. Os corpos de prova são fixados em blocos de concreto utilizando uma resina epóxi rígida, garantindo estabilidade durante o ensaio. A face superior do material é posicionada adequadamente para receber o impacto conforme determinado pela ABNT NBR 10545-5.

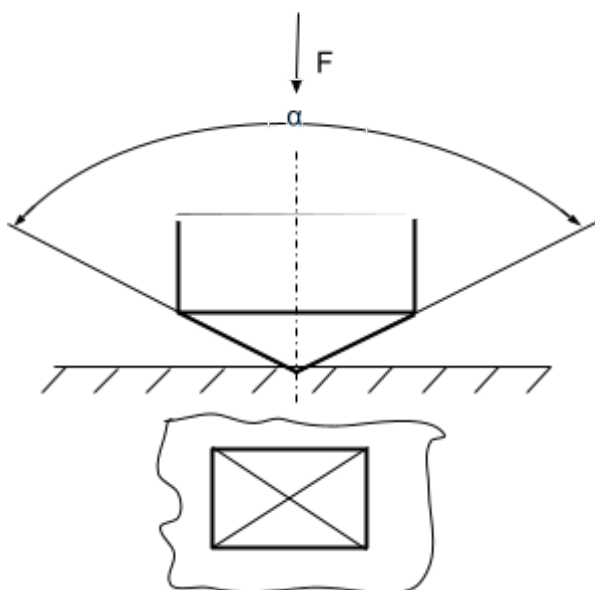
Durante o ensaio, a esfera de aço é liberada em queda livre e a altura de repique é medida para o cálculo do coeficiente de restituição. De acordo com a norma, sinais de lascamento ou trincas visíveis a menos de 1 m de distância devem ser ignorados, garantindo que apenas danos significativos sejam considerados na análise.

Este método foi aplicado por Dondi entre outros, (2016) e está descrito na seção 2.5.3 deste documento.

3.4.3. Ensaio de dureza Vickers

De acordo com a ABNT ISO 6507-1 (2019), o método de ensaio de dureza Vickers é aplicável a materiais metálicos, incluindo metais duros e outros carbonetos cementados. O método não se destina a medição da resistência ao impacto, e sim de dureza de um material, entretanto existe uma correlação positiva entre dureza e resistência ao impacto. O ensaio consiste em pressionar um penetrador de diamante, com formato de pirâmide de base quadrada e ângulo especificado entre faces opostas, sobre a superfície do corpo de prova, a Figura 14 corresponde a representação esquemática do método. Após a remoção do penetrador, mede-se o comprimento das diagonais da impressão deixada na superfície para determinar a dureza do material.

Figura 14. Representação esquemática do ensaio de dureza Vickers.



Fonte: Adaptado de ABNT ISO 6507-1 (2019).

O corpo de prova deve possuir uma superfície plana, lisa e livre de impurezas, preferencialmente polida, sem deformações visíveis, para garantir a precisão do ensaio. A força aplicada deve ser suficiente para produzir impressões com diagonais superiores a 0,020 mm. A velocidade de aplicação da carga não deve exceder 0,2 mm/s ou 0,070 mm/s, dependendo da força utilizada determinado pela ABNT ISO 6507-1.

A dureza Vickers (HV) é calculada pela Equação 3:

$$HV = \frac{1,8544 \cdot F}{d^2} \quad (\text{Eq. 02})$$

Onde:

- HV= Dureza Vickers (sem unidade — valor adimensional, mas com notação convencional como "HV 300");
- F = Carga aplicada (em newtons, N — ou em kgf se for o sistema convencional);
- d = Média das diagonais da impressão (em milímetros, mm);

O fator 1,8544 é uma constante que resulta da geometria da pirâmide da ponta de diamante (ângulo de 136° entre as faces opostas).

Para forças de ensaio baixas, é necessário considerar o aumento da incerteza nas medições quando as diagonais da impressão forem menores que 0,020 mm. A norma também especifica requisitos para a calibração e verificação das máquinas de ensaio, assegurando a confiabilidade e repetibilidade dos resultados obtidos (ABNT ISO 6507-1).

O autor JUNIOR (2011) aplicou este método na avaliação de dureza dos compósitos cerâmicos reforçados com produtos da combustão do carvão mineral. O ensaio de microdureza Vickers foi conduzido em corpos de prova designados como CP-0, CP-10, CP-20 e CP-30, todos submetidos ao processo de sinterização a uma temperatura de 1.170 °C. Os resultados obtidos, expressos em unidade Vickers de dureza (HV), representam a média das microdurezas medidas para cada composição específica das amostras, conforme detalhado na Tabela 4 (JUNIOR, 2011).

Tabela 4. Resultado da Microdureza Vickers.

Amostras	CP-0	CP-10	CP-20	CP-30
Microdureza Vickers (HV)	760,20	793,00	874,40	940,20
Desvio Padrão (HV)	43,14	65,30	82,60	68,98

Fonte: Adaptado de Junior, 2011.

As amostras CP-0, isentas de resíduos de carvão mineral, apresentaram uma microdureza Vickers média de 760,20 HV, com um desvio padrão de 43,14 HV. A incorporação de 10% em peso de resíduos de carvão mineral nas amostras CP-10 resultou em um incremento de aproximadamente 4,3% na dureza, atingindo uma média de 793 HV e um desvio padrão de 65,30 HV.

A adição de 20% em peso de resíduos de carvão mineral nas amostras CP-20 promoveu um aumento de 15% na dureza em relação às amostras CP-0, com uma média de 874,40 HV e um desvio padrão de 82,60 HV. Similarmente, as amostras CP-30, contendo 30% em peso de resíduos de carvão mineral, exibiram um aumento de 23,7% na dureza em comparação às amostras CP-0, apresentando uma média de 940,20 HV e um desvio padrão de 68,98 HV, (JUNIOR, 2011).

3.4.4. Ensaio de dureza ao Risco de Mohs

A norma NBR 13818 (1997), atualmente cancelada, definia a resistência ao risco como uma propriedade mecânica que indicava a capacidade da superfície de uma peça em resistir a cortes e arranhões. Esta propriedade está diretamente relacionada às condições de resistência ao risco do revestimento, considerando sua aplicação específica como componente de mobiliário.

Segundo essa norma, o teste era realizado em três peças inteiras por produto, cada peça era colocada sobre um suporte firme, com a superfície a ser testada voltada para cima. A superfície era então limpa com um pano de umedecido em álcool etílico e seca, em seguida um mineral da escala Mohs de referência, com o canto agudo recém-cortado, era riscado sobre a superfície da peça.

Durante o procedimento, aplicava-se manualmente uma pressão uniforme, buscando manter intactos tanto o mineral quanto a superfície da peça. Esse processo era repetido com cada mineral da escala Mohs apresentada na Tabela 5. Os riscos resultantes na peça eram examinados a olho nu sob uma intensidade luminosa de, no mínimo, 300 ± 30 lux, a uma distância de 30 ± 5 cm. Em caso de dificuldade na avaliação do risco, recomendava-se passar grafite de lápis HB sobre a área riscada e removê-lo com um pano úmido em álcool. A presença de risco era indicada pela impregnação do grafite.

A dureza ao risco da peça era determinada pela dureza do mineral de maior dureza na escala Mohs que não havia produzido risco visível na superfície testada.

Tabela 5. Escala Mohs

Mineral	Dureza
Talco	1
Gipsita	2
Calcita	3
Fluorita	4
Apatita	5
Feldspato	6
Quartzo	7
Topázio	8
Coríndon	9
Diamante	10

Fonte: Adaptado do Instituto de Geociências da USP. (2023)

A norma ASTM C 1895-20 (2020) apresenta o método de teste que define como avaliar a resistência ao risco, utilizando a escala de Mohs, em superfícies duras. Para realizar o teste, utiliza-se um aparelho composto por pontas com durezas que variam de 2 a 9 na escala Mohs. Esse aparelho também possui um suporte que posiciona a ponta de dureza em um ângulo fixo de 70° e aplica uma força controlada de $3,2 \pm 0,2$ kg.

Figura 15. Dispositivo de determinação ao risco conforme ASTM C 1895.



Fonte: Autora, 2025.

Para a realização do teste de resistência ao risco, é necessário no mínimo uma amostra por ensaio, com dimensões de até 15 × 15 cm que devem ser testados integralmente. Amostras maiores podem ser reduzidas a um tamanho máximo de 15 cm. No procedimento, as pontas utilizadas para riscar devem ser inspecionadas e afiadas regularmente para garantir um ponto de contato uniforme (ASTM C 1895-20, 2020).

O dispositivo de riscagem conforme Figura 15 deve ser posicionado sobre a amostra em um ângulo apropriado e, então, arrastado por uma distância de 7,5 cm ou metade do comprimento da amostra, prevalecendo a menor medida. Por fim, a superfície riscada deve ser cuidadosamente inspecionada com o auxílio de ampliação para verificar a presença de qualquer ranhura ou dano.

A dureza ao risco da peça é determinada pela maior dureza da ponta que não produz risco visível na superfície testada.

3.5. MÉTODOS NÃO NORMATIVOS PARA MEDIÇÃO DE RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Esta seção apresenta estudos que aplicam métodos alternativos para medir a resistência ao impacto em materiais cerâmicos. Os métodos foram selecionados por sua facilidade de aplicação e por simularem adequadamente o impacto de um objeto sobre a superfície do mobiliário. A Tabela 6 resume os artigos selecionados.

Tabela 6. Métodos selecionados de medição de resistência ao impacto em cerâmica.

Título do artigo	Autor (Ano)	Método de queda	Norma base
<i>Análisis del impacto mecánico sobre las baldosas cerámicas. factores que influyen</i>	Cantavella e outros. (2008)	Pêndulo com dardo	-
Estudos dos fatores intervenientes na redução de defeitos de fissura em superfícies esmaltadas	Rosa & De Noni Jr. (2012)	Queda livre com esfera	-
<i>Resistance to impact of porcelain stoneware tiles</i>	Dondi entre outros (2016)	Queda livre com esfera	ISO 10545-5

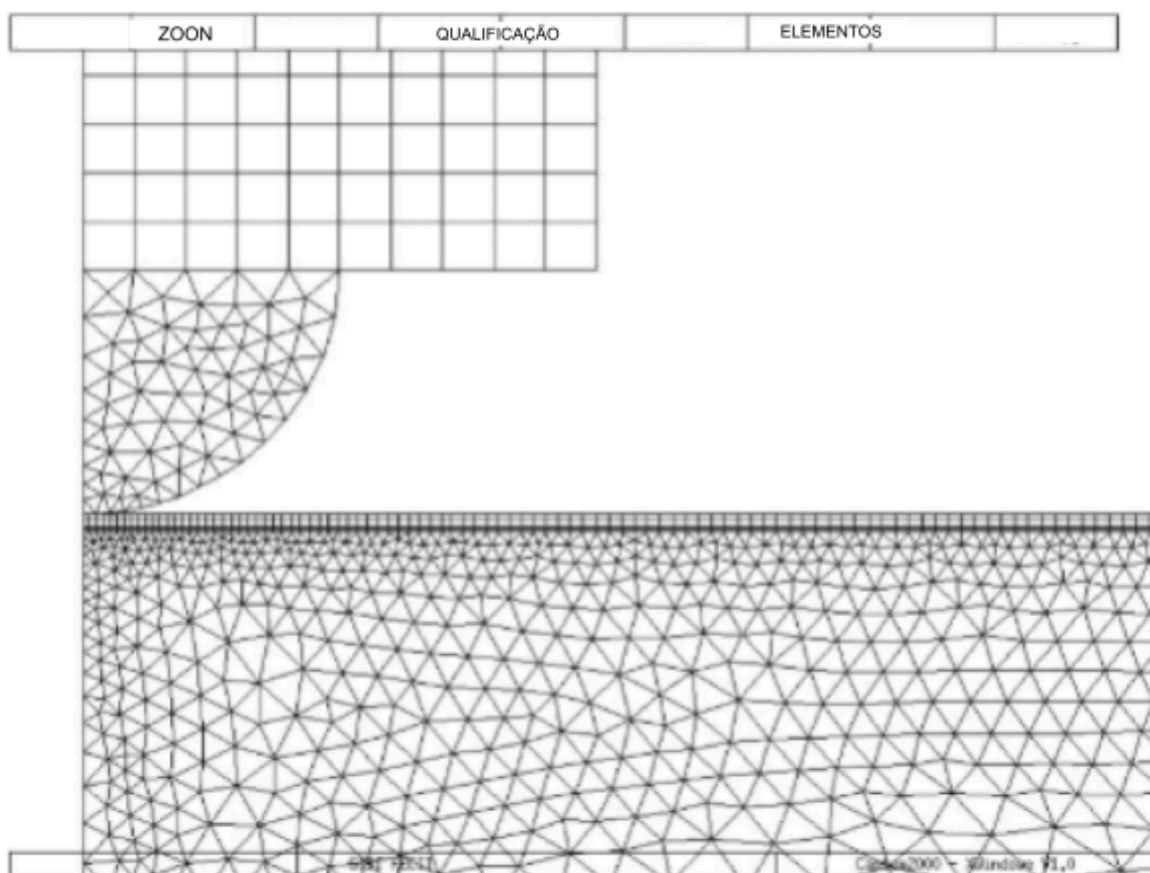
Fonte: Autora, 2025

3.5.1. Método do pêndulo com dardo

No estudo de Cantavella e outros (2008), investigou-se o comportamento de placas cerâmicas submetidas a impactos mecânicos utilizando um pêndulo com dardo, tanto de forma dinâmica quanto semi-estática. Os resultados experimentais foram comparados com simulações realizadas no programa Code Aster. Observou-se que, durante o impacto, surgem tensões de cisalhamento, tração e compressão que podem gerar trincas ou lascas no ponto de contato. O método normativo vigente avalia a resistência ao impacto através do coeficiente de restituição, que considera as alturas inicial e final da peça testada. Entretanto, este método pode variar conforme o tipo de peça e é sensível à aplicação do impacto do corpo de prova.

A modelagem do impacto dinâmico considerou um revestimento cerâmico composto por base cerâmica, engobe e esmalte sobre um suporte de cimento. O elemento impactante foi um dardo com massa de 100 g e longitude de 45 mm, com ponta semi esférica acoplada a um cilindro de raio 5 mm, lançado de uma altura de 0,8 m. O projeto foi desenvolvido utilizando o método de elementos finitos, no qual os sólidos (dardo e peça cerâmica) foram divididos em células, possibilitando a análise das tensões e deformações nos nós dos elementos, conforme ilustrado na Figura 16. Com a simulação, foi possível obter informações detalhadas sobre a profundidade do impacto, duração, deformação da peça, tensões na zona de contato e distribuição das tensões.

Figura 16. Diagrama empregado no cálculo por elementos finitos.



Fonte: CANTAVELLA e outros. (2008).

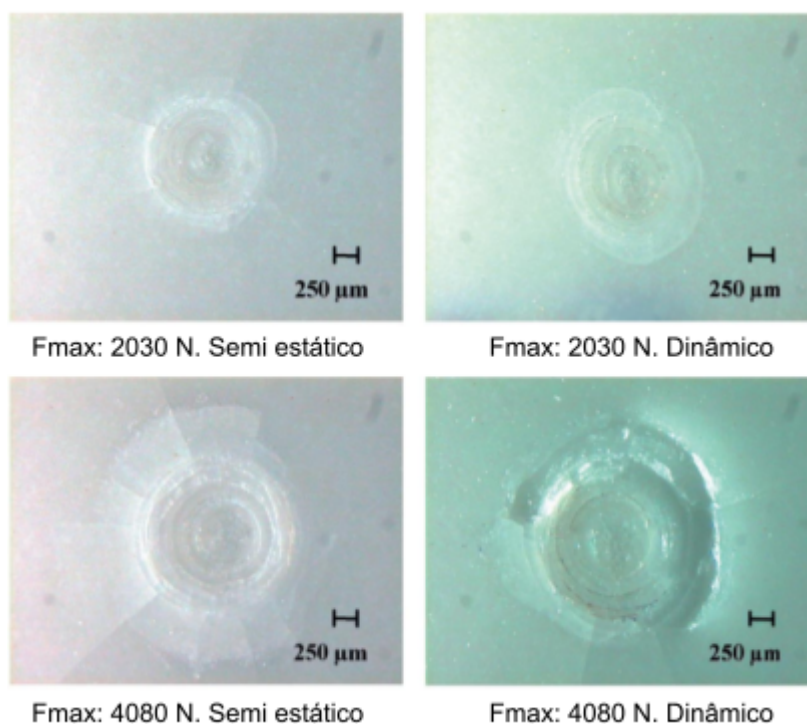
A modelagem aplicada ao impacto semi-estático não considera a aceleração da peça. Esse método utiliza informações simplificadas, levando em conta variáveis como o deslocamento máximo do dardo e a força aplicada sobre a peça. Além disso, os cálculos são realizados com diferentes valores de força e com o uso da equação de conservação de energia mecânica (CANTAVELLA e outros, 2008).

Esse método permite avaliar o comportamento das acelerações e apresenta um tempo de duração menor em comparação ao método dinâmico. Os mesmos parâmetros do ensaio dinâmico foram aplicados no método semi-estático. Os resultados indicaram semelhança entre os dois métodos, embora as tensões observadas no método dinâmico sejam um pouco mais elevadas.

Para verificar a equivalência entre os métodos dinâmico e semi-estático, foi realizado um ensaio com pêndulo de impacto, utilizando uma ponta de 3 mm. Esse pêndulo estava equipado com uma célula de carga, capaz de registrar a força durante o impacto. Os resultados foram analisados com base na curva de força em função do

tempo. Um adaptador foi acoplado ao sistema para viabilizar o ensaio no modo semi-estático. Os resultados obtidos demonstraram uma similaridade entre os dois métodos, conforme ilustrado na Figura 17, que apresenta os tipos de danos gerados nos ensaios (CANTAVELLA e outros, 2008).

Figura 17. Aspecto dos danos causados pelo impacto de diferentes cargas.



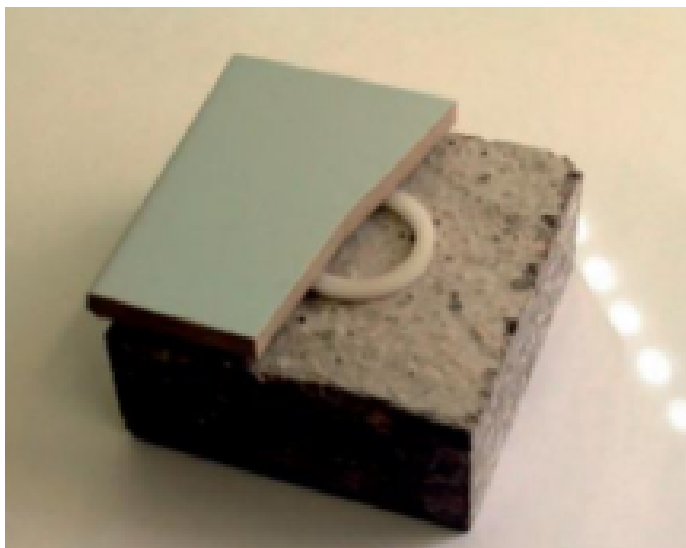
Fonte: CANTAVELLA e outros, (2008).

De acordo com os resultados obtidos, foi proposto um método de quantificação da resistência ao impacto semi-estático, utilizando cargas cíclicas aplicadas por um dardo sobre uma peça cerâmica aderida com resina a um substrato de cimento. A carga máxima aplicada oscilou de forma sinusoidal entre um valor de força máxima (F_{max}) e um valor de força mínima (F_{min}), sendo este último calculado como $F_{min} = F_{max}/10$. Caso o material fosse completamente elástico e não apresentasse fraturas, o deslocamento máximo do dardo ocorreria no momento em que a força máxima fosse atingida, mantendo-se constante ao longo do tempo. No entanto, se o material sofresse algum tipo de deterioração, o deslocamento do dardo aumentaria progressivamente à medida que os ciclos fossem executados.

Para avaliar, em condições de laboratório, os efeitos de uma fixação deficiente, uma peça foi posicionada sobre uma argola de náilon conforme Figura 18 e submetida à aplicação de força por meio do dardo, alinhado ao centro da amostra. Os resultados

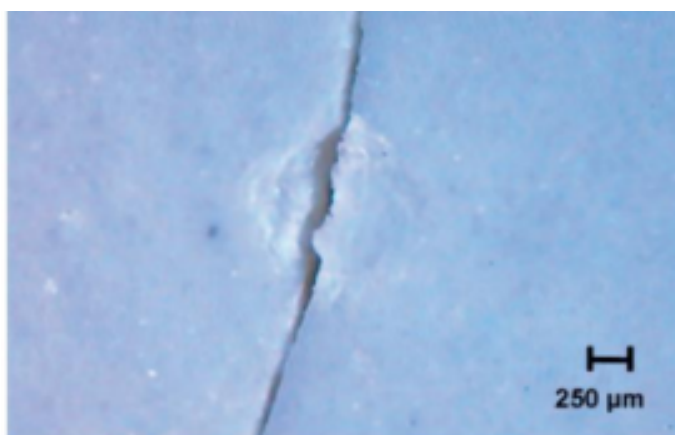
mostraram que o impacto resultante gerou trincas na peça visto na Figura 19, evidenciando a influência da fixação inadequada na resistência ao impacto.

Figura 18. Acoplamento incorreto do revestimento no suporte.



Fonte: CANTAVELLA e outros. (2008).

Figura 19. Dano causado na área mal acoplada.



Fonte: CANTAVELLA e outros, (2008).

A influência do engobe e do esmalte na resistência ao impacto de revestimentos cerâmicos foram avaliadas em condições laboratoriais, considerando diferentes tipos desses materiais com o suporte porcelanato, conforme a Tabela 7. Utilizando o método de avaliação com pêndulo de impacto e o parâmetro m_1 , observou-se que o engobe refratário apresentou um valor de m_1 superior.

O parâmetro m_1 representa a inclinação do trecho inicial da curva, indicando a taxa de variação do deslocamento em função do número de ciclos (mm/ciclo). Ele reflete

a rapidez com que o material começa a sofrer danos sob impacto cíclico, sendo um indicador da resistência inicial. Valores mais altos de m_1 significam menor resistência ao impacto, pois o dano se propaga mais rapidamente, enquanto valores menores indicam maior resistência. Esse resultado pode ser atribuído à maior refratariedade do engobe, que indica um menor módulo de elasticidade e uma maior deformação do engobe, aumentando, por sua vez, as tensões no esmalte (CANTAVELLA e outros, 2008).

Tabela 7. Características das peças industriais testadas sob impacto sobre peças de porcelanato. OBS: Porcelanato, absorção de água < 0,5% (Bla); grés, absorção de água 3 - 6% (Blla). m_1 quanto menor maior a resistência ao impacto.

Teste	Tipo de Engobe	Tipo de Esmalte	Curva de queima	m_1 (nm/ciclo)
T1	Padrão Porcelanato	Mate	Padrão Porcelanato	51 ± 10
T2	Mais refratário	Mate	Padrão Porcelanato	158 ± 16
T3	Padrão grés	Brilhante	Grés	215 ± 18
T4	Padrão grés	Mate	Grés	200 ± 17

Fonte: Adaptado de CANTAVELLA e outros, (2008).

A refratariedade do engobe exerce influência significativa sobre a resistência ao impacto do material cerâmico. O aumento da refratariedade do engobe tende a diminuir a resistência ao impacto, possivelmente devido à redução do módulo de elasticidade do material (CANTAVELLA e outros, 2008).

A natureza do suporte foi avaliada utilizando do tipo grés (Blla) e porcelanato (Bla). Considerando a curva de queima, o módulo de elasticidade (E), a resistência mecânica (σ_R) e o parâmetro m_1 . Quando comparados na mesma curva de queima, os dois suportes não apresentaram diferenças significativas. No entanto, ao serem avaliados em curvas de queima distintas, verificou-se que o porcelanato demonstrou melhor desempenho em relação ao impacto.

Observou-se uma correlação entre as propriedades mecânicas e a resistência ao impacto. Quanto maior o módulo de elasticidade, maior a resistência ao impacto. Esse fenômeno ocorre porque materiais mais rígidos tendem a dissipar menos energia no impacto, concentrando as tensões no ponto de contato (CANTAVELLA e outros, 2008).

O estudo também comprovou que durante o impacto ocorre uma tensão elevada concentrada nas proximidades do ponto de impacto. As simulações indicaram que o impacto de um objeto sobre a placa cerâmica não envolve acelerações significativas, pois pode ser tratado como um processo semi-estático, fato confirmado em testes laboratoriais. O que define a tipologia do suporte é a absorção de água, neste caso, suporte porcelanato em curva de queima de grés tende a ser um produto grés (CANTAVELLA e outros, 2008).

A Tabela 8 apresenta o módulo de elasticidade e a resistência mecânica à flexão. Fica evidenciado a relação do efeito da maior resistência ao impacto quanto maior a resistência mecânica e rigidez das peças.

Tabela 8. Características das peças industriais de acordo com a natureza do suporte.

Teste	Suporte	Esmalte	Curva de queima	E (GPa)	σ_R (MPa)	m1 (nm/ciclo)
T5	Grés	Grés brilhante	Grés	36.0 ± 1.2	36.7 ± 1.7	189 ± 38
T3	Porcelanato	Grés brilhante	Grés	24.4 ± 0.6	27.7 ± 1.2	215 ± 18
T6	Grés	Porcelanato mate	Porcelanato sobre refratário	47.8 ± 1.5	45.2 ± 1.9	67 ± 10
T1	Porcelanato	Porcelanato mate	Porcelanato	52.0 ± 1.0	52.4 ± 1.7	51 ± 10

Fonte: CANTAVELLA e outros, (2008).

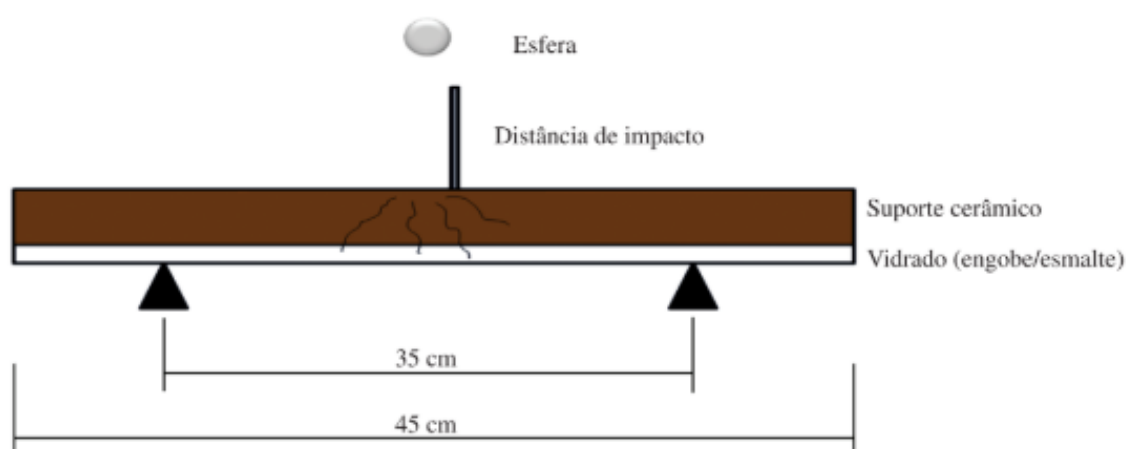
O suporte cerâmico desempenha um papel fundamental na resistência ao impacto. Em geral, materiais com maior módulo de elasticidade apresentam melhor desempenho nesse aspecto, pois reduzem a deformação do vidro e, conseqüentemente, as tensões de cisalhamento e tração que ocorrem durante o impacto (CANTAVELLA e outros, 2008).

3.5.2. Método da queda livre com esfera

Rosa & De Noni Jr (2012) realizaram estudos para avaliar a ocorrência de defeitos de fissuração em superfícies esmaltadas, observadas após a saída das peças na queima. O procedimento experimental foi conduzido em três etapas principais: classificação do defeito, simulação do defeito e planejamento fatorial dos experimentos. Neste caso, tratava-se de esforços mecânicos sofridos pela peça ainda em estado cru ou seco. Estes esforços traziam como consequências fissuras à crú, imperceptíveis ao olho.

Na etapa de classificação, foi realizada uma análise das informações históricas sobre o defeito, incluindo aspectos como aparência, local de ocorrência, amplitude, frequência, intensidade e dimensão das fissuras. Para a simulação do defeito, os pesquisadores aplicaram um impacto mecânico na face oposta ao esmalte da placa cerâmica, conforme ilustrado na Figura 20.

Figura 20. Esquema do ensaio de simulação do defeito com queda livre de esfera.

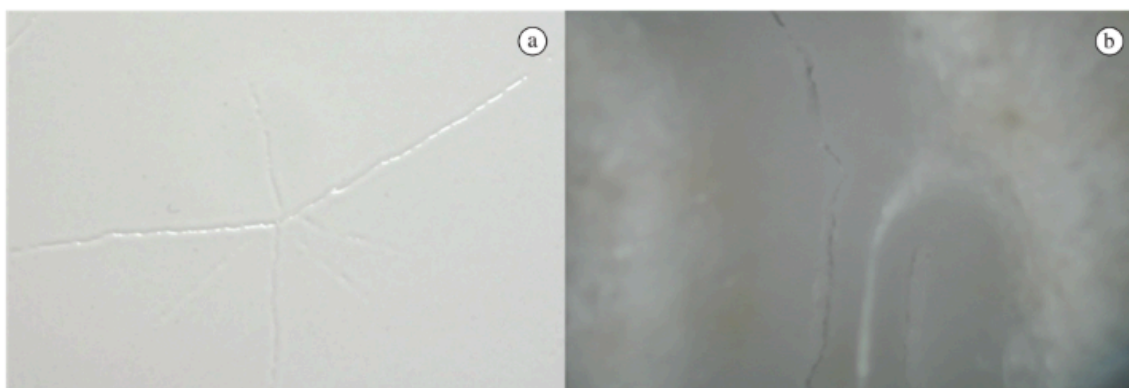


Fonte: Rosa & De Noni Jr. (2012).

Uma esfera de alumina com massa de 32,2 g foi utilizada para gerar o impacto. A altura da queda variou de 0,010 m a 0,080 m, com incrementos de 0,010 m. Após o impacto, o corpo de prova seco foi submetido à queima em forno industrial, e as trincas resultantes foram medidas em seu comprimento total com o auxílio de uma régua graduada (ROSA & DE NONI JR, 2012).

Os defeitos observados foram trincas no esmalte, conhecidas como fissuras, que podem levar à desclassificação do material. A Figura 21 ilustra esse tipo de defeito, que pode comprometer o suporte cerâmico (ROSA & DE NONI JR, 2012).

Figura 21. Fissuras em revestimentos cerâmicos esmaltados: (a) Vista geral da fissura na superfície esmaltada; (b) Detalhe da fissura observada em microscopia óptica (100x de aumento).



Fonte: Rosa & De Noni Jr. (2012).

Para validar o método de análise, foram coletadas peças diretamente da linha de produção e submetidas a testes. Os resultados mostraram que aproximadamente 95% das peças que apresentaram fissuras sofreram impactos com energia inferior a 2×10^{-2} J. Isso sugere que o uso de um suporte cerâmico com maior resistência mecânica poderia minimizar a ocorrência do defeito.

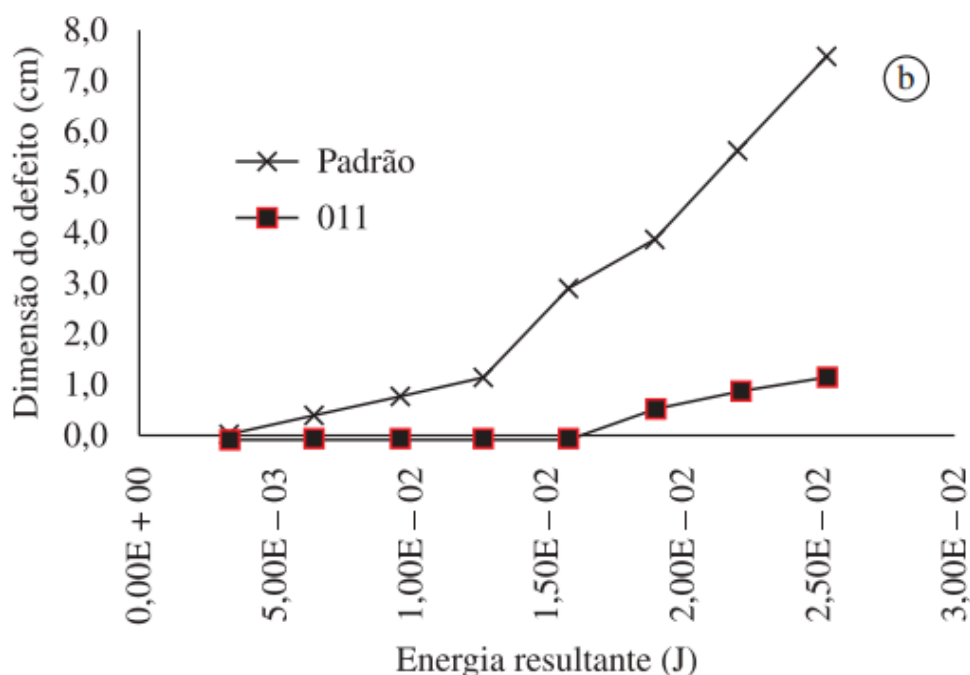
A altura de queda crescente, com energia de impacto crescente, é um princípio que apresentou sensibilidade suficiente para identificar claramente a energia crítica de início de fissuração, assim como o aumento do dano com o aumento da energia do impacto (ROSA & DE NONI JR, 2012).

Diferentes fatores do processo produtivo foram analisados para compreender sua relação com a incidência das fissuras. Inicialmente, foi realizado um ensaio de simulação com altura de lançamento da esfera de 0,085 m, resultando em uma força de impacto de $4,76 \times 10^{-2}$ J (ROSA & DE NONI JR, 2012).

A espessura da camada de engobe e a plasticidade do esmalte e do engobe foram os fatores mais relevantes para a redução do comprimento das fissuras. Esses

aspectos foram estudados por meio de um planejamento experimental fatorial, permitindo avaliar a influência isolada e combinada de cada variável.

Figura 22. Resultado gráfico do planejamento experimental.



Fonte: Rosa & De Noni Jr. (2012).

Os resultados demonstraram que o aumento da pressão de compactação não trouxe melhorias significativas na mitigação do defeito. No entanto, a aplicação de um engobe mais plástico e em maior espessura contribuiu para reduzir a incidência de fissuras. Além disso, ajustes na formulação do esmalte também se mostraram benéficos (ROSA & DE NONI JR, 2012).

A combinação desses fatores, especialmente o aumento simultâneo da plasticidade do engobe e do esmalte, sendo avaliado no experimento 101, apresentado na Figura 22, revelou-se a estratégia mais eficiente para minimizar o problema, reduzindo custos sem comprometer a qualidade final do produto (ROSA & DE NONI JR, 2012).

Testes industriais confirmaram a eficácia dessa nova abordagem, resultando em uma redução significativa na formação de fissuras em revestimentos cerâmicos esmaltados. A necessidade de aditivos foi otimizada, tornando o processo mais eficiente e economicamente viável (ROSA & DE NONI JR, 2012).

3.5.3. Análise da resistência ao impacto de porcelanatos de grandes formatos

O estudo conduzido por Dondi e outros (2016) investiga a resistência ao impacto de revestimentos cerâmicos, uma propriedade técnica fundamental, especialmente para placas de grandes formatos e baixa espessura. Até o momento, a avaliação dessa propriedade tem sido limitada ao método normativo baseado no coeficiente de restituição, conforme estabelecido pela ABNT ISO 10545-5 (2017).

Duas conclusões principais surgiram deste estudo: primeiramente, diferentes mecanismos de fratura podem coexistir, incluindo a fratura hertziana e o comportamento pseudoplástico, os quais influenciam a resposta ao impacto de acordo com as camadas e sua distribuição. Em segundo lugar, as variáveis geométricas do objeto impactante e sua velocidade são os fatores mais determinantes na severidade do dano (DONDI e outros, 2016).

Ao considerar o impacto como um processo quase estático, foi possível investigá-lo por meio de simulações em elementos finitos. Os resultados indicam que a força do impacto gera uma concentração de tensões na região da colisão, sendo o corpo cerâmico o principal responsável pela resistência ao impacto, enquanto o esmalte cerâmico exerce pouca influência. A correlação com o módulo de elasticidade mostra que materiais de maior rigidez apresentam melhor desempenho contra o impacto, evidenciado pela superioridade do porcelanato em comparação ao grés.

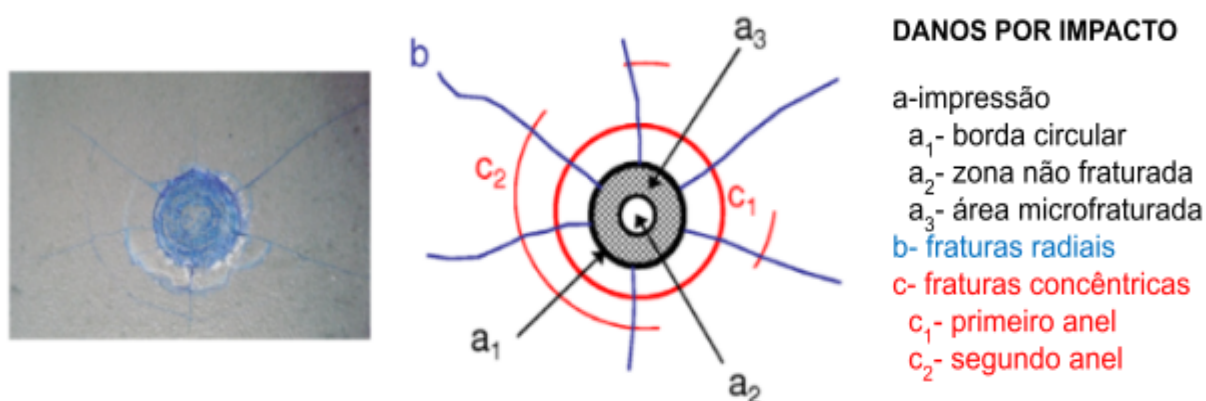
O ensaio normativo ABNT ISO 10545-5 (2017) define o tamanho do corpo de prova como 75 x 75 mm, fixado sobre um substrato de concreto, com uma energia de impacto padronizada em 0,27 J. No entanto, devido à dependência da montagem entre o revestimento cerâmico e o substrato, esse método não permite obter informações detalhadas sobre como o material cerâmico se danifica sob impacto (DONDI e outros, 2016).

Para compreender melhor o comportamento dos revestimentos cerâmicos sob diferentes condições de impacto, o estudo analisou três tipos de porcelanatos não esmaltados comerciais, com espessuras de 3,5 mm, 5,0 mm e 8,0 mm. Os corpos de prova foram preparados em formatos distintos (12 x 12 cm, 25 x 25 cm e 60 x 60 cm), seguindo os parâmetros da ABNT ISO 10545-5 para o substrato (DONDI e outros, 2016).

As propriedades físicas e mecânicas avaliadas incluíram absorção de água, porosidade aberta, densidade aparente, resistência à flexão, módulo de elasticidade e tenacidade à fratura. A resistência ao impacto foi testada em condições semelhantes às normativas, utilizando esferas de aço de diferentes massas (50 g, 80 g, 200 g e 500 g) e diâmetros variando entre 10 mm e 50 mm. As esferas foram soltas de alturas crescentes entre 0,38 m e 1,35 m, resultando em impactos com energias entre 0,2 J a 6,0 J e velocidades terminais de 1,9 m/s a 5,5 m/s.

O Índice de Rigidez de Roesler ($P / R^{3/2}$) foi calculado como a relação entre a energia de impacto (P , em Joules) e o raio da impressão ($R^{3/2}$, em milímetros). Após os impactos, os danos foram quantificados de acordo com o diâmetro do anel deixado pelo impacto e a presença de microtrincas internas, conforme ilustrado na Figura 23.

Figura 23. Danos observados após o impacto no porcelanato.



Fonte: Dondi e outros, (2016).

Os resultados apresentados na Tabela 9, demonstram que as características físicas e mecânicas do porcelanato seguem padrões usuais, com absorção de água inferior a 0,1%, porosidade total entre 5,8% e 8,0% (dependendo da espessura), resistência à flexão acima do limite normativo (>35 MPa) e módulos elásticos entre 60 e 80 GPa. A tenacidade à fratura apresentou correlação inversa com a porosidade total: quanto menor a fase vítrea e a presença de poros, maior a resistência mecânica do porcelanato.

Tabela 9. Propriedades físico-mecânicas e composição de fases

Propriedade	Unidade	3,5 milímetros	5,0 milímetros	8,0 milímetros
Absorção de água	% peso	0,05 ± 0,03	0,10 ± 0,06	0,06 ± 0,03
Porosidade aberta	% volume	0,13 ± 0,06	0,23 ± 0,15	0,15 ± 0,07
Porosidade fechada	% volume	7,9 ± 0,3	5,6 ± 0,3	6,2 ± 0,3
Resistência à flexão	MPa	71,4 ± 2,2	64,7 ± 2,8	71,6 ± 5,0
Tenacidade à fratura	MPa m 0,5	1,18 ± 0,03	1,32 ± 0,06	1,27 ± 0,04
Módulo elástico	GPa	66,0±1,3	65,4±1,3	68,0±1,3
Fase vítrea	% peso	72 ± 3	57 ± 3	65 ± 3
Quartzo	% peso	18 ± 1	22 ± 1	23 ± 1
Mulita	% peso	9 ± 1	10 ± 1	9 ± 1
Feldspatos	% peso	1 ± 1	10 ± 1	3 ± 1

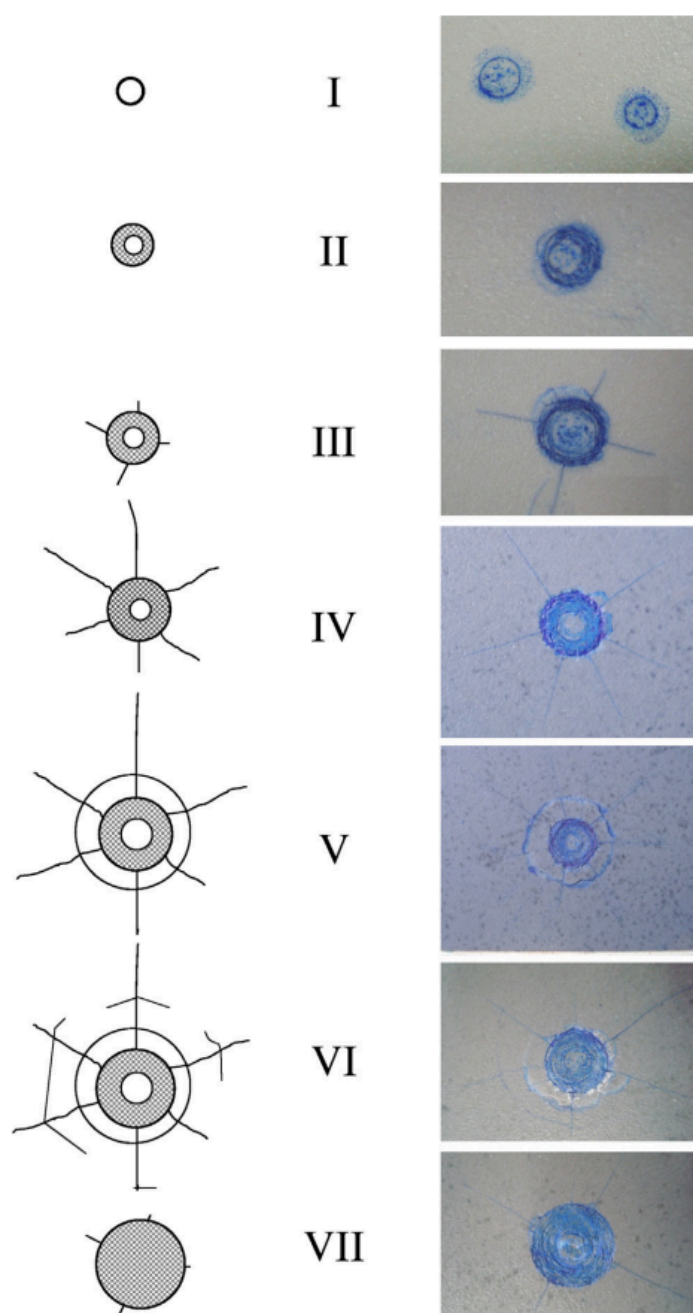
Fonte: Adaptado de Dondi e outros. (2016).

A severidade do dano aumenta em proporção à energia do impacto. A análise da aparência dos danos permite a classificação em sete categorias distintas apresentadas na Figura 24.

Mesmo com impactos de baixa energia (por exemplo, 0,3 J), a esfera de aço pode deixar uma marca circular, sem características internas visíveis (classe I). Com o aumento da energia, surge um anel circular com microfaturas na borda interna (classe II), um padrão comum em vidros de cal-soda sob baixo impacto. Em seguida, pequenas fissuras radiais (geralmente quatro) aparecem ao redor do anel de impacto (classe III). Com o aumento da energia, o número e a extensão das fissuras radiais crescem, acompanhados pela fragmentação interna do anel (classe IV). O processo continua com o surgimento de um primeiro anel (classe V) e um segundo anel (classe VI) de fissuras

concêntricas, resultantes da interseção dos cones hertzianos com a superfície do porcelanato. Finalmente, na classe VII, observa-se um comportamento quase plástico: o anel de impacto é extenso e sua área interna exhibe microfaturas generalizadas, com a possível presença de fissuras radiais curtas. Este comportamento é esperado, uma vez que materiais similares, como porcelana e vidro de cal-soda, demonstram um comportamento mecânico próximo ao limite entre frágil e quase plástico (DONDI e outros, 2016).

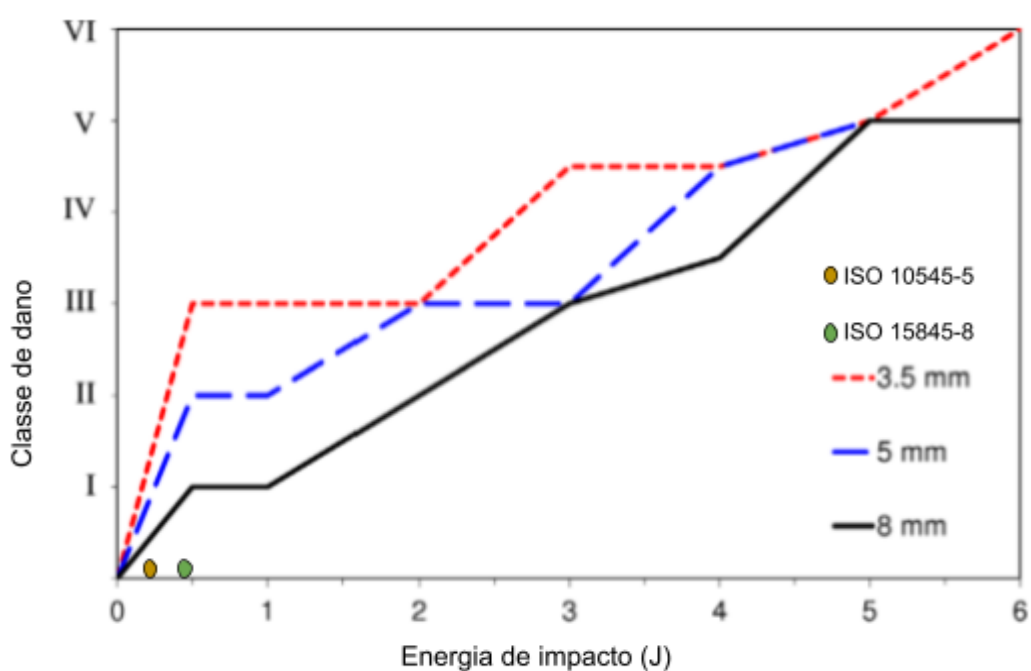
Figura 24. Classe dos danos.



Fonte: Dondi e outros. (2016).

A relação entre a energia do impacto e a classe de dano varia significativamente no porcelanato com diferentes espessuras, conforme Figura 25. Em peças de 8 mm de espessura, o aumento da classe de dano é diretamente proporcional ao aumento da energia do impacto, seguindo uma progressão linear. Por outro lado, peças de 5 mm de espessura apresentam uma classe de dano superior, para a mesma energia de impacto, até 5 J. Como esperado, as peças de 3,5 mm de espessura demonstram maior suscetibilidade a danos, especialmente em energias de impacto mais baixas. No entanto, para impactos de 5 J ou mais, a classe de dano se torna similar entre as peças, independentemente da espessura. A norma ISO 15845-8, que inicia o teste com energia de 1,96 J, representa um risco significativo de apresentar dano. Por outro lado, a norma ISO 10545-5, que também lida com testes de impacto, é considerada insuficiente para causar danos relevantes aos produtos testados.

Figura 25. Classe de dano em função da energia de impacto para diferentes espessuras.



Fonte: Dondi e outros. (2016).

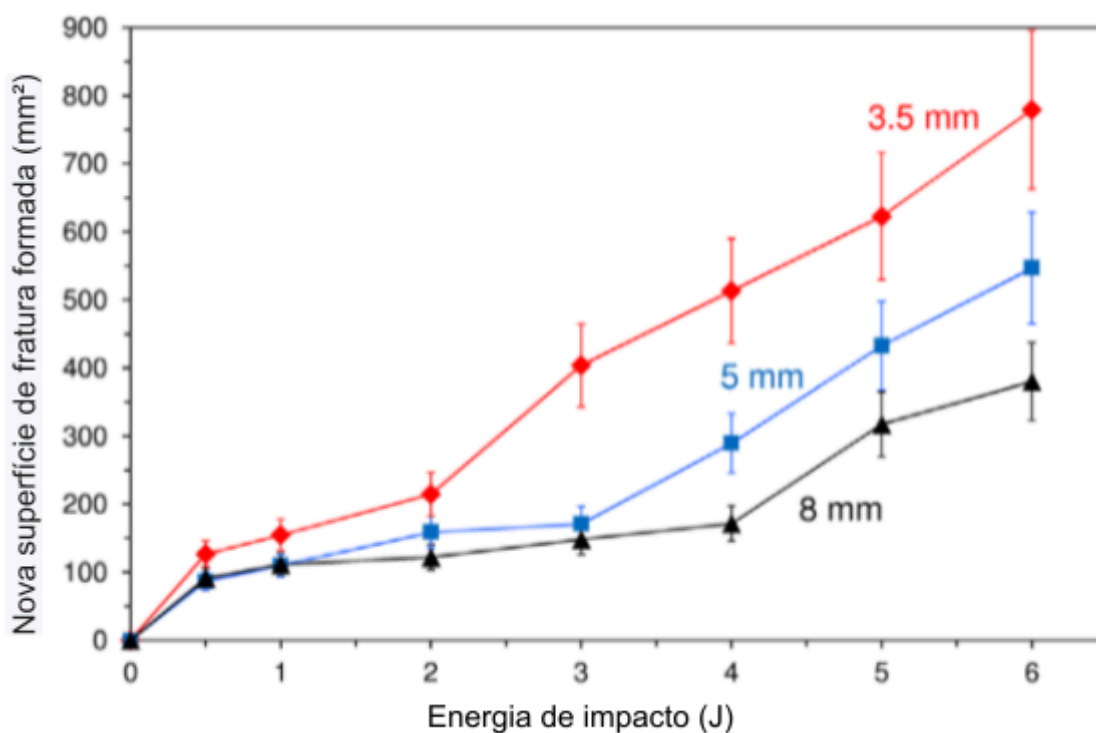
A espessura do porcelanato influencia diretamente o comportamento ao impacto, seguindo uma tendência quase linear, conforme demonstrado pelo índice de Roesler e pela área de microfraturas internas na marca de impacto. Porcelanatos com 5 mm de espessura exibem um comportamento similar aos de 8 mm, uma observação

conservadora, considerando que os porcelanatos de 5 mm possuem menor resistência à flexão.

Realizou-se uma tentativa de estimar a nova área superficial gerada pelo impacto, é uma aproximação simplificada, visto que as fissuras se propagam ao longo de trajetórias de máxima liberação de energia de deformação. Um fenômeno complexo e difícil de prever em materiais heterogêneos como o porcelanato. Dentro da margem de erro desta suposição, a área superficial criada pelo impacto mostrou-se praticamente constante em todos os tipos de peças, quando submetidos a baixas energias de impacto (inferiores a 2 J).

Para energias mais elevadas, o porcelanato mais fino apresentou uma área de fratura maior em comparação com os porcelanatos de 5 mm e 8 mm, que exibiram resultados semelhantes conforme Figura 26. Esta observação provavelmente reflete as propriedades mecânicas similares dos porcelanatos de 3,5 mm e 8 mm, enquanto os porcelanatos de 5 mm possuem menor resistência à flexão.

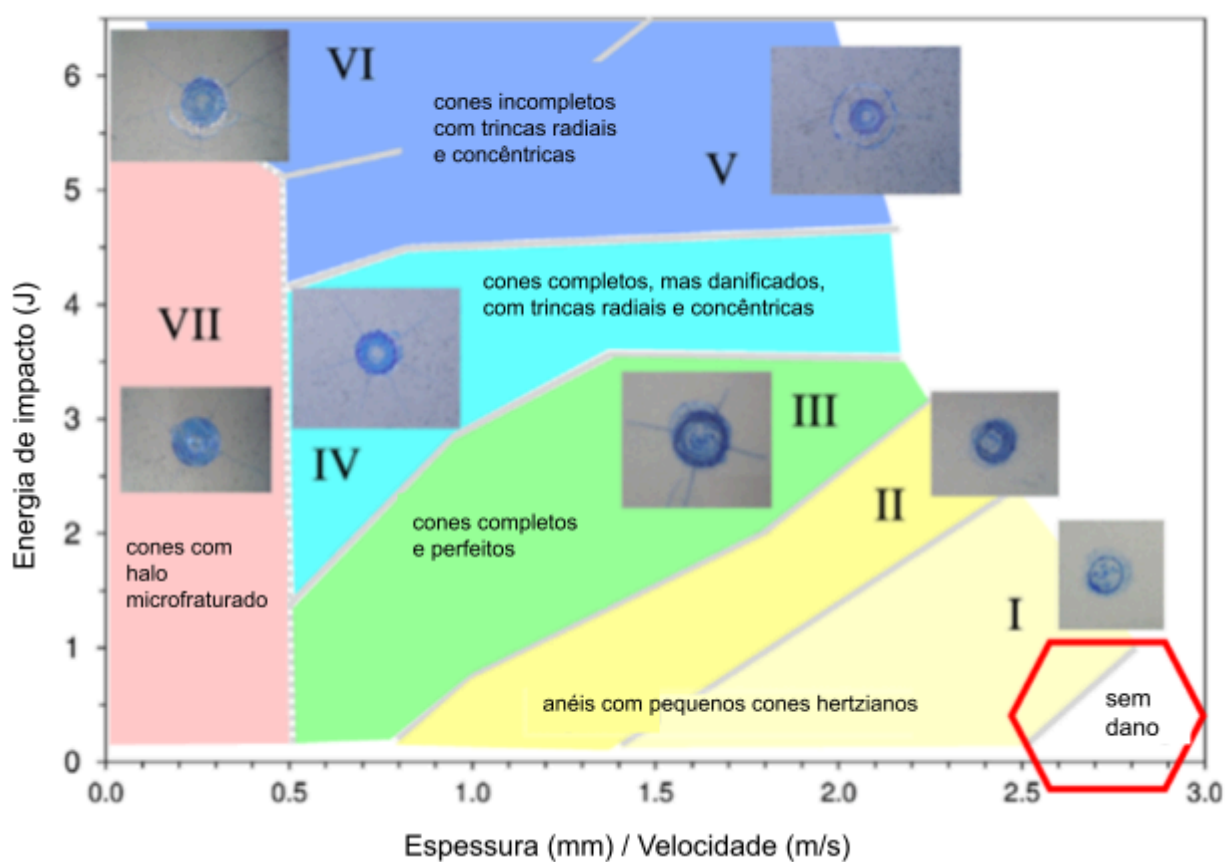
Figura 26. Nova superfície de fratura formada em função da energia de impacto.



Fonte: Dondi e outros. (2016).

Os níveis de dano definidos na Figura 27 puderam ser correlacionados com a energia e velocidade do impacto, bem como com a espessura do revestimento cerâmico. A partir dos resultados obtidos, foi possível elaborar um mapa de impacto, contrastando energia de impacto, espessura do revestimento e velocidade da esfera.

Figura 27. Níveis de dano em função da energia de impacto e da razão entre espessura do porcelanato e velocidade da esfera de aço.



Fonte: Dondi e outros. (2016).

As conclusões do estudo indicam que a resistência ao impacto no porcelanato não segue um comportamento linear, sendo influenciada por múltiplos fatores. A espessura da peça mostrou-se um fator crítico, com peças de menos de 5 mm apresentando danos mais severos. O formato da peça também teve impacto significativo, uma vez que placas de maior dimensão demonstraram menor resistência.

A energia e a velocidade do objeto impactante foram determinantes na severidade dos danos, sendo que impactos de maior energia e velocidade resultaram em deterioração mais expressiva. A literatura científica sugere que, durante o impacto,

os materiais cerâmicos apresentam um comportamento misto, alternando entre deformação elástica e pseudoplástica, o que contribui para a complexidade do fenômeno.

Após analisar os resultados é possível inferir que ensaios de impacto para avaliar com mais sensibilidade a região onde não ocorre dano precisa dispor de energia de impacto até a ordem de grandeza de aproximadamente 1 J, uma vez que as espessuras das peças de porcelanato em geral são inferiores à 12 mm.

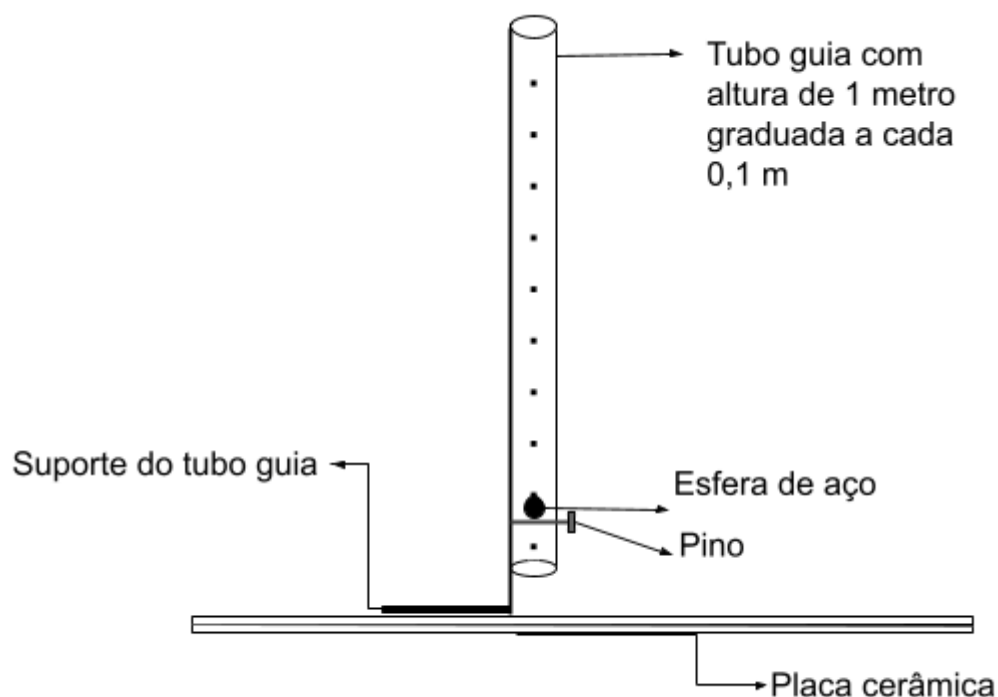
4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar a resistência ao impacto de placas cerâmicas destinadas ao uso em mobiliário, foi desenvolvido um equipamento inspirado naqueles descritos nas normas ABNT ISO 10545-5 e NBR 15845-8, projetado para liberar uma esfera de aço sobre o revestimento cerâmico e analisar os danos causados. O método foi estruturado para possibilitar variações na altura de queda, ajustando-se conforme o desempenho do revestimento ensaiado.

O material selecionado para o estudo foi um porcelanato esmaltado no formato 60x60 cm, com superfície natural (sem relevo, textura lisa) e espessura média de 9,0 mm. Este produto foi selecionado por apresentar formato menor e por não necessitar de corte durante as avaliações. O revestimento foi caracterizado com os ensaios de resistência mecânica à flexão e carga de ruptura (ABNT ISO 10545 anexo 4), foram ensaiadas sete peças inteiras utilizando a célula de carga para corpos de prova queimados. A absorção de água (ABNT ISO 10545 anexo 3) foi realizada em 12 corpos de prova pelo método a vácuo. O ensaio de resistência ao impacto foi conduzido com base nas referências bibliográficas estudadas, abrangendo tanto métodos normativos quanto não normativos.

O sistema experimental desenvolvido foi baseado nos métodos normativos ABNT NBR 15845-8:2015 e ABNT NBR ISO 10545-5:2017, compõe-se de um tubo guia com 1 m de altura, contendo marcações a cada 0,10 m para permitir a liberação da esfera em diferentes alturas. O tubo é fixado em um suporte e conta com um pino para controle preciso da altura de liberação. As esferas utilizadas são de aço cromo e possuem diferentes pesos e diâmetros. O sistema está representado na Figura 28.

Figura 28. Sistema de medição de impacto.

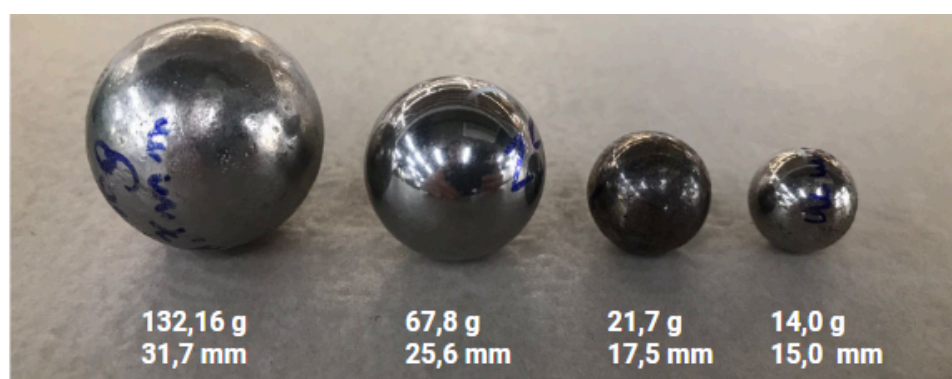


Fonte: Autora (2025).

A amostra cerâmica foi fixada em outra placa utilizando argamassa colante, conforme especificado pela ABNT ISO 10545-5, que recomenda a fixação de placas cerâmicas sobre um suporte para testes de impacto. O sistema de ensaio foi composto pelo equipamento, a esfera de aço e a placa teste fixada sobre uma base plana com dimensões 80x80 cm, garantindo a replicabilidade dos testes.

As esferas utilizadas apresentaram diferentes dimensões e pesos, conforme ilustrado na Figura 29. A escolha das esferas foi realizada de forma a permitir a variação dos valores de energia de impacto durante os ensaios.

Figura 29. Esferas de aço utilizadas no ensaio.



Fonte: Autora (2025)

A energia do impacto (E) foi calculada para cada combinação de esfera e altura de queda utilizando a equação da energia potencial gravitacional, Equação 4, que é convertida em energia cinética no momento do impacto.

$$E=m \cdot g \cdot h \quad (\text{Eq. 4})$$

onde:

E = energia de impacto (J)

m = massa da esfera (kg)

g = aceleração da gravidade (9,81 m/s²)

h = altura da queda (m)

Os resultados apresentados na Tabela 10 correspondem à energia de impacto de acordo com a esfera e a altura da queda no momento do impacto.

Tabela 10. Energia de impacto (J) para cada condição de diâmetro da esfera de aço e da altura de queda.

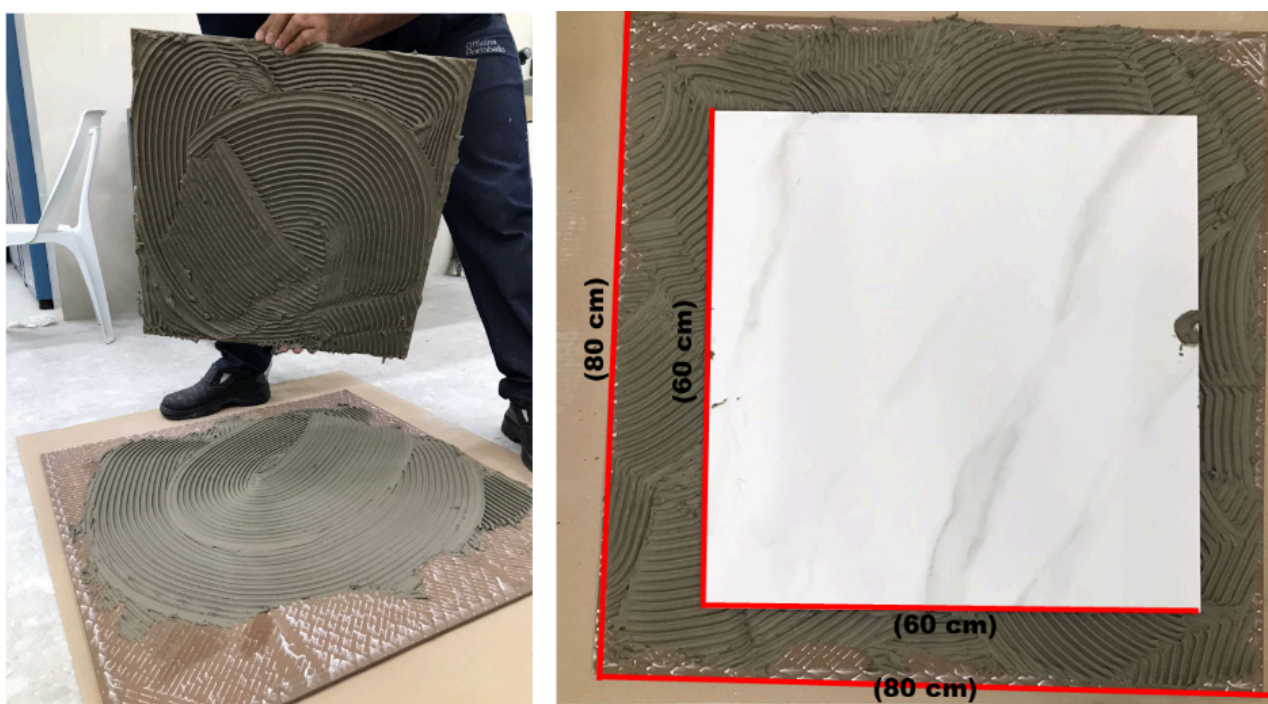
Altura de queda (m)	Diâmetro (cm) e (massa) (g) da esfera			
	3,17 (132,2)	2,56 (67,8)	1,75 (21,7)	1,50 (14,0)
0,10	0,13	0,07	0,02	0,01
0,20	0,26	0,13	0,04	0,03
0,30	0,39	0,20	0,06	0,04
0,40	0,52	0,27	0,09	0,05
0,50	0,65	0,33	0,11	0,07
0,60	0,78	0,40	0,13	0,08
0,70	0,91	0,47	0,15	0,10
0,80	1,04	0,53	0,17	0,11
0,90	1,17	0,60	0,19	0,12
1,00	1,30	0,66	0,21	0,14

Fonte: Autora, 2025.

Após alguns ensaios preliminares de impacto observou-se que as esferas de 2.56 cm ou inferior, resultam no máximo em uma energia de impacto de 0.66 J. Esta energia está abaixo do range de sensibilidade que abrangeria tanto uma região cujo impacto não provoca dano quanto aquela com potencial de provocar dano $\sim E > 1$ J, sendo assim, foi selecionada a esfera com diâmetro de 3,17 cm para ser utilizada no estudo.

Para garantir a repetibilidade dos testes, as placas cerâmicas 60x60x0,9 cm foram aderidas a uma base de 80x80x0,9cm, seguindo o método de assentamento com argamassa em dupla camada. O assentamento com argamassa foi empregado por se tratar da alternativa tecnicamente viável e economicamente mais acessível dentre os métodos disponíveis para a fixação das peças. A fixação foi realizada face a face (muratura com muratura), conforme ilustrado na Figura 30.

Figura 30. Preparação das amostras para ensaio de impacto.



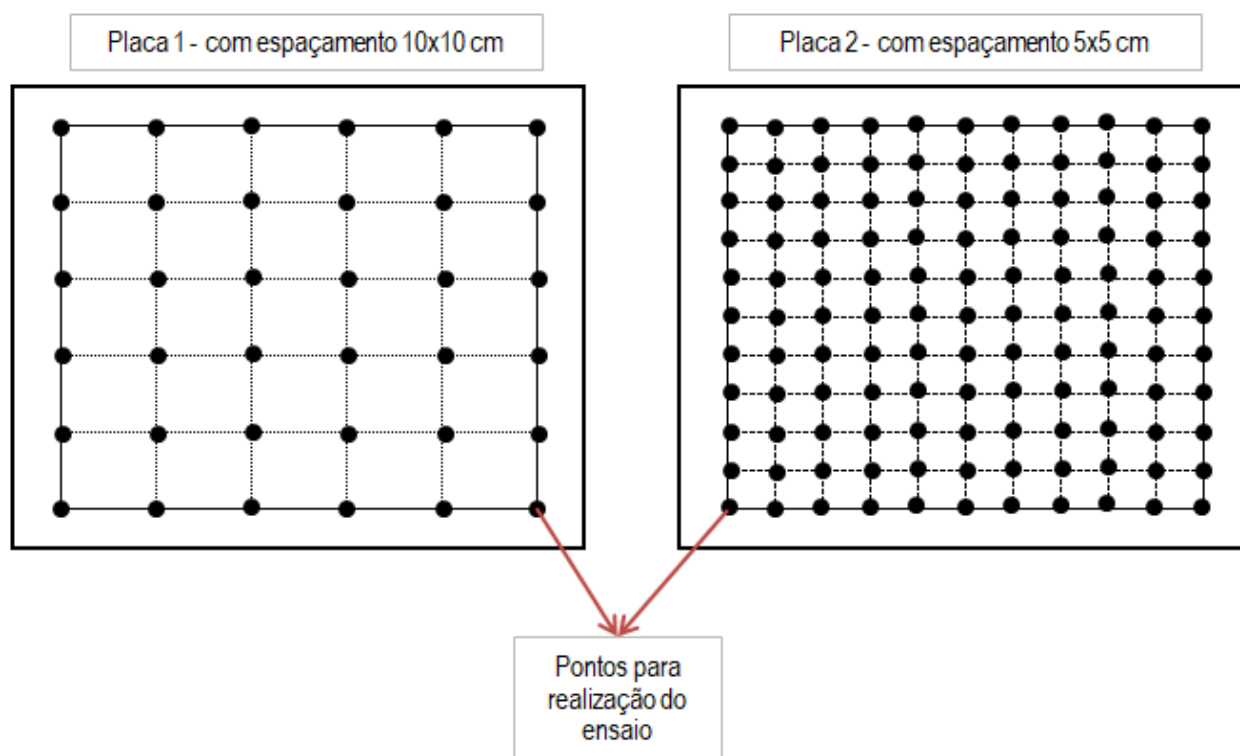
Fonte: Autora (2025).

Os testes foram realizados com diferentes espaçamentos entre os pontos de impacto, a fim de evitar interferência entre as áreas atingidas. Acredita-se que impactos muito próximos possam mascarar os resultados. Para isso, utilizaram-se grades com malhas de 10x10 cm e 5x5 cm, mantendo-se um afastamento de 5 cm das bordas da peça, com o intuito de minimizar possíveis influências causadas por fragilidades nas extremidades do material, conforme ilustrado na Figura 31. Os testes foram realizados em peças inteiras, a fim de evitar possíveis influências decorrentes do corte, como a formação de microtrincas ou outros danos não perceptíveis a olho nu.

Além da variação na altura de impacto, os ensaios foram realizados com e sem repetição do impacto no mesmo ponto. A inspeção visual foi conduzida para identificar os danos causados. Para aprimorar a detecção das trincas, foi aplicada uma solução de

Azul de Metileno a 10% sobre as áreas impactadas. Adicionalmente, foi utilizado um microscópio óptico, da marca Leica, para capturar imagens detalhadas das fissuras resultantes.

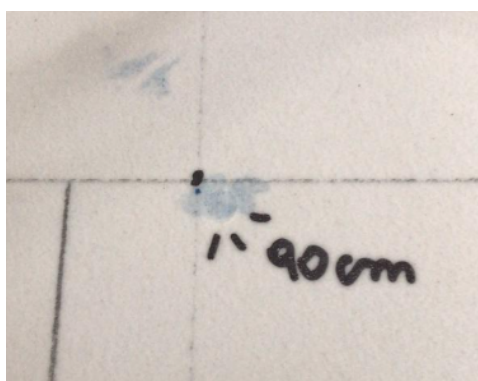
Figura 31. Mapeamento dos locais de impacto.



Fonte: Autora (2025)

Para registrar com precisão o ponto de impacto da esfera com a peça, utilizou-se papel carbono entre o equipamento e a placa cerâmica. No momento do impacto, o papel carbono marca a superfície do revestimento, possibilitando uma análise mais detalhada da dispersão dos danos ilustrado na Figura 32.

Figura 32. Exemplo da marcação do impacto da esfera sobre o revestimento cerâmico.



Fonte: Autora (2025).

Cada etapa de avaliação foi conduzida em uma amostra distinta, com objetivos específicos. As etapas iniciais (primeira e segunda) tiveram caráter exploratório, com a finalidade de compreender o comportamento do porcelanato frente ao método de ensaio adotado. A terceira etapa teve como propósito avaliar a homogeneidade e a reprodutibilidade do método aplicado. Por fim, a quarta etapa visou à indução de danos visíveis, sendo, para isso, realizados impactos sucessivos com energia decrescente concentrados na mesma região da amostra.

Cada fase foi estruturada para compreender a resistência do material sob diferentes condições de impacto e validar o método proposto, a Tabela 11 apresenta o resumo das avaliações.

Tabela 11. Etapas realizadas.

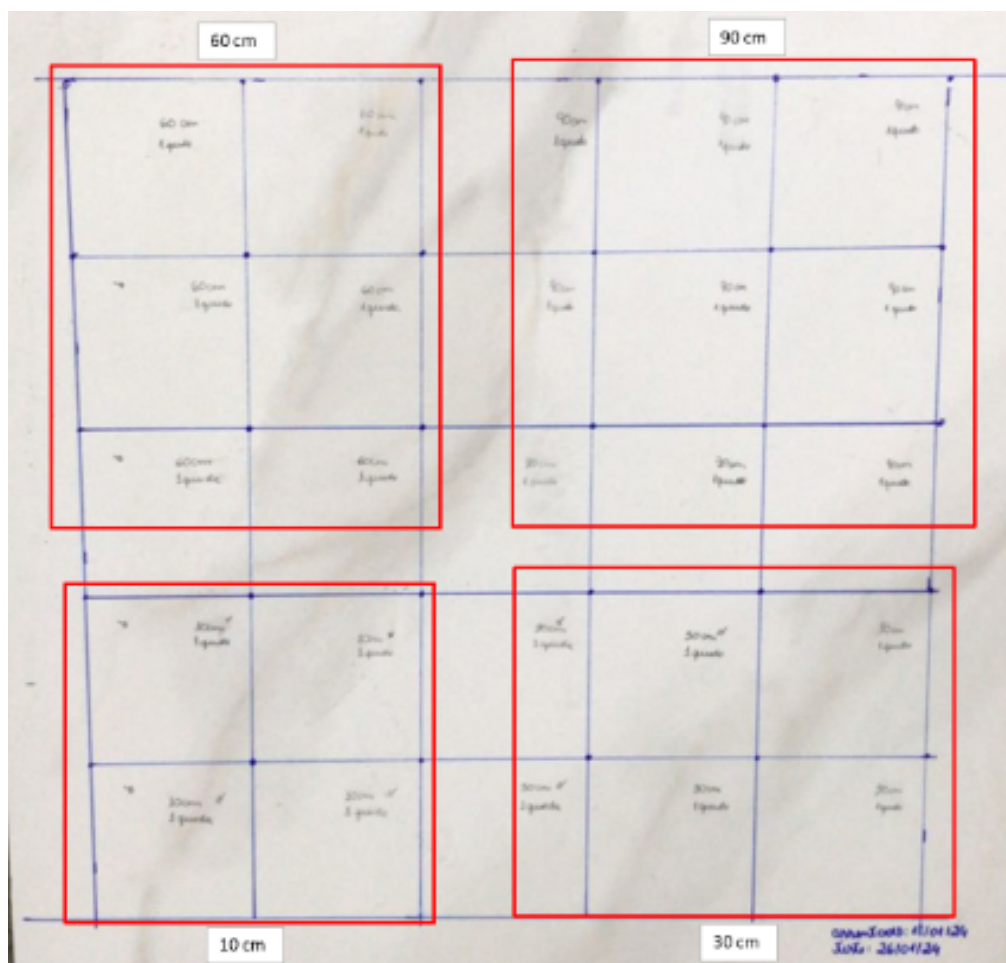
Etapa	Alturas de queda (m)	Repetição das quedas
1 ^a	0,10 - 0,30 - 0,60 - 0,90	1
2 ^a	0,90 - 1,00	1 e 2
3 ^a	1,10	1
4 ^a	de 0,50 até 1,00	até 6

Fonte. Autora (2025).

A primeira etapa do ensaio consistiu em experimentos sem repetição do impacto, em que a esfera de diâmetro 3,17 cm (massa = 132,16 g) foi liberada sobre diferentes áreas do porcelanato com alturas de queda de 0,10, 0,30, 0,60 e 0,90 m, conforme a Figura 33. Esta etapa teve como propósito a experimentação do método em situações práticas.

Os impactos foram realizados na mesma placa, esta foi dividida em quatro áreas, para os testes em alturas diferentes. O espaçamento entre os impactos foi de 0,10 m, conforme apresentado na Figura 31: placa 01.

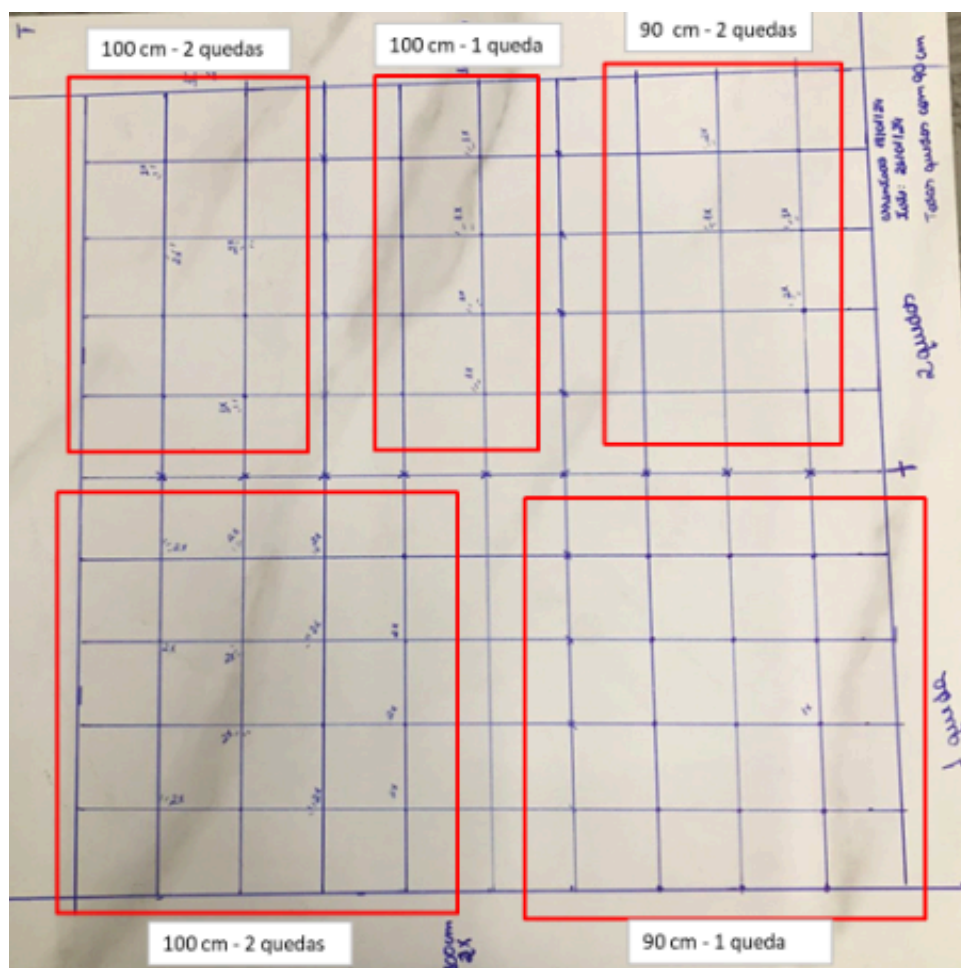
Figura 33. Distribuição da área de teste da 1ª etapa.



Fonte. Autora (2025).

Na segunda etapa do estudo, foram utilizadas alturas fixas de 0,90 m e 1,00 m, sendo os impactos aplicados uma ou duas vezes no mesmo ponto, com distanciamento entre os impactos de 5 cm. A quantidade de quedas repetidas é com o objetivo de aplicar mais energia de impacto na mesma área de impacto. Estas etapas foram realizadas na mesma placa conforme Figura 31: placa 02. Foi possível observar que algumas quedas resultaram em danos ao revestimento conforme Figura 34.

Figura 34. Avaliação do impacto na 2ª etapa.



Fonte. Autora (2025).

A terceira etapa foi realizada em uma placa com distanciamento entre as quedas de 5 cm, com altura fixada em 1,10 m.

A quarta etapa foi realizada em uma placa com distanciamento entre os impactos de 5 cm. As quedas iniciaram em 50 cm e foram repetidas no mesmo ponto aumento a cada queda sem dano 0,10 m de altura até obter dano observável, sendo assim, quando se fala que a altura de 0,70 m gerou um dano, significa que naquele ponto houve uma queda a 50 cm, seguida de uma queda de 0,60 m e 0,70 m no mesmo local.

4.1. PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE WEIBULL

A distribuição de Weibull é amplamente empregada como modelo estatístico para a análise da confiabilidade das propriedades mecânicas de materiais classificados como frágeis. Essa abordagem baseia-se na analogia entre um material frágil submetido à

tração e uma corrente que se rompe quando a resistência de seu elo mais fraco é ultrapassada. Dessa forma, a análise de Weibull permite estimar a probabilidade de falha ou, complementarmente, a probabilidade de sobrevivência de um material, em função de seu volume e da tensão aplicada. Tal relação fornece um indicativo da reprodutibilidade da resistência mecânica do material (MENEGAZZO e outros, 2007).

A resistência de materiais cerâmicos e vítreos, por sua vez, está diretamente relacionada à presença de micro defeitos, os quais variam em distribuição, tamanho e geometria, tanto na superfície quanto no volume da peça. Além disso, a probabilidade de esses defeitos estarem submetidos a tensões críticas é um fator determinante na ocorrência de fratura catastrófica em componentes cerâmicos (MIGLIORE e ZANOTTO, 1992).

A variabilidade dos valores de resistência mecânica em materiais frágeis pode ser quantificada por meio da distribuição de Weibull. O módulo de Weibull, representado por m , é um parâmetro estatístico que indica o grau de reprodutibilidade da resistência do material: valores mais elevados de m correspondem a menor dispersão nos resultados, ou seja, maior confiabilidade do material em aplicações estruturais (AMOROS, e outros, 2020).

Weibull comparou o comportamento de um material frágil tracionado ao de uma corrente, a qual se rompe quando a resistência de seu elo mais fraco é excedida. Da mesma forma, o crescimento de uma microtrinca isolada em um corpo elástico, quando submetido a uma carga normal ao plano da trinca, pode ser associado ao rompimento da corrente (AMOROS, e outros, 2020).

A equação proposta por Weibull que relaciona a probabilidade de sobrevivência de um corpo de prova (P) submetido a uma tensão aplicada (σ_R) é expressa na Equação 5:

$$P_f(\sigma_R) = \exp\left[-\left(\frac{\sigma_R}{\sigma_o}\right)^m V_E\right] \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

P_f = probabilidade de falha (probabilidade de que uma peça submetida a uma tensão máxima σ_R não se rompa).

σ_o = constante de normalização (MPa)

V_E = volume equivalente (m^3)

m = constante adimensional (módulo de Weibull).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO REVESTIMENTO

A caracterização física do revestimento cerâmico utilizado foi realizada pela determinação da resistência mecânica à flexão, carga de ruptura e absorção de água conforme ABNT NBR ISO 10545 e seus anexos, e foi avaliada a camada de esmalte e engobe com imagem capturada em microscópio óptico apresentado na Figura 35. Os resultados obtidos foram comparados com os valores mínimos estabelecidos pela ABNT NBR ISO 13006, anexo G, para porcelanatos esmaltados, conforme apresentado na Tabela 12.

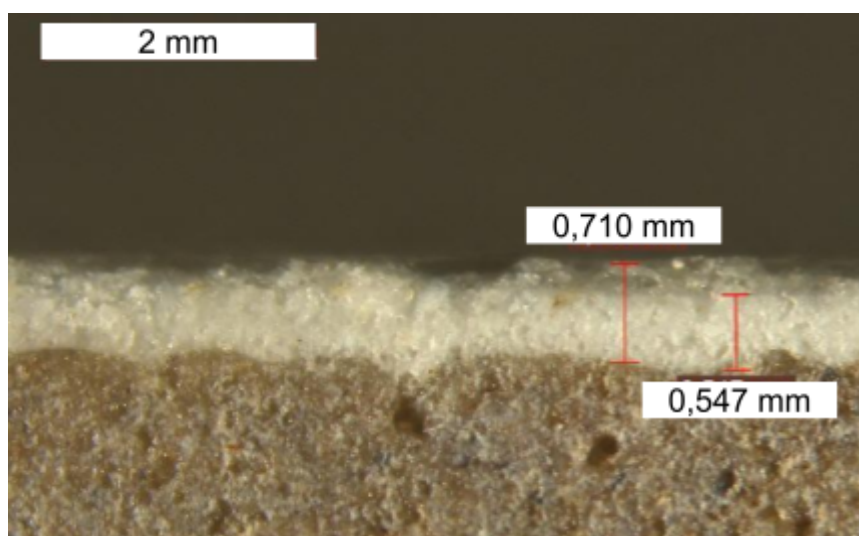
Tabela 12. Propriedades físicas do porcelanato.

Propriedade	Norma ABNT NBR ISO	Resultado normativo	Resultados (média)
Resistência Mecânica	10545-4	Mínimo 35 N/cm ²	40,43 N/cm ²
Carga de Ruptura	10545-4	Não menor que 1300 N	1951,50 N
Absorção de água	10545-3 - Vácuo	≤ 0,50%	0,23 % média

Fonte. Autora (2025).

Os resultados obtidos para resistência mecânica e carga de ruptura superaram os valores mínimos estabelecidos pela normativa. A absorção de água, por sua vez, ficou abaixo do limite máximo permitido, confirmando a classificação da amostra como porcelanato.

Figura 35. Camada de engobe e esmalte.



Fonte. Autora (2025).

Embora a camada de esmalte/cobertura não seja especificada em normas, Rosa & De Noni Jr. (2012) e Dondi e outros (2016) apontam que a qualidade e espessura exercem influência direta na capacidade do piso de suportar impactos.

5.2. AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO

A Tabela 13 apresenta o detalhamento dos pontos de impacto realizados na primeira etapa e seus respectivos resultados, a energia de impacto aplicada variou entre 0,130 J e 1,167 J. Em nenhum dos pontos de impacto foi observado dano visível ao revestimento. A variação na quantidade de pontos avaliados em cada etapa deve-se ao caráter exploratório da análise. O ensaio foi iniciado com a menor altura de queda, e, como não foram observados danos aparentes, a altura foi progressivamente aumentada. Como cada amostra possuía um número fixo de pontos disponíveis para ensaio, esses pontos foram explorados gradualmente de acordo com a variação da energia de impacto, a fim de identificar o limiar de dano do material.

Tabela 13. Avaliação do impacto na 1ª etapa.

Altura da queda (m)	Energia de impacto (J)	Quantidade avaliada (número de pontos)	Resultado
0,10	0,130	6	Sem dano
0,30	0,389	6	Sem dano
0,60	0,778	9	Sem dano
0,90	1,167	9	Sem dano

Fonte. Autora (2025).

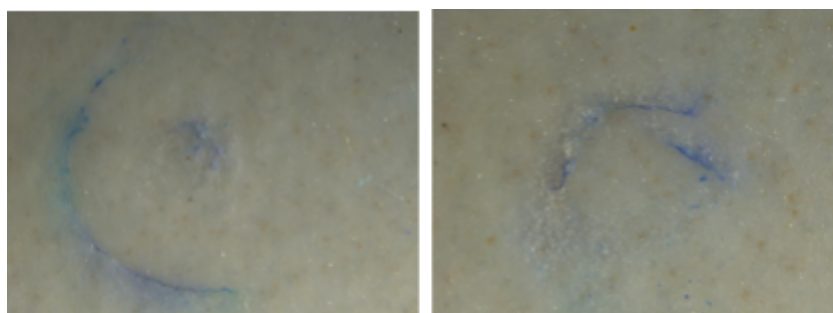
A Tabela 14 resume os danos registrados na segunda etapa. Ao total, foram testados 40 pontos com altura de 1,00 m com duas quedas, dos quais 16 pontos apresentaram danos de classe I e II, correspondendo a 40% do total testado, os danos de classe I e II estão apresentados na Figura 36.

Tabela 14. Avaliação do impacto na 2ª etapa.

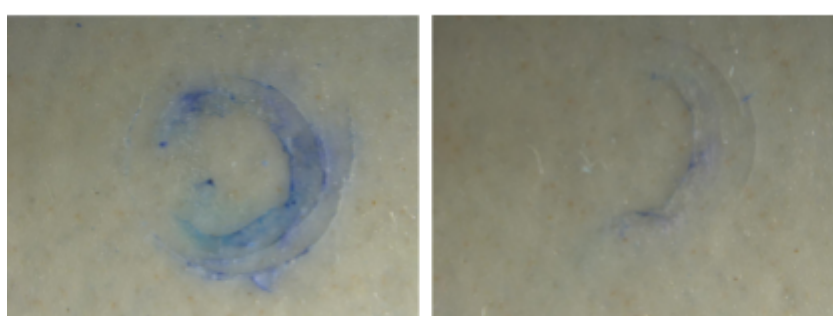
Altura da queda (m)	Energia de impacto (J)	Quantidade de quedas	Quantidade avaliada (número de pontos)	Resultado (número de pontos com dano aparente)	Dano (%)
0,90	1,167	1	25	1	4
0,90	1,167	2	20	4	20
1,00	1,296	1	10	4	40
1,00	1,296	2	40	16	40

Fonte. Autora (2025).

Figura 36. Imagem do dano com altura de 0,90 m e duas quedas



Danos de classe I



Danos de classe II

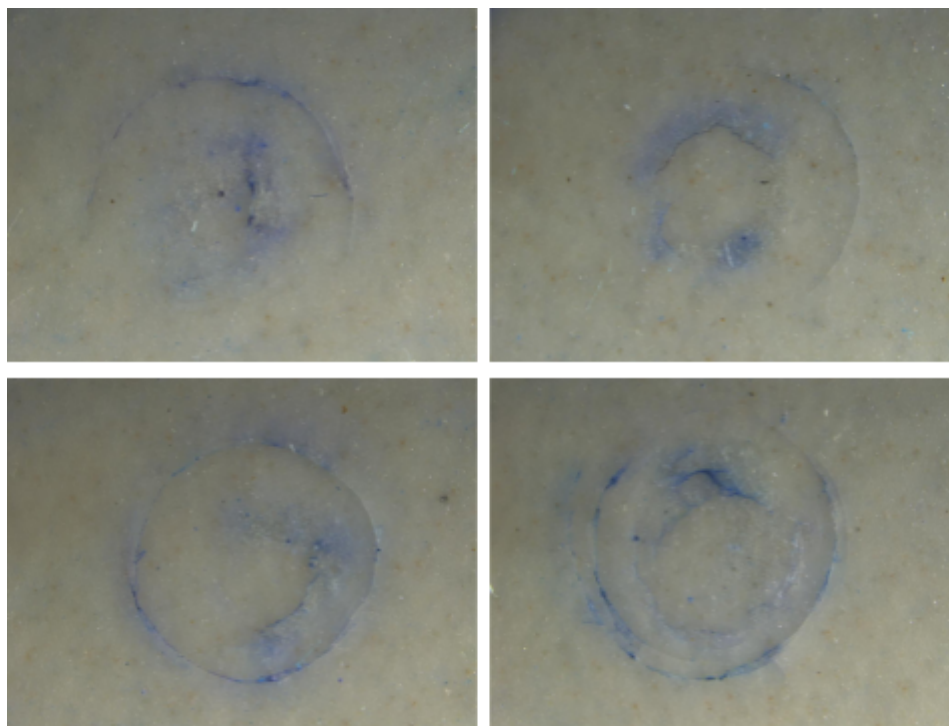
Fonte. Autora (2025).

Observa-se pelas imagens que a liberação da esfera à 1,00 m de altura com duas quedas provocou dano predominantemente do tipo II em 40% das quedas, por outro lado 60% das quedas, com a mesma energia e velocidade não provocaram dano à peça. No caso das quedas à 90 cm com uma queda, apenas 4% provocaram dano observável e ainda com características do tipo I, sendo 96% das quedas não provocaram dano.

Ao avaliar o desempenho com duas quedas sobre o mesmo ponto, para a altura de 90 cm, o percentual de peças danificadas subiu de 4% para 20%. Este percentual de 40% de danos se manteve igual para as quedas à altura de 1,00 m.

Esse resultado aponta para dificuldades metrológicas quando se executa apenas uma queda da esfera, em termos de sensibilidade, para determinar com mais precisão e reprodutibilidade o ponto crítico a partir do qual o dano é observado. A figura 37 apresenta os danos causados com a esfera sendo liberada duas vezes da altura de 1,00 m apresentando danos de classe I e II.

Figura 37. Imagem do dano com altura de 1,00 m e duas quedas.



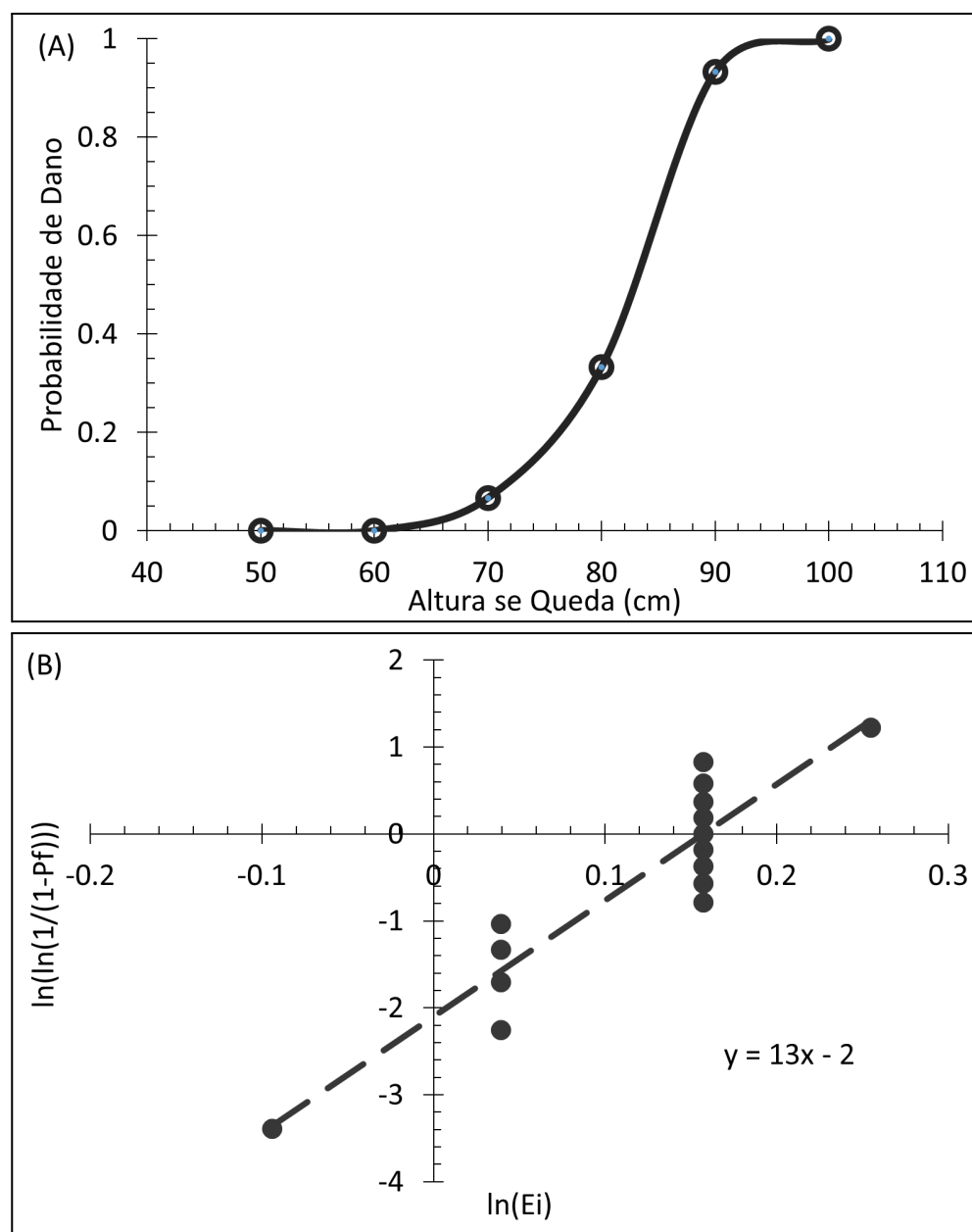
Fonte. Autora (2025).

A avaliação dos danos por queda com alturas progressivas sobre um mesmo ponto, iniciando em 50 cm aponta para um resultado com maior robustez.

Na terceira etapa, a energia de impacto aplicada foi de 1,426 J, dos 121 pontos avaliados, 2,5% apresentaram danos classificados como de Classe I.

A quarta etapa é apresentada na Figura 38, com a respectiva probabilidade de ocorrência de dano em função da altura de queda da esfera. É possível verificar que até 60 cm de queda não foi observado dano à peça. Com 0,70 m 6,7% das quedas resultaram em dano à peça, com 1,00 m de queda todos os pontos estavam danificados com dano do tipo II.

Figura 38. Curva de probabilidade de dano em função da altura de queda (A) e gráfico para determinação de módulo de Weibull.



Fonte. Autora (2025).

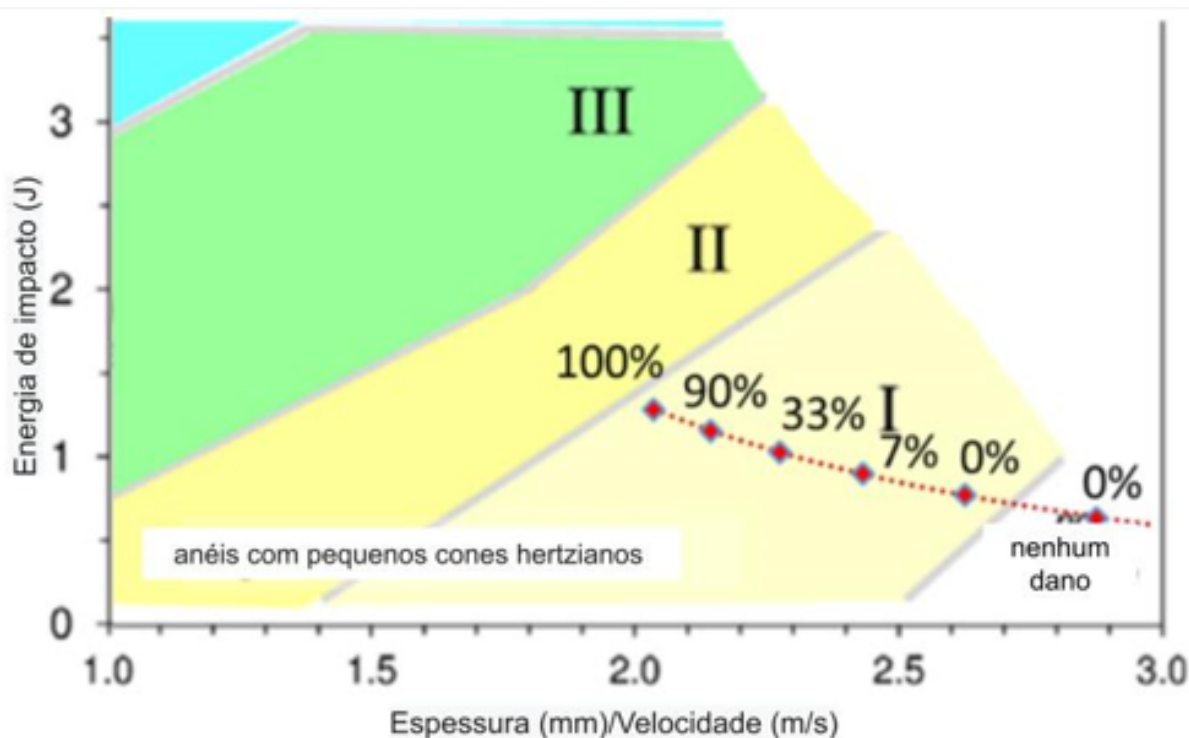
Ao comparar os resultados experimentais obtidos neste trabalho com diagrama de níveis de dano publicado por Dondi e outros (2016), pode-se observar que efetivamente as quedas de 1,00 m estão praticamente na fronteira da região onde se observa o dano tipo II. A esta altura 100% dos pontos apresentavam dano. Ainda de acordo com o diagrama de Dondi e outros (2016), apenas quedas com altura abaixo de ~0,56 m não provocaram danos do tipo I na peça ensaiada. Nos experimentos realizados neste trabalho, nenhum dano foi observado até 0,60 m de queda. Portanto, é

possível dizer que ambos resultados estão compatíveis com o comportamento esperado para o porcelanato. A Figura 6B apresenta o gráfico para determinação do módulo de Weibull, tendo sido calculado valor de 13. O valor encontrado está dentro da ordem de grandeza esperada para materiais frágeis.

O módulo de Weibull apresenta ampla variação em materiais porcelânicos. No estudo de Menegazzo e outros (2002), foram observados valores entre 12,7 e 37,1, enquanto De Noni e outros (2010) relataram uma faixa compreendida entre 6 e 30. Este último trabalho demonstrou uma correlação entre o módulo de Weibull e o tamanho dos defeitos naturais do tipo Griffith presentes na microestrutura dos materiais. Verificou-se que valores mais baixos do módulo de Weibull estavam associados a materiais com maior degradação microestrutural, o que refletiu em uma redução significativa de suas propriedades mecânicas (DE NONI JR e outros, 2010).

É possível ainda sugerir que a observância do dano e do não dano na região de incidência do dano do tipo I segue uma lei de probabilidade. Existe uma probabilidade crescente de ocorrência do dano na medida em que as condições do impacto (energia e velocidade, se aproximam da fronteira com a região do Tipo II, apresentado na Figura 39.

Figura 39. Diagrama de energia de impacto em função da espessura/velocidade (Dondi e outros (2016) e comparação com as condições experimentais de queda reproduzidas neste estudo, marcadores em vermelho correspondem a diferentes alturas de queda da esfera entre 50 e 100 cm, os percentuais informados correspondem à incidência de falha observada do tipo I.



Fonte: Autora (2025).

5.3 OBSERVAÇÕES QUANTO À QUALIDADE DO ASSENTAMENTO

Como já apresentado neste trabalho, conforme demonstrado por Cantavella e outros (2008) a qualidade do assentamento exerce influência muito significativa sobre o desempenho frente a resistência ao impacto.

Os resultados anteriores, com uma altura de 1,10 m, 2,5% apresentaram dano. Ou seja, o resultado foi melhor inclusive que o experimento com lançamento à 0,90 m.

Após a realização dos ensaios, as peças foram seccionadas transversalmente, em regiões fora da área de impacto, a fim de evitar interferências causadas pelos danos superficiais. Conforme ilustrado na Figura 40, foi possível observar falhas no processo de assentamento, evidenciadas pela presença de numerosos vazios, sem o preenchimento adequado da argamassa entre as placas. Essa deficiência na interface de assentamento pode justificar a variação observada nos resultados. A correlação entre

a classe de dano e a altura de impacto apresentou inconsistências, com classificações variando entre Classe I e Classe II para uma mesma energia de impacto, indicando a influência de fatores adicionais, como a homogeneidade do assentamento.

Figura 40. Falha no assentamento.

(A) Placa sem falha no assentamento



(B) Placa com falha no assentamento



Fonte. Autora (2025).

Falhas no assentamento de pisos podem levar a uma série de problemas, tanto estéticos quanto funcionais, comprometendo a durabilidade e a segurança do revestimento. Especificamente, a falta de aderência entre o piso e a argamassa pode resultar no desprendimento das peças, criando áreas ocas e instáveis ao impacto.

Em geral, a má distribuição da massa faz com que certas partes do piso fiquem sem material. Assim, quando damos leves batucadas no piso, um som oco é ouvido, estes tendem a quebrar rapidamente (SUL MINAS, 2022).

A Tabela 15 apresenta resultados que indicam um comportamento não linear entre a energia de impacto média, a quantidade de quedas e o dano visível observado. Inicialmente, observa-se que valores baixos de energia, mesmo com uma queda, não geram dano significativo; contudo, a partir de aproximadamente 1,2 J, o dano aumenta abruptamente, sugerindo a existência de um limiar crítico de energia a partir do qual o material começa a apresentar falhas visíveis. Além disso, o aumento na quantidade de quedas também contribui para o agravamento do dano, embora essa relação não seja estritamente proporcional, como evidenciado por casos em que maiores números de impactos resultaram em danos menores, sugerindo possível variabilidade experimental ou propriedades locais do material. Esse comportamento reforça a necessidade de se

utilizar abordagens estatísticas, como a distribuição de Weibull, para modelar a probabilidade de falha ou dano, considerando a natureza probabilística dos resultados.

Tabela 15. Resumo dos resultados do estudo

Energia de impacto média (J)	Quantidade de quedas	Dano visível (%)
0,130 a 0,778	1	0,00
1,167	1	4,00
1,296	1	40,00
1,426	1	2,50
1,167	2	20,00
1,296	2	40,00
0,778	3	6,70
0,843	4	26,60
0,908	5	60,00
0,972	6	6,70

Fonte. Autora (2025).

CONCLUSÕES

O presente estudo teve como objetivo avaliar a resistência ao impacto de revestimentos cerâmicos, explorando os principais fatores que influenciam a severidade dos danos causados. A pesquisa demonstrou que a energia de impacto é um dos parâmetros mais determinantes, sendo diretamente proporcional à extensão dos danos observados. A altura de queda e a repetição dos impactos também se mostraram variáveis cruciais na caracterização da resistência do material, influenciando diretamente os resultados obtidos.

Dentre as principais conclusões, destaca-se que impactos de maior energia causaram fissuras mais expressivas, comprometendo a integridade do revestimento.

Outro aspecto relevante identificado foi a influência do assentamento das peças na resistência ao impacto. A presença de falhas na aderência da argamassa compromete a homogeneidade da fixação, resultando em regiões mais vulneráveis ao impacto. Esse fator reforça a importância da adoção de protocolos padronizados para o assentamento dos revestimentos, garantindo maior confiabilidade nos resultados obtidos e, conseqüentemente, na aplicação dos materiais em contextos reais.

A metodologia empregada seguiu as normas ABNT ISO 10545-5 e NBR 15845-8 e se mostrou eficiente na avaliação da resistência ao impacto. No entanto, algumas limitações foram observadas. A energia necessária para gerar um dano visível variou, o que evidencia a influência do assentamento. A inspeção visual dos danos, apesar de ser um método usual, apresenta um certo grau de subjetividade. Dessa forma, sugere-se a integração de técnicas complementares, como análises microscópicas detalhadas e quantificação digital de fissuras, para garantir maior precisão na caracterização dos danos e na reprodutibilidade dos experimentos.

A contribuição deste estudo é relevante para a indústria de revestimentos cerâmicos, pois fornece informações essenciais sobre a resistência dos materiais frente às condições de impacto. A identificação das principais variáveis envolvidas permite avanços tanto na seleção dos materiais quanto nos processos de instalação, minimizando falhas e aumentando a durabilidade dos revestimentos. Ademais, o estudo abre caminho para investigações futuras que possam refinar ainda mais os critérios de

avaliação da resistência ao impacto, incluindo o uso de simulações computacionais e testes em condições ambientais mais diversas.

Em suma, este trabalho representa um avanço na compreensão da resistência ao impacto de revestimentos cerâmicos, propondo um método de ensaio acessível e eficiente. No entanto, para ampliar a confiabilidade dos resultados e sua aplicação na construção civil, futuras pesquisas devem focar na otimização dos protocolos de fixação, no aprimoramento das técnicas de análise dos danos e na incorporação de condições de uso realistas, garantindo maior segurança e eficiência dos materiais empregados.

REFERÊNCIAS

AÇO, Sul Minas. **5 Problemas no assentamento de piso**. 10 de março de 2022. Disponível em: <https://sulminasaco.com.br/5-problemas-no-assentamento-de-piso/>.

AGRIZZI, Carlos Paulino. **Produção e caracterização de rocha artificial com resíduos da lavra e beneficiamento de quartzito**. 2020. Dissertação para obtenção de título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais. Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2020.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM, C1895-19, **Standard Test Method for Determination of Mohs Scratch Hardness of Ceramic Tile**. 2020.

AMOROS, J.L. e outros. **Propriedades mecánicas de los soportes cerámicos crudos**. 2020. QUALICER 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13818**. Placas cerâmicas Para Revestimento – Ensaios e métodos de ensaio – Determinação de Dureza segundo escala Mohs. Anexo V. abr 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15845-8:2015**. Rochas para revestimento – Parte 8: Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. Rio de Janeiro, 2015. 4 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10545-5:2017**. Placas cerâmicas – Parte 5: Determinação da resistência ao impacto pela medição do coeficiente de restituição. Rio de Janeiro, 2017. 7 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 6507-1:2019**. Materiais metálicos — Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019. 30 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13006:2020**. Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2020. 78 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575-3:2013**. Edificações habitacionais – Desempenho – Parte 3: Requisitos para os sistemas de pisos. Rio de Janeiro, 2013. 52 p.

BARBA, A. et al. **Materias primas para la fabricación de soportes de baldosas cerámicas**. Castellón: Instituto de Tecnología Cerámica – AICE, 1997.

BIANCOGRES. **Usos de porcelanato em móveis**. 2019. Disponível em: https://www.biancogres.com.br/pt_BR/blog/porcelanato-em-moveis.

BRITO, A. W. L. **Apostila de materiais cerâmicos**. Fortaleza, Ceará: Escola Estadual de Educação Profissional – EEEP, 2012. Disponível em:

https://www.seduc.ce.gov.br/wpcontent/uploads/sites/37/2011/10/ceramica_materiais_ceramicos.pdf.

BROWN, G. **Materiais de construção e outras matérias brutas**. In: OS RECURSOS FÍSICOS DA TERRA. Campinas: Editora da Unicamp, 1995. p. 36-63.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CANTAVELLA, V. et al. **Evolución de las tensiones y curvaturas en soportes porosos durante el enfriamiento**. XIV Congreso mundial de la calidad del azulejo y del pavimento cerámico - Qualicer 2008, 2008. Castellón.

CANTAVELLA, V. et al. **Análisis del impacto mecánico sobre baldosas cerámicas. factores que influyen**. QualiCer 2008. Castellón (Espanha), 2008. p. 225-240.

CARTER, C. B.; NORTON, M. G. **Ceramic materials: science and engineering**. 2nd ed. New York: Springer, 2013.

CARTY, W. M.; SENAPATI, U. **Porcelain—Raw materials, processing, phase evolution, and mechanical behavior**. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 81, n. 1, p. 3–20, 1998.

CASTILHO, E. D. F. **Caracterização tecnológica de rochas ornamentais: práticas laboratoriais**. Vitória, Espírito Santo, 2018. 60 p.

CAZA MODERNA. **Prós e contras das bancadas de porcelanato para sua cozinha**. Curitiba, 6 jul. 2023. Disponível em: https://cazamoderna.com.br/bancadas-de-porcelanato-para-cozinha-pros-e-contras/#google_vignette.

DA CRUZ, R. T.; PEDRASSANI, J.; BRAGANÇA, S. R. **Faianças, grés e porcelanas**. 2022.

DEORRISTT, V. S. **Desenvolvimento de unificação dos esmaltores dos grandes formatos de porcelanato esmaltado com a substituição de frita à base de óxido de bário por frita à base de óxido de zinco**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2024.

DE NONI JR, A. **Modelagem matemática aplicada ao controle dimensional de placas cerâmicas de monoqueima processadas por via úmida**. 2005. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

DE NONI JR. A. **Estudo das propriedades mecânicas de porcelanato através da avaliação de tensões residuais, microscópicas e macroscópicas originadas durante a etapa de resfriamento do ciclo de queima**. 2007. Tese para obtenção do

grau em Doutor em Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007

DE NONI JR, A. HOTZA, D. SOLER, VC. VILCHES, EJS. **Influence of composition on mechanical behaviour of porcelain tile. Part III: Effect of the cooling rate of the firing cycle.** Mater. Sci. Eng. A. 2011. 2011;528:3330-3336. doi:10.1016/j.msea.2010.12.086

DONDI,G. GUARANI,C. MELANDRI,M. RAIMONDO,C. ZANELLI. I. **Resistencia al impacto del porcelanato: una aproximación fenomenológica.** *Ceramics International*, v. 42, n. 5, p. 5731-5736, 2016.

ELIANE. **Mobiliários de porcelanato.** 2021. Disponível em: <https://www.eliane.com/blog/mobiliarios-de-porcelanato>.

EMILIANI, G. P.; CORBARA, F. **Tecnologia cerâmica – Le materia prime.** Faenza: Gruppo Editoriale Faenza Editrice, 1999.

FERREIRA, G. C.; DAITX, E. C. **Características e especificações da areia industrial.** *Geociências*, UNESP, São Paulo, v. 19, n. 2, p. 235-242, 2000.

GASCH, J. G. M. **Controle e automação na indústria cerâmica: evolução e perspectivas.** *Cerâmica Industrial*, v. 12, p. 15-26, 2007.

HENRIQUE, P. **Fleximetria térmica como técnica para medição de planaridade de revestimentos cerâmicos durante a queima.** 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2013.

JUNIOR, G. S. L. **Determinação das propriedades físicas e mecânicas de um compósito cerâmico reforçado com produtos da combustão do carvão mineral.** 2011. Monografia apresentada à Universidade Federal do Ceará como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Metalúrgica. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MEDINA, J. A. H. **Avaliação de previsões de fratura elastoplástica.** 2014. Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, 2014.

MENEGAZZO, APM. Paschoal JOA, Andrade AM, Carvalho JC, Gouvêa D. **Análise da capacidade do processo de secagem em uma cerâmica vermelha.** *Cerâmica Industrial*. 2002. Edição 2002;7, p. 24-32. doi:10.4322/cerind.2015.033.

MIGLIORE, ARJ. e outros. **The Leamington Italian Community: Ethnicity and Identity in Canada.** *Cerâmica*. 1992. Edición 1992;38, p. 253. doi:10.33137/ ic.v36i1.39382

MIGLIANI, Audrey. **Como escolher bancadas de cozinhas: vantagens, esvantagens e inspirações.** ARCHDAILY BRASIL. Disponível em:

<https://www.archdaily.com.br/br/921161/como-escolher-bancadas-de-cozinhas-vantagens-desvantagem-e-inspiracoes>. Acesso em: 3 abr. 2025.

OLIVEIRA, A. P. N. de. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. *Cerâmica Industrial*, v. 5, p. 37-47, 2000.

OLIVEIRA, A. P. N. de; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2015. p. 13-28.

PORTOBELLO. **Arch trends. Móveis de porcelanato: estado da arte no design de interiores**. 2019. Disponível em: <https://blog.archtrends.com/moveis-de-porcelanato-estado-da-arte-no-design-de-interiores-2/>.

ROSA, Cleiton Corrêa da; DE NONI JÚNIOR, Agenor. **Estudos dos fatores intervenientes na redução de defeitos de fissura em superfícies esmaltadas**. *Cerâmica Industrial*, v. 17, n. 3, p. 20-25, 2012.

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

SLAVO, V.M.; Larentis. L.; Green. D.J. **Flaw-insensitive Ion-exchanged Glass: I, Theoretical Aspects**, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 84, p. 1827-1831, 2001.

SOUZA, F. J. P. **Estudo e desenvolvimento de alternativas para o aproveitamento de resíduos das indústrias de revestimentos cerâmicos**. 2003. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SUZANA. Blog Decoração. **Porcelanato e conforto térmico**. 4 de julho de 2023. Disponível em: <https://blogdecoracao.biz/porcelanato-conforto-termico/>.

USP, Instituto de Geociências. 2023. **Propriedades e identificação de minerais**. Recuperado de <https://didatico.igc.usp.br/minerais/identificacao-de-minerais/>

WIGGERS, W. S.; SANTOS, R. A.; HOTZA, D. **Evolução da superfície do porcelanato ao longo do processo de polimento**. *Cerâmica Industrial*, p. 27-30, 2007.