



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FÍSICA

JÉSSICA BEATRIZ DANTAS

Desenvolvimento de mármore sintético utilizando resíduos cerâmicos da indústria
cerâmica vermelha de Pernambuco

Cabo de Santo Agostinho - PE

2021

JÉSSICA BEATRIZ DANTAS

Desenvolvimento de mármore sintético utilizando resíduos cerâmicos da indústria cerâmica vermelha de Pernambuco

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física, Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Física.

Área de concentração: Materiais

Linha de pesquisa: Materiais para aplicações ambientais, energéticas e industriais.

Orientador: Prof. Dr. Vinícius Dantas de Araújo

Coorientador: Prof. Dr. Aureliano Xavier dos Santos

CABO DE SANTO AGOSTINHO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

D192d

Dantas, Jéssica Beatriz

Desenvolvimento de mármore sintético utilizando resíduos cerâmicos da indústria cerâmica vermelha de Pernambuco / Jéssica Beatriz Dantas. - 2021.
55 f. : il.

Orientador: Vinicius Dantas de Araujo.

Coorientador: Aureliano Xavier dos Santos.

Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Física, Cabo de Santo Agostinho, 2021.

1. Resíduos. 2. Mármore Sintético. 3. Chamote. 4. Cerâmica vermelha . 5. compósito. I. Araujo, Vinicius Dantas de, orient. II. Santos, Aureliano Xavier dos, coorient. III. Título

CDD 621

Jéssica Beatriz Dantas

Desenvolvimento de mármore sintético utilizando resíduos cerâmicos da indústria
cerâmica vermelha de Pernambuco

Dissertação apresentada à Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da
Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Física.

APROVADA EM: 11/02/2021

Banca examinadora

Prof. Dr. Vinícius Dantas de Araújo – UFRPE
Orientador

Prof. Dr. Aureliano Xavier do Santos – UFRPE
Coorientador

Prof. Dr. Carlos Augusto Escanhoela Júnior- UFABC
Membro Externo

Prof. Dra. Verônica Cristhina de Souza Diniz- UFRPE
Membro Interno

À minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus por estar comigo em todos os momentos e zelar pela minha vida.

A minha família, em especial os meus pais Nalma e Boaventura, minhas irmãs (Bárbara e Izadora), tio Binho e tio Olímpio.

Aos orientadores, Professor Vinícius Dantas de Araújo e Professor Aureliano Xavier dos Santos.

A todos os professores do Programa de Pós- Graduação em Engenharia Física, em especial os professores Sérgio Vladimir Barreiro DeGiorgi, Romildo Morant de Holanda e Martine Chevrollier.

A Professora Cecília pela disposição dos laboratórios de Materiais de Construção e Solos.

A Professora Verônica pela disposição do laboratório de Processamento Cerâmico.

A todos do laboratório de Nanotecnologia Aplicada e Ambiental- NanoA e do laboratório de Propriedades Mecânicas.

Aos meus professores de graduação que me apresentaram a carreira acadêmica e incentivaram a seguir para um mestrado, Jerusa Aragão, Djair Félix, Ricardo Marques, Ricardo Zaninelli e Giordano Gonzaga.

Aos amigos que conquistei durante o curso, Robson, Henrique, Sebastião, Léo e Torquato, obrigada por estarem ao meu lado nos melhores e nos piores momentos.

Aos amigos que me auxiliaram no desenvolvimento da pesquisa: Eduardo, Wesley, Renata e Felipe.

A todos que estiveram ao meu lado ajudando e apoiando durante as seleções de mestrado: Francisco Binas e a equipe AGM Geotécnica, em especial Thamires Sandrelle, Francine Alves, Amilton Júnior, Paulo Chagas e Dr. Abel Galindo.

A FACEPE pelo apoio financeiro.

RESUMO

A indústria da cerâmica vermelha é responsável por produzir uma quantidade significativa de resíduos, podendo chegar a 10% do total da produção. Estes, quando lançados ao meio ambiente de forma aleatória, impactam de forma negativa, ainda que não tenham compostos tóxicos em sua maioria. Hoje em dia há uma tendência crescente de reutilização de resíduos industriais, a fim de reduzir impacto ambiental. Uma alternativa típica para um resíduo deve ser incorporar num processo produtivo que possa ser economicamente viável. Pedras artificiais, ou mármore sintético, são compósitos particularmente rentáveis que simulam pedras ornamentais naturais. A utilização prática de uma pedra artificial ao invés de uma natural é baseada em vantagens técnicas, como a menor densidade da matriz poliméricas ($\sim 1 \text{ g/cm}^3$) em comparação com a pedra natural ($\sim 2 \text{ g/cm}^3$), o que torna a pedra artificial significativamente mais leve. O presente trabalho teve como objetivo a produção de peças de mármore sintético utilizando resíduos da indústria cerâmica vermelha, conhecido como chamote, como carga em matrizes de poliéster. As composições foram escolhidas utilizando planejamento experimental em rede simplex centróide $\{3,2\}$. Foram realizados ensaios mecânicos de flexão, compressão e impacto. Foi verificado que a granulometria do resíduo utilizado impacta diretamente no desempenho mecânico das peças produzidas, apresentando melhor desempenho as amostras com maior proporção de resíduo com granulometria mais fina. Os resultados são muito próximos aos encontrados na literatura para o mármore natural, indicando que o produto desenvolvido tem potencial de aplicação como pedra ornamental na indústria da construção civil, agregando valor ao resíduo gerado pela indústria da cerâmica vermelha e gerando oportunidades para um ciclo sustentável de gestão de resíduos.

Palavras-chave: resíduos, mármore sintético, chamote, cerâmica vermelha, compósito.

ABSTRACT

The red ceramic industry is responsible for producing a significant amount of waste, reaching up to 10% of total production. These, when released randomly to the environment cause a negatively impact, even if they do not have toxic compounds in their majority. Nowadays, there is a growing trend of reuse of industrial waste in order to reduce environmental impact. A typical alternative to waste is incorporate into a production process that can be economically viable. Artificial stones or synthetic marble, are particularly profitable composites that simulate natural ornamental stones. The practical use of an artificial stone rather than a natural one is based on technical advantages, such as the lower density of the polymer matrix (1g/cm^3) compared to the natural stone (2g/cm^3), which makes the artificial stone significantly lighter. The work presented here aimed the production of synthetic marble pieces using residues from the red ceramic industry, known as *chamote*, as load into polyester matrix. The compositions were chosen using experimental planning in a simplex centroid network {3.2}. Flexural bending, compression and impact tests were performed. It was verified that the granulometry of the residue used directly impacts on the mechanical performance of the parts produced, presenting better performance the samples with higher proportion of residue with finer granulometry. Results are similar to those found in the literature for natural marble, indicating that the developed product has potential for application as ornamental stone in the construction industry, adding value to the waste generated by the red ceramic industry and generating opportunities for a sustainable cycle of waste management.

Palavras-chave: waste, synthetic marble, chamote, red ceramic, composite.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Difratoograma de raio X da amostra de argila estudada por Saleiro; Holanda	18
Figura 2: Reação da resina Poliéster Insaturada.....	25
Figura 3: Fórmula química da resina poliéster ortoftálica	26
Figura 4: (a) Espaço amostral para experimentos com 3 variáveis independentes; (b) Superfície de resposta para todas as possíveis formulações dos 3 componentes e curva de nível dessa superfície de resposta.	30
Figura 5: (a) Corpos de prova para ensaio de flexão. (b) Ensaio de flexão em 3 pontos	36
Figura 6: Corpos de prova para o ensaio de compressão	37
Figura 7: Corpos de prova para o ensaio de impacto.....	37

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Projeções das superfícies de resposta e curvas de nível para (a)TRF, (b) TRC e (c) RI, calculadas a partir dos modelos lineares.	46
Gráfico 2. Projeções das superfícies de resposta e curvas de nível para (a) TRF, (b) TRC e (c) RI, calculadas a partir dos modelos quadráticos.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química da argila vermelha estudada por Saleiro; Holanda em peso (%)	19
Tabela 2: Composição de resíduos de construção e demolição	21
Tabela 3: Principais tipos de matrizes utilizadas em materiais compósitos.....	23
Tabela 4: Tipos de resinas poliéster insaturadas	26
Tabela 5: Especificações da resina líquida poliéster ortoftálica.....	32
Tabela 6: Propriedades mecânicas da resina poliéster ortoftálica.	33
Tabela 7: Composições obtidas através do planejamento em rede simplex centróide {3,2}, aumentado.....	35
Tabela 8: Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos do Mármore Artificial Produzido	38
Tabela 9: Valores encontrados na literatura para o resultado de resistência a flexão	40
Tabela 10: Resultados da Resistência à Compressão	41
Tabela 11: Resultado da energia absorvida no ensaio de impacto de corpo rígido.....	42
Tabela 12. Valores médios de TRF, TRC e RI para as diferentes composições estabelecidas pelo planejamento em rede simplex {3,2}, aumentado.....	43
Tabela 13. Equações correlacionando os valores de TRF, TRC e RI com as frações mássicas do resíduo de cerâmica vermelha nas malhas 8,10 e 16.....	43
Tabela 14. Estatísticas relevantes para análise de variância das variáveis TRF, TRC e RI para todas as composições.	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA	16
2.1	CERÂMICA VERMELHA.....	16
2.1.1	Matéria- prima argilosa.....	17
2.1.2	Etapas do processo de fabricação da cerâmica vermelha	19
2.2	RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA.....	20
2.3	MATERIAIS COMPÓSITOS.....	22
2.3.1	Compósitos reforçados com partículas	24
2.3.2	Matriz Polimérica	24
2.3.3	Resina Poliéster Insaturada	25
2.4	MÁRMORE SINTÉTICO	26
2.5	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	27
2.5.1	Erro/ Tipos de erros	28
2.5.2	Delineamento de Misturas.....	29
3	OBJETIVOS.....	31
3.1	GERAL	31
3.2	ESPECÍFICOS	31
4	METODOLOGIA	32
4.1	MATERIAIS	32
4.1.1	Resíduo cerâmico.....	32
4.1.2	Resina.....	32
4.1.3	Agente de cura.....	33
4.1.4	Desmoldante.....	33
4.2	PROCESSAMENTO DO MATERIAL.....	33
4.2.1	Britamento.....	33

4.2.2 Ensaio de peneiramento	34
4.2.3 Confeção dos corpos de prova.....	34
4.2.4 Delineamento de Misturas.....	34
4.2.5 Estudo Estatístico.....	35
4.3 ENSAIOS MECÂNICOS	36
4.3.1 Flexão em 3 pontos.....	36
4.3.2 Compressão	36
4.3.3 Impacto.....	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM 3 PONTOS	38
5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	41
5.3 RESISTÊNCIA AO IMPACTO.....	42
5.4 DELINEAMENTO DE MISTURAS	42
5.4.1 Superfícies de Resposta	45
6 CONCLUSÃO	48
7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	48
REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento desenfreado e contínuo de produção e consumo, foi intensificada a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) o qual representa uma das maiores problemáticas atuais da sociedade. Apenas em 2015, a geração de resíduos sólidos no Brasil representou cerca de 79,9 milhões de toneladas, dessa forma, a fim de minimizar os problemas decorrentes da má gestão de tais resíduos, foi promulgada a lei nº 12.305/2010 que regulamenta a Política Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos (PNRS). A nova lei estabelece os princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas de forma isolada pelo Governo Federal, Municípios ou indivíduos na gestão dos resíduos, ressaltando também as responsabilidades dos governadores e das autoridades públicas. A PNRS apresenta também diretrizes para o recolhimento, tratamento e disposição final, bem como formas de reduzir a produção de tais resíduos (ALFAIA; COSTA; CAMPOS, 2017).

Dentro da categoria de resíduos sólidos urbanos encontramos os resíduos da construção civil (RCC), o qual de acordo com o CONAMA 307/2002 esses resíduos são provenientes das reformas, construções, reparos, demolições e resultantes da preparação e escavação de terrenos, sendo estes: tijolos, concreto, blocos cerâmicos, rochas, solos, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, compensados, argamassa, gesso, forros, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros (materiais comumente conhecidos por metralha).

A indústria da cerâmica vermelha é responsável por produzir uma quantidade significativa de resíduos, podendo chegar a 10% do total da produção. Estes, quando lançados ao meio ambiente de forma aleatória, impactam de forma negativa, ainda que não tenham compostos tóxicos em sua maioria. A cerca desse assunto, estudos têm sido desenvolvidos para que os resíduos gerados nesse ramo de empreendimento sejam cada vez mais aproveitados (DIAS, 2004; GONÇALVES, 2007; GRANATO, 2012; WADA, 2010)

O segmento de cerâmica vermelha brasileiro integra o ramo de produtos de minerais não metálicos da indústria de transformação, esta conta com um alto número de unidades produtivas e depósitos de argilas comuns espalhadas por todo o país, devido a composição do substrato geológico brasileiro (CABRAL et al., 2012). Dentre as regiões do Brasil com maior importância na produção cerâmica estão as regiões Sudeste, Sul e Nordeste e somente no estado de Pernambuco, através de informações fornecidas pelo Sindicere - PE no seu relatório anual de 2010, o setor gerou no estado 5 mil empregos diretos e 15 mil indiretos, realçando seu potencial de crescimento.

Atualmente há uma tendência crescente de reutilização de resíduos industriais, a fim de reduzir impacto ambiental. Uma alternativa típica para um resíduo deve ser incorporada num processo produtivo que possa ser economicamente viável(GOMES et al., 2018). De fato, atualmente é muito utilizada a adição de resíduos em matrizes poliméricas formando compósitos.

Pedras artificiais, ou mármore sintético, são compósitos particularmente rentáveis que simulam pedras ornamentais naturais. A utilização prática de uma pedra artificial ao invés de uma natural é baseada em vantagens técnicas, como a menor densidade da matriz poliméricas ($\sim 1 \text{ g/cm}^3$) em comparação com a pedra natural ($\sim 2 \text{ g/cm}^3$), o que torna a pedra artificial significativamente mais leve. Outra vantagem relativa das pedras artificiais é a baixa quantidade de poros e falhas(GOMES et al., 2018).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo a produção de peças de mármore sintético utilizando resíduos da indústria cerâmica vermelha, conhecido como chamote, como carga em matrizes de poliéster. O material obtido foi caracterizado quanto às suas propriedades mecânicas através de ensaios mecânicos de flexão, compressão e impacto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CERÂMICA VERMELHA

Muito conhecidos por serem materiais frágeis e porosos, os materiais cerâmicos são constituídos a partir da combinação de elementos metálicos e não metálicos, sendo assim considerados versáteis pela natureza química de suas ligações iônicas e covalentes. O tipo de ligação pode determinar as propriedades dos materiais, no caso dos cerâmicos: alta temperatura de fusão, alto módulo de elasticidade, alta resistência ao desgaste, baixa propriedade térmica, alta dureza, alta fragilidade, baixa ductibilidade e bons isolantes(ELICHE QUESADA; PEREZ VILLAREJO; SÁNCHEZ SOTO, 2019).

Esses materiais podem ser divididos em: cerâmicas tradicionais e cerâmicas avançadas. As tradicionais são baseadas em silicatos, e são fabricados a partir de matérias-primas naturais, constituindo um importante mercado, como: cimento, refratários e produtos de argila. Já as cerâmicas avançadas são fabricadas a partir de matérias-primas artificiais que sofreram um importante tratamento químico para obter alta pureza e melhoria de suas características físicas, são fabricadas por métodos avançados e sofisticados, como: carbonetos, nitretos, boretos, óxidos puros, entre outros (ELICHE QUESADA; PEREZ VILLAREJO; SÁNCHEZ SOTO, 2019).

Dentro da categoria de cerâmicas tradicionais temos a cerâmica vermelha, Juan et al (2010) explica que os produtos cerâmicos são fabricados a partir de materiais naturais que possui uma alta proporção de minerais de argila, o qual sofrem um processo de desidratação, seguido por queima controlada a temperaturas entre 700°C e 1000°C, tal processo de cozimento ativa os minerais da argila fornecendo ao material propriedades pozolânicas. Esse tipo de cerâmica de acordo com (PAZ; MORAIS; HOLANDA, 2014) têm grande importância nas obras de construção civil, pois é a matéria- prima utilizada para a fabricação de materiais como telhas e tijolos, que são amplamente utilizados nas obras não apenas pela questão cultural, mas também por seu baixo custo e bom isolamento térmico e acústico.

Sendo considerada uma importante atividade econômica no Brasil, mesmo possuindo ainda uma produção muitas vezes rudimentar e prejudicial para o meio ambiente. As etapas de produção são consideradas as mesmas: tempero da argila, preparação da mistura, moldagem, secagem e processamento térmico no forno. No Brasil as indústrias de cerâmica vermelha estão espalhadas por todo o país, sendo aproximadamente 6900 indústrias de cerâmica, gerando 293 mil empregos, 900 mil indiretos e uma renda anual por volta de R\$ 18 bilhões, tais indústrias em sua maioria sendo de propriedade familiar ou de pequenas indústrias (ABRAHAO; CARVALHO, 2018).

No processo de fabricação de cerâmica vermelha os principais fatores envolvidos no processo são a composição das matérias-primas e o ciclo de queima. É importante destacar que esses fatores influenciam tanto na qualidade quanto no custo final e que o processo de queima é irreversível, sendo este o responsável pela forma final da peça cerâmica. No processo de queima da argila os corpos cerâmicos passam por uma série complexa de reações físico- químicas, o qual as principais para cauliniticos são: desidroxilação de minerais de argila, desidratação de hidróxidos, transformação de fase e fusão parcial com a formação de uma fase líquida a uma temperatura elevada (SALEIRO; HOLANDA, 2012).

2.1.1 Matéria- prima argilosa

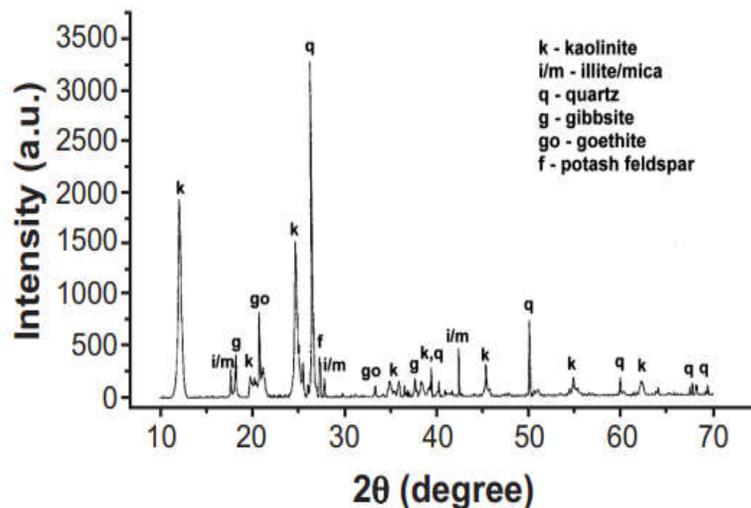
A indústria da cerâmica vermelha consome aproximadamente 40 milhões de toneladas/ano de argila (principal matéria- prima), tais argilas sendo tipo comum apresentam como característica principal alta plasticidade, como também alta porosidade (MOTTA et al., 2002).

Ainda de acordo com (MOTTA; ZANARDO; CABRAL JR, 2001), a argila é um material natural, terroso, com granulometria fina e de fácil moldagem por sua característica

plástica na presença de determinada proporção de água. A matéria-prima argilosa pode apresentar diferentes composições químicas, mineralógicas, plasticidade e cor devido à sua formação geológica e de fatores de alteração durante a sua consolidação. Logo, tais características químicas, mineralógicas, físicas e microestruturais se inter-relacionam influenciando as propriedades cerâmicas dos produtos da indústria de cerâmica vermelha.

Argila vermelha consiste de uma mistura entre minerais naturais chamados de “minerais de argila”, são estes: quartzo, feldspato, óxido de ferro, óxido de titânio, entre outros. Na matéria-prima argilosa os maiores teores são para: a sílica (quartzo, cristobalite e tridimite), óxidos e hidróxidos de alumínio (gibbsite, corinolo, diásporo, boemita, entre outros), carbonatos (dolomita, calcita, aragonite, diobertite, siderite...) e materiais de ferro (lepidocrocita, maguemita, etc)(DE SOUZA SANTOS, 1975). A figura 1 apresenta o padrão de difração de raio X (DRX) e a tabela 1 apresenta a composição, ambos encontrados por (SALEIRO; HOLANDA, 2012).

Figura 1 –Difratograma de raio X da amostra de argila estudada por Saleiro; Holanda



Fonte: Saleiro, Holanda, 2012

Tabela 1 – Composição química da argila vermelha estudada por Saleiro; Holanda em peso (%)

SiO ₂	40,31
Al ₂ O ₃	32,15
Fe ₂ O ₃	10,83
TiO ₂	1,49
CaO	0,32
MgO	0,78
K ₂ O	2,37
Na ₂ O	0,62
MnO	0,10
LOI	11,03

Fonte: Adaptado de Saleiro; Holanda, 2012

2.1.2 Etapas do processo de fabricação da cerâmica vermelha

As etapas básicas do processo de produção da indústria de cerâmica vermelha são divididas em quatro etapas, sendo estas: extração, moldagem, secagem e queima.

Extração de matéria-prima:

Esta etapa é caracterizada pela atividade de extração da argila no parque de armazenagem para a preparação da massa a ser utilizada para a produção de produtos cerâmicos, no caso de empresas que não possuem depósitos de argila, tal matéria-prima é obtida a partir de fornecedores (OLIVEIRA et al., 2015).

b. Moldagem:

Na fase de preparação é realizada a mistura das matérias-primas em proporções específicas, a depender das características desejadas para o produto final. Os grandes grumos de argila são eliminados em um desintegrador, o qual tal etapa é seguida por um misturador (onde é adicionado água à mistura), quando a plasticidade ideal é alcançada, a mistura é homogeneizada -sendo removidos bolhas de ar e cascalho- para que então seja iniciado o processo de moldagem (ABRAHAO; CARVALHO, 2018).

Após a elaboração da mistura (que consiste em alguns tipos de argila, água e resíduos) é obtida a massa, seguindo então para a etapa de moldagem, dessa forma a conformação é realizada a partir de extrusão e corte (DE SOUZA SANTOS, 1975).

A extrusão trata-se de um método de conformação, o qual uma massa plástica rígida é “empurrada” a fim de formar uma barra de seção contínua, muito usada para produzir formas complexas (como é o caso de tijolos e coberturas para lajes). O aparelho usado é o extrusor de vácuo, onde a massa é colocada em seu interior que é forçado por um êmbolo através de um bocal com um dado formato, a seção transversal da coluna extrudida na forma e tamanho desejado é cortado, obtendo assim as peças cerâmicas. Já o corte pode ser realizado com

cortadores manuais ou automáticos, onde após o corte por inspeção visual as peças são selecionadas e seguem para a indústria de secagem (OLIVEIRA et al., 2015).

c. Secagem:

Com o objetivo de remover a água usada no processo de formação necessária para obter a massa plástica, tal processo evita a deformação e fissuras na peça, dessa forma é importante que a água seja eliminada de modo gradual e lento. O processo de secagem é constituído de duas fases: secagem natural e artificial. A secagem natural é realizada em locais cobertos, sendo mais lenta e empírica, com duração de aproximadamente sete dias, por causa da ausência e controle de temperatura pode ocorrer aparecimento de fissuras, contudo, apresenta baixo custo. Já na secagem artificial é possível atingir uma maior produtividade, por causa da utilização de secadores com controle de temperatura, porém, este tipo de secagem é restrito a grandes empresas (OLIVEIRA et al., 2015).

d. Queima:

Quando a umidade atinge aproximadamente 6% as peças estão prontas para a etapa de queima, sendo colocadas em forno a aproximadamente 900°C, onde as características finais como cor e resistência são obtidas (ABRAHAO; CARVALHO, 2018).

2.2 RESÍDUO DE CERÂMICA VERMELHA

O resíduo de cerâmica vermelha é classificado de acordo com o CONAMA (Nº 307/2002), resolução 448/12, Art. 3º, como categoria I/ Classe A, que são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados. É necessário também ressaltar o Art. 4º que impõe aos geradores priorizar a não geração do resíduo sólido, e secundariamente, reduzir, reutilizar, reciclar, fazer uso do tratamento dos RCC's e da disposição ambientalmente correta dos rejeitos, como também a § 1º a qual cita que os resíduos da construção civil não podem ser dispostos em aterros de Resíduos sólidos urbanos, "lixões", encostas, terrenos, corpos d'água ou áreas protegidas por lei.

Mesmo a indústria cerâmica contribuindo significativamente na economia, já que esta representa cerca de 1% do PIB Nacional brasileiro, o qual aproximadamente 40% deste total faz referência ao setor da cerâmica vermelha, tal atividade produtiva possui alto potencial extrativista e poluidor, afetando o meio ambiente desde a extração da argila (matéria-prima) até a etapa de destinação final, em que se refere ao processo produtivo e transporte (MACEDO et al., 2008). Dessa forma, alternativas que tenham como objetivo proporcionar uma nova destinação a esses resíduos, além de ajudar a proteger o meio ambiente, também

contribui para a redução no uso de matérias-primas. Outra vantagem são os benefícios em termos de energia, principalmente quando o material passou por um processo de queima (como é o caso da cerâmica vermelha), onde as reações de decomposição altamente endotérmicas já ocorreram, recuperando então a energia incorporada anteriormente durante a produção (ANDRES JUAN, 2010).

Mais da metade dos resíduos da construção correspondem à fração de cerâmica, como apresentado na tabela 2. Dessa forma, é de extrema importância a implementação de medidas de tratamento e recuperação desses resíduos (ANDRES JUAN, 2010).

Tabela 2: Composição de resíduos de construção e demolição

Materiais	Composição (%)
Fração de pedra	75
Tijolos e outros materiais cerâmicos	54
Concreto	12
Pedra	5
Areia, brita e outros agregados	4
Restante	25
Madeira	4
Vidro	0,5
Plástico	1,5
Metais	2,5
Asfalto	5
Gesso	0,2
Lixo	7
Pape	0,3
Outros	4

Fonte: Adaptado de Juan et al., 2010

Dentre as alternativas para a minimização desta problemática, têm-se a implementação de tecnologias limpas nas indústrias de cerâmica vermelha, a qual visa melhorar não apenas a qualidade de seus produtos mas também a produtividade e a competitividade no mercado, tais tecnologias são: substituição de combustíveis fósseis por biomassa no processo de sinterização, a implementação de eficiência energética para reduzir o consumo de energia elétrica, preparação da massa da argila para reduzir o consumo de matéria- prima, entre outros. Contudo, existem fatores restritivos que “impedem” a implementação de tecnologias limpas nas indústrias de cerâmica vermelha, são eles: O fator restritivo institucional - que está relacionado com a influência do governo e das instituições governamentais na inovação tecnológica ou de qualquer outra influência que possa impedir tais ações; O fator restritivo econômico - Faz referência às dificuldades na obtenção do crédito, elevadas taxas de juros para empréstimos, altos custos de implementação e outros obstáculos que possam dificultar a obtenção de recurso financeiro para investimento de tecnologias limpas; Fator restritivo

tecnológico - Representa a ausência de conhecimento e capacidade técnica das instituições/empresas, como também inadequada infraestrutura destas; e o Fator sociocultural - que são os impedimentos acarretados a partir do comportamento da sociedade/ comunidade, como também dos membros das indústrias (temem as mudanças causadas pela modernização de produtos e processos)(DA SILVA; MÉXAS; QUELHAS, 2017).

Uma destinação dos resíduos que vêm ganhando espaço dentro de olarias é a adição dos cacos (triturados) na massa para fabricação de novas peças, outras destinações como a adição deste resíduo na produção de argamassa, como apresentado por (SILVA J.; DE BRITO J.; VEIGA R., 2010), e agregado fino em concreto não estrutural e estrutural, como estudado por (DEMIR; ORHAN, 2003) e (NEPOMUCENO; ISIDORO; CATARINO, 2018) respectivamente, são algumas formas eficientes de reaproveitar tal material.

2.3 MATERIAIS COMPÓSITOS

Os compósitos possuem como característica principal o desenvolvimento de um novo tipo de material a partir da combinação de diferentes classes de materiais (cerâmicas, polímeros e metais), exibindo uma proporção significativa das propriedades de cada fase que o constitui. Dessa forma, os materiais compósitos podem apresentar combinações de propriedades que inicialmente não podem ser atendidas por qualquer cerâmica, polímero ou metal (CALLISTER; RETHWISCH, 2012). Logo, essa junção de materiais pode formar materiais diferentes, com propriedades superiores, ou até mesmo melhores em determinados aspectos, em relação às propriedades das fases individuais que os compõem.

A maioria dos compósitos são constituídos por duas fases: matriz e reforço, e o seu desempenho depende diretamente da relação entre a matriz, carga (reforço) e a interface carga/ matriz (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A matriz é o principal componente de suporte da carga que rege as propriedades mecânicas do material, fornece proteção para a fase de reforço, colagem, suporte e transferência de tensão (DANIEL; ISHAI, 2006), a tabela 3 apresenta os principais tipos de matrizes para materiais compósitos.

Tabela 3: Principais tipos de matrizes utilizadas em materiais compósitos

Principais tipos de matriz	Polímero	Resinas poliéster
		Resina epóxi
		Poliuretano
	Metal	Alumínio
		Magnésio
		Cobre
		Titânio
	Cerâmica	Carbeto de silício
		Cimento Portland
		Nitreto de silício
		Alumina

Fonte: Adaptado de Juan et al , 2010

Já o reforço possui influência tanto nas propriedades finais do compósito, como também no valor do produto final. Mais de um tipo de reforço pode ser adotado, a fim de obter uma combinação híbrida com o objetivo de possuir propriedades diferentes e/ou reduzir custos (RIBEIRO, 2011).

A região responsável pela transferência de carga entre a matriz e o reforço é a interface, desta forma, é crucial uma maior atenção quanto à qualidade desta interação, pois interfere diretamente no desempenho mecânico do material compósito, para garantir uma boa interação é importante que haja uma maior área de contato possível entre as fases que constituem o compósito (DANIEL; ISHAI, 2006).

Contudo em alguns outros materiais, entre a fase de reforço e matriz pode desenvolver a formação de uma terceira fase, sendo esta denominada de interfase. Daniel e Ishai explicam que mesmo possuindo dimensões pequenas, esta desempenha um papel importante tanto no controle dos mecanismos e propagação de falhas, como também na tenacidade à fratura e comportamento geral de tensão-deformação (2006).

O termo interfase refere-se a uma zona tridimensional e o termo interface a uma zona bidimensional. O termo interfase foi utilizado pela primeira vez por Sharpe em 1974, atualmente tal termo é amplamente usado para indicar a presença de uma zona de alteração química e/ou mecânica entre fases adjacentes. Sendo assim, na zona de interfase ocorre uma alteração gradual das propriedades de uma fase para outra, em vez de uma mudança brusca, como ocorre na interface (JESSON; WATTS, 2012).

2.3.1 Compósitos reforçados com partículas

Composto por partículas como reforço (os quais podem possuir diversos tamanhos e formas) e aglutinante como matriz (DANIEL; ISHAI, 2006), os compósitos particulados podem possuir vantagens como: resistência aprimorada, aumento da temperatura operacional e resistência a oxidação (KAW, 2006).

Em sua maioria, a fase particulada é mais dura e mais rígida que a matriz. Tais partículas, usadas como reforço, tendem a restringir o movimento da fase matriz nas proximidades de cada partícula. Parte da tensão recebida pela matriz é transferida para as partículas, e estas suportam uma fração da carga. Um fator importante nesse tipo de compósito é que quanto mais forte a ligação na interface matriz-partícula, maior é o grau de reforço e conseqüentemente o comportamento mecânico (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

2.3.2 Matriz Polimérica

O compósito de matriz polimérica (CMPs) pode ser obtido pela mistura em quantidades previamente estabelecidas de resina e catalisador, após o processo de polimerização é obtido um material sólido, que apresenta propriedades mecânicas razoáveis.

Por possuírem baixo custo, alta resistência e princípios simples de fabricação, são considerados os compósitos mais comuns. Os CMPs apresentam como desvantagens baixas temperaturas de operação, alto coeficiente de expansão térmica e umidade, como também baixa propriedade elástica (KAW, 2006).

De acordo com (FLOREA; CARCEA, 2012), os métodos de fabricação mais importantes de compósitos à base de polímeros são:

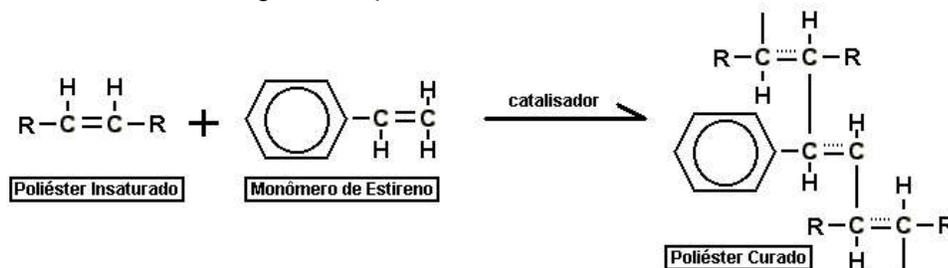
- a. Prensagem a frio: É usado molde (geralmente de metal e dividido em duas partes), o qual após a mistura ser despejada no recipiente em questão, é mantida sob pressão até que o fortalecimento da peça moldada esteja completo. Tal processo apresenta como vantagem a produção de grandes séries, diminui as perdas de material e as peças apresentam bons acabamentos em ambos os lados. Apresenta como desvantagem a necessidade de equipamento.
- b. Prensagem a quente: Os materiais são retidos em molde fechado sob pressão e temperatura elevada. Esse método apresenta como vantagem alta produtividade e melhores características físicas e mecânicas.

2.3.3 Resina Poliéster Insaturada

A resina de poliéster insaturada (UPR) é um polímero obtido a partir da reação de policondensação entre poliácidos e poliálcoois, com a liberação de uma molécula de água. A UPR atinge o seu processo de cura com base no uso de endurecedores, alcançando uma forma sólida. Na resina de poliéster insaturada líquida é possível usar pós ou grãos de diversos tamanhos como reforço da matriz polimérica, estes fornecem propriedades de resistência e rigidez, ou qualidades estéticas, como a “imitação” de mármore ou pedras naturais, que em alguns casos, chegam a atingir resultados de propriedades mecânicas superiores aos naturais (POLYNT, [s.d.]).

O poliéster insaturado é produzido quando algum dos reagentes possui insaturações. A insaturação advém da presença de ligações duplas existentes na cadeia molecular. A partir da ação de um catalisador (peróxido orgânico, radiação ou calor) as ligações duplas são quebradas, reagindo novamente entre si, originando agora um polímero tridimensional com características termoestáveis, infusíveis e irreversíveis (SILAEX, 2018). A figura 2 apresenta a reação descrita.

Figura 2: Reação da resina Poliéster Insaturada



Fonte: Silaex, 2018

Dentre as resinas poliéster insaturadas temos: ortoftálica, tereftálica, isoftálica, isoftálica com NPG e bisfenólica, como detalha a tabela 4, na qual a mais usada é a ortoftálica.

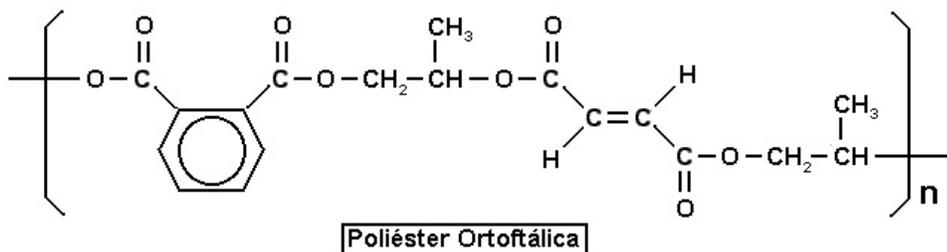
Tabela 4: Tipos de resinas poliéster insaturadas

Principais tipos de resinas poliéster insaturadas	
Ortoftálica	O tipo de resina mais utilizado, custo inferior, recomendada para usos básicos e não nobres
Tereftálica	Resistência física pouco superior à ortoftálica, contudo apresenta baixa resistência UV
Isoftálica	Apresenta melhores característica mecânicas, químicas e térmicas em relação às misturas
Isoftálica com NPG	O NPG melhora a resistência à hidrólise
Bisfenólica	Tem como característica melhores características químicas e térmicas

Fonte: Adaptado de Silaex, 2018

A resina ortoftálica possui propriedades mecânicas e químicas inferiores em comparação às demais, pela sua dificuldade em obter polímeros com alto peso molecular, a figura 3 apresenta a fórmula química da resina em questão.

Figura 3: Fórmula química da resina poliéster ortoftálica



Fonte: Silaex, 2018

2.4 MÁRMORE SINTÉTICO

Desenvolvido artificialmente a partir de resina de alta resistência, catalisador e reforço, o mármore sintético oferece diversas vantagens em relação ao natural, como: alta resistência mecânica, resistência à intempéries, dureza, resistência ao calor, resistência a manchas e ótimo processabilidade, estes possuem ainda custo inferior e flexibilidade de design, além de poder apresentar tanto cor uniforme como também variações aleatórias (se assemelhando a pedra natural). Enquanto que o mármore natural é limitado a superfícies planas, o sintético é mais facilmente moldado, permitindo melhor flexibilidade no desenvolvimento de peças como banheira por exemplo (BERA et al., 2012).

No geral os métodos de processamento para a fabricação do mármore artificial são semelhantes, já que consiste da mistura da matriz (com base na literatura as resinas mais utilizadas são as acrílicas, epóxi e poliéster), catalisador (responsável pelo início da reação

polimérica) e reforço (a fase reforço mais utilizada na indústria trata-se do calcário e da dolomita, contudo esta pode ser variada). Após a mistura desses componentes, a massa pode ser simplesmente despejada no molde, sendo desmoldada após a finalização da reação de cura ou pode ainda adicionar no processo produtivo etapas que auxiliam no aumento das propriedades mecânicas, como: compactação, vibração, vibrocompressão, tratamento por microondas ou adição de agente de acoplamento na mistura (BERA et al., 2012; RIBEIRO, 2011).

2.5 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento experimental é a definição de uma sequência de coleta de dados experimentais a fim de atingir certos objetivos (Barros Neto, 1996), como: Identificar o ajuste dos parâmetros do processo garantindo qualidade e produtividade superiores e menor custo do processo. Dessa forma, para a identificação correta do ajuste ótimo, é importante planejar a coleta de dados, pois em determinados experimentos os dados são coletados estabelecendo posteriormente conclusões sem considerar como tais dados foram obtidos, contudo, um procedimento de coleta realizado de forma errônea pode acarretar em desperdício financeiro e resultados diferentes da realidade, logo, planejar um experimento relaciona-se à definição dos dados que serão coletados, embasando as conclusões que serão obtidas (ECHEVESTE, 1997). Dessa forma um bom planejamento é baseado no projeto de um experimento que seja capaz de fornecer a informação que estamos procurando, sendo então de extrema importância antes de tudo saber o que se está procurando, pois dependendo do que se deseja algumas técnicas serão mais vantajosas que outras e vice versa. O pesquisador que não utiliza o método do planejamento experimental se arrisca a obter conclusões duvidosas ou simplesmente a não obter conclusões, desperdiçando tempo e dinheiro, sendo assim, a estatística é de fundamental importância para não apenas planejar, mas realizar experimentos de forma eficiente (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2001).

Tal planejamento pode ocorrer pelo método de delineamento de mistura, o qual depende unicamente das proporções relativas dos ingredientes que compõem a mistura, e não da quantidade total da mistura (no experimento de quantidade de mistura, a quantidade de mistura também é variada, onde seu resultado depende tanto das proporções relativas dos ingredientes, como também da quantidade total dos ingredientes). Já o método de experimento fatorial estuda a resposta sobre alguma quantidade observável de dois ou mais fatores, podendo ser estes temperatura e fonte de matéria- prima, para este método é escolhido

uma série de valores ou níveis de cada fator, onde todas as combinações dos níveis de todos os fatores são testados, dessa forma o objetivo do experimento fatorial consiste na mudança da resposta ao alterar o nível de cada fator, mantendo os níveis dos outros fatores fixos, podendo também alterar os níveis de dois ou mais fatores de forma simultânea (CORNELL, 2002).

2.5.1 Erro/ Tipos de erros

A variabilidade que não é explicada por influências conhecidas é classificada como erro experimental. Na grande maioria das vezes, apenas uma pequena parcela do erro experimental é atribuída a erros de medição. Um projeto experimental bem elaborado busca evitar ao máximo que os efeitos reais sejam “camuflados” por erros experimentais, impedindo que o pesquisador acredite erroneamente em resultados não verdadeiros. Com o uso de planejamento experimental a influência do erro é reduzida consideravelmente, fornecendo ainda medidas de precisão das quantidades estimadas no estudo, sendo possível avaliar se há evidências sólidas da existência de efeitos reais, aumentando assim a probabilidade do pesquisador ser direcionado a resultados confiáveis e não duvidosos (BOX; HUNTER; HUNTER, 2005). Os tipos de erros mais frequentes são:

- Grosseiro

“Os erros grosseiros são enganos que podem ocorrer na medição ou nos cálculos. Dessa forma, se existir qualquer suspeita de erro em alguma leitura, esta deve ser repetida, se possível, ou eliminada do conjunto de dados” (VUOLO, 1996).

- Sistemático

“O erro sistemático apresenta o mesmo resultado quando a medição é repetida, dessa forma, não pode ser avaliado simplesmente repetindo as medições. Estes podem resultar de erro na calibração do instrumento, efeitos do ambiente sobre o experimento, ou decorrer de pequenas falhas de procedimento ou limitações do observador” (VUOLO, 1996).

- Aleatório

“Resultam de variações aleatórias no resultado da medição, devido a fatores que não podem ser controlados ou que, por qualquer motivo, não são controlados” (VUOLO, 1996).

2.5.2 Delineamento de Misturas

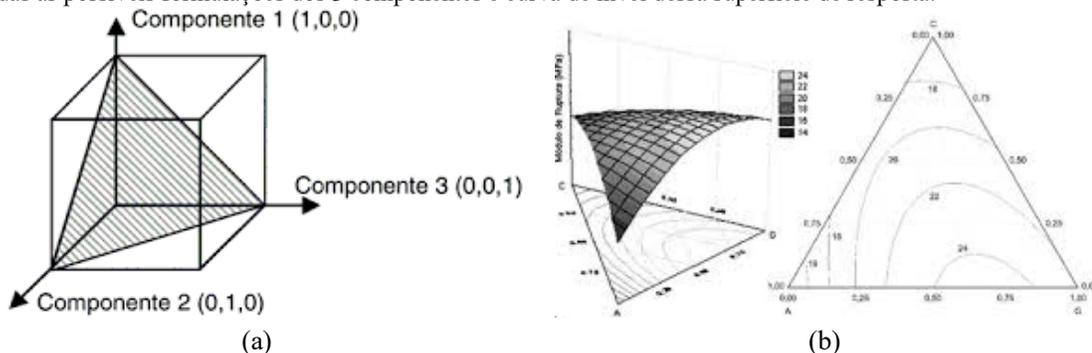
O objetivo geral de um experimento com composições é, por meio de superfície de resposta, tornar possível a estimativa das propriedades de um sistema multicomponente, a partir de um número limitado de observações. Tais observações são obtidas através de combinações pré-selecionadas dos componentes a fim de tentar determinar quais delas otimizam a resposta (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1996).

Nesse tipo de planejamento experimental as propriedades de uma composição são determinadas pelas proporções de seus componentes, e não pela quantidade total. As proporções de todos os componentes de uma composição não são independentes, logo, a soma de todas elas deve totalizar 100%. Dessa forma, para uma mistura com q componentes tem-se:

$$\sum_{i=1}^q x_i = x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1, \quad (1)$$

Sendo x_i a proporção do i -ésimo componente numa escala em que 100% corresponde a 1. Tal restrição torna o espaço disponível para experimentação mais restrito. Para sistemas com 3 fatores independentes é possível investigar todos os pontos contidos no cubo, como apresentado na figura 4(a), nesse caso a equação (x) torna-se $x_1 + x_2 + x_3 = 1$, essa equação corresponde geometricamente a um triângulo equilátero inscrito no cubo, como apresenta a figura 4(a), onde os vértices correspondem aos componentes puros e os lados às composições binárias, e os pontos localizados no interior do triângulo representam as possíveis combinações de três componentes. A variação de uma determinada propriedade com a composição pode ser representada por uma superfície de resposta acima do triângulo, como apresenta a figura 4(b). Já a representação dessa superfície por curvas de nível, é obtida por um diagrama triangular (MONTGOMERY, 1997), como mostrado na figura 4(b).

Figura 4: (a) Espaço amostral para experimentos com 3 variáveis independentes; (b) Superfície de resposta para todas as possíveis formulações dos 3 componentes e curva de nível dessa superfície de resposta.



Fonte: Campos et al, 2007.

A localização e o número das composições selecionadas no espaço amostral em que as composições são representadas, geralmente definem-se através de uma rede de pontos com espaçamento uniforme, tal representação, conhecida como arranjo Simplex $\{q,m\}$, sendo q a quantidade de componentes e m o parâmetro de espaçamento no arranjo. O planejamento simplex $\{q,m\}$ é embasado por um conjunto de coordenadas, sendo as proporções de cada componente tomadas a $m+1$ valores igualmente espaçados de 0 a 1, o qual todas as combinações possíveis são formadas pelos componentes da equação 1 (CAMPOS et al., 2007).

$$x_i = 0, \frac{1}{m}, \frac{2}{m}, \dots, 1 \text{ sendo } i = 1, 2, \dots, q \quad (1)$$

De acordo com (CAMPOS et al., 2007). Para um sistema com três componentes ($q = 3$), o fator de espaço disponível é um triângulo equilátero, sendo as proporções de cada componente 0, $\frac{1}{2}$, 1 quando $m=2$. Dessa forma o simplex $\{3,2\}$ apresenta seis pontos localizados nas arestas do triângulo: $(x_1, x_2, x_3) = (1,0,0), (0,1,0), (0,0,1), (\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0), (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2}), (0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$. Os três pontos $(1,0,0), (0,1,0), (0,0,1)$ ou respectivamente $x_1 = 1, x_2 = x_3 = 0$; $x_1 = x_3 = 0, x_2 = 1$; $x_1 = x_2 = 0, x_3 = 1$ representam os componentes puros e encontram-se localizados nos três vértices do triângulo. Logo, os pontos $(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}, 0), (\frac{1}{2}, 0, \frac{1}{2})$ e $(0, \frac{1}{2}, \frac{1}{2})$ representam as combinações binárias ou de dois componentes, estes estão localizados no centro das arestas do triângulo. A rede simplex também pode apresentar pontos no centróide. Nesse caso, existirão além de $(2q-1)$ pontos, os pontos do centróide $(1q)$. Dessa forma, o planejamento simplex centróide é utilizado com o objetivo de observar a influência real da mistura dos q componentes.

3 OBJETIVOS

3.1 GERAL

Produzir peças de mármore sintético utilizando resíduos da indústria cerâmica vermelha (chamote), como carga em matriz poliéster.

3.2 ESPECÍFICOS

- Avaliar a estrutura física e a granulometria do resíduo cerâmico (chamote);
- Obter as condições ideais de incorporação do chamote na matriz de poliéster através de planejamento experimental;
- Caracterizar o mármore sintético obtido quanto suas propriedades mecânicas.

4 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados todos os materiais utilizados para o desenvolvimento do compósito em estudo, como também a metodologia utilizada para a elaboração do mesmo e as técnicas de caracterização.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Resíduo cerâmico

O resíduo utilizado foi gerado na indústria de cerâmica vermelha a partir da produção de tijolos, sendo fornecido pela Cerâmica São José, localizada na cidade de Paudalho- PE.

4.1.2 Resina

Foi empregada resina de poliéster insaturada ortoftálica pré-acelerada, de cor escura, totalmente polimerizável, de baixa reatividade e baixa viscosidade, da marca IBEX químicos e compósitos.

As tabelas 5 e 6 apresentam as especificações técnicas e propriedades mecânicas respectivamente da resina poliéster ortoftálica utilizada neste trabalho.

Tabela 5: Especificações da resina líquida poliéster ortoftálica.

Propriedade	Unidade	Valor (min)	Valor (máx.)	Norma
Aparência		Castanho		ASTM D2090
Viscosidade	cps @ 25°C	250	350	ASTM D2196
Índice Tixotrópico		1,1	1,8	ASTM D2196
Teor de sólidos	%nvm	56	60	ASTM D1259
Peso Específico	@ 25°C	1.109	1.111	ASTM D1963
Índice de acidez	mg KOH/g		30	ASTM D1639
Tempo de gel	min @ 25°C	9	13	ASTM D2471
Intervalo simples	min @ 25°C	7	14	

Fonte: Adaptado de IBEX químicos e compósitos, 2020

Tabela 6: Propriedades mecânicas da resina poliéster ortoftálica.

Propriedade	Método	Unidade	Valor
Tensão			
Resistência à tração	ASTM D638	MPa	53
Módulo à tração	ASTM D638	GPa	1,9
Elongação à tração	ASTM D638	%	5
Flexão			
Resistência à flexão	ASTM D790	MPa	94
Módulo de flexão	ASTM D790	GPa	3,2
Elongação à flexão	ASTM D790	%	1,5
Outras propriedades			
Contração volumétrica		%	3
Temperatura de distorção térmica (HDT)	ASTM D648	°C	70
Dureza	ASTM D2583	Barcol	42

Fonte: Adaptado de IBEX químicos e compósitos, 2020

4.1.3 Agente de cura

Peróxido de metil-cetona ($C_4H_{10}O_4$) foi utilizado como agente de cura, conhecido comercialmente como Butanox, sendo utilizado como recebido em temperatura ambiente.

4.1.4 Desmoldante

O poliéster tem a tendência de aderir às superfícies do molde e dessa maneira o uso de desmoldante é essencial. Cera de carnaúba na forma sólida foi utilizada como desmoldante, a fim de facilitar a desmoldagem e garantir o melhor acabamento.

4.2 PROCESSAMENTO DO MATERIAL

4.2.1 Britamento

O resíduo coletado teve sua granulometria reduzida manualmente. Os cacos cerâmicos foram moídos manualmente com o auxílio de martelo e posteriormente o processo de moagem foi refinado utilizando almofariz e pistilo, a fim de obter a granulometria ideal para a confecção dos corpos de prova.

4.2.2 Ensaio de peneiramento

A separação e distribuição do tamanho de partículas foram realizados pelo método de peneiramento, conforme a norma ASTM C136. Os resultados são utilizados para determinar o cumprimento da distribuição do tamanho de partículas com as exigências de aplicações específicas e para fornecer os dados necessários para o controle da produção de vários produtos agregados ou misturas contendo agregados (ASTM, 2019).

O resíduo passou por uma série de peneiras (4, 8, 10, 16, 30, 50, 100 e 200 mesh), posicionadas em ordem decrescente. As peneiras foram vibradas em crivo mecânico a uma frequência de 60 rpm, durante 5 minutos. Para confecção dos corpos de provas foram utilizados os materiais passantes nas peneiras de 8, 10 e 16 mesh.

4.2.3 Confecção dos corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados na forma de placa, com as dimensões de 100mm x 100mm x 10mm, a partir da mistura da resina poliéster insaturada ortoftálica com o catalisador e o resíduo de cerâmica vermelha, com o auxílio de um agitador mecânico durante 3 minutos até atingir uma mistura homogênea, sendo posteriormente despejada no molde metálico. O método de fabricação utilizado para preparação deste compósito foi o de moldagem por compressão à frio em molde metálico, utilizando uma prensa hidráulica, aplicando uma carga fixa de 2 toneladas por 24 horas, obtendo assim a cura completa do compósito.

Para a confecção do compósito foi fixado o percentual em peso total, sendo 30% para resina, 1% de catalisador e 70% para resíduo de cerâmica vermelha. Sendo que, a proporção de resíduo de cerâmica vermelha seguiu o planejamento experimental do tipo delineamento de misturas.

4.2.4 Delineamento de Misturas

As composições foram formuladas com os resíduos de cerâmica vermelha em três faixas granulométricas, empregando a metodologia de moldagem de misturas do planejamento experimental (CORNELL, 1990). Para definir as composições foi utilizado um planejamento em rede simplex centróide {3,2}, aumentado com pontos interiores, total de dez pontos. As combinações encontram-se na tabela 7.

Tabela 7: Composições obtidas através do planejamento em rede simplexcentróide {3,2}, aumentado.

Composição	Proporções dos resíduos (%)		
	#8	#10	#16
M1	100	0	0
M2	0	100	0
M3	0	0	100
M4	50	50	0
M5	50	0	50
M6	0	50	50
M7	33,3	33,3	33,3
M8	66,6	16,7	16,7
M9	16,7	66,6	16,7
M10	16,7	16,7	66,6

Fonte: Autora, 2020

4.2.5 Estudo Estatístico

Na representação do ajuste dos valores de resposta, Tensão de resistência a compressão (TRC), Tensão de resistência a flexão (TRF) e Resistência ao impacto (RI), utilizou-se os modelos linear (Equação 2) e quadrático (Equação 3).

$$Y(x,y,z) = b_{1x} + b_{2y} + b_{3z} \quad (2)$$

$$Y(x, y, z) = b_{1x} + b_{2y} + b_{3z} + b_{12xy} + b_{13xz} + b_{23yz} \quad (3)$$

Sendo:

Y = estimativa da resposta TRF, TRC e RI;

b = coeficientes da equação determinados conforme(CORNELL, 1990);

x,y e z = proporção dos componentes na formulação.

Os resultados obtidos no estudo do comportamento mecânico foram usados para calcular (iterativamente, até serem obtidos modelos estatisticamente significativos) os coeficientes das equações de regressão que relacionam TRF, TRC e RI com as proporções dos resíduos #8, #10 e #16 presente na composição do compósito. Os modelos foram ajustados para representar as respostas sobre uma superfície, com o objetivo de encontrar modelos que descrevam o comportamento mecânico das composições com a menor margem de erro possível, quando comparados com os resultados reais dos experimentos.

Uma avaliação da eficiência dos modelos foi feita por meio de métodos estatísticos. Os cálculos foram executados com auxílio do software Statistica 7.0.

4.3 ENSAIOS MECÂNICOS

4.3.1 Flexão em 3 pontos

Para a realização do ensaio de resistência à flexão em 3 pontos foram utilizadas 5 amostras, com as dimensões de 100 x 25 x 10mm, o experimento seguiu a norma (ASTM, 2017), como apresenta a figura 5.

Figura 5: (a) Corpos de prova para ensaio de flexão. (b) Ensaio de flexão em 3 pontos



Fonte: Autora, 2020

Para a realização deste ensaio as vigas foram assentadas sob os cutelos inferiores (de reação) e o superior (de ação), onde a carga foi aplicada lentamente à uma taxa de 1,19 mm/min até o rompimento. Os resultados foram apresentados na forma de média \pm erro padrão.

Para o cálculo da força de flexão foi utilizado a equação 4:

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4).$$

Sendo P a força máxima de ruptura, L o comprimento do vão da peça ensaiada, b a largura da viga ensaiada e d a espessura da viga ensaiada.

4.3.2 Compressão

Para o ensaio de compressão foram utilizados 5 corpos de prova, com arestas de 12,5 x 12,7 x 25,4 mm, seguindo a norma (ASTM, 2015), como apresenta a figura 6. As amostras foram submetidas a força de compressão, o qual sua tensão foi calculada pela equação 5:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (5).$$

Sendo σ a tensão de ruptura em compressão, P a força máxima de ruptura, A a área da face do corpo de prova submetido ao carregamento.

Figura 6: Corpos de prova para o ensaio de compressão



Fonte: Autora, 2020

4.3.3 Impacto

Para o ensaio de impacto foram utilizadas 5 amostras, com as dimensões de 55mm de comprimento, 10mm de largura e 10mm de espessura, como apresenta a figura 7. O ensaio seguiu a norma (ASTM, 2020).

Figura 7: Corpos de prova para o ensaio de impacto



Fonte: Autora, 2020

O cálculo da energia absorvida seguiu a equação 6:

$$E_{abs} = m \cdot g \cdot |h_f - h_i| \quad (6)$$

Sendo E_{abs} a energia absorvida, m a massa do martelo, h_f a altura final e h_i a altura inicial do martelo em relação ao corpo de prova.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados experimentais referentes aos ensaios mecânicos obtidos para o mármore sintético desenvolvido. As peças foram submetidas aos ensaios de flexão, compressão e impacto.

5.1 RESISTÊNCIA À FLEXÃO EM 3 PONTOS

Na tabela 8 são apresentados os valores encontrados para a resistência à flexão em 3 pontos e o desvio padrão referente às 10 diferentes misturas do planejamento experimental do mármore sintético.

Tabela 8: Resultados da Resistência à Flexão em 3 Pontos do Mármore Artificial Produzido

Composição	Resistência à Flexão em 3 Pontos (MPa)
M1	9 ± 2
M2	12 ± 2
M3	16 ± 2
M4	11 ± 2
M5	11 ± 1
M6	13 ± 2
M7	10 ± 2
M8	10 ± 3
M9	14 ± 1
M10	12 ± 2

Fonte: Autora, 2020.

O valor máximo obtido para a resistência à flexão foi de (16 ± 2) MPa para a composição M3, e o menor foi de (9 ± 2) MPa referente a composição M1. Foi verificado que os maiores valores encontrados para a resistência à flexão são referentes as composições com maior teor de resíduos com granulometria mais fina, enquanto composições com uma

proporção maior de resíduos com granulometria mais grossa tem uma tendência a valores menores de resistência a flexão.

Na tabela 9 é apresentada uma revisão da literatura de dados sobre testes de resistência a flexão para amostras de mármore artificial e compósitos afins. Os resultados deste trabalho são próximos aos encontrados na literatura, sendo que as principais diferenças são encontradas em função do tipo de carga na matrix, formulação e processamento. Segundo os dados da literatura, materiais que são processados utilizando vibração e vácuo apresentam valores superiores de resistência a flexão (BARANI; ESMAILI, 2016; LEE et al., 2008). Vale ressaltar ainda que o valor obtido é próximo ao do mármore comercial (HERIYANTO; PAHLEVANI; SAHAJWALLA, 2018), indicando a possibilidade de utilização deste material como pedra ornamental.

Tabela 9: Valores encontrados na literatura para o resultado de resistência a flexão

Autor	% de Resina	Resina	Carga	Flexão (MPa)	Compressão (MPa)	Impacto
Este trabalho	30	Poliéster Insaturada Ortoftálica	Resíduo cerâmica vermelha	9-16	23-51	14-21J
(ABNT NBR 15270-1:2017, 2017)		Tijolo cerâmica vermelha comercial		-	≥ 1,5	-
(HERIYANTO; PAHLEVANI; SAHAJWALLA, 2018)		Mármore comercial		12,8	52	-
(HERIYANTO; PAHLEVANI; SAHAJWALLA, 2018)		Pedra artificial comercial		53,8	169	-
(GOMES RIBEIRO; SANCHEZ RODRIGUEZ; CARVALHO, 2017)	10	Poliéster Insaturada Ortoftálica	Resíduo de mármore dolomítico	4,2-26,6	25-100	-
(LEE et al., 2008)	8	Resina polimérica insaturada	Resíduo de vidro e pedras	27,9-52,7	78,7-151,3	-
(GOMES et al., 2020)	15	Epóxi	Granito	33	-	4J
(SILVA; RIBEIRO; RODRIGUEZ, 2017)	-	Epóxi	Resíduo de mármore calcítico	30,5-37,42	69,39-95,89	4J
(CARVALHO et al., 2018)	10-15	Epóxi	Pó de pedreira	30-32	-	-
(RIBEIRO et al., 2014a)	15	Poliéster Insaturada Ortoftálica	Resíduo de Mármore	15	81	-
(RIBEIRO et al., 2014b)	15	Poliéster Insaturada Ortoftálica	Resíduo de Mármore	9,2	16,7	-
(RIBEIRO; RODRIGUEZ, 2015)	15-20	Poliéster Insaturada Ortoftálica	Resíduo de mármore calcítico	17,7-25,9	-	-
(DEMARTINI; RODRÍGUEZ; SILVA, 2018)	15	Epóxi	Resíduo fino de mármore dolomítico	34	97	-
(BARANI; ESMAILI, 2016)	10-18	Poliéster Insaturada Ortoftálica	Lama de granito / Lama de mármore	40,32-64,26	75,61-115,69	-
(BORSELLINO; CALABRESE; DI BELLA, 2009)	20-40	Poliéster / Epóxi	Resíduo de mármore calcítico	10,6-30,7	-	0,193-0,261 J/cm ²
(ABDUL SAMAD; ABD RASHID, 2020)	30	Poliéster	Resíduo de pedra dolomítica e granito	22,09-34,05	83,11-93,65	-
(HAMIZAH; RASHITA; MALEK, 2020)	25-30	Poliéster	Resíduo dolomítico e caulínico	22-34	83-105,43	-

Fonte: Autora, 2020

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Na tabela 10 são apresentados os valores encontrados para a resistência à compressão e o desvio padrão referente às 10 diferentes misturas do planejamento experimental do mármore sintético.

Tabela 10: Resultados da Resistência à Compressão

Composição	Resistência à Compressão (MPa)
M1	31 ± 2
M2	33 ± 1
M3	51 ± 1
M4	38 ± 3
M5	41 ± 3
M6	48 ± 2
M7	35 ± 1
M8	23 ± 3
M9	38 ± 1
M10	26 ± 1

Fonte: Autora, 2020

O valor máximo obtido para a resistência à compressão foi de (51 ± 1) MPa para a composição M3, e o menor foi de (23 ± 3) MPa referente a composição M8. Assim como para os ensaios de flexão, foi verificado que os maiores valores encontrados para a resistência à compressão são referentes as composições com maior teor de resíduos com granulometria mais fina, enquanto composições com uma proporção maior de resíduos com granulometria mais grossa tem uma tendencia a valores menores de resistência a flexão.

Os valores obtidos neste trabalho são em geral inferiores aos encontrados na literatura (apresentados na tabela 9), indicando novamente uma tendência a valores altos para amostras que são processadas com auxílio de vibração e vácuo (BARANI; ESMAILI, 2016; LEE et al., 2008). Entretanto, (HAMIZAH; RASHITA; MALEK, 2020) obtiveram valores altos para resistência a compressão utilizando um método de processamento sem vibração ou vácuo similar a este trabalho, sendo o tipo de resíduo e suas proporções os principais responsáveis pelo seu desempenho superior.

5.3 RESISTENCIA AO IMPACTO

A tabela 11 apresenta os resultados do ensaio de impacto de corpo rígido realizado para as 10 diferentes misturas.

Tabela 11: Resultado da energia absorvida no ensaio de impacto de corpo rígido

Mistura	Energia de Impacto (J)
M1	14 ± 8
M2	21 ± 1
M3	19 ± 3
M4	17 ± 7
M5	16 ± 7
M6	18 ± 3
M7	20 ± 1
M8	17 ± 7
M9	15 ± 4
M10	16 ± 4

Fonte: Autora, 2020

Os resultados referentes à energia absorvida no impacto para as 10 misturas variam de (14 ± 8) J para a mistura M1 a (21 ± 1) J para a mistura M2. Embora a variação de todas as medidas esteja dentro do desvio padrão, existe uma tendência de valores de resistência ao impacto maiores para amostras com composições com maior teor de resíduos de granulometria fina.

5.4 DELINEAMENTO DE MISTURAS

A tabela 12 apresenta a matriz codificada de planejamento em rede simplex {3,2}, aumentado e os resultados experimentais das propriedades mecânicas, Tensão de Resistência a Flexão (TRF), Tensão de Resistência a Compressão (TRC) e Resistência ao Impacto (RI), com relação às Proporções dos componentes da mistura.

Tabela 12. Valores médios de TRF, TRC e RI para as diferentes composições estabelecidas pelo planejamento em rede simplex {3,2}, aumentado.

Composições	Proporções dos componentes da mistura (%)			TRC (MPa)	MRF (MPa)	RI(kJ)
	x (#8)	y (#10)	z (#16)			
M1	100,0	0	0	31,11	8,61	13,78
M2	0	100,0	0	33,25	11,53	20,50
M3	0	0	100,0	50,74	15,46	18,18
M4	50,0	0	0	38,11	11,03	16,57
M5	0	50,0	0	41,10	10,71	16,01
M6	0	0	50,0	48,39	13,43	17,29
M7	33,3	33,3	33,3	35,38	9,99	20,04
M8	66,6	16,7	16,7	22,89	9,63	16,84
M9	16,7	66,6	16,7	38,12	14,42	14,87
M10	16,7	16,7	66,6	25,88	12,02	15,50

Fonte: Autora, 2020

Os resultados obtidos para o comportamento mecânico foram obtidos através dos ensaios de flexão, compressão e impacto, mediante a utilização da técnica de análise por delineamento de misturas, análise da superfície de respostas.

A partir dos resultados apresentados na tabela 12, foi possível gerar as equações de regressão de acordo com os modelos lineares e quadráticos, correlacionando as proporções do resíduo de cerâmica vermelha em termos da granulometria nas malhas 8, 10 e 16 na composição da mistura com os parâmetros de resposta TRF, TRC e RI, para todas as composições, escolhendo-se as equações que apresentem significância estatística ao nível de 95% de confiança.

A tabela 13 apresenta os modelos matemáticos correlacionados com os valores de TRF, TRC e RI com as proporções dos componentes da mistura do resíduo de cerâmica vermelha nas malhas 8,10 e 16 com a resina de poliéster. Os coeficientes em negrito são os efeitos estatisticamente significativos ao nível de 95% de confiança.

Tabela 13. Equações correlacionando os valores de TRF, TRC e RI com as frações mássicas do resíduo de cerâmica vermelha nas malhas 8,10 e 16.

EQUAÇÃO	MODELO
$TRF_1 = +8,14 * X + 12,59 * Y + 14,31 * Z$	(7) LINEAR
$TRF_2 = +8,56 * X + 12,28 * Y + 15,23 * Z + 3,34 * X * Y - 7,76 * X * Z - 1,15 * Y * Z$	(8) QUADRÁTICO
$TRC_1 = +27,7 * X + 36,61 * Y + 45,19 * Z$	(9) LINEAR
$TRC_2 = +30,60 * X + 36,04 * Y + 48,33 * Z + 1,82 * X * Y - 31,59 * X * Z - 0,13 * Y * Z$	(10) QUADRÁTICO
$RI_1 = +14,63 * X + 18,88 * Y + 17,36 * Z$	(11) LINEAR
$RI_2 = +14,12 * X + 19,57 * Y + 17,68 * Z + 0,50 * X * Y + 3,79 * X * Z - 7,077 * Y * Z$	(12) QUADRÁTICO

Fonte: Autora, 2020

Segundo (CORNELL, 1990), os componentes da mistura interagem sinergicamente quando os coeficientes das interações são maiores que zero contribuindo para elevar os valores das propriedades e interagem antagonisticamente quando os coeficientes das interações contribuem para diminuir seus valores.

Analisando os termos estatisticamente significativos das equações de 7 a 12 referentes aos modelos lineares e quadráticos, observa-se que os componentes da mistura, resíduo da cerâmica vermelha em termos da granulometria (8 mesh, 10 mesh e 16 mesh) interagem sinergicamente contribuindo para aumentar as para as propriedades mecânicas TRF, TRC e RI. Observa-se também que alguns termos dos modelos quadráticos que não apresentaram influência estatisticamente significativa, interagem antagonisticamente, ou seja, contribuindo para diminuir os valores da TRF, TRC e RI.

A tabela 14 apresenta os parâmetros estatísticos para os modelos linear e quadrático. Os modelos foram analisados com os resultados experimentais, TRF, TRC e RI.

Tabela 14. Estatísticas relevantes para análise de variância das variáveis TRF, TRC e RI para todas as composições.

Variáveis	Modelo	Teste F _{calc}	Valor p	R ² *	F _{calc} /F _{tab}
TRF ₁	LINEAR	8,518	0,013	70,88	291,45
TRF ₂	QUADRÁTICO	0,560	0,668	79,50	19,16
TRC ₁	LINEAR	1,678	0,254	32,41	57,41
TRC ₂	QUADRÁTICO	0,157	0,919	39,57	5,37
RI ₁	LINEAR	1,779	0,237	33,71	60,87
RI ₂	QUADRÁTICO	0,182	0,903	41,69	6,22

*R²- coeficiente de determinação, F_{calc}/F_{tab}- Razão entre o teste F calculado e o teste F tabelado a 95% de confiança.

Fonte: Autora, 2020

Analisando os parâmetros estatísticos principais (Teste F, Valor p, coeficiente de determinação R² e o valor da razão entre o teste F calculado e o teste F tabelado no nível de 95% de confiança), observa-se que os modelos são estatisticamente significativos ao nível estipulado (valor p ≤ nível de significância). O teste F apresenta a razão entre o F calculado e o F tabelado, sempre que esta relação for maior que um a regressão é estatisticamente significativa havendo relação entre as variáveis independentes e dependentes. Para que uma regressão seja não apenas estatisticamente significativa, mas também útil para fins preditivos, o valor da razão deve ser no mínimo maior que quatro (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1996). O coeficiente de determinação R² quantifica a qualidade do ajustamento, pois fornece uma medida da proporção da variação explicada pela equação de regressão em relação à variação total das respostas, variando de 0 a 100% (RODRIGUES; IEMMA, 2005).

Através dos dados apresentados na tabela 14, o modelo linear da variável de resposta TRF1 é estatisticamente significativo com intervalo de confiança de 95%, como também pode ser utilizado para fins preditivos, pois o valor obtido pela razão do $F_{\text{calculado}}/F_{\text{Tabelado}}$ foi maior que quatro. Por outro lado, os demais modelos encontrados para as respostas de TRF2, TRC1, TRC2, RI1 e RI2 não apresentaram efeitos estatisticamente significativos no intervalo de confiança de 95%, entretanto, para estes modelos valores obtidos da razão do $F_{\text{calculado}}/F_{\text{Tabelado}}$ foram maiores que quatro, indicando que eles servem para fins preditivos.

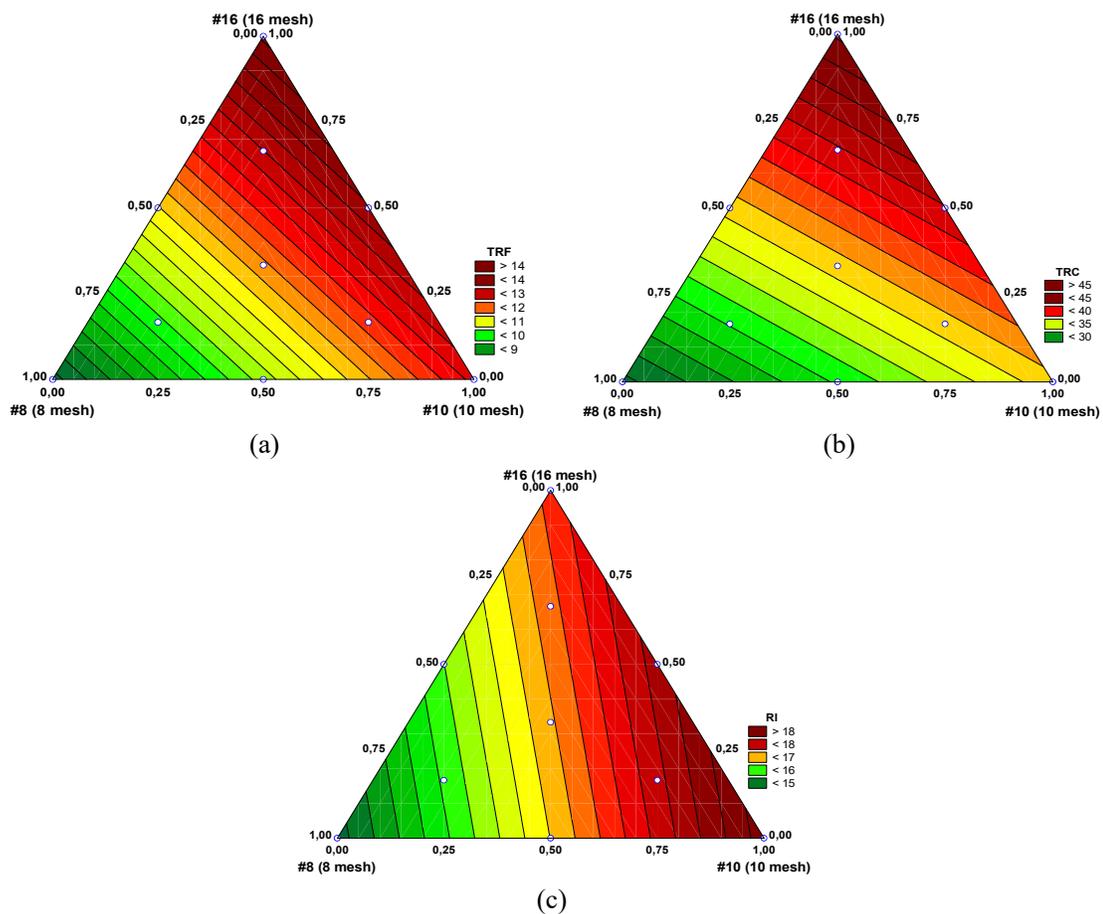
Os valores dos coeficientes de determinação R^2 encontrados para os modelos TRF1, TRF2, TRC1, TRC2, RI1 e RI2 não apresentaram variabilidade consideráveis, pois quanto mais perto da unidade estiver o valor do R^2 , melhor terá sido o ajuste do modelo aos dados observados.

5.4.1 Superfícies de Resposta

Os gráficos 1 e 2 apresentam as curvas de nível, referentes à projeção das superfícies de resposta, calculadas para os valores da Tensão da Resistência a Flexão (TRF), Tensão de Resistência a Compressão (TRC) e a Resistência ao Impacto (RI), em todas as condições estudadas. Nestas figuras visualiza-se a influência individual de cada faixa de granulometria sobre as propriedades mecânicas analisadas.

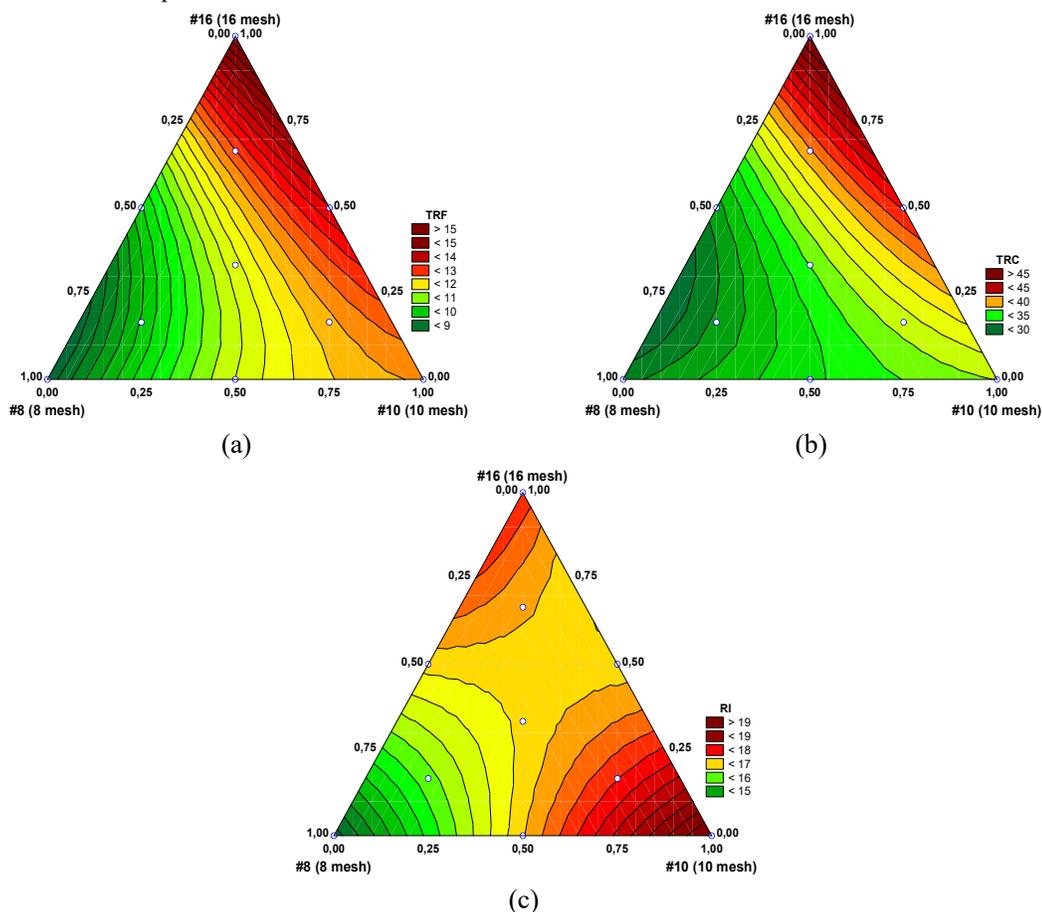
Analisando as figuras observa-se que os maiores valores de TRF e TRC foram encontrados próximo ao vértice da composição com os maiores percentuais de resíduos em 16 mesh. Os maiores valores da RI estão localizados próximo ao vértice do resíduo em 10 mesh. Entretanto, os menores valores para as três propriedades, TRF, TRC e RI, foram encontrados próximos ao vértice do percentual de resíduo em 8 mesh.

Gráfico 1. Projeções das superfícies de resposta e curvas de nível para (a) TRF, (b) TRC e (c) RI, calculadas a partir dos modelos lineares.



Fonte: Autora, 2020

Gráfico 2. Projeções das superfícies de resposta e curvas de nível para (a) TRF, (b) TRC e (c) RI, calculadas a partir dos modelos quadráticos.



A fim de aprimorar as propriedades mecânicas como ductilidade e dureza, assim como melhor transferência de cargas entre matriz e particulado/fibra, os materiais compósitos requerem uma maior área superficial da interface entre a matriz e o particulado/fibra (KAW, 2006). Dessa maneira, a melhor eficiência mecânica das amostras com resíduos de granulometria mais fina pode estar relacionada com o aumento da área superficial destas partículas e conseqüentemente uma interação de interface resíduo/polímero superior as demais composições.

6 CONCLUSÃO

De uma maneira geral, os objetivos propostos no início do projeto foram alcançados com sucesso.

Foram obtidas peças de mármore sintético com diferentes proporções de resíduos provenientes da indústria de cerâmica vermelha do estado de Pernambuco. O método de planejamento experimental mostrou-se eficiente na otimização das composições obtidas.

As misturas que apresentaram melhor desempenho mecânico foram a M3 para compressão e flexão e a M2 para impacto. Foi verificado que a granulometria do resíduo utilizado impacta diretamente no desempenho mecânico das peças produzidas, apresentando melhor desempenho as amostras com maior proporção de resíduo com granulometria mais fina.

Ensaio mecânicos mostraram que o desempenho do material produzido é similar aos reportados na literatura. Em particular, os resultados das amostras obtidas são muito próximos aos encontrados na literatura para o mármore natural, indicando que este produto desenvolvido tem potencial de aplicação como pedra ornamental na indústria da construção civil, agregando valor ao resíduo gerado pela indústria da cerâmica vermelha e gerando oportunidades para um ciclo sustentável de gestão de resíduos.

7 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar caracterização estrutural e morfológica utilizando técnicas de difração de raios X e microscopia eletrônica de varredura nos resíduos obtidos.
- Realizar estudos de densidade das peças de mármore sintético obtidas e de absorção de água.
- Estudar as propriedades térmicas e mecânicas da resina poliéster.
- Obter peças utilizando resina epóxi.

REFERÊNCIAS

ABDUL SAMAD, H.; ABD RASHID, R. Influence of Dolomite and Granite Waste Content on The Properties of Artificial Marble. **Materials Science and Engineering**, v. 713, p. 012017, 3 jan. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/338374203_Influence_of_Dolomite_and_Granite_Waste_Content_on_The_Properties_of_Artificial_Marble. Acesso em: 09 de jan. de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15270-1:2017**. Componentes cerâmicos - Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. Disponível em: <https://www.gedweb.com.br/visualizador-lite/viewer.asp?ns=24627&token={b4bf4814-9f7d-4318-9ad3-f33b292b40be}&sid=1593&cnpj=24.416.174/0001-06&email=&tracking=pergamum@ufrpe.br>. Acesso em: 09 de dez. de 2020.

ABRAHAO, R.; CARVALHO, M. Environmental Impacts of the Red Ceramics Industry in Northeast Brazil. **International Journal of Emerging Research in Management and Technology**, v. 6, n. 8, p. 310- 317, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/321057856_Environmental_Impacts_of_the_Red_Ceramics_Industry_in_Northeast_Brazil. Acesso em: 04 de jan. de 2021.

ALFAIA, R. G. DE S. M.; COSTA, A. M.; CAMPOS, J. C. Municipal solid waste in Brazil: A review. **Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy**, v. 35, n. 12, p. 1195–1209, dez. 2017. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X17735375>. Acesso em: 04 de jan. de 2021.

ANDRÉS, J. *et al.* Re-Use of Ceramic Wastes in Construction. In: CÉSAR MEDINA (Ed.). **Ceramic Materials**. M. Ignacio Guerra. Rijeka: IntechOpen, 2010. p. Ch. 10. Disponível em https://cdn.intechopen.com/pdfs/11637/InTech-Re_use_of_ceramic_wastes_in_construction.pdf. Acesso em : 04 de jan. de 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D695-15** - Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastic. West Conshohocken: ASTM, 2015. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D695-15>. Acesso em: 12 jan. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. D790-17** - Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials. West Conshohocken: ASTM, 2017. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?D790-17>. Acesso em: 12 jan. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. C136/C136M-19** - Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken: ASTM, 2019. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C136C136M-19>. Acesso em: 12 jan. 2021.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM. C368–88** - Test Method for Impact Resistance of Ceramic Tableware. West Conshohoken: ASTM, 2020. Disponível em: <http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C368-88R20>. Acesso em: 12 jan. 2021.

BARANI, K.; ESMAILI, H. Production of artificial stone slabs using waste granite and marble stone sludge samples. **Journal of Mining and Environment**, v. 7, n. 1, p. 135- 141. jan. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/291074577_Production_of_artificial_stone_slabs_using_waste_granite_and_marble_stone_sludge_samples. Acesso em: 04 de dez. de 2020.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.; BRUNS, R. **Planning and optimization of experiments**. Campinas: Unicamp, p. 66, 1996.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.; BRUNS, R. **Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. Campinas: EDUNICAMP, p. 339, 2001.

BERA, P. et al. Recent developments in synthetic marble processing. **Rev. Adv. Mater. Sci**, v. 32, p. 94–105, 2012. Disponível em: <https://www.semanticscholar.org/paper/RECENT-DEVELOPMENTS-IN-SYNTHETIC-MARBLE-PROCESSING-Bera-Guptha/d328420350dc4c93f695db56d0f937b00f5622ce>. Acesso em: 20 de jan. de 2021.

BORSELLINO, C.; CALABRESE, L.; DI BELLA, G. Effects of powder concentration and type of resin on the performance of marble composite structures. **Construction and Building Materials**. v. 23, n. 5, p. 1915–1921, maio 2009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061808002717>. Acesso em: 09 de fev. de 2021.

BOX, G. E. P.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. **Statistics for experimenters: design, innovation, and discovery**. 2 ed. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 2005. Disponível em: [http://pages.stat.wisc.edu/~yxu/Teaching/16%20spring%20Stat602/%5BGeorge_E._P._Box,_J._Stuart_Hunter,_William_G._Hu\(BookZZ.org\).pdf](http://pages.stat.wisc.edu/~yxu/Teaching/16%20spring%20Stat602/%5BGeorge_E._P._Box,_J._Stuart_Hunter,_William_G._Hu(BookZZ.org).pdf). Acesso em: 10 jan. de 2021.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. (2012). **Resolução CONAMA** nº. 448, de 18 de janeiro de 2012. Altera os arts. 2º, 4º, 5º, 6º, 8º, 9º, 10 e 11 da Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, do CONAMA. Disponível em: http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_federal/leg_fed_resolucoes/leg_fed_res_conama/Resol-CONAMA-448-12_altera-Resol-307-02_residuos-construcao-civil.pdf. Acesso em: 05 de fev. de 2021.

CABRAL, M. *et al.* A Indústria de Cerâmica Vermelha e o Suprimento Mineral no Brasil: Desafios para o Aprimoramento da Competitividade, **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 1, p. 36–42, 2012. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876574a7f8c9d6e028b47bc/pdf/ci-17-1-5876574a7f8c9d6e028b47bc.pdf>. Acesso em: 08 de jan. de 2021.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 4th ed. Hoboken, N.J: Wiley, Rio de Janeiro, 2012.

CAMPOS, L. F. A. *et al.* Planejamento experimental no estudo da maximização do teor de resíduos em blocos e revestimentos cerâmicos. **Cerâmica**, v. 53, n. 328, p. 373–380, dez. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/ce/v53n328/a0753328.pdf>. Acesso em: 07 de fev. de 2021.

CARVALHO, E. A. S. *et al.* Novel Artificial Ornamental Stone Developed with Quarry Waste in Epoxy Composite. **Materials Research**, v. 21, n. suppl 1, 2018. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392018000700204. Acesso em: 02 de jan. de 2021.

CORNELL, J. A. Embedding mixture experiments inside factorial experiments. **Journal of quality technology**, v. 22, n. 4, p. 265–276, 1990. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00224065.1990.11979258>. Acesso em: 04 de fev. de 2021.

CORNELL, J. A. **Experiments with mixtures: designs, models, and the analysis of mixture data**. 3 ed. New York: Wiley, 2002.

DA SILVA, A. C.; MÉXAS, M. P.; QUELHAS, O. L. G. Restrictive factors in implementation of clean technologies in red ceramic industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 441–451, dez. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez19.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652617320760?via%3Dihub>. Acesso em: 01 de fev. de 2021.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. Edição: 2. ed. New York: Oxford University Press, 2006. p. 403. Disponível em: http://dl.icdst.org/pdfs/files3/ff750b_c24ae06fc21cf3301c2b3fcb5a.pdf. Acesso em: 03 de jan. de 2021.

SANTOS, P.S. **Tecnologia de argilas aplicada às argilas brasileiras: Aplicações**. São Paulo Editora E. Blücher, p. 802, 1975.

DEMARTINI, T. J. DA C.; RODRÍGUEZ, R. J. S.; SILVA, F. S. Physical and mechanical evaluation of artificial marble produced with dolomitic marble residue processed by diamond-plated bladed gang-saws. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 3, p. 308–313, jul. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785417307196>. Acesso em: 05 de jan. de 2021.

DEMIR, I.; ORHAN, M. Reuse of waste bricks in the production line. **Building and Environment**, v. 38, n. 12, p. 1451–1455, dez. 2003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360132303001409>. Acesso em: 04 de fev. de 2021.

DIAS, J. F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**, 2004. 251 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana)— Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-16122004-130717/publico/JoaoFDias.pdf>. Acesso em: 11 de jan. de 2021.

ECHEVESTE, M. **Planejamento da otimização experimental de processos industriais**. 1997. 166f. 1997. Dissertação (Mestrado em engenharia de produção)- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, Programa de Pós- Graduação em Engenharia de Produção, Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/159046/000226274.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 10 de jan. de 2021.

ELICHE- QUESADA, D.; PEREZ- VILLAREJO, L.; SÁNCHEZ- SOTO, P. (EDS.). **Ceramic Materials - Synthesis, Characterization, Applications and Recycling**. Espanha IntechOpen, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/331493333_Introduction_to_Ceramic_Materials_Synthesis_Characterization_Applications_and_Recycling. Acesso em: 03 de fev. de 2021.

FLOREA, R. M.; CARCEA, I. Polymer matrix composites—routes and properties. **International Journal of Modern Manufacturing Technologies**, IV, v. 1, p. 59–64, 2012. Disponível em: https://ijmmt.ro/vol4no12012/09___Florea_Raluca.pdf. Acesso em: 12 de jan. de 2021.

GOMES, M. L. P. et al. Mechanical and physical investigation of an artificial stone produced with granite residue and epoxy resin. **Journal of Composite Materials**, p. 002199832096813, 25 out. 2020. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0021998320968137>. Acesso em: 18 de jan. de 2021.

GOMES, M. L. P. M. et al. Production and characterization of a novel artificial stone using brick residue and quarry dust in epoxy matrix. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 7, n. 4, p. 492–498, out. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785417307639>. Acesso em: 10 de jan. de 2021.

GOMES RIBEIRO, C. E.; SANCHEZ RODRIGUEZ, R. J.; CARVALHO, E. A. DE. Microstructure and mechanical properties of artificial marble. **Construction and Building Materials**, v. 149, p. 149–155, set. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S095006181731005X>. Acesso em: 06 de fev. de 2021.

GONÇALVES, J. P. Utilização do resíduo da indústria cerâmica para produção de concretos. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 60, n. 4, p. 639–644, dez. 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/rem/v60n4/a09v60n4.pdf>. Acesso em: 09 de jan. de 2021.

GRANATO, L. Uso de resíduos de demolição e de cerâmica vermelha na pavimentação. **Agência Universitária de Notícias (AUN)**, v. 45, n. 77, p. 1, 2012. Disponível em: <http://usp.br/aun/antigo/exibir?id=4700&ed=820&f=33>. Acesso em: 03 de fev. de 2021.

HAMIZAH, A. S.; RASHITA, A. R.; MALEK, S. Characterization and evaluation of dolomite and kaolin as filler on the properties of poly art marble. **Materials Today: Proceedings**, v. 29, p. 173–178, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320341456>. Acesso em: 04 de jan. de 2021.

HERIYANTO; PAHLEVANI, F.; SAHAJWALLA, V. From waste glass to building materials – An innovative sustainable solution for waste glass. **Journal of Cleaner Production**, v. 191, p. 192–206, ago. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.ez19.periodicos.capes.gov.br/science/article/pii/S0959652618312502?via%3Dihub>. Acesso em: 17 de jan. de 2021.

JESSON, D. A.; WATTS, J. F. The Interface and Interphase in Polymer Matrix Composites: Effect on Mechanical Properties and Methods for Identification. **Polymer Reviews**, v. 52, n. 3, p. 321–354, jul. 2012. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15583724.2012.710288>. Acesso em: 18 de jan. de 2021.

KAW, A. K. **Mechanics of composite materials**. 2 ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, p. 457, 2006.

LEE, M.-Y. et al. Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 7, p. 583–587, ago. 2008. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946508000425>. Acesso em: 03 de fev. de 2021.

MACEDO, R. S. et al. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, n. 332, p. 411–417, dez. 2008. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132008000400005&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 04 de fev. de 2021.

MONTGOMERY, D. Design and analysis of experiments. 8 ed. New Jersey: John Willey e Sons incorporation, 730 p. 1997.

MOTTA, J. F. M. et al. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte II: Os Minerais Industriais e as Massas da Cerâmica Tradicional. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 1, p. 0, 2002. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/587657107f8c9d6e028b4662/pdf/ci-7-1-587657107f8c9d6e028b4662.pdf>. Acesso em: 13 de jan. de 2021.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JR, M. As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos. **Cerâmica Industrial**, v. 6, n. 2, p. 0, 2001. Disponível em: <https://www.ceramicaindustrial.org.br/article/5876570b7f8c9d6e028b4643/pdf/ci-6-2-5876570b7f8c9d6e028b4643.pdf>. Acesso em: 15 de jan. de 2021.

NEPOMUCENO, M. C. S.; ISIDORO, R. A. S.; CATARINO, J. P. G. Mechanical performance evaluation of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates from industrial brick waste. **Construction and Building Materials**, v. 165, p. 284–294, mar. 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061818300527>. Acesso em: 20 de jan. de 2021.

OLIVEIRA, B. P. DE C. P. et al. Study of The Technological Profile of The Red Ceramic Industry of Alagoas. **International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)**, v. 5, n. 6, p. 92–105, 2015. Disponível em: https://www.academia.edu/13130596/STUDY_OF_THE_TECHNOLOGICAL_PROFILE_OF_THE_RED_CERAMIC_INDUSTRY_OF_ALAGOAS. Acesso em: 14 de jan. de 2021.

PAZ, Y. M.; MORAIS, M. M. DE; HOLANDA, R. M. DE. Desenvolvimento Econômico Regional e o Aproveitamento de Resíduos Sólidos no Pólo da Indústria da Cerâmica Vermelha de Pernambuco (Regional Economic Development and Utilization of Solid Waste in Polo Red Ceramic Industry of the State of Pernambuco). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 6, n. 6, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/313821588_Desenvolvimento_Economico_Regional_e_o_Aproveitamento_de_Residuos_Solidos_no_Polo_da_Industria_da_Ceramica_Vermelha_do_Estado_de_Pernambuco. Acesso em: 15 de jan. de 2021.

POLYNT. **Polyester Resins**, [s.d.]. Disponível em: <https://www.polynt.com/en/polyester-resins/>. Acesso em: 1 fev. 2020

RIBEIRO, C. E. G. **Produção de rocha artificial utilizando resíduo da indústria de mármore em matriz poliéster**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais— Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes/RJ. Disponível em: <https://uenf.br/posgraduacao/engenharia-de-materiais/wp-content/uploads/sites/2/2013/07/Disserta%C3%A7%C3%A3o-Carlos-Eduardo-Gomes-Ribeiro.pdf>. Acesso: 05 de jan. de 2021.

RIBEIRO, C. E. G. et al. Production of Synthetic Ornamental Marble as a Marble Waste Added Polyester Composite. **Materials Science Forum**, v. 775–776, p. 341–345, jan. 2014a. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.775-776.341>. Acesso em: 13 de jan. de 2021.

RIBEIRO, C. E. G. et al. Fabrication of Artificial Stone from Marble Residue by Resin Transfer Molding. **Materials Science Forum**, v. 775–776, p. 336–340, jan. 2014b. Disponível em: <https://www.scientific.net/MSF.775-776.336>. Acesso em: 05 de fev. de 2021.

RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S. Influence of Compaction Pressure and Particle Content on Thermal and Mechanical Behavior of Artificial Marbles with Marble Waste and Unsaturated Polyester. **Materials Research**, v. 18, n. suppl 2, p. 283–290, 24 nov. 2015. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392015000800283. Acesso em: 17 de jan. de 2021.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**: Uma estratégia sequencial de planejamentos. Campinas: Casa do Pão, 325p. 2005.

SALEIRO, G. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using a fast-firing cycle. **Cerâmica**, v. 58, n. 347, p. 393–399, set. 2012. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132012000300018. Acesso em: 12 de jan. de 2021.

SILAEX. **Poliéster Insaturado**, 2018. Disponível em: <http://www.silaex.com.br/poli%C3%A9ster.htm>. Acesso em: 1 fev. 2020

SILVA, F. S.; RIBEIRO, C. E. G.; RODRIGUEZ, R. J. S. Physical and Mechanical Characterization of Artificial Stone with Marble Calcite Waste and Epoxy Resin. **Materials Research**, v. 21, n. 1, 7 dez. 2017. Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1516-14392017005065101&script=sci_abstract. Acesso em: 10 de jan. de 2021.

SILVA J.; DE BRITO J.; VEIGA R. Recycled Red-Clay Ceramic Construction and Demolition Waste for Mortars Production. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 22, n. 3, p. 236–244, 1 mar. 2010. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282010%2922%3A3%28%20236%29>. Acesso em: 05 de fev. de 2021.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da teoria de erros**. 2. ed. São Paulo: Blucher. 241p. 1996.

WADA, P. H. **Estudo da incorporação de resíduos de cerâmica vermelha na composição de concreto para uso em estacas moldadas in loco**. 2010. 108 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas)— Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira/ SP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/91448>. Acesso: jan. de 2021.