



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

ROSYELLE MAYARA DIAS DE SOUZA

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE QUEBRA NA
COMPOSIÇÃO DA MASSA EM UMA INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS**

JOÃO PESSOA - PB

2024

ROSYELLE MAYARA DIAS DE SOUZA

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE QUEBRA NA
COMPOSIÇÃO DA MASSA EM UMA INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS**

Trabalho Final de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof^o Dr Genaro Zenaide Clericuzi

JOÃO PESSOA - PB

2024

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729a Souza, Rosyelle Mayara Dias de.

ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE QUEBRA NA
COMPOSIÇÃO DA MASSA EM UMA INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS / Rosyelle Mayara Dias de Souza. - João
Pessoa, 2024.

53 f. : il.

Orientação: Genaro Zenaide Clericuzi Clericuzi.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Revestimentos Cerâmicos. 2. Resíduos. 3. Massa.
4. Análises Físicas. I. Clericuzi, Genaro Zenaide
Clericuzi. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 66.01(043.2)

ROSYELLE MAYARA DIAS DE SOUZA

**ANÁLISE DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE QUEBRA NA
COMPOSIÇÃO DA MASSA EM UMA INDÚSTRIA DE REVESTIMENTOS
CERÂMICOS**

Trabalho Final de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia Química do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento aos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof^o Dr Genaro Zenaide Clericuzi

BANCA EXAMINADORA



Prof^o Dr. Genaro Zenaide Clericuzi
Universidade Federal da Paraíba
Orientador



Dr. Franklin Pessoa Aguiar
Departamento de Engenharia Química
Examinador



Eng. Gilvan Figueiredo Maciel Filho
Engenheiro Químico
Examinador

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que sempre foram minha fonte de força e inspiração. À minha mãe, que é minha rocha em tempos de incerteza, e ao meu pai, mesmo na ausência, sua presença é sentida em cada passo,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por Sua infinita graça e misericórdia, que me sustentaram em todos os momentos

À minha mãe, Mazé, minha heroína silenciosa, agradeço por seu sacrifício, dedicação e por ser meu exemplo de determinação e perseverança. Esta conquista também é sua.

À minha avó, Maria Auta, alicerce da família, sou eternamente grata por todo o apoio

À minha irmã, Roselyne, pela companhia e parceria durante a graduação, sua força e apoio foram essenciais

À minha irmã, Mayra, por todo encorajamento e por estar sempre presente em todos os momentos

Ao meu sobrinho, Matteo, por trazer luz, alegria e tanto amor à minha vida, e por ser uma inspiração diária para alcançar meus objetivos.

Ao meu namorado, Lucas, por seu amor, paciência e por estar sempre ao meu lado, incentivando-me a seguir em frente.

Aos meus cunhados, Hugo e João, por todo apoio e carinho ao longo desta jornada.

Ao meu orientador, Genaro, pela paciência e orientação na elaboração deste trabalho.

À toda equipe da Elizabeth, em especial a André, Rodrigo, José Carlos e Cícero pelo aprendizado e contribuição para meu crescimento pessoal e profissional.

Aos meus colegas da graduação, por compartilharem comigo desafios, aprendizados e momentos de superação, criando um ambiente de colaboração e amizade.

E a todos que de alguma forma contribuíram para esta conquista, seja com palavras de encorajamento, gestos de apoio ou simplesmente estando presente, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo analisar a incorporação de resíduos de quebra na composição da massa de revestimentos cerâmicos. O Brasil se destaca como o terceiro maior produtor mundial de revestimentos cerâmicos. No entanto, a importância econômica e social desse setor destaca a necessidade de adotar diretrizes voltadas para a sustentabilidade, especialmente no que diz respeito à gestão adequada dos resíduos gerados, os quais frequentemente carecem de destinação ecologicamente correta. Foram conduzidas análises físicas em três tipos de resíduos, tanto antes quanto depois da queima, os quais foram adicionados em diferentes proporções à formulação padrão. Com base nos resultados, as formulações com 3% de cada resíduo mostraram os melhores resultados nas análises físicas em geral, incluindo aumento na carga de ruptura em condições secas e queimadas, maior resistência à flexão, baixa absorção de água e menor deformação piropelástica. Portanto, observou-se que a adição adequada dos resíduos resulta em melhorias significativas em várias características, ao mesmo tempo em que contribui para a redução do impacto ambiental sem comprometer a qualidade dos produtos.

Palavras-chave: revestimentos cerâmicos; resíduos; massa; análises físicas.

ABSTRACT

This dissertation aims to analyze the incorporation of breakage residues in the composition of ceramic tiles mass. Brazil stands out as the third largest producer of ceramic tiles in the world. However, the economic and social importance of this sector highlights the need to adopt guidelines aimed at sustainability, especially with regard to the adequate management of generated waste, which often requires an ecologically correct disposal. Physical analyzes were conducted on three types of waste, both before and after burning, which were added in different proportions to the standard formulation. Based on the results, formulations with 3% of each residue showed the best results in general physical analyses, including increased breaking load in dry and burned conditions, greater flexural strength, low water absorption and lower pyroplastic deformation. Therefore, it was observed that the appropriate addition of waste results in significant improvements in several characteristics, while contributing to the reduction of environmental impact without compromising the quality of the products.

Keywords: ceramic tiles; waste; mass; physical analyses.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Detalhe no portão de Ishtar da Babilônia.....	15
Figura 2 - Cerâmica Marajoara.....	16
Figura 3 - Maiores produtores de revestimentos cerâmicos do mundo.....	17
Figura 4 - Produção de revestimentos no Brasil entre 2019 e 2023.....	18
Figura 5 - Fluxograma do processo de produção - Via úmida.	20
Figura 6 - Quebra crua 1, Quebra crua 2 e Chamote, respectivamente.....	31
Figura 7 - Corpos de provas antes da queima.....	35
Figura 8 - Valores do Índice de Piroplasticidade	44
Figura 9 - Curva de Gresificação – Retração de Queima	46
Figura 10 - Curva de Gresificação – Absorção de Água.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação por Tipologia quanto as características físicas.....	19
Tabela 2 - Variáveis utilizadas no estudo	32
Tabela 3 - Combinações de testes do planejamento fatorial 23	33
Tabela 4 - Formulações resultantes do planejamento experimental.....	33
Tabela 5 - Resultados da Carga de Ruptura e Módulo de Resistência à Flexão	39
Tabela 6- Resultados da Carga de Ruptura e Módulo de Resistência à Flexão após a queima	41
Tabela 7 – Resultados da Absorção e Retração.....	42

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
2.	OBJETIVOS	13
	2.1. OBJETIVOS GERAIS	13
	2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
	3.1. ORIGEM DA CERÂMICA	14
	3.1.1. ORIGEM NO BRASIL	15
	3.1.2. SETOR CERÂMICO NO BRASIL	17
	3.2. PROCESSO PRODUTIVO CERÂMICO	19
	3.2.1. VIA ÚMIDA	20
	3.2.2. SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E FORMULAÇÃO	21
	3.2.3. PESAGEM	21
	3.2.4. MOAGEM	22
	3.2.5. ATOMIZAÇÃO (<i>Spray Drying</i>)	23
	3.2.6. PRENSAGEM	24
	3.2.7. SECAGEM	25
	3.2.8. ESMALTAÇÃO E DECORAÇÃO	26
	3.2.9. SINTERIZAÇÃO	27
	3.2.10. CLASSIFICAÇÃO E EMBALAGEM	28
	3.3. RESÍDUOS SÓLIDOS NA INDÚSTRIA CERÂMICA	29
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
	4.1 MATERIAIS	31

4.1.1	PLANEJAMENTO FATORIAL	32
4.1.2	PREPARO DOS CORPOS DE PROVA	34
4.2	ANÁLISES REALIZADAS.....	35
4.2.1	CARGA DE RUPTURA E RESISTÊNCIA A FLEXÃO MECÂNICA	35
4.2.2	ABSORÇÃO	36
4.2.3	RETRAÇÃO LINEAR.....	37
4.2.4	ÍNDICE DE PIROPLASTICIDADE	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1.	AVALIAÇÃO DA ANÁLISE FÍSICA	39
5.1.1.	CARGA DE RUPTURA E MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO A SECO ..	39
5.1.2.	CARGA DE RUPTURA E MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO QUEIMADO 41	
5.1.3.	ABSORÇÃO E RETRAÇÃO	42
5.1.4.	ÍNDICE DE PIROPLÁSTICIDADE	44
5.2	SELEÇÃO DE UMA FORMULAÇÃO	45
6.	CONCLUSÕES FINAIS.....	48
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO

Ao longo da história, a humanidade explorou os recursos naturais sem muita preocupação com os resíduos, pois estes eram vistos como aceitáveis pela natureza. Com o surgimento da revolução industrial no século XVIII, o foco no crescimento econômico imediato levou a uma intensa exploração de recursos, resultando em grandes problemas ambientais, incluindo a geração excessiva de resíduos. Neste contexto, surge o conceito de "Capitalismo Natural", que busca atribuir valor real aos produtos não renováveis e responsabilizar os produtores pelo tratamento dos rejeitos (CASAGRANDE, 2008).

O Brasil destaca-se como o terceiro maior produtor global de revestimentos cerâmicos, ampliando a diversidade e qualidade desses materiais ao longo do tempo. Diante da significativa relevância econômica e social do setor cerâmico, torna-se imprescindível a adoção de novas diretrizes e compromissos que impulsionem a sustentabilidade. Esse imperativo se intensifica, especialmente após a divulgação do Relatório Luz 2023, o qual destacou a alarmante estágio de retrocesso, ameaça e estagnação das metas para o desenvolvimento sustentável nacional.

De acordo com o Centro Cerâmico do Brasil (CCB), cerca de 10% da produção total de placas cerâmicas é considerada não conforme, resultando na geração de resíduos sólidos. Esses resíduos, provenientes de peças cerâmicas queimadas e quebradas, são classificados como resíduos industriais pela Lei 12305:2010, que define como tais aqueles "gerados nos processos produtivos e instalações industriais". Este descarte de resíduos tem um forte impacto ambiental, tornando essencial a busca por formas sustentáveis de reutilização. Como destacado pelo Relatório Brundtland (1991), o desenvolvimento sustentável visa atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem às suas próprias necessidades.

As indústrias de fabricação e transformação de materiais geram uma quantidade variável de resíduos, muitas vezes sem destino ecologicamente adequado. A gestão apropriada desses subprodutos representa um desafio significativo. Em determinadas situações, esses materiais secundários podem ser reutilizados diretamente ou utilizados como matéria-prima em outros processos industriais, conforme estabelecido pela norma ISO 14040 (CASAGRANDE, 2008).

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral deste trabalho é analisar o reaproveitamento de resíduos sólidos provenientes do processo de produção na composição da massa cerâmica, visando manter ou melhorar as propriedades finais do produto de uma indústria de revestimentos cerâmicos sediada em João Pessoa, Paraíba.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as proporções de Quebra crua 1 (antes da queima), Quebra crua 2 (antes da queima) e Chamote (quebra queimada) a serem adicionadas à formulação da massa;
- Analisar o efeito que elas causam nas propriedades físicas do produto final;
- Selecionar uma formulação e analisar o comportamento diante a variação de temperatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. ORIGEM DA CERÂMICA

O termo cerâmica vem do grego “keramos”, que se traduz como “argila queimada” ou “terra queimada”. Há aproximadamente dez mil anos, a cerâmica surgiu como um dos materiais mais antigos criados pelo ser humano (ANFACER, 2024).

A cerâmica surgiu quando o homem começou a utilizar do barro endurecido pelo fogo, substituindo utensílios domésticos feitos de frutos e cascas de árvores. As primeiras peças cerâmicas registradas na Pré-História eram vasos de barro na cor natural da argila (MONTE, 2008).

A civilização egípcia desempenhou um papel significativo no avanço da cerâmica e do vidro no Mediterrâneo antigo. No entanto, são os gregos que se atribui a introdução de técnicas essenciais na produção cerâmica. Eles desenvolveram métodos de purificação de argilas, que consistiam na dispersão da argila em água, separando a fração grosseira retida no fundo do reservatório da barbotina (mistura de argila e água, de consistência cremosa) útil, que era transferida para um segundo reservatório e seca posteriormente. Por volta do século XIII a.C., os gregos começaram a utilizar fornos fechados de formato circular para suas queimas. Entre os séculos VI e VII a.C., os gregos alcançaram um refinamento notável na produção de cerâmica. Criaram vasos belamente decorados com engobes feitos de suspensões de argilas, queimadas em tons de vermelho (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

A cerâmica de revestimento tem suas raízes nos países mediterrâneos do Oriente Médio. Por volta de 3000 a.C., os egípcios produziam placas cerâmicas esmaltadas feitas de composição quartzosa, com seus distintivos esmaltes azuis obtidos a partir da extração de cobre. Estes mesmos esmaltes eram utilizados para revestir objetos simbólicos e elementos decorativos pelos joalheiros da época. Entre os séculos IX e VI a.C., os assírios e babilônios também fabricavam placas cerâmicas para revestimento de paredes, além de telhas esmaltadas com esmaltes policromáticos, muitas vezes decoradas com motivos mitológicos (OLIVEIRA e HOTZA, 2011). Como evidenciado na Figura 1:

Figura 1 - Detalhe no portão de Ishtar da Babilônia



Fonte: Google Imagens.

Durante muito tempo, a aplicação de revestimentos cerâmicos em paredes e pisos foi limitada, principalmente devido à natureza artesanal de sua fabricação e ao alto custo associado, o que restringia seu consumo ao clero e às classes mais abastadas. No entanto, com o crescimento do processo de industrialização, que se intensificou especialmente no pós-guerra, esses revestimentos se tornaram mais acessíveis a uma parcela muito maior da população, o que resultou em um aumento significativo de seu uso em diversos ambientes (RIBEIRO, 2016).

3.1.1. ORIGEM NO BRASIL

Antes da chegada dos europeus ao Brasil por volta de 1500, já havia uma tradicional produção de cerâmica no país, especialmente nas regiões banhadas pelos rios Amazonas e Paraná, com destaque para a cultura indígena na Ilha de Marajó. A cerâmica marajoara caracterizava-se por artefatos de modelagem antropomorfa, representando seres humanos, animais, deuses e elementos da natureza. As técnicas artesanais utilizadas incluíam raspagem, incisão, excisão e pintura (MONTE, 2008). Uma variedade de objetos era confeccionada, como vasilhas, potes, urnas funerárias, tangas, chocalhos e estatuetas, podendo ser tanto acromáticos

quanto cromáticos, e zoomorfizados ou antropomorfizados. A Figura 2 ilustra alguns desses artefatos.

Figura 2 - Cerâmica Marajoara.



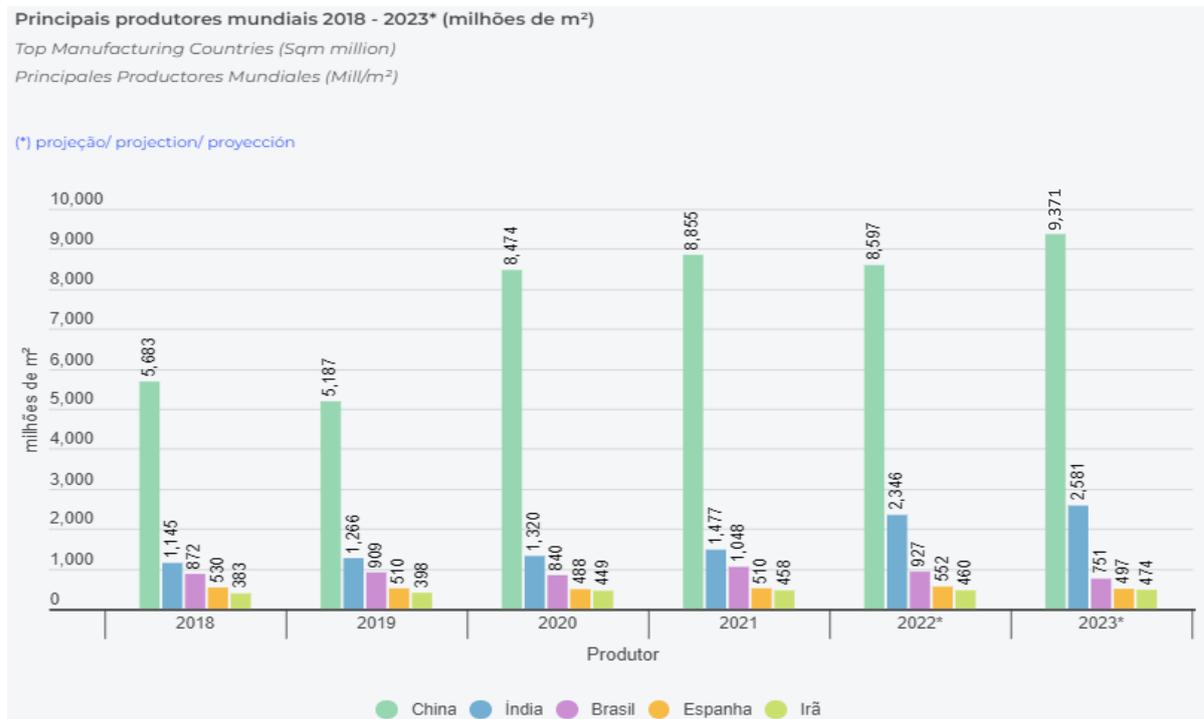
Fonte: Portal Amazônia, 2021

Durante o período de colonização, a influência da arquitetura portuguesa foi notável. A produção de cerâmica portuguesa destacou-se por adornar fachadas, muitas vezes feita sob encomenda para as residências da aristocracia na nova colônia, nos séculos XVII e XVIII. Nos ambientes internos, os azulejos eram comumente utilizados para revestir a metade das paredes de cozinhas, salas e banheiros (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

3.1.2. SETOR CERÂMICO NO BRASIL

De acordo com a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres (ANFACER), o Brasil destaca-se globalmente no setor de revestimentos cerâmicos e louças sanitárias, ocupando posições de destaque: é o terceiro maior produtor e o terceiro maior mercado consumidor, ficando atrás da Índia que ocupa o segundo lugar e da China que é líder do mercado, como mostra na Figura 3. E é o sexto maior exportador, com seus produtos alcançando mais de 110 países. Esse segmento representa 6% do Produto Interno Bruto (PIB) da indústria de materiais de construção, além de ser o segundo maior consumidor industrial de gás natural no país (ANFACER, 2024).

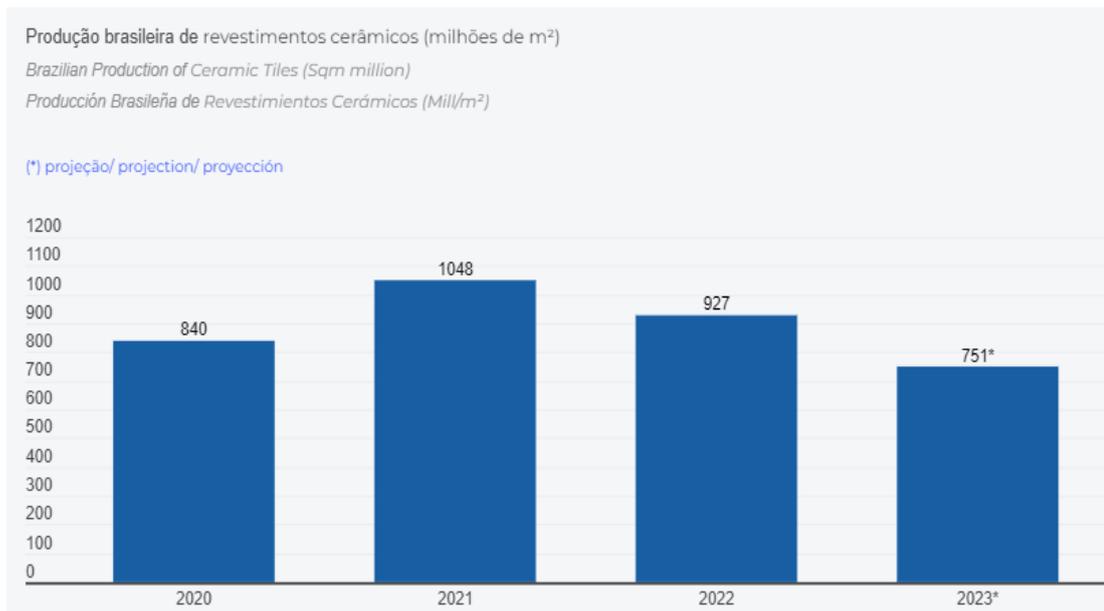
Figura 3 - Maiores produtores de revestimentos cerâmicos do mundo.



Fonte: ANFACER, 2024.

Segundos os dados da ANFACER, no relatório de 2023, apontam que a produção nacional atingiu cerca de 751 milhões de m² no ano de 2023 (Figura 4). A produção de revestimentos para pisos se destaca sobre os tipos de produtos fabricados nacionalmente, em seguida os porcelanatos e paredes.

Figura 4 - Produção de revestimentos no Brasil entre 2019 e 2023.



Fonte: ANFACER, 2024.

Com maior presença nas regiões Sudeste e Sul e uma crescente expansão no Nordeste, o segmento produtivo brasileiro de revestimentos cerâmicos e louças sanitárias é predominantemente nacional em termos de capital, sendo também um significativo gerador de empregos, contabilizando cerca de 50 mil postos de trabalho diretos e aproximadamente 200 mil indiretos. Uma característica marcante da produção no Brasil é a adoção de dois processos industriais em seu parque fabril: via seca e via úmida. Os fabricantes brasileiros estão alinhados com as tecnologias mais avançadas disponíveis globalmente, seguindo rigorosamente as normas internacionais de qualidade.

3.2. PROCESSO PRODUTIVO CERÂMICO

O processamento utilizado na fabricação de revestimentos cerâmicos é um conjunto de etapas sucessivas. Essa combinação de ações resulta nas características do produto final. Essas características devem atender aos padrões estabelecidos pela ABNT NBR ISO 13006 (Placas cerâmicas — Definições, classificação, características e marcação) para garantir que os produtos atendam às expectativas do consumidor com relação à usabilidade.

Na Tabela 1, é fornecida a classificação conforme a norma das placas cerâmicas. Nessa classificação, a letra maiúscula (B) indica que o produto é prensado, enquanto os algarismos romanos (I, II e III) e as letras minúsculas (a, b) determinam o grupo de absorção e resistência à quebra do material, respectivamente.

Tabela 1 - Classificação por Tipologia quanto as características físicas.

Produto	Grupo de absorção de água	Absorção de água AA (%)	Módulo de resistência à flexão (Mpa)	Carga de ruptura (N) para espessura $\geq 7,5$ mm
Porcelanato	BIa	0 a 0,5	≥ 35	≥ 1.300
Grés	BIb	0,5 a 3	≥ 30	≥ 1.100
Semigrés	BIIa	3 a 6	≥ 22	≥ 1.000
Semiporoso	BIIb	6 a 10	≥ 18	≥ 800
Poroso	BIII	> 10	≥ 15	≥ 600

FONTE: Adpatado da ISO 13006:2020

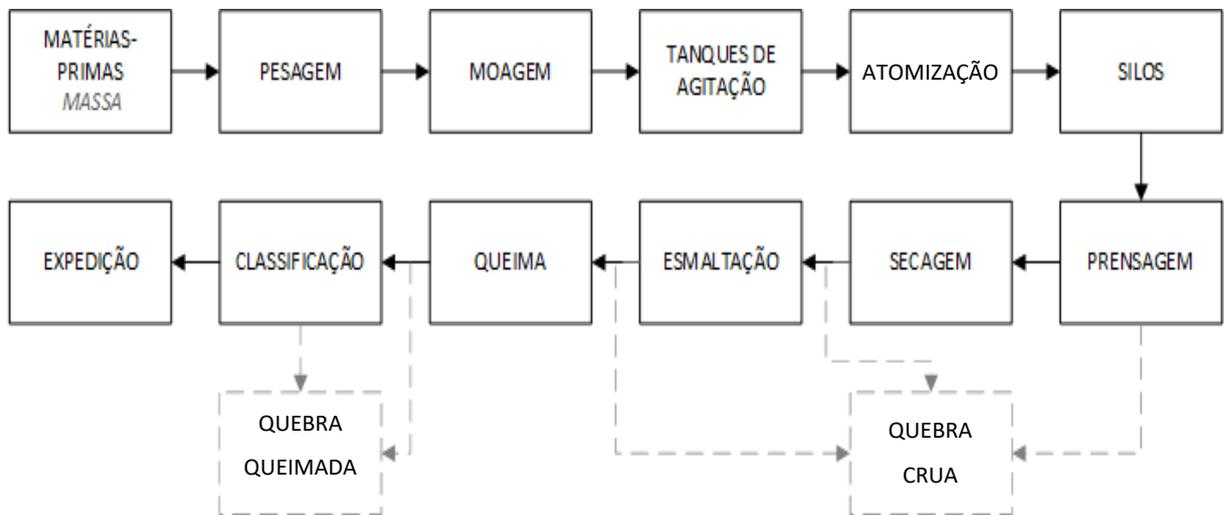
Como observado por Melchiades (2011) há várias abordagens de fabricação dos revestimentos cerâmicos, que têm diferenças em quatro aspectos fundamentais. O primeiro deles refere-se a moagem, mistura e granulação das matérias-primas pode ser seco ou via úmida. O segundo aspeto mencionado acima é referente ao método de conformação, que pode ser feito por prensagem, a qual é conhecida na larga escala industrial, extrusão, qual é usada em algumas linhas de produtos rústicos, ou por colagem de barbotina, a qual é restrita a processos artesanais. Quanto ao acabamento superficial, há a opção de esmaltado, com polimento, ou aspecto rústico, sem polimento ou esmaltação. Por fim, o número de tratamentos térmicos pode seguir a

abordagem de monoqueima, caracterizada pela queima simultânea do suporte e dos esmaltes, ou de biqueima, que envolve a queima individual do suporte seguida pela queima do esmalte.

3.2.1. VIA ÚMIDA

O método de via úmida demanda um grande beneficiamento das matérias-primas, o que pode resultar em um custo elevado, porém possibilita um controle mais preciso das propriedades do produto final. Ademais, as matérias-primas podem ser empregadas sem a necessidade de preparação prévia, eliminando uma possível etapa de sazonalidade, o que abre espaço para novas formulações e a diversificação dos produtos cerâmicos. (MOTTA et.al. 2001).

Figura 5 - Fluxograma do processo de produção - Via úmida.



Fonte: O autor, 2024.

3.2.2. SELEÇÃO DA MATÉRIA-PRIMA E FORMULAÇÃO

As matérias-primas que compõem a massa, podem ser agrupadas em plásticas e não plásticas. As argilas plásticas desempenham um papel importante na fase de modelagem das peças cerâmicas, influenciando características essenciais como a resistência mecânica antes da queima, e contribuindo para a estrutura e cor durante o processamento térmico. Enquanto isso, as matérias-primas não-plásticas também têm impacto significativo nas etapas de modelagem e secagem, reduzindo a retração das peças, facilitando a secagem e assumindo um papel essencial no processo térmico. Elas controlam transformações, deformações e o processo de sinterização, especialmente durante a fase de queima. Por conta de sua importância nesse contexto, os materiais não plásticos são frequentemente classificados como inertes, vitrificantes e fundentes (MOTTA et al. 2002).

Estas matérias-primas são minuciosamente selecionadas de forma a obter o produto desejado. As mesmas, devem ter características pré-determinadas como: absorção de água, retração de queima, módulo de ruptura e resistência à flexão, cor de queima (que influencia diretamente na cor do produto final), e entre outros. As proporções dos insumos são então definidas na formulação, considerando sua composição química e os resultados da análise física.

3.2.3. PESAGEM

Estabelecida a composição da massa, realiza-se a pesagem dessas matérias-primas e em continuidade a carga alimenta os moinhos. Ao realizar a pesagem dos insumos consumidos dos boxes, é suma importância monitorar a umidade. Isso viabiliza o equilíbrio de massa, assegurando a estabilidade na quantidade de material seco adicionado ao moinho, com o peso úmido ajustado para refletir o peso real. (SILVA, 2001).

3.2.4. MOAGEM

Após a pesagem das matérias-primas, elas são transportadas por esteiras para serem carregadas nos moinhos, acompanhadas por um volume específico de água (aproximadamente 35%) e silicato de sódio como agente defloculante. Esse defloculante atua quimicamente nas moléculas do material sólido, aumentando a repulsão entre elas e mantendo a suspensão em meio aquoso.

Durante um intervalo que geralmente varia entre cinco a seis horas, a moagem tem como objetivo reduzir o tamanho das partículas das matérias-primas e promover a homogeneização da massa (MARQUES, 2017). Essa redução resulta em um aumento na superfície específica, tornando as reações químicas mais reativas durante o processo de sinterização (RIBEIRO, 2001).

O equipamento predominante na indústria cerâmica é o moinho de bolas. Uma configuração básica desse moinho consiste em um cilindro ocos com carcaça metálica, com um eixo na posição horizontal e que contém em seu interior esferas (NASCIMENTO, 2018).

As esferas de moagem utilizadas nesse contexto incluem bolas de sílex, ágata, porcelana e alta alumina com alta densidade. A fragmentação do material é impulsionada pela interação entre a descida dos corpos moedores sobre o revestimento do moinho, o deslizamento desses corpos sobre o revestimento e, por último, o impacto ou deslizamento entre os próprios corpos moedores (MEDEIROS, 2018).

As esferas apresentam uma variação de tamanho intencional, visando otimizar a eficiência do processo de moagem. As bolas maiores iniciam a moagem, ao passo que as menores são responsáveis pela obtenção de uma moagem mais fina. Após determinar a quantidade e o tamanho das bolas, procede-se ao carregamento no moinho, sendo necessário ocupar de 50 a 55% do volume útil deste (MEDEIROS, 2018).

Uma boa moagem depende de vários fatores como:

- Rotação do moinho;
- Tamanho das bolas e distribuição;
- Densidade das bolas;
- Quantidade de material a ser moído;
- Quantidade de argilas, água e defloculante.

A duração do processo de moagem estará condicionada ao resíduo desejado. Se o resíduo for superior ao padrão, existe a possibilidade de surgirem trincas de resfriamento no forno; por outro lado, se for inferior, podem ocorrer variações no tamanho. Além da análise do resíduo, são avaliadas a viscosidade e a densidade (FERRARI, 2000).

A massa líquida resultante, conhecida como barbotina, é peneirada e então transferida para tanques de agitação, estes têm as seguintes funções:

- Armazenamento de barbotina e pulmão para o atomizador;
- Permite homogeneizar e controlar perfeitamente a barbotina bombeada ao atomizador;
- Permite corrigir eventuais erros em moagens, misturando a barbotina fora de padrões com outras, a fim de ajustar parâmetros.

A substância destinada ao atomizador provém do tanque de serviço, atravessando uma série de peneiras. É de suma importância que a barbotina armazenada seja continuamente agitada, evitando a sedimentação das partículas.

3.2.5. ATOMIZAÇÃO (*Spray Drying*)

Uma interpretação concisa de "*Spray drying*" é "secagem por pulverização", uma operação unitária de transferência de calor que ocorre em um dispositivo chamado atomizador. Este dispositivo é fundamentalmente composto por uma câmara em formato cilíndrico,

contendo tubulações metálicas com bicos que pulverizam a barbotina, formando aglomerados esféricos (OLIVEIRA e HOTZA, 2011).

O procedimento compreende três fases distintas: a formação das gotículas, a secagem dessas gotículas em um ambiente de ar quente - o qual pode ocorrer em contracorrente ou concorrente, interagindo com um fluxo de ar aquecido a aproximadamente 850°C proveniente de uma fornalha - e, por fim, a separação do pó seco. As partículas que constituem os grãos mais densos são precipitadas e entornados pelo atomizador, enquanto as de granulometria menor são descarregadas por meio de ciclones. O ar contendo partículas residuais é submetido a um processo de lavagem em um lavador de gás antes de ser descartado em forma de vapor, garantindo conformidade com as normas ambientais (NEGRE e SANCHEZ, 1998).

Desta forma o pó atomizado é depositado na esteira por uma saída no fundo do atomizador e direcionado a silos de estocagem. Lá, permanecem em repouso por ao menos 24 horas para a homogeneização e estabilização da umidade.

3.2.6. PRENSAGEM

A prensagem é o estágio responsável por comprimir o pó atomizado dentro de um molde flexível por meio da aplicação de pressão. Este método é amplamente utilizado na indústria de revestimentos devido à sua eficaz capacidade de produção e à facilidade na fabricação de peças com diversas dimensões e formatos (ALBERO, 2000).

Este estágio é de grande importância no processo de fabricação de cerâmicas, pois uma compactação inadequada dos grânulos pode resultar em problemas de geometria nas placas cerâmicas como falhas de ortogonalidade e/ou dimensões, entre outros defeitos.

Durante a etapa de prensagem, o suporte cerâmico passa por três operações simultâneas:

1. Preenchimento da cavidade do molde: Nesta fase, a massa sem geometria definida toma forma. Para garantir uma distribuição uniforme da massa na cavidade do molde, é

essencial que ela tenha boa fluidez. Os grânulos devem ser suficientemente moles e deformáveis para que, durante a compactação moderada, se deformem plasticamente. Isso facilita o deslizamento das partículas que compõem a massa (ALBERO, 2000).

2. Compactação da massa: Essa operação visa conferir ao material a resistência necessária para enfrentar os esforços mecânicos, tanto durante o processo de queima quanto no estado cru.

3. Adensamento (empacotamento): Refere-se à redução dos vazios existentes entre as partículas da massa, promovendo uma coesão mais eficaz.

A prensagem destaca-se por suas características, tais como: elevada resistência à flexão no estado cru, produtividade significativa, facilidade de secagem, deformação mínima, compactação uniforme e pressão específica mais elevada, entre outros atributos.

3.2.7. SECAGEM

Após o processo de prensagem, as peças cerâmicas são conduzidas por rolos até o secador horizontal contínuo, onde passam por uma fase de secagem que assume uma importância fundamental no processo, tendo como principal objetivo a eliminação quase completa da água contida nas peças.

Então após a conformação, as peças são carregadas através de rolos para um secador horizontal, onde são submetidas a uma etapa de secagem. Os secadores são constituídos por estruturas metálicas modulares revestidas com painéis isolantes e com tubulações externas para a circulação de ar. Dentro do equipamento os módulos são iguais quando levado em consideração as condições térmicas, higrométricas e de fluxo de ar de ventilação (NASCIMENTO, 2018).

De acordo com Oliveira (2006), a forma de evitar tensões e, conseqüentemente, deformidades nas peças, é imprescindível eliminar essa água de forma lenta e gradual até um

teor suficientemente baixo, de 0,8% a 1,5% de umidade residual. Além disso, desempenha a função de aquecimento para tornar mais fácil e possibilitar a etapa de esmaltação

3.2.8. ESMALTAÇÃO E DECORAÇÃO

A etapa de esmaltação no processo envolve as peças cerâmicas, também conhecidos como "biscoitos", com coberturas viscosas, conhecidas como engobe e esmalte, que contém componentes que contribuem para uniformidade da superfície do biscoito e, durante o processo de queima, conferem o design às peças. Essas coberturas são compostas por elementos vitrificantes (fritas cerâmicas), materiais fundentes e plásticos (como feldspato, argilas, talco, entre outros), bem como substâncias duras e refratárias (quartzo, caulim, alumina, etc.).

Para garantir a qualidade do produto durante o procedimento de esmaltação, várias etapas são seguidas:

1. Pós secagem: Após a saída das peças do secador, inicia-se o processo de acabamento, que envolve a remoção de rebarbas, controle da temperatura e limpeza da superfície. O controle preciso da temperatura é crucial para evitar problemas como furos no esmalte e retração pós-queima.

2. Aplicação de água: A água é aplicada na superfície das peças para promover a absorção uniforme do engobe e do esmalte, retardando a secagem e reduzindo a temperatura do suporte, quando necessário.

3. Aplicação do engobe: O engobe reveste e uniformiza a superfície do suporte, isolando-o de contaminantes e proporcionando uma base para o esmalte. Geralmente composto por fundentes, cargas e opacificantes, é aplicado por disco ou campana.

4. Aplicação do esmalte: O esmalte, um tipo de vidro, é aplicado formando uma camada homogênea, conferindo durabilidade ao produto. A escolha do método de aplicação é determinada pelo resultado estético desejado.

5. Decoração: Realizada por serigrafia, a decoração imprime desenhos na superfície das peças, personalizando-as esteticamente. Ao final do processo, a parte inferior recebe um engobe para proteção durante a queima.

3.2.9. SINTERIZAÇÃO

A etapa de sinterização ou queima representa o núcleo essencial do processo cerâmico, marcada por um conjunto de transformações físicas e reações químicas. Essas alterações provocam uma modificação fundamental nas propriedades das peças cerâmicas, resultando em um material robusto e resistente.

No processo de queima, observa-se uma contração em volume e uma redução nos espaços vazios entre as partículas do suporte cerâmico. Essas mudanças, que resultam na fortificação da resistência mecânica, acontecem por meio da união das partículas de pó para formar uma massa mais densa, caracterizando o processo conhecido como sinterização.

Os fornos são segmentados em módulos de queima, categorizados como aquecimento, pré-queima, queima (onde ocorre a sinterização, envolvendo a compactação das partículas) e o resfriamento, que ocorre de forma gradativa necessário para conter defeitos como deformação. Normalmente, o gás natural é utilizado como fonte de energia, podendo ser direcionado para a etapa de secagem.

O controle do ciclo térmico (temperatura x tempo) e da atmosfera do forno é essencial nessa fase, sendo imprescindíveis ajustá-los conforme a natureza das massas cerâmicas e as dimensões das peças a serem queimadas.

A etapa de queima dos materiais cerâmicos desempenha um papel fundamental no processo de fabricação, consolidando todas as operações realizadas até então. Durante essa fase, ocorre a sinterização, na qual, sob altas temperaturas, as partículas individuais ou um corpo poroso sofrem modificações em suas propriedades para atingir o máximo de densificação possível, reduzindo a porosidade do material. Esse processo de densificação resulta em uma

retração do material, também conhecida como retração de queima, que exerce influência direta na estabilidade dimensional e na resistência mecânica do produto cerâmico final, conforme destacado por Medeiros, 2018.

Durante o processo de queima, o suporte cerâmico experimenta uma contração volumétrica e uma redução nos espaços vazios entre as partículas, simultaneamente ao aumento de sua resistência mecânica. Essas mudanças ocorrem devido à coalescência (união entre as parcelas) das partículas de pó para formar uma massa mais densa, em um fenômeno conhecido como sinterização, conforme descrito por Callister Jr. (2002).

Durante esse processo, as partículas se unem gradualmente, evoluindo para um estado de maior compactação, resultando na redução da porosidade. Esse impulso é impulsionado pela diminuição da energia livre superficial total, decorrente do contato e crescimento entre os grãos. Essas transformações são evidenciadas ao longo da queima pela transferência de material entre as microestruturas. Conforme observado por Vieira (2002), os poros tendem a se tornar mais esféricos e diminuir de tamanho à medida que a porosidade é reduzida durante a sinterização. Sanchez et al. (2001) destacam que, durante esse processo, matérias-primas contendo minerais alcalinos, especialmente os materiais fundentes, produzem uma quantidade significativa de fase líquida. Essa fase líquida, cuja viscosidade diminui com o aumento da temperatura, tem a capacidade de penetrar nos poros existentes, eliminando-os gradualmente por meio de forças capilares.

3.2.10. CLASSIFICAÇÃO E EMBALAGEM

Após sair do forno, o produto acabado passa pela Surface, máquina capaz de identificar possíveis defeitos ocasionados nas etapas anteriores do processo produtivo e com base na qualidade classificá-los. Os produtos podem ser do tipo A, B ou C. O piso do tipo A é o de primeira linha, logo é o produto de melhor qualidade. Já as versões B e C, são os pisos de segunda e terceira linha respectivamente. Feita a classificação, os pisos são embalados com o auxílio de robôs. Informações como o Grupo de Absorção e a Classe de Resistência ao Desgaste

por Abrasão (Índice PEI), por exemplo, são importantes para definir em que local o revestimento cerâmico deve ser utilizado (piso ou parede, tráfego do local) e, portanto, o consumidor deve ter acesso a todas essas informações através das embalagens, a fim de selecionar aquele que melhor se adeque às suas necessidades.

Nesta fase, identificam-se os defeitos que resultam na quebra de escolha, ou seja, nos produtos que não alcançam os padrões de qualidade estabelecidos. Entre os defeitos mais comuns estão trincas, lascas, bolhas de ar, empenamento, furos, entre outros. Essas imperfeições visuais comprometem tanto a integridade estrutural quanto estética dos produtos cerâmicos, tornando-os impróprios para venda ou uso final.

3.3. RESÍDUOS SÓLIDOS NA INDÚSTRIA CERÂMICA

Os resíduos industriais provenientes dos processos de produção em países em desenvolvimento são um desdobramento negativo da busca pela paridade econômica e desenvolvimento em relação aos países desenvolvidos. Eles são reconhecidos como os principais agentes de degradação ambiental e representam um dos principais desafios enfrentados pelo setor industrial. O descarte inadequado desses resíduos resulta em uma série de problemas ambientais, incluindo a emissão de gases do efeito estufa, a contaminação de corpos d'água e a dispersão de resíduos sólidos no meio ambiente (DE LIMA, 2024).

O Brasil dispõe de sua própria legislação relativa à gestão de resíduos, estabelecida na Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Essa legislação define resíduo sólido como:

o material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede

pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.

O resíduo sólido de placa cerâmica, categorizado como resíduo industrial, cuja produção tem um impacto ambiental significativo. Portanto, é essencial adotar práticas de reutilização desses resíduos de forma sustentável (SILVEIRA, 2023).

A reciclagem, reutilização e reaproveitamento desses resíduos industriais, são meios alternativos e viáveis para minimizar esse efeito e garantir uma gestão ambientalmente responsável. Essas práticas não apenas contribuem para a redução dos impactos ambientais, mas também promovem a valorização e a comercialização desses resíduos como matéria-prima.

A indústria cerâmica apresenta um considerável potencial para incorporar resíduos, tanto internos quanto de outras indústrias, em seus produtos e processos. De Lima (2024) destaca esse potencial como uma oportunidade para reduzir os custos de produção, impulsionar a inovação e elevar os padrões de responsabilidade socioambiental.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

As formulações foram planejadas para preservar as matérias-primas da fórmula padrão, adicionando apenas os resíduos analisados nas proporções estabelecidas em cada teste. As percentagens desses resíduos variaram de 0 a 6% cada, em peso e sobrecarga.

Os resíduos estudados foram:

- Quebra crua 1 – Retorno de massa de porcelanato, proveniente da quebra crua (antes da queima) de outra unidade, localizada no Conde – PB;
- Quebra crua 2 – Quebra de biscoito cru e esmaltado do próprio processo (antes da queima);
- Chamote – Quebra queimada dos produtos que apresentaram defeitos visuais ou que não foram classificados de acordo com as normas.

A amostra de Chamote submetida a trituração por moinhos de martelos e então foi formada uma mistura de 30% de resíduos provenientes da quebra de produtos semigrés – BIIa e 70% de Porcelanatos – BIa.

Figura 6 - Quebra crua 1, Quebra crua 2 e Chamote, respectivamente.



Fonte: O autor, 2024.

4.1.1 PLANEJAMENTO FATORIAL

O planejamento experimental é uma ferramenta eficaz para melhorar processos, resultando em maior versatilidade, redução de falhas, diminuição do tempo de produção e redução dos custos totais. O planejamento de experimentos investiga informações relacionadas a diversos fatores, revelando como as variáveis interagem entre si. É uma ferramenta metodológica que visa estruturar um experimento, identificando quais fatores específicos e níveis de relação influenciam na resposta do método (MONTGOMERY, 2021).

Conforme descrito por Montgomery (2021), um experimento fatorial com K fatores (variáveis) é caracterizado por diferentes níveis (valores utilizados como referência), os quais são representados como alto (+) e baixo (-).

Mainardi e Bidoia (2020) explicam que o planejamento fatorial é uma ferramenta estatística que permite distinguir as variáveis de um processo, estimar seus efeitos e modelar os processos por meio de modelagem matemáticas.

Para o estudo, utilizou-se um planejamento fatorial de composto central. Esse método buscou analisar a relação entre os parâmetros escolhidos para entrada e resposta. O planejamento foi feito no software Minitab. Destes constituíram:

Tabela 2 - Variáveis utilizadas no estudo

Variáveis	Níveis reais e codificados		
	-1	0	+1
Quebra crua 1	0%	3%	6%
Quebra crua 2	0%	3%	6%
Chamote	0%	3%	6%

Fonte: O autor, 2024.

A Tabela 3, mostra as combinações resultantes do planejamento fatorial e a Tabela 4 apresenta as formulações completas dos testes propostos, respeitando a carga de moagem.

Tabela 3 - Combinações de testes do planejamento fatorial 2³

Ordem de Ensaios	TESTES	FATORES DE CONTROLE		
		Quebra crua 1	Quebra crua 2	Chamote
11	1	-1	-1	-1
9	2	+1	-1	-1
10	3	-1	+1	-1
4	4	+1	+1	-1
3	5	-1	-1	+1
6	6	+1	-1	+1
5	7	-1	+1	+1
7	8	+1	+1	+1
12	9	0	0	0
8	10	0	0	0
2	11	0	0	0
1	12	0	0	0

Fonte: O autor, 2024.

Tabela 4 - Formulações resultantes do planejamento experimental

TESTES	SIENITOS	ARGILAS	FILITOS	DOLOMITA	Quebra crua 1	Quebra crua 2	Chamote
1	30,85%	23,40%	43,62%	2,13%	0,00%	0,00%	0,00%
2	29,00%	22,00%	41,00%	2,00%	6,00%	0,00%	0,00%
3	29,00%	22,00%	41,00%	2,00%	0,00%	6,00%	0,00%
4	27,36%	20,75%	38,68%	1,89%	5,66%	5,66%	0,00%
5	29,00%	22,00%	41,00%	2,00%	0,00%	0,00%	6,00%
6	27,36%	20,75%	38,68%	1,89%	5,66%	0,00%	5,66%
7	27,36%	20,75%	38,68%	1,89%	0,00%	5,66%	5,66%
8	25,89%	19,64%	36,61%	1,79%	5,36%	5,36%	5,36%
9	28,16%	21,36%	39,81%	1,94%	2,91%	2,91%	2,91%
10	28,16%	21,36%	39,81%	1,94%	2,91%	2,91%	2,91%
11	28,16%	21,36%	39,81%	1,94%	2,91%	2,91%	2,91%
12	28,16%	21,36%	39,81%	1,94%	2,91%	2,91%	2,91%

Fonte: O autor, 2024.

4.1.2 PREPARO DOS CORPOS DE PROVA

A abordagem empregada na preparação da massa cerâmica e na produção dos corpos de prova seguiu a metodologia empírica (experimental) adotada pela unidade fabril localizada na cidade de João Pessoa na Paraíba, fornecedora da infraestrutura necessária. O objetivo do experimento foi reproduzir as condições de processamento via úmida, buscando gerar resultados que se assemelhassem à produção em escala industrial.

As formulações foram meticulosamente pesadas para atingir um balanço total de massa, em peso seco, de 500 gramas. Em todos os testes do planejamento, os seguintes valores foram empregados como padrão: 290 mililitros de água e 2,8 gramas de defloculante (representando 0,84% em peso da carga total), os quais foram posteriormente introduzidos nos moinhos para o processo de moagem.

As atividades foram realizadas de maneira uniforme para todas as formulações estudadas: Após um tempo de moagem fixo de 9 minutos, a barbotina resultante foi submetida a peneiramento em malha #10. A barbotina então foi levada para uma estufa com a temperatura de 100°C por 24 horas, o que removeu toda a umidade presente na amostra. Após a secagem, com o material triturado, foi adicionado cerca de 7% de umidade. Finalmente, o material permaneceu em um saco plástico por mais 24 horas para assegurar a homogeneização.

Após a homogeneização da massa cerâmica, procedeu-se à compactação utilizando uma prensa hidráulica (Prensa Hidráulica NANNETTI - Mignon) a qual possui um suporte interno com dimensões médias de (110 x 55 x 8,5) mm. Durante o processo de prensagem, foi aplicada uma pressão de 70 bar para 100 gramas de massa.

Em seguida, os corpos de prova "cru" foram colocados em uma estufa térmica por um intervalo de 2 a 3 horas, mantidos a uma temperatura de 100 °C. Por fim, os testes foram conduzidos por meio da queima em um forno de rolos da SISI industrial, durante um período de 42 minutos, com a temperatura máxima atingindo 1198°C. Após a sinterização, que resulta no fechamento dos poros durante a queima, os suportes cerâmicos tornaram-se prontos para o início dos testes laboratoriais.

Figura 7 - Corpos de provas antes da queima



Fonte: O autor, 2024.

4.2 ANÁLISES REALIZADAS

Foram preparados os corpos de prova necessários para análise em estado cru, esmaltado e queimado. Posteriormente, os testes foram conduzidos e avaliados nas diferentes análises:

4.2.1 CARGA DE RUPTURA E RESISTÊNCIA A FLEXÃO MECÂNICA

A resistência mecânica à flexão é a capacidade de uma peça cerâmica resistir a uma força aplicada perpendicularmente à sua superfície enquanto apoiada em dois pontos na sua base. Essa resistência pode ser medida em diferentes estados da peça: úmida, seca ou após a queima.

Para testar os corpos de prova das formulações elaboradas, estes foram submetidos a um forno de rolos industrial para queima, seguido pelo uso de um equipamento de flexão (Flexímetro da marca NANNETTI - SERVITECH). Os corpos de prova foram posicionados sobre duas barras paralelas, enquanto uma terceira barra superior aplicava uma carga específica para flexionar o material, registrando a força necessária para a sua ruptura. Os resultados foram expressos em termos de Carga de Ruptura (CR) calculados usando a equação (1), medida em newtons (N), e Resistência Mecânica à Flexão (RMF) calculados usando a equação (2), medida em megapascal (MPa).

$$CR = \frac{F*L}{b} \quad (1)$$

$$RMF = \frac{3*F*L}{2*b*e^2} \quad (2)$$

Sendo,

- F = Força aplicada (kgf);
- L = Distância entre os apoios (mm);
- b = largura do corpo de prova (mm);
- e = Espessura do corpo de prova na região de ruptura (cm).

4.2.2 ABSORÇÃO

As placas de massa cerâmica, após queimadas e alcançadas o equilíbrio térmico, foram pesadas em balança analítica (m_i) com precisão 0,01 e em seguida colocadas em um Porosímetro (Servitech, modelo CT-12174), onde foram imersas em um recipiente preenchido com água alimentado com uma fonte de calor.

Após isso as peças permaneceram durante 2h a partir do alcance da temperatura de ebulição da água. Após esse período pesou-as novamente (m_f). Através da absorção (%AA) é possível obter a medida indireta da porosidade aberta de uma peça cerâmica, valor de muita

importância para o controle do processo cerâmico. O valor percentual da absorção é obtido pela equação (3):

$$\%AA = \frac{mf-mi}{mi} * 100 \quad (3)$$

Sendo,

- mi = Massa inicial (g);
- mf = Massa final (g).

4.2.3 RETRAÇÃO LINEAR

A retração, ou contração, de matérias-primas e peças cerâmicas refere-se à redução das dimensões causada por processos físicos e físico-químicos durante a secagem e queima. A mudança nas dimensões após a secagem resulta da remoção da água, de modo que quanto maior a retração, maior a tendência de maior plasticidade. Para o experimento, os comprimentos do lado maior dos corpos de prova foram medidos antes e depois da queima utilizando um paquímetro com precisão de 0,01 e calculados a partir da equação (4).

$$\%RL = \frac{ci-cf}{ci} * 100 \quad (4)$$

Sendo,

- ci = Comprimento inicial (mm);
- cf = Comprimento final (mm).

4.2.4 ÍNDICE DE PIROPLASTICIDADE

Piroplasticidade, também conhecida como deformação piropelástica, refere-se a uma propriedade presente em matérias-primas e corpos cerâmicos. Estes materiais, em função de suas propriedades físicas e químicas, podem experimentar diferentes níveis de deformação quando expostos a temperaturas específicas, sendo essa deformação irreversível. A magnitude dessa deformação é quantificada pelo Índice de Piroplasticidade (I.P.).

O valor da Flecha de Deformação (S) é calculado pela equação (5):

$$S = D - EP \quad (5)$$

Sendo,

- $D =$ Curvatura da peça;
- $EP =$ espessura da placa.

O Índice de Piroplasticidade (I.P.) é calculado pela equação (6):

$$I.P. = \frac{4}{3} * h^2 * \frac{S}{L^2} \quad (6)$$

- $h =$ espessura da peça;
- $S =$ flecha;
- $L =$ distância entre os apoios.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, os resultados obtidos a partir do planejamento experimental, análise das propriedades físicas do produto, identificação e processamento dos resíduos, bem como a avaliação da viabilidade econômica.

5.1. AVALIAÇÃO DA ANÁLISE FÍSICA

5.1.1. CARGA DE RUPTURA E MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO A SECO

Tabela 5 - Resultados da Carga de Ruptura e Módulo de Resistência à Flexão

TESTES	Quebra crua 1	Quebra crua 2	Chamote	CR seco (N)	MRF seco (MPa)
1	0%	0%	0%	155,72	3,99
2	6%	0%	0%	157,98	4,10
3	0%	6%	0%	128,97	3,22
4	6%	6%	0%	146,31	3,70
5	0%	0%	6%	128,97	3,26
6	6%	0%	6%	128,18	3,16
7	0%	6%	6%	129,85	3,24
8	6%	6%	6%	112,99	2,87
9	3%	3%	3%	162,35	4,16
10	3%	3%	3%	162,88	4,15
11	3%	3%	3%	162,08	4,20
12	3%	3%	3%	162,09	4,21

Fonte: O autor, 2024.

Com base nos dados apresentados na Tabela 5, observamos uma variedade de comportamentos nos resultados dos testes, conforme a composição das formulações. No teste 1, a carga de ruptura a seco foi de 155,72 N e o módulo de resistência à flexão a seco foi de 3,99 MPa. Nos testes subsequentes, foram adicionadas diversas combinações de resíduos. No teste 2, os valores aumentaram para 157,98 N e 4,10 MPa, respectivamente. No teste 3 houve uma diminuição para 128,97 N e 3,22 MPa.

Os testes 4, 5, 6, 7 e 8 avaliaram diferentes combinações das Quebra crua 1 e 2 e o Chamote, mostrando variações nos resultados de acordo com a proporção dos resíduos na formulação. Notavelmente, o teste 8 com uma maior presença de resíduos, apresentou o menor valor de carga de ruptura, indicando um possível impacto negativo da alta concentração de resíduos na resistência do material.

Já nos testes 9, 10, 11 e 12, obteve-se uma média de 162,35 N para carga de ruptura a seco e 4,18 MPa para o módulo de resistência à flexão a seco. Esses testes registraram os maiores valores para a carga de ruptura, sugerindo uma composição mais equilibrada e favorável em termos de resistência mecânica.

A inclusão do Chamote nas formulações pode influenciar significativamente a resistência mecânica. Quando adicionada uma quantidade adequada e de maneira uniforme na matriz cerâmica, as partículas do material podem fortalecer a estrutura, aumentando a resistência à tração e à compressão. No entanto, uma distribuição inadequada ou incorporação defeituosa dessas partículas pode resultar em pontos fracos na cerâmica. Além disso, o Chamote, por já ter passado pelo processo de vitrificação, não tem retenção de água, essencial para um bom processo de prensagem, o que também pode afetar a resistência do material.

A Quebra crua 1 e a Quebra crua 2, possuem partículas menores por já terem sido moídos anteriormente. A inclusão desses resíduos pode contribuir para a homogeneidade da massa, proporcionando uma distribuição mais uniforme dos componentes e tornando a mistura mais consistente. No entanto, é importante notar que a utilização excessiva desses resíduos pode comprometer a prensabilidade da massa, prejudicando a qualidade final do produto.

5.1.2. CARGA DE RUPTURA E MÓDULO DE RESISTÊNCIA À FLEXÃO QUEIMADO

Tabela 6- Resultados da Carga de Ruptura e Módulo de Resistência à Flexão após a queima

Testes	Quebra crua 1	Quebra crua 2	Chamote	CR queimado (N)	MRF queimado (MPa)
1	0%	0%	0%	2.455,88	69,05
2	6%	0%	0%	1.710,10	47,47
3	0%	6%	0%	2.442,16	67,76
4	6%	6%	0%	2.640,12	76,39
5	0%	0%	6%	3.092,88	89,49
6	6%	0%	6%	2.939,02	85,04
7	0%	6%	6%	2.775,36	80,31
8	6%	6%	6%	2.527,42	70,18
9	3%	3%	3%	2.657,80	75,43
10	3%	3%	3%	2.658,74	72,83
11	3%	3%	3%	2.777,30	82,52
12	3%	3%	3%	2.788,10	82,96

Fonte: O autor, 2024.

Em relação aos resultados dos testes após o processo de queima, apresentados na Tabela 6, podemos observar que os menores valores obtidos foram do Teste 2, com a carga de ruptura de 1710,10 N e o módulo de resistência a flexão de 47,47 MPa. Por outro lado, no teste 5, registrou-se os maiores valores, com 3.092,88 N e 89,49 MPa, respectivamente.

O teste 8, apresentou uma carga de ruptura queimada de 2.527,42 N e um módulo de resistência à flexão queimado de 70,18 MPa. Por fim, os testes 9, 10, 11 e 12, obtiveram uma média de 2.720,48 N para a carga de ruptura queimada e 78,43 MPa para o módulo de resistência à flexão queimado, indicando uma tendência de aumento desses valores em comparação com o teste 8 quando é diminuído a porcentagem dos resíduos na composição.

A inclusão da Quebra crua 1, proveniente de outra unidade fabril, pode ser significativa na melhoria das propriedades da massa cerâmica, mesmo quando adicionada em pouca

quantidade. Isso se deve à diversidade de matérias-primas presentes nessa amostra, as quais podem enriquecer a composição da massa, contribuindo para aprimorar suas características.

Por outro lado, a adição da Quebra crua 2, oriunda do próprio processo, tem o potencial de aprimorar a homogeneidade da massa, promovendo uma distribuição mais uniforme dos componentes. Isso resulta em uma mistura mais consistente, o que pode impactar positivamente nas propriedades finais do produto cerâmico.

Além disso, o Chamote, apesar de não desempenhar um papel químico significativo durante a fase de queima, oferece benefícios estruturais. O fato de ter sido submetido a um processo de sinterização significa que o material agora está mais duro e resistente. Essa dureza e resistência tornam o Chamote capaz de interagir fisicamente com as outras matérias-primas da massa, fortalecendo a estrutura geral do produto cerâmico.

5.1.3. ABSORÇÃO E RETRAÇÃO

Tabela 7 – Resultados da Absorção e Retração

Testes	Quebra crua 1	Quebra crua 2	Chamote	Absorção (%)	Retração (%)
1	0%	0%	0%	0,05%	9,30%
2	6%	0%	0%	0,12%	8,85%
3	0%	6%	0%	0,02%	9,51%
4	6%	6%	0%	0,05%	9,41%
5	0%	0%	6%	0,13%	9,34%
6	6%	0%	6%	0,03%	9,49%
7	0%	6%	6%	0,03%	9,56%
8	6%	6%	6%	0,02%	10,04%
9	3%	3%	3%	0,03%	9,43%
10	3%	3%	3%	0,03%	9,42%
11	3%	3%	3%	0,03%	9,41%
12	3%	3%	3%	0,03%	9,42%

Fonte: O autor, 2024.

A absorção é um fator crucial na classificação do produto final, enquanto a retração influencia diretamente sua estabilidade dimensional.

Em relação à absorção, todos os testes apresentaram resultados favoráveis, indicando baixa absorção de água. O teste 3 registrou uma absorção de apenas 0,02%, a menor entre todos os testes. Por outro lado, o teste 5 apresentou uma absorção de 0,13%, indicando uma absorção maior.

Quanto à retração, observamos que o teste 2 apresentou uma retração de 8,85%, a menor entre os testes de retração. Já o teste 8, registrou uma retração de 10,04%, a mais alta entre todos os testes de retração.

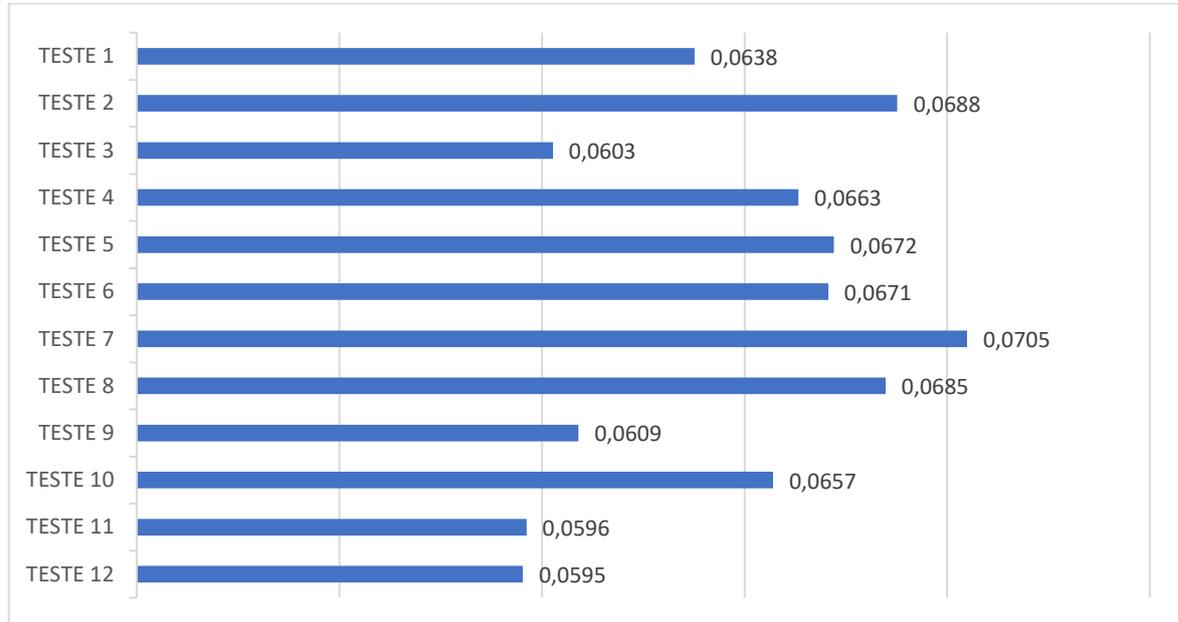
O Chamote, devido à sua baixa capacidade de compactação em comparação com os materiais argilosos, resulta em um aumento significativo no espaço vazio dentro dos corpos de prova. Durante o processo de tratamento térmico, esses vazios contribuem para a densificação do material, auxiliando no processo de desgaseificação, com os materiais fundentes preenchendo esses espaços. Como resultado, observa-se uma redução na absorção de água e um subsequente aumento na retração linear durante a queima.

A inclusão da Quebra crua 2, proveniente do próprio processo, além de atuar como um material fundente, também possui pequenas camadas de esmalte e engobe, que auxiliam na formação da fase vítrea. Dessa forma, a presença deste resíduo é um dos principais fatores responsáveis na variação da absorção nos testes.

Por outro lado, a Quebra crua 1, originária de outra unidade fabril, é produzida a partir de uma massa com características específicas para a fabricação de porcelanatos, ajustadas às condições de queima da unidade de origem. Nesse sentido, ela atua na composição estudada como um material refratário, devido às condições de queima necessárias para provocar a fase vítrea. Como resultado, este resíduo tem a capacidade de manter uma menor variação dimensional, mantendo a porcentagem de retração mais baixa. No entanto, essa menor retração pode provocar um leve aumento na absorção de água.

5.1.4. ÍNDICE DE PIROPLÁSTICIDADE

Figura 8 - Valores do Índice de Piroplasticidade



Fonte: O autor, 2024.

À medida que a temperatura das peças cerâmicas aumenta, há um gradual aumento na quantidade de fase líquida formada. Essa fase líquida surge devido à fusão parcial dos componentes mais fundentes presentes na massa cerâmica. Com o aumento da temperatura, os componentes refratários são progressivamente dissolvidos pela fase líquida, resultando em um considerável aumento de volume. Se esse aumento for excessivo e combinado com fatores como a pressão interna do forno e a ação da gravidade, pode ocorrer uma irregularidade na forma das peças cerâmicas, conhecida como "deformação piroplástica" (DE OLIVEIRA, 2023).

A presença de uma quantidade significativa de fase líquida de baixa viscosidade é crucial para alcançar a baixa absorção de água necessária nos porcelanatos. No entanto, essa mesma fase líquida é responsável pela deformação piroplástica das peças durante o processo de queima.

As matérias-primas utilizadas na formulação das massas de porcelanato possuem composições mineralógicas distintas, desempenhando funções específicas. Enquanto as matérias-primas argilosas conferem plasticidade à massa, as complementares, não plásticas, são

caracterizadas por minerais fundentes que, em geral, são responsáveis pela densificação e resistência mecânica do material. Por sua vez, as matérias-primas refratárias garantem a estabilidade dimensional das peças durante o processo de queima (OLIVEIRA, 2015).

Ao utilizar uma quantidade balanceada de Quebra crua 1 e 2, e o Chamote em uma formulação cerâmica, observou-se uma melhoria significativa na deformação pirolástica. Isso pode ser explicado pelos papéis específicos desempenhados por cada um desses materiais.

A Quebra crua 1, considerada como um material refratário, é reconhecida por sua capacidade de resistir a altas temperaturas sem perder suas propriedades físicas. Durante o processo de queima, os materiais refratários desempenham um papel fundamental na preservação da forma e das dimensões das peças cerâmicas, ajudando a minimizar a deformação pirolástica.

O Chamote, por sua vez, é considerado um material inerte devido à sua baixa reatividade química durante a queima. Sua principal função é fornecer volume à massa cerâmica e evitar uma contração excessiva durante o processo de sinterização. Atuando como espaçador entre as partículas da massa, o Chamote contribui para controlar a deformação pirolástica, garantindo a manutenção da forma das peças cerâmicas.

Por fim, a Quebra crua 2 como um material fundente, é capaz de reduzir o ponto de fusão da massa cerâmica. Esse processo promove a formação de uma fase líquida durante a queima, facilitando a densificação da cerâmica e reduzindo a porosidade. No entanto, é importante ressaltar que um excesso de materiais fundentes pode aumentar a deformação pirolástica, uma vez que contribuem para a fluidez da fase líquida, podendo resultar em uma deformação indesejada das peças cerâmicas durante o processo de queima.

5.2 SELEÇÃO DE UMA FORMULAÇÃO

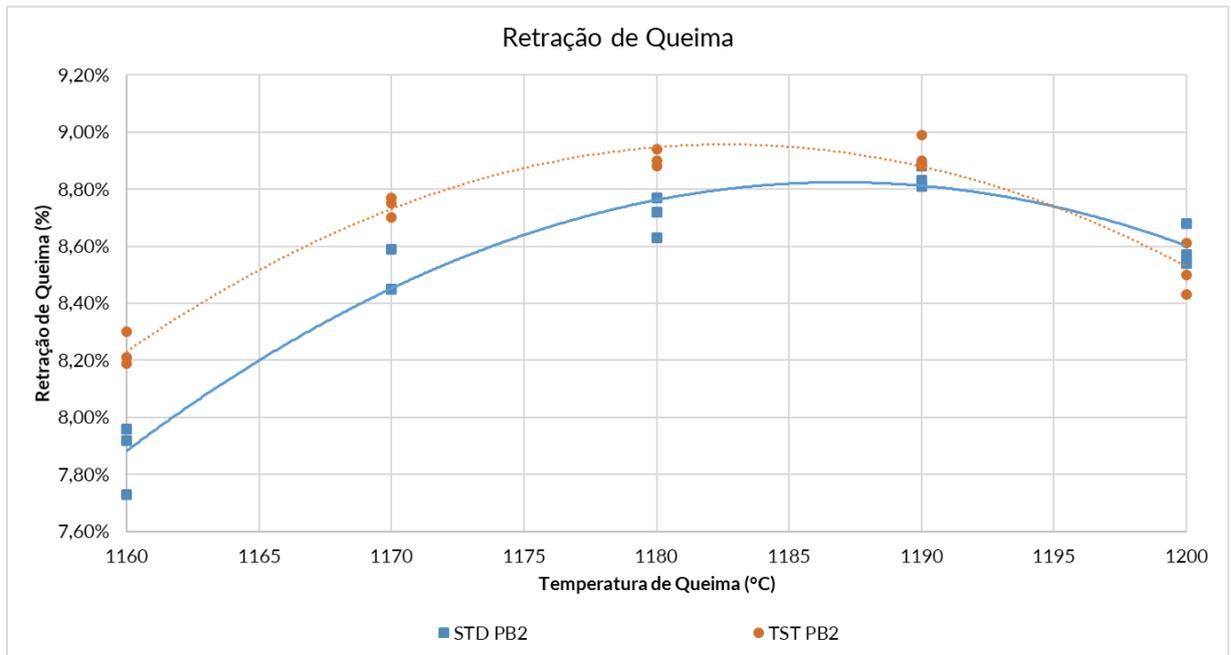
Após uma avaliação dos resultados apresentados nos na Análise Física dos testes, optou-se por realizar uma pesquisa mais detalhada da formulação dos testes 9, 10, 11 e 12 devido à

sua composição balanceada, contendo 3% de Quebra crua 1, 3% de Quebra crua 2 e 3% de Chamote. Esses testes evidenciaram resultados significativamente positivos para a carga de ruptura queimada e o módulo de resistência à flexão queimado, apontando para um potencial aumento na resistência mecânica nessa formulação.

No entanto, é pertinente observar que houve um aumento considerável na retração durante o processo de queima. Este fato sugere que o comportamento do material em relação à variação de temperatura precisa ser mais bem compreendido para uma avaliação completa de sua viabilidade. Em suma, embora os testes selecionados tenham demonstrado resultados promissores em diversos aspectos, a variação na retração destaca a necessidade de uma investigação mais aprofundada para uma compreensão abrangente do desempenho do material em diferentes condições de processo.

Os corpos de prova foram enviados para uma unidade do grupo em Cocal do Sul – SC no qual foram submetidos aos testes de absorção e retração com a variação da temperatura, com ciclo de queima de 30 minutos, comparado com a massa Padrão (STD).

Figura 9 - Curva de Gresificação – Retração de Queima

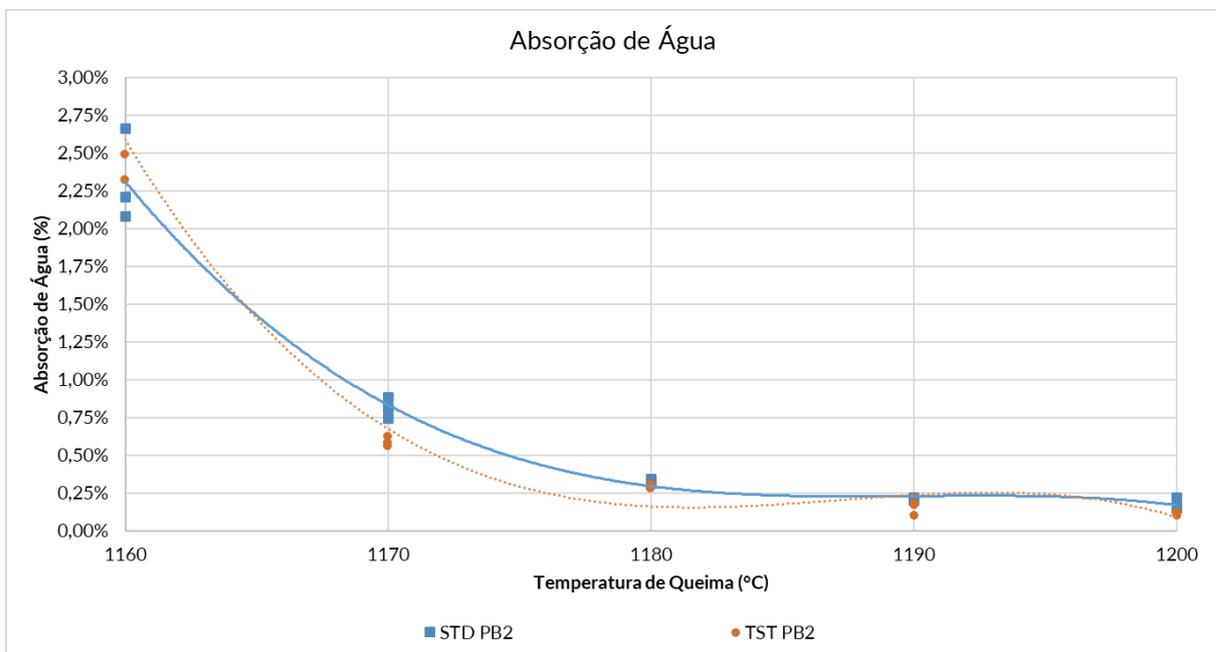


Fonte: O autor, 2024.

Com base na Figura 8, para alcançar uma Retração Linear (%RL) de cerca de 8,8%, que corresponde ao máximo da massa STD, para a massa de teste, conforme indicado pela curva de gresificação, estima-se que uma temperatura de aproximadamente 1172°C seja necessária.

Observando a Figura 9, verifica-se que a massa de teste atinge o limite de absorção (%AA) estabelecido pela norma, de 0,5%, quando submetida a essa temperatura. Esse cenário é considerado arriscado, especialmente considerando as possíveis variações nas condições do processo.

Figura 10 - Curva de Gresificação – Absorção de Água



Fonte: O autor, 2024.

Para alcançar a retração desejada, duas alternativas podem ser consideradas. A primeira seria aumentar a pressão de compactação na prensa, o que requereria um estudo de viabilidade econômica para avaliar sua aplicabilidade. A segunda alternativa seria aumentar a proporção de materiais refratários na composição da massa, proporcionando maior estabilidade dimensional.

6. CONCLUSÕES FINAIS

Após análises laboratoriais, foi constatado que a adição adequada dos resíduos em estudo pode resultar em melhorias significativas em diversas características. As formulações dos testes 9, 10, 11 e 12, contendo 3% de cada resíduo estudado, demonstraram os melhores resultados nas análises em geral. Esses testes revelaram melhorias significativas na carga de ruptura tanto em condições secas quanto queimadas, no módulo de resistência à flexão em ambos os estados, valores ótimos de absorção de água e as deformações piropelásticas mais baixas. No entanto, houve um aumento na retração linear, levantando preocupações em relação aos desvios dimensionais nas peças cerâmicas.

Diante da análise das curvas de gresificação da formulação adotada, constatou-se que para obter uma diminuição na retração resultaria em uma curva de absorção bastante próxima ao limite estabelecido, o que pode ser arriscado devido a possíveis variações no processo fabril.

Duas alternativas podem ser consideradas para atingir a retração desejada. A primeira seria aumentar a pressão de compactação na prensa, o que necessitaria uma análise de viabilidade econômica para avaliar sua aplicabilidade. A segunda alternativa, pode ser proposto um aumento na proporção da Quebra crua 1 na composição da massa, pois poderia diminuir a porcentagem de retração. A Quebra crua 1, por sua natureza refratária, desempenha um papel fundamental na conservação da forma e das dimensões das peças cerâmicas durante o processo de queima.

Portanto, conclui-se que o estudo realizado contribuiu para uma compreensão dos efeitos da utilização de resíduos de quebra na composição da massa, destacando a importância de práticas sustentáveis e a busca por soluções que promovam a redução do impacto ambiental sem comprometer a qualidade dos produtos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 13006:2020. Placas cerâmicas — Definições, classificação, características e marcação. Primeira edição, 11 de dezembro de 2020.

ALBERO, J. L. A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial Parte I: O Preenchimento das Cavidades do Molde. **Cerâmica Industrial**, v.5, n.5, 2000.

Brundtland G O, 1991. Comissão mundial sobre meio ambiente e desenvolvimento. Nosso futuro comum. 2ª ed. Rio de Janeiro: **Editora da Fundação Getúlio Vargas**

CALLISTER JR, William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução 5ª edição. Rio de Janeiro. **LTC Editora**, 2002.

CASAGRANDE, Marcos Cardoso et al. Reaproveitamento de resíduos sólidos industriais: processamento e aplicações no setor cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 13, n. 1/2, p. 34-42, 2008.

Centro Cerâmico do Brasil. **Programa setorial da qualidade de placas cerâmicas para revestimento**. Relatório setorial 047/2024. Disponível em: <https://www.ccb.org.br/pt/psq>. Acesso em: 17 abr. 2024

DE LIMA, Rafael Rodrigo Ferreira. A aplicação de resíduos no desenvolvimento de produtos sustentáveis na indústria cerâmica. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, p. 1-10, 2024.

DE OLIVEIRA MODESTO, Claudio et al. Deformação piropiástica em porcelanatos: Uma breve revisão. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, p. 1-13, 2023.

DE OLIVEIRA, Antonio Pedro Novaes; HOTZA, Dachamir. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. Ed. da UFSC, 2011.

FERRARI, K. R. Aspectos ambientais do processo de fabricação de placas de revestimentos cerâmicos (via úmida), com ênfase nos efluentes líquidos. Tese – Instituto de Pesquisas Energética Nucleares, São Paulo, 2000.

Relatório Luz do Desenvolvimento Sustentável no Brasil 2023. Disponível em: <https://gtagenda2030.org.br/relatorio-luz/relatorio-luz-do-desenvolvimento-sustentavel-no-brasil-2023/>. Acesso em: 26 abr. 2024

História da Cerâmica. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/historia-da-ceramica>>. Acesso em: 26 abr. 2024.

Lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 26 abr. 2024.

LIMA, I. Cerâmica Marajoara: Arte que resiste ao tempo! Disponível em: <https://portalamazonia.com/estados/para/ceramica-marajoara-arte-que-resiste-ao-tempo>>. Acesso em: 5 maio. 2024.

MAINARDI, P.H.; BIDOIA, E.D. Modelos estatísticos fatoriais: conceitos e aplicações. **Exatas Online**, v. 11, n. 1, p. 32-49, 2020

MARQUES, Maria Helena Vieira Pereira. Análise da variabilidade do processo de sinterização em uma indústria de revestimentos cerâmicos e de porcelanato usando a ferramenta CEP. 110 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção). UFPB / CT / DEP, Campus I - João Pessoa, 2017.

MEDEIROS JUNIOR, Nelson de Assis. Desenvolvimento de massa de revestimento cerâmico, relacionando o desempenho do Caulim e Argila Mataraca. 2018.

MELCHIADES, Fábio Gomes. Estudo comparativo entre as tecnologias via úmida e via seca para a preparação de massas de porcelanatos. 2011.

MONTE, M. V. R. C. Avaliação de engobes no aparecimento da mancha d'água em revestimentos cerâmicos. Dissertação. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares associada a Universidade de São Paulo, 2008.

MONTE, M. V. R. C. Avaliação de engobes no aparecimento da mancha d'água em revestimentos cerâmicos. Dissertação. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares associada a Universidade de São Paulo, 2008.

MONTGOMERY, Douglas C.; RUNGER, George C. Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. SCRIBD, 2021.

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

MOTTA, José Francisco Marciano et al. As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 7, n. 1, p. 33-40, 2002.

NASCIMENTO, Rhayane Silva Rodrigues do. Desenvolvimento de engobe impermeável para ciclo de queima rápida. 57 f. Trabalho de Conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química). Universidade Federal da Paraíba – João Pessoa, 2018.

NEGRE, F.; SANCHEZ, E. Avanços no processamento de pós atomizados para a fabricação de revestimentos cerâmicos. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 3, n. 1/2 jan./abril 1998.

Números do setor. Disponível em: <<https://www.ceramicsofbrazil.com/setor-ceramico/numeros-do-setor>>. Acesso em: 25 abr. 2024.

Oliveira A P N, Hotza D, 2015. Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos. 2ª ed. Florianópolis: **UFSC**.

OLIVEIRA, Maria Cecília [e] MAGANHA, Martha Faria Bernils. Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas branca e de revestimentos. São Paulo: **CETESB**, 2006. 90p. (1 CD): il.; 21 cm

Presidência da República, 2010. Lei nº 12305. Brasília: Presidência da República.

RIBEIRO, H. S. S. Indústria Ceramista Nacional, sua implantação e seu desenvolvimento, o surgimento do grês porcelanato, suas características físicas e geométricas. Monografia, Universidade Federal de Minas Gerais - Belo Horizonte, 2016.

RIBEIRO, M. J. P. M.; ABRANTES, João Carlos Castro. Moagem em moinho de bolas: Estudo de algumas variáveis e otimização energética do processo. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 7-11, 2001.

SANCHEZ, E. et al. Efeito da Composição das Matérias-Primas empregadas na fabricação de grês porcelanato sobre as fases formadas durante a queima e as propriedades do produto final. **Revista Cerâmica Industrial**, v 5, p 15-22,set/out, 2001.

SILVA, Jorge Elias da. Controle de processo. Curso de Tecnologia Cerâmica. SENAI, Tijucas, Santa Catarina, 2001

SILVEIRA, Maria Eduarda Gonçalves et al. Análise da influência da incorporação parcial de resíduos de placas cerâmicas com aditivo cristalizante em argamassas. **Cerâmica Industrial**, v. 28, n. 1, p. 1-11, 2023.

VIEIRA, Laercio Evaristo et al. Avaliação do comportamento térmico de uma placa cerâmica ao longo do processo de monoqueima em forno a rolos. 2002.