



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES COM RESÍDUO DO
POLIMENTO DO PORCELANATO POR MÉTODOS ESTATÍSTICOS**

por

VITÓRIA SILVA MARTINS DE OLIVEIRA

**João Pessoa - Paraíba
Agosto – 2024**



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES COM RESÍDUO DO
POLIMENTO DO PORCELANATO POR MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Dissertação de mestrado submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais da
Universidade Federal da Paraíba, como
parte dos requisitos necessários para
obtenção do título de Mestra.

Vitória Silva Martins de Oliveira

ORIENTADOR: Prof.^o Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra

João Pessoa – Paraíba
Agosto – 2024

**Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação**

0480 Oliveira, Vitória Silva Martins de.
Otimização da produção de agregados leves com
resíduo do polimento do porcelanato por métodos
estatísticos / Vitória Silva Martins de Oliveira. -
João Pessoa, 2025.
78 f. : il.

Orientação: Ricardo Peixoto Suassuna Dutra.
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT.

1. Agregados leves. 2. Resíduo do polimento do
porcelanato. 3. Método de Taguchi. I. Dutra, Ricardo
Peixoto Suassuna. II. Título.

UFPB/BC

CDU 666.972.127(043)

OTIMIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES COM RESÍDUO DO
POLIMENTO DO PORCELANATO POR MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Vitória Silva Martins de Oliveira

Dissertação defendida e aprovada em 26 de agosto de 2024 e examinada pela banca
constituída dos membros:

Prof. Dr. RICARDO PEIXOTO SUASSUNA DUTRA - UFPB/PPCEM
(Presidente, Orientador)

Prof. Dr. MARCOS ALYSSANDRO SOARES DOS ANJOS
(Examinador Interno)

Prof. Dr. JOSE ELSON SOARES FILHO

(Examinador Externo ao Programa)

João Pessoa – PB

Agosto – 2024

Aos meus pais, Antonio e Josilene que pelas frontes queimadas pelo mormaço do sol da vida, me fizeram chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois Ele é o escudo que me protege, é minha honra e aquele que me faz erguer a cabeça, sempre mostrando o caminho correto a seguir. Em seu colo descanso com tranquilidade, pois é Ele quem me ampara e me sustenta.

Aos meus pais Antonio e Josilene que sempre acreditaram na minha capacidade e nunca mediram esforços, fazendo de tudo para que eu chegassem até aqui. Aos meus irmãos Jéssica e Bernardo por serem meus companheiros e apoio. Eu amo vocês.

À Miqueias, que sempre me deu amor, carinho e motivação, me ajudando nos melhores e nos piores dias (esses foram muitos).

Agradeço ao meu orientador Ricardo por confiar em mim e me auxiliar em tudo o que pode no decorrer desta pesquisa.

Aos meus queridos amigos Fernanda, José Anselmo e Gustavo. Sem vocês, com certeza eu não teria chegado até aqui.

À UFPB por disponibilizar os laboratórios e espaço para realização dos ensaios realizados na metodologia deste trabalho.

A todos os professores e técnicos da UFPB que contribuíram para o meu crescimento profissional e que me auxiliaram nesta pesquisa, em especial, à Liszandra, Sérgio, Joelma e Breno.

Não poderia deixar de agradecer aos meus amigos do trabalho: Leonardo, Henrique, Cínthia, Matheus, Kayo, Selene e vários outros colegas que não citei, mas que fazem parte da minha rotina e enchem meus dias de alegrias e bônçãos. Os dias de luta se tornaram mais suportáveis com vocês.

Aos demais amigos, colegas e familiares que contribuíram de alguma forma para a realização desta pesquisa.

Meu respeito e gratidão.

“Uma ideia, contudo, me perseguia.”

- Álvares de Azevedo

RESUMO

Estudos sobre agregados leves sintéticos com uso de resíduos industriais e agrícolas são de interesse para a diminuição dos impactos ambientais a partir do reaproveitamento de materiais de descarte, promovendo práticas sustentáveis e conferindo valor comercial aos rejeitos. Além disso, suas variadas aplicações são atrativas: concreto, alvenaria, pavimento, geotecnia, tratamento de água, entre outros. O objetivo principal desta pesquisa foi investigar a produção de agregados leves com uso do resíduo do polimento do porcelanato e argilas, utilizando o método de Taguchi, a fim de avaliar as principais variáveis de influência ao processo e possíveis aplicações dos agregados obtidos aos serviços de engenharia. Para isso, foi necessário produzir os agregados a partir de um programa experimental definido no método de Taguchi, sendo as variáveis controláveis a taxa de aquecimento (variando de 10 °C/min a 40 °C/min), o tempo de sinterização (de 10 min a 25 min), o tipo de argila utilizada (branca ou vermelha) e a temperatura de sinterização (variando entre 1180 °C e 1240 °C). Em seguida, as amostras foram submetidas aos ensaios laboratoriais que possibilitaram a obtenção do índice de expansão, perda de massa, massa unitária, massa específica aparente, absorção de água, resistência ao esmagamento, composição mineralógica e morfologia. Também foram realizadas análises estatísticas pelo método de Taguchi e análise de variância ANOVA, seguindo com a confecção de gráficos de superfície e classificação quanto as possíveis aplicações dos agregados. Com isso, foi possível obter agregados com expansão variando de -40,84% (retração) a 91,69%, perda de massa entre 3,67% e 7,62%, massa unitária de 0,81 g/cm³ a 2,43 g/cm³, massa específica com valores entre 0,99 g/cm³ e 2,36 g/cm³, absorção de água de 0% a 3,29% e resistências entre 4,57 MPa e 39,87 MPa. Em geral, as variáveis que mais influenciaram nos processos foram o tipo de argila utilizada e a temperatura de sinterização. Dos 16 experimentos realizados, 9 se configuraram como agregados leves e apresentaram uso para as 3 principais aplicações da engenharia (concretos). Com esta pesquisa, concluiu-se que é possível gerar agregados leves utilizando argilas do litoral da Paraíba e resíduo do polimento do porcelanato variando os fatores de sinterização, tais como a taxa de aquecimento, a temperatura e o tempo a depender da propriedade desejada. Foi possível constatar a relevância do uso de métodos estatísticos para identificar os parâmetros de influência na produção que, se controlados, poderão resultar na redução de custos e na melhoria da qualidade dos produtos.

Palavras-chave: Agregados Leves. Resíduo do Polimento do Porcelanato. Método de Taguchi.

ABSTRACT

Studies on synthetic lightweight aggregates using industrial and agricultural waste are of interest for reducing environmental impacts by reusing waste materials, promoting sustainable practices, and conferring commercial value to the residues. Additionally, its various applications are appealing: concrete, masonry, pavement, geotechnics, water treatment, among others. The main objective of this research was to investigate the production of lightweight aggregates using porcelain polishing waste and clays, utilizing the Taguchi method to evaluate the main variables influencing the process and possible applications of the obtained aggregates in engineering services. To achieve this, the aggregates were produced based on an experimental program defined by the Taguchi method, with controllable variables including the heating rate (ranging from 10 °C/min to 40 °C/min), the sintering time (from 10 min to 25 min), the type of clay used (white or red), and the sintering temperature (ranging between 1180 °C and 1240 °C). Subsequently, the samples were subjected to laboratory tests that made it possible to determine the expansion index, mass loss, unit mass, apparent specific mass, water absorption, crushing resistance, mineralogical composition and morphology. Statistical analyses were also performed using the Taguchi method and analysis of variance ANOVA, followed by the creation of surface graphs and classification regarding the possible applications of the aggregates. With this, it was possible to obtain aggregates with expansion ranging from -40.84% (shrinkage) to 91.69%, mass loss between 3.67% and 7.62%, unit mass from 0.81 g/cm³ to 2.43 g/cm³, specific mass with values between 0.99 g/cm³ and 2.36 g/cm³, water absorption from 0% to 3.29%, and compressive strengths between 4.57 MPa and 39.87 MPa. In general, the variables that most influenced the processes were the type of clay used and the sintering temperature. Out of the 16 experiments carried out, 9 were configured as lightweight aggregates and were used for the 3 main engineering applications (concretes). This research concluded that it is possible to generate lightweight aggregates using clays from the coast of Paraíba and porcelain polishing waste by varying the sintering factors, such as heating rate, temperature and time depending on the desired property. It was possible to verify the relevance of using statistical methods to identify the parameters that influence production which, if controlled, can result in cost reduction and improvement in product quality.

Keywords: Lightweight Aggregates. Porcelain Polishing. Taguchi Method.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Armazenamento do resíduo do polimento do porcelanato	23
Figura 2 - Difração de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato, por Marques <i>et al.</i> ..	25
Figura 3 - Difração de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato, por Pontes	26
Figura 4 - Distribuição granulométrica do resíduo do polimento do porcelanato e argilas branca e vermelha.....	26
Figura 5 - Micrografia do resíduo do polimento do porcelanato.....	27
Figura 6 - Geologia do município de João Pessoa – Paraíba segundo o <i>OneGeology</i>	27
Figura 7 - Distribuição das unidades litoestratigráficas cenozoica e mesozoica na Região Metropolitana de João Pessoa.....	28
Figura 8 - Composição mineralógica da argila vermelha.....	30
Figura 9 - Composição mineralógica da argila branca	30
Figura 10 - Diagrama de Riley para as misturas com argila vermelha e resíduo do polimento do porcelanato (1) e argila branca e resíduo do polimento do porcelanato (2)	31
Figura 11 - TG, DTA e perda de massa da argila branca	31
Figura 12 - TGA-DTA da argila vermelha.....	32
Figura 13 - Esquema metodológico.....	35
Figura 14 - Etapas do beneficiamento: (a) secagem em estufa; (b) moagem; (c) destorroamento; (d) peneiramento.....	37
Figura 15 - Pós obtidos após o beneficiamento: (a) do resíduo do polimento do porcelanato; (b) da argila vermelha; (c) da argila branca.....	38
Figura 16 - Massas das composições com argila branca e vermelha	39
Figura 17 - Pelotas de misturas com argila branca e vermelha antes da secagem em estufa ..	39
Figura 18 - Índice de expansão x perda de massa	47
Figura 19 - Massa unitária (g/cm ³) x massa específica aparente (g/cm ³)	49
Figura 20 - Absorção de água x resistência ao esmagamento	51
Figura 21 - Amostras de argila branca e vermelha antes da sinterização.....	52
Figura 22 - Amostras após sinterização.....	53
Figura 23 - Difração de raios-X: a) amostra 1 (1180 °C); b) amostra 4 (1240 °C); c) amostra 5 (1180 °C) e d) amostra 8 (1240 °C)	54
Figura 24 - MEV a 500 µm: a) amostra 1; b) amostra 4; c) amostra 5; d) amostra 8 e MEV a 50 µm: a.1) amostra 1; b.1) amostra 4; c.1) amostra 5 e d.1) amostra 8	55
Figura 25 - Respostas S/R para o índice de expansão	58

Figura 26 - Respostas S/R para a perda de massa	60
Figura 27 - Respostas S/R para a massa unitária.....	61
Figura 28 - Respostas S/R para a massa específica aparente	63
Figura 29 - Respostas S/R para a absorção de água	65
Figura 30 - Respostas S/R para a resistência ao esmagamento	66
Figura 31 - Superfície para massa específica	68
Figura 32 - Superfície para absorção de água	68
Figura 33 - Superfície para resistência ao esmagamento	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Massa unitária máxima de agregados leves para concreto estrutural	18
Tabela 2 - Faixas granulométricas.....	18
Tabela 3 - Parâmetros de classificação dos agregados leves	19
Tabela 4 - Composição química obtida através de fluorescência de raios-X, por Pontes	24
Tabela 5 - Composição química obtida através de fluorescência de raios-X, por Santos	24
Tabela 6 - Granulometria das argilas branca e vermelha	29
Tabela 7 - Composições químicas das argilas branca e vermelha	29
Tabela 8 - Programa experimental determinado pelo método de Taguchi	36
Tabela 9 - Resultados dos ensaios tecnológicos: índice de expansão, perda de massa, massas unitária e específica, absorção de água e porosidade, e, resistência ao esmagamento	45
Tabela 10 - Resultados dos ensaios tecnológicos: absorção de água e porosidade para amostras quebradas	46
Tabela 11 - Atendimento simultâneo a massa específica e massa unitária	50
Tabela 12 - Resultados dos experimentos e relações sinal-ruído	57
Tabela 13 - S/R para índice de expansão.....	57
Tabela 14 - Análise ANOVA para o índice de expansão	58
Tabela 15 - S/R para perda de massa	59
Tabela 16 - Análise ANOVA para a perda de massa	60
Tabela 17 - S/R para massa unitária	61
Tabela 18 - Análise ANOVA para a massa unitária.....	62
Tabela 19 - S/R para massa específica aparente	62
Tabela 20 - Análise ANOVA para a massa específica aparente	63
Tabela 21 - S/R para absorção de água.....	64
Tabela 22 - Análise ANOVA para a absorção de água	65
Tabela 23 - S/R para resistência ao esmagamento.....	66
Tabela 24 - Análise ANOVA para a resistência ao esmagamento	67

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Características do agregado leve produzido no Brasil	20
Quadro 2 - Condições utilizadas nas análises pelo método de Taguchi	44
Quadro 3 - Aplicações dos agregados produzidos	70

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO DA LITERATURA	18
3.1	AGREGADOS LEVES	18
3.2	UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA A PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES20	
3.3	RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO (RPP)	22
3.3.1	Características do Resíduo do Polimento do Porcelanato.....	24
3.4	ARGILAS BRANCA E VERMELHA DE JOÃO PESSOA - PARAÍBA	27
3.5	MÉTODO DE TAGUCHI.....	32
4	METODOLOGIA.....	35
4.1	DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO E TAMANHO DAS PELOTAS	35
4.2	DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	36
4.3	BENEFICIAMENTO E CONFORMAÇÃO.....	37
4.3.1	Beneficiamento	37
4.3.2	Conformação	38
4.4	SECAGEM E SINTERIZAÇÃO.....	40
4.5	ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	40
4.5.1	Índice de Expansão	40
4.5.2	Perda de Massa	40
4.5.3	Massa Unitária	41
4.5.4	Massa Específica Aparente	41
4.5.5	Absorção de Água	42
4.5.6	Porosidade	42
4.5.7	Resistência ao Esmagamento	43

4.5.8	Análise Visual.....	43
4.5.9	Composição Mineralógica e Morfologia	43
4.6	MODELAGEM ESTATÍSTICA	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	45
5.1	DOS ENSAIOS TECNOLÓGICOS.....	45
5.1.1	Índice de Expansão x Perda de Massa	46
5.1.2	Massa Unitária x Massa Específica Aparente	49
5.1.3	Absorção de Água x Resistência ao Esmagamento	50
5.1.4	Inspeção Visual.....	52
5.1.5	Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura	54
5.2	ANÁLISES ESTATÍSTICAS	56
5.2.1	Relações para o Índice de Expansão	57
5.2.2	Relações para a Perda de Massa.....	59
5.2.3	Relações para a Massa Unitária	61
5.2.4	Relações para a Massa Específica Aparente.....	62
5.2.5	Relações para a Absorção de Água	64
5.2.6	Relações para a Resistência ao Esmagamento	65
5.2.7	Gráficos de Superfície.....	67
5.3	APLICAÇÕES.....	69
6	CONCLUSÕES.....	71
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Os agregados leves são materiais granulares de baixa densidade que podem ser naturais, tal como a pedra-pomes, ou sintéticos, fabricados através de tratamentos térmicos de materiais como argilas, xisto e vermiculita (MEHTA & MONTEIRO, 2014). Estes agregados possuem uma vasta possibilidade de aplicações, a exemplo: de concretos leves a concretos de alta resistência, isolamentos termoacústicos e jardinagem.

A produção de agregados leves comerciais no Brasil é limitada ao estado de São Paulo, no qual encontra-se o único fabricante desse produto, a Cinexpan. Isso dificulta o uso deste material em outras regiões do país, pois sua utilização torna-se onerosa devido aos custos com transporte (SOUZA *et al.*, 2020).

De acordo com Rehman *et al.* (2020), com a urbanização e o rápido aumento da população, os recursos naturais são cada vez mais explorados, tornando a sustentabilidade uma questão séria. Esse tema não está relacionado apenas em reduzir o desperdício de materiais, mas também com ações que possam promover o uso inteligente dos recursos naturais, impactando positivamente no desenvolvimento social, econômico e regional (ROQUE & PIERRI, 2019).

Ao longo dos anos vêm surgindo diversos estudos que abordam a produção de agregados leves com incorporação de rejeitos como o lodo, cinzas de carvão e resíduos agrícolas. Isto porque existe no mundo a necessidade do gerenciamento dos resíduos sólidos. A Organização das Nações Unidas (ONU) publicou um estudo em 2024 projetando que dentro de 26 anos a produção mundial de resíduos será de aproximadamente 3,8 bilhões de toneladas, impactando a sociedade, o meio ambiente e a economia global, o que torna relevante e urgente a busca pelo reaproveitamento dos resíduos, que se tornarão recursos valiosos.

Os revestimentos cerâmicos, materiais amplamente utilizados em todo o mundo, sendo grande parte deles o porcelanato, são responsáveis por gerar grandes quantidades de resíduos. O Brasil é um país que está entre os maiores consumidores (3º lugar), produtores (3º lugar) e exportadores (6º lugar) de revestimentos cerâmicos, e que, segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos (2024), representa 6% do PIB de materiais de construção. O crescimento desse setor é preocupante, pois há um aumento significativo na produção de resíduos, sendo um deles o resíduo do polimento do porcelanato (RPP) que são dispostos de forma inadequada e vão se acumulando ao longo dos anos, resultando em prejuízos ambientais que podem chegar a ser irreversíveis. Os principais danos ao meio ambiente são a contaminação do solo e de bacias hidrográficas.

Existem metodologias consagradas para a fabricação de agregados leves, como a de Riley, que parte da combinação de materiais que, submetidos à altas temperaturas, conseguem sofrer expansão e tornar-se leves devido a criação da porosidade interna (RILEY, 1951). A metodologia pelo somatório de óxidos fundentes também é amplamente utilizada. Entretanto, como alguns autores já abordaram em seus trabalhos (RILEY, 1951; DONDI *et al.*, 2016; AYATI, 2018; PONTES, 2024), essas metodologias não são de todo assertivas e, portanto, as fabricações dos agregados devem considerar otimizações. Como forma de otimizar o processo, pode-se fazer uso do método de Taguchi, uma técnica estatística que parte de um plano experimental capaz de conceber sistemas de alta qualidade a partir das combinações dos parâmetros mais influentes no processo (MARTINS, 2023).

Diante o exposto, o desenvolvimento de agregados leves sustentáveis e regionais se fazem necessários, uma vez que o uso de resíduos contribui na redução de impactos ambientais, ao mesmo tempo que incentiva a economia local, trazendo a possibilidade de produções dos agregados em outras regiões do país. Além disso, este trabalho visa contribuir cientificamente sobre a otimização da produção de agregados leves com resíduo do polimento do porcelanato e argilas regionais da Paraíba.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Proceder a um estudo de desenvolvimento de agregado leve artificial com argilas e resíduo do polimento do porcelanato.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir agregados leves a partir da definição do programa experimental pelo método de Taguchi, a fim de indicar a formulação entre argila e resíduo do polimento do porcelanato adequada com base em suas propriedades essenciais;
- Avaliar as propriedades tecnológicas de relevância dos agregados que mostrem sua classificação como leves;
- Criar um catálogo de aplicações para os agregados leves obtidos.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 AGREGADOS LEVES

Segundo a Norma Europeia EN 13055:2016, os agregados leves são definidos como materiais granulares, de origem mineral, que possuem densidade de partículas menor ou igual a 2000 kg/m³. Quanto à absorção de água, a norma ACI 213R-03 (2003) do Instituto Americano de Concreto cita que esse parâmetro varia entre 5% e 25% de absorção, valores acima do apresentado para os agregados de peso normal, que é 2%.

A NBR NM 35/1995 cita que os agregados leves devem ser de material granular leve, celular e inorgânico, e com relação a densidade, na Tabela 1 podem ser observados os maiores valores para massa unitária em relação às faixas granulométricas pré-definidas (Tabela 2).

Tabela 1 - Massa unitária máxima de agregados leves para concreto estrutural

Graduação do agregado (faixa)	Massa unitária máxima do agregado no estado seco solto (kg/m ³)
1 e 2	1040
3	1120
4, 5, 6, 7 e 8	880

Fonte: NBR NM 35/1995.

Tabela 2 - Faixas granulométricas

Faixa	Graduação do agregado	Porcentagem, em massa, acumulada em peneiras de malha quadrada								
		25 mm	19 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	300 µm	150 µm
1	12,5 a 0	-	0	0 - 5	-	20 - 50	-	-	80 - 95	85 - 98
2	9,5 a 0	-	-	0	0 - 10	10 - 35	35 - 65	-	75 - 90	85 - 95
3	4,75 a 0	-	-	-	0	0 - 15	-	20 - 60	65 - 90	75 - 95
4	25 a 12,5	0 - 5	-	90 - 100	-	-	-	-	-	-
5	25 a 4,75	0 - 5	-	40 - 75	-	90 - 100	-	-	-	-
6	19 a 4,75	0	0 - 10	-	40 - 80	90 - 100	-	-	-	-
7	12,5 a 4,75	-	0	0 - 10	20 - 60	80 - 100	90 - 100	-	-	-
8	9,5 a 2,36	-	-	0	0 - 20	60 - 95	90 - 100	-	-	-

Fonte: NBR NM 35/1995.

Além de sua baixa densidade, os agregados leves possuem alta porosidade (o que pode explicar a maior absorção de água), caráter inerte e boa resistência mecânica, o que colabora para que esse material possua variadas aplicações, tais como: concreto leve, alvenaria, pavimentos, geotecnica, tratamento de água, horticultura, entre outros (MORENO-MAROTO *et al.*, 2020).

Souza (2019) coletou informações sobre as propriedades de resistência ao esmagamento, absorção de água e densidade de partículas dos agregados leves comerciais que resultou na formação de cinco grupos de aplicações em obras e serviços de engenharia, conforme apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de classificação dos agregados leves

Densidade (g/cm ³)	Absorção de Água (%)	Resistência ao Esmagamento (MPa)	Aplicação
< 2,00	0 - 20	> 5,00	Concreto de alta resistência
	0 - 20	> 2,30	Concreto leve estrutural
	0 - 34	> 1,80	Concreto leve não estrutural, argamassas leves
	10 - 38	> 1,80	Aplicações geotécnicas
	10 - 38	> 1,00	Jardinagem e paisagismo, isolamento térmico e acústico

Fonte: Adaptado, SOUZA *et al.* (2020).

Segundo Ayati *et al.* (2018), a melhor matéria-prima para se produzir o agregado leve é a argila natural, pois existe em abundância e possui características peculiares de interesse ao processo. Além da argila, as fontes utilizadas para produzir os agregados leves são diversas, a exemplo, podem ser citados o xisto expandido, vidro expandido ou triturado, resto de tijolos, rejeito de ferro, poliestireno e casca de arroz.

Molinari *et al.* (2020) cita que o processo para a obtenção de agregados leves está relacionado com um tratamento térmico que faça o material expandir. O grau de expansão deste material irá refletir nas propriedades tecnológicas, microestrutura e resistência mecânica, características que estão atreladas à qualidade do produto.

Em seu estudo, Riley (1951) indicou o que leva uma argila a se tornar um agregado leve:

- Primeiramente, há o desenvolvimento de uma fase viscosa em temperatura próxima à do ponto de fusão;
- Em seguida, há a liberação de gás (geralmente CO₂, CO, H₂O, H₂, O₂, SO₂ ou Cl₂), referente à decomposição de matéria orgânica e minerais, tais como a calcita, dolomita, os filossilicatos, sulfetos, cloretos, minerais ferrosos, entre outros.

Se essas condições forem atendidas de forma simultânea, o gás é aprisionado na matriz viscosa, promovendo a formação de poros. Esse processo é seguido pela expansão (ou inchaço) do material. A soma dos teores de óxidos fundentes (Fe₂O₃, Na₂O, K₂O, CaO e MgO) da mistura interferem na expansão do agregado (AYATI *et al.*, 2018).

Segundo Chung *et al.* (2021), a baixa densidade surge a partir do ar aprisionado, formando um sistema interno de poros. Nesse processo, os agregados tendem a perder um pouco da resistência mecânica, porém, outras propriedades podem ser melhoradas.

De acordo com Moreno-Maroto *et al.* (2020), a produção de agregados leves deve envolver um rápido aquecimento por choque térmico. Com isso, as pelotas (*pellets*) podem acabar estourando, caso esse tratamento térmico não seja de forma controlada. O que pode impedir esse fenômeno é o pré-aquecimento do material, que deve ser por um curto período, para que não haja significativa perda de gases (DECLER & VIAENE, 1993).

A formação das pelotas está associada à plasticidade do material. Quando se utiliza amostras com baixa plasticidade, ou mesmo com ausência dela, ocorre a desintegração dessa amostra quando manuseada (MORENO-MAROTO *et al.*, 2020). Portanto, o material utilizado deve possuir boa trabalhabilidade, devendo secar com baixa deformação e com baixo consumo de calorias, sendo mais comum a utilização de argilas de caulim e caulinita (SEMBENELLI, 1966).

Souza (2019) apresentou que, no Brasil, só há um tipo de agregado leve comercial, produzido no estado de São Paulo. As características desse agregado são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Características do agregado leve produzido no Brasil

Nome comercial	Matéria-prima	Processo de fabricação	Massa específica (g/cm ³)
Cinexpan	Argila	Forno rotativo	0,6 - 1,5

Fonte: Adaptado, Rossignolo (2003) e Lau *et al.* (2018).

Como este agregado é produzido apenas na região Sudeste do país, é necessário buscar agregados advindos de matérias-primas regionais e da indústria local (SOUZA, 2019).

3.2 UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS PARA A PRODUÇÃO DE AGREGADOS LEVES

Conforme as questões ambientais vão ganhando força, é exigido cada vez mais que as indústrias se posicionem quanto ao reaproveitamento dos resíduos. No que tange a produção de agregados leves, a aplicação de resíduos como material adicionado à mistura conduz a um menor consumo de recursos naturais e, consequentemente, agrega valor ao material que seria descartado (SOUZA *et al.*, 2020). Diante disso, diversos pesquisadores vêm analisando a viabilidade do reaproveitamento de diferentes resíduos para a fabricação de agregados leves.

Segundo Dondi *et al.* (2016), a partir dos anos 2000 é possível encontrar na literatura diversos estudos sobre a produção de agregados leves envolvendo diferentes fontes de matérias-primas, como os resíduos sólidos urbanos, os resíduos de mineração e pedreiras, resíduos de usinas de carvão, indústria metalúrgica, entre outros.

No estudo de Souza (2010), foram utilizadas misturas de argila (5% em massa) com rejeito do processo *Bayer* (processo industrial de produção de alumina) da indústria minero-metalúrgica (variando de 55% a 95% de substituição) e adição de sílica (de 0% a 40%) sinterizadas a temperaturas de 1200 °C a 1250 °C. Os ensaios realizados mostraram que as densidades obtidas variaram de 1,2 g/cm³ até 2,7 g/cm³, com resistência à compressão chegando a 40 MPa.

Soltan *et al.* (2016), desenvolveram um agregado leve a partir de argila e resíduo de corte de granito e mármore (RGM), sem adição de fundentes. Os teores de resíduo utilizados nas misturas variaram de 50% a 100%, sendo sinterizadas por 15 minutos a temperaturas de 1000 °C a 1200 °C. A massa unitária obtida para esses agregados foi de 1,2 g/cm³.

Moreno-Maroto *et al.* (2017), mostraram em seu estudo a utilização de resíduos de pedras ornamentais (RGM) com argila e adição de fibra de carbono/rejeito plástico, que serviram como fundentes, fazendo chegar em um produto satisfatório para utilização como agregado leve, com densidade de 1,13 g/cm³.

Souza *et al.* (2020, 2021) utilizou resíduo da biomassa da cana-de-açúcar (RBC), resíduo de corte de granito e mármore (RGM) e argila para desenvolver estudos sobre o desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduos industriais e matérias-primas locais da região nordeste do Brasil. O teor de resíduos utilizado variou de 0% a 100% e as misturas foram submetidas a temperaturas de sinterização entre 1000 °C e 1263 °C. Registrou-se densidades inferiores a 2 g/cm³ e absorção de água inferior a 15%. As composições utilizando RGM forneceram agregados com densidade de 1,56 g/cm³ e 8% de absorção de água, além de apresentar resistência à tração superior à do agregado leve comercial produzido no Brasil.

O estudo “Influência das adições de resíduo do polimento do porcelanato em argilas visando a obtenção de agregados leves” de Pontes (2024), fez uso do resíduo do polimento do porcelanato em argilas de dois grupos: brancas e vermelhas. Foram feitas substituições em teores de 20% a 100% de resíduo do polimento do porcelanato nas argilas, submetendo cada composição a temperaturas de sinterização que variaram de 1000 °C a 1240 °C. Foi observado expansão com índice de 187,49%, densidades variando de 0,63 g/cm³ e 2,35 g/cm³, absorção de água de 0,83% e resistências mecânicas chegando até 25,8 MPa, concluindo que é possível e viável produzir agregados leves com incorporação de resíduo de polimento de porcelanato.

Apesar da variação de resíduos utilizados e processos metodológicos aplicados, é possível observar a semelhança entre os resultados obtidos nas pesquisas mencionadas anteriormente. Todas elas apresentaram agregados com densidade pouco maior que 1 g/cm³, com exceção da pesquisa de Pontes (2024), que obteve densidades inferiores. Além disso, tanto Pontes (2024) quanto Souza *et al.* (2020, 2021) obtiveram absorções de água relativamente baixas. Observa-se também que as combinações realizadas por Pontes (2024) proporcionaram elevados índices de expansão, chegando a mais de 100%, ou seja, as amostras mais que duplicaram de tamanho. Todos esses estudos mostram como é possível produzir agregados leves de qualidade mesmo quando parte de sua matéria-prima é substituída por resíduos agrícolas/industriais.

3.3 RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO (RPP)

Segundo Santos (2019), o resíduo do polimento do porcelanato é gerado a partir da mistura do pó obtido na etapa de polimento das peças de porcelanato polido e do material abrasivo usado para tal finalidade. A característica final desse resíduo é um pó branco e fino. Sua composição química é basicamente formada pela massa do porcelanato e do material abrasivo (BECHER, 2013). Diversos autores trazem estudos sobre essa composição (SILVA, 2005; BERNARDIN *et al.*, 2007; MARQUES *et al.*, 2007; RAMBALDI *et al.*, 2007; SILVA, 2012; PONTES, 2024), sendo comum entre os resultados o elevado teor de sílica (SiO₂) e de alumina (Al₂O₃), respectivamente. Entre os óxidos, o de teor mais significativo é o óxido de magnésio (MgO).

O processo de produção do porcelanato/resíduo do polimento do porcelanato se dá da seguinte forma:

Após a obtenção das matérias-primas, faz-se a dosagem da massa para o porcelanato, que consiste, basicamente, em argilas, quartzo, caulins e feldspatos (SOUZA, 2007). Com a mistura pronta, esta parte para a etapa de moagem, que vai proporcionar uma granulometria ideal para as melhores condições de compactação das peças. A moagem é feita através de um moinho de bolas, seguindo para um peneiramento com a função de reter os materiais mais grosseiros, resultando assim em uma massa mais homogênea (ARAÚJO, 2016).

A próxima etapa é a atomização por meio da técnica do *spray dryer*. A barbotina gerada na etapa de moagem é atomizada com ar a temperaturas que podem variar de 500 °C a 600 °C (MORAIS, 2007), formando um pó fino que será utilizado na prensagem das peças de

porcelanato. A conformação é feita de tal forma que se reduza ao máximo a porosidade das peças, sendo a pressão aplicada de forma invariável (ARAÚJO, 2016).

Após a prensagem, ocorre a etapa de secagem das peças, a fim de reduzir o teor de umidade antes de levar à queima, pois a umidade em altas temperaturas pode gerar problemas ou defeitos nas peças. Além disso, o processo de secagem confere maior resistência ao material (ARAÚJO, 2016). Em seguida, a sinterização ocorre para que a fase líquida seja gerada, reduzindo os poros internos que venham a existir, o que proporciona uma menor absorção de água e dimensões bem definidas (MORAIS, 2007).

Finalmente, ocorre a etapa em que o resíduo é gerado, o polimento:

O processo de polimento consiste em um equipamento dotado de várias cabeças polidoras compostas de materiais abrasivos, que em contato com as peças em rotação alta, velocidade controlada em presença de água executam o polimento, sendo que à medida que a peça passa pela máquina os abrasivos usados apresentam gradativamente uma granulometria mais fina, até conseguir-se o resultado desejado (BITTENCOURT & BENINCÁ, 2002, p. 40).

De acordo com Santos (2019), o resíduo do polimento do porcelanato gerado em forma de “lama” após a etapa do polimento é direcionado para um galpão no qual uma prensa comprime esse material até formar um pó úmido que é conformado em placas retangulares que depois são dispostas em terrenos a céu aberto (outras indústrias rejeitam o pó sem prensar). Depois de secas, o resíduo em pó é armazenado no próprio pátio das indústrias (Figura 1), gerando grandes quantidades de resíduo com capacidade de causar poluição do ar, visual, do solo e lençóis freáticos. Além disso, para fazer um descarte adequado, a empresa tem que dispensar de recursos financeiros.



Figura 1 - Armazenamento do resíduo do polimento do porcelanato

Fonte: SOUZA, 2007.

Santos (2019), faz um alerta quanto ao aumento da produção do porcelanato polido, em que no período de 10 anos (2005 a 2015), houve um aumento de aproximadamente 55,17%. Consequentemente, a geração de resíduos tende a aumentar nas mesmas proporções, fazendo-se necessário a criação de soluções ecologicamente corretas para o descarte desse material.

3.3.1 Características do Resíduo do Polimento do Porcelanato

Neste tópico serão abordadas características do resíduo do polimento do porcelanato, tais como a composição química, mineralógica e granulometria que serão utilizadas como base para a discussão dos resultados apresentados no Capítulo 5.

Na análise da composição química do resíduo do polimento do porcelanato utilizado em seu trabalho, Pontes (2024) realizou o ensaio de fluorescência de raios-X (FRX), obtendo os resultados apresentados na Tabela 4, em que se pode confirmar a observação feita anteriormente de que a sílica, a alumina e o óxido de magnésio são os elementos com maior teor na composição.

Tabela 4 - Composição química obtida através de fluorescência de raios-X, por Pontes

Precursor	Composição química do resíduo do polimento do porcelanato, óxidos (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Óxidos fundentes (OF)		CaO	MgO	Outros
Resíduo do polimento do porcelanato	64,460	25,192	0,478	-	2,060	1,644	5,850	0,315

Fonte: Adaptado, Pontes (2024).

Santos (2008), também realizou esta análise e obteve os resultados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Composição química obtida através de fluorescência de raios-X, por Santos

Precursor	Composição química do resíduo do polimento do porcelanato, óxidos (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	SO ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Outros
Resíduo do polimento do porcelanato	59,533	18,989	2,260	1,533	3,050	1,911	10,953	0,841

Fonte: Adaptado, Santos (2008).

A presença do óxido de magnésio pode ser explicada por este composto químico estar presente nos abrasivos utilizados no processo de polimento do porcelanato (BERNARDIN *et al.*, 2007) e sua presença pode facilitar a liberação de gases nas amostras quando queimadas (PONTES, 2024), o que é de importância para a formação de agregados leves.

No trabalho de Marques *et al.* (2007), foi usado o método de difração de raios-X (DRX) para se obter as fases cristalinas do resíduo do polimento do porcelanato, no qual foi encontrado o carbeto de silício, o quartzo, a mulita e o periclase (Figura 2).

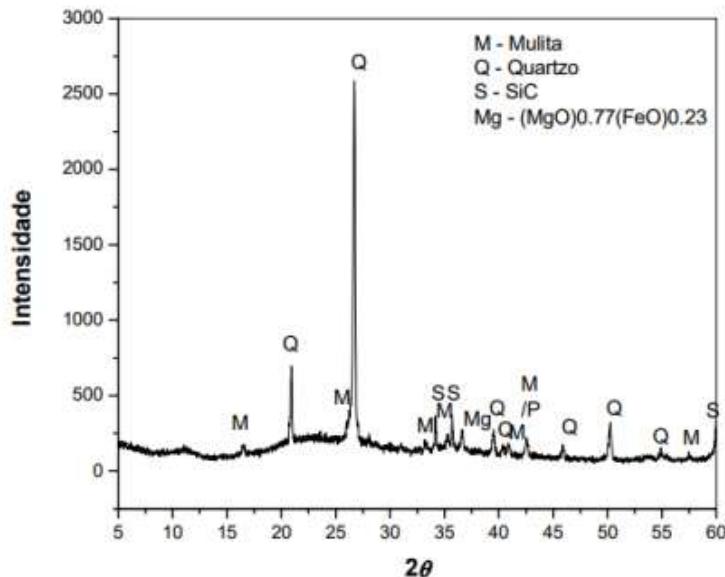


Figura 2 - Difração de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato, por Marques *et al.*

Fonte: MARQUES *et al.*, 2007.

Pontes (2024) previu a formação da mulita a partir dos óxidos inorgânicos encontrados na fluorescência de raios-X de suas matérias-primas:

A partir dos resultados encontrados é possível presumir parte dos efeitos provocados pela adição das matérias-primas: (a) o elevado teor do somatório de óxidos inorgânicos (SiO_2 e Al_2O_3), encontrado em (RPP) (89,6%), [...] pode favorecer a captura de gases liberados, promovendo a formação de materiais cerâmicos, além da importância desses compostos como formadores das agulhas de mulita durante a queima, conferindo resistência mecânica aos corpos cerâmicos; [...]. (PONTES, 2024, p. 37).

Marques *et al.* (2007) explica que o carbeto de silício e o periclase são provindos dos abrasivos utilizados no polimento, enquanto a mulita e o quartzo advêm das matérias-primas do porcelanato.

A composição mineralógica obtida por Pontes (2024) é semelhante a encontrada por Marques *et al.* (2007), em que as principais fases cristalinas encontradas foram o quartzo, a mulita e o carbeto de silício (Figura 3).

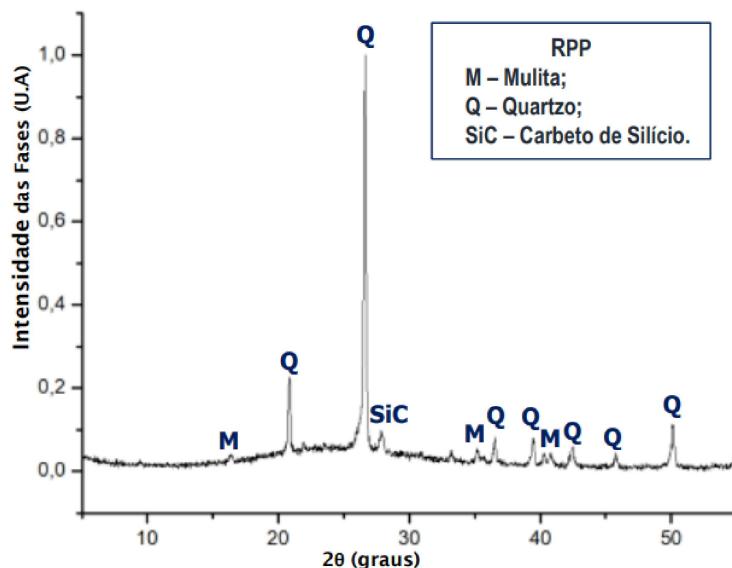


Figura 3 - Difração de raios-X do resíduo do polimento do porcelanato, por Pontes
Fonte: PONTES, 2024.

Pontes (2024) confirma que o quartzo é oriundo do porcelanato, que a mulita é proveniente do processo de cristalização da peça e que o carbeto de silício está associado ao abrasivo utilizado no polimento do porcelanato.

Com relação à distribuição granulométrica, o resíduo do polimento do porcelanato apresenta diâmetro médio de 6,69 μm , com dimensões máximas abaixo de 74 μm (Figura 4), confirmando os valores encontrados na literatura (PONTES, 2024; MARQUES *et al.*, 2007).

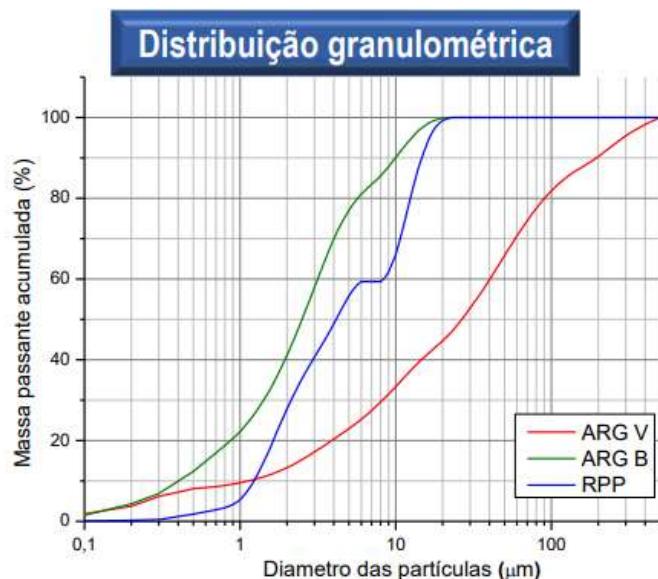


Figura 4 - Distribuição granulométrica do resíduo do polimento do porcelanato e argilas branca e vermelha
Fonte: PONTES, 2024.

No trabalho de Santos (2008) é possível observar, através de imagem obtida na microscopia eletrônica de varredura (MEV), que as partículas do resíduo do polimento do porcelanato se apresentam de forma irregular e angular (Figura 5).

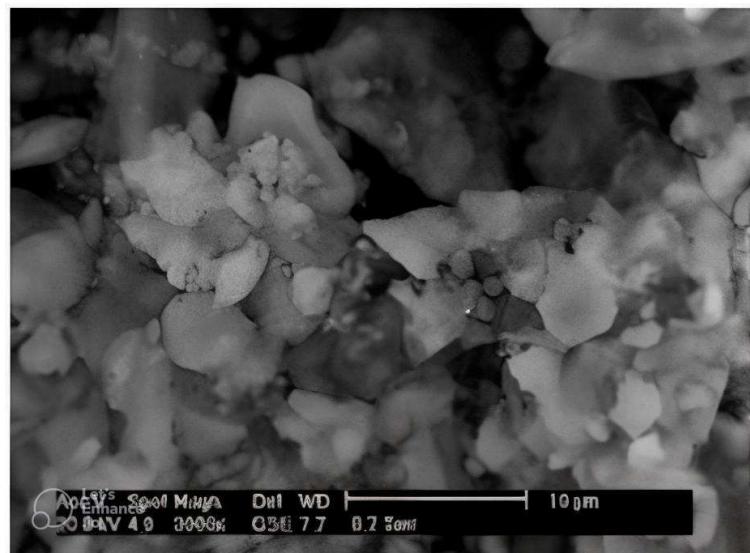


Figura 5 - Micrografia do resíduo do polimento do porcelanato

Fonte: SANTOS, 2008.

3.4 ARGILAS BRANCA E VERMELHA DE JOÃO PESSOA - PARAÍBA

Semelhante ao item anterior, este tópico abordará características físico-químicas e mineralógicas das argilas branca e vermelha que serão utilizadas como base para a discussão dos resultados apresentados no Capítulo 5.

O portal *OneGeology* oferece informações relacionadas às pesquisas geológicas em todo o mundo, o que possibilita conhecer o solo presente no município de João Pessoa – Paraíba (Figura 6).



Figura 6 - Geologia do município de João Pessoa – Paraíba segundo o *OneGeology*

Fonte: *OneGeology* (2024).

O portal apresenta uma faixa na cor amarela na região do município de João Pessoa – Paraíba, que significa a predominância de rochas sedimentares da estratigrafia Cenozoica.

No mapa (Figura 7) disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) através do “Projeto Materiais de Construção Civil da Região Metropolitana de João Pessoa” é perceptível que o município de João Pessoa – Paraíba é constituído pelos litotipos Cenozoico Quarternário de Depósitos Aluvionares, Cenozoico Neógeno de Depósitos Coluvio-Eluviais e Cenozoico Paleógeno do Grupo Barreiras.

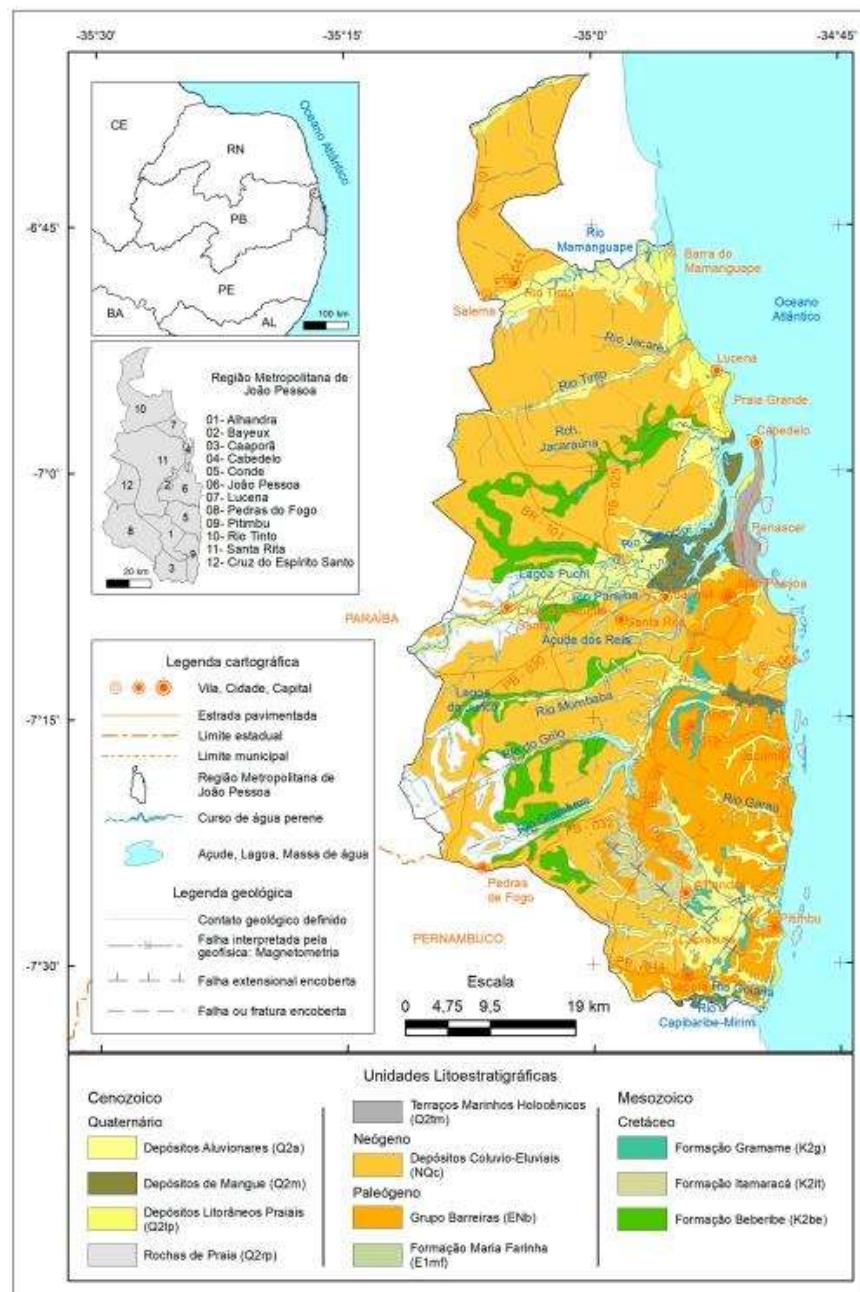


Figura 7 - Distribuição das unidades litoestratigráficas cenozoica e mesozoica na Região Metropolitana de João Pessoa

Fonte: CPRM, 2021.

O CPRM (2021) cita que os Depósitos Aluvionares são predominantes nos terrenos de várzeas ou aluviões, sendo formados por areais, cascalhos e argilas, possuindo significativas frentes de extração desses materiais para serem utilizados na indústria da cerâmica vermelha. O depósito das argilas é caracterizado por possuir bastante plasticidade e coloração acinzentada (escura e clara) e amarronzada. Já os Depósitos Coluvio-Eluviais estão ligados aos sedimentos, possuindo coberturas arenoso-argilosas e, o Grupo Barreiras, apresenta depósitos com granulometria variada, indo de cascalhos a areias finas, com coloração amarelada, intercalados com argila siltica (ALHEIROS *et al.*, 1988).

Os ensaios de caracterização física e química das argilas branca e vermelha utilizadas no trabalho de Pontes (2024), procedeu nos resultados apresentados nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Granulometria das argilas branca e vermelha

Diâmetros (μm)	Argila Branca	Argila Vermelha
a 10%	0,4	1,12
a 50%	2,5	26,5
a 90%	9,95	194,36
Médio	3,8	63,22

Fonte: Adaptado, Pontes (2024).

A distribuição granulométrica mostra que a argila branca possui graduação mais fina em comparação com a argila vermelha. Segundo Dutra *et al.* (2006), argilas que possuem partículas menores são conduzidas a uma menor estabilidade térmica, assim como maior retração e perda de massa.

Tabela 7 - Composições químicas das argilas branca e vermelha

Argila	Fluorescência de Raios-X (%)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Outros
Branca	46,216	50,752	0,238	0,708	-	1,918	0,170
Vermelha	55,581	28,866	5,713	2,163	1,399	5,064	1,215

Fonte: Adaptado, Pontes (2024).

É percebido que há presença de maiores teores dos óxidos fundentes (Fe₂O₃, K₂O, CaO, MgO) na argila vermelha do que na argila branca. Segundo Ayati *et al.* (2018) a soma dos óxidos fundentes (Σ OF) interfere na expansão do material, pois uma soma mais elevada significa mais gases sendo liberados. Os óxidos inorgânicos (SiO₂ e Al₂O₃) possuem papel fundamental no controle da viscosidade do material, auxiliando na captura dos gases que vão sendo liberados. Neste caso, há uma maior probabilidade dos agregados com argila vermelha (Σ OF 14,34) expandirem do que os agregados com argila branca (Σ OF 2,86).

Na composição mineralógica, foi observada a presença de caulinita, quartzo e ilita na argila vermelha (Figura 8) e caulinita, haloisita e quartzo na argila branca (Figura 9).

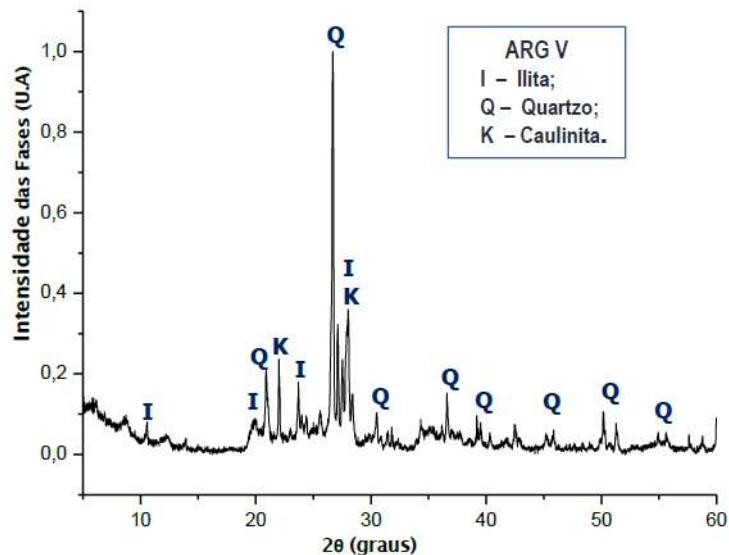


Figura 8 - Composição mineralógica da argila vermelha

Fonte: PONTES, 2024.

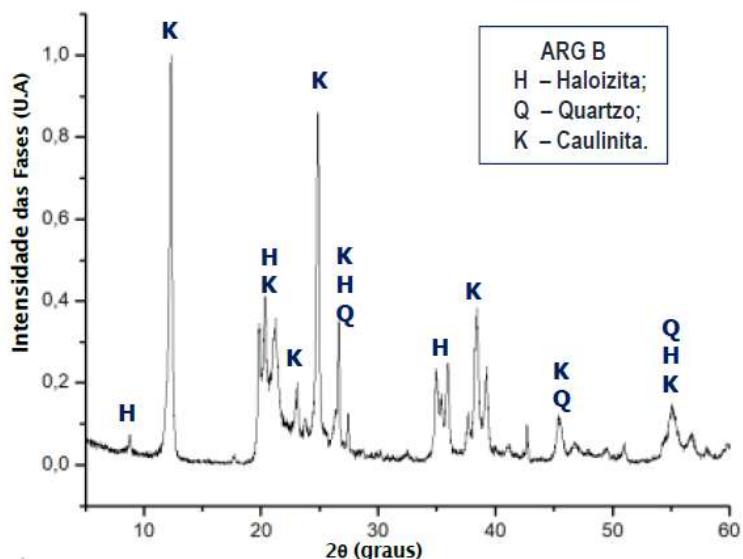


Figura 9 - Composição mineralógica da argila branca

Fonte: PONTES, 2024.

Com relação à expansibilidade das argilas, Pontes (2024) produziu o diagrama de Riley (Figura 10), em que é mostrado que tanto a argila branca quanto a argila vermelha se apresentam fora da zona de expansão, assim como o resíduo do polimento do porcelanato.

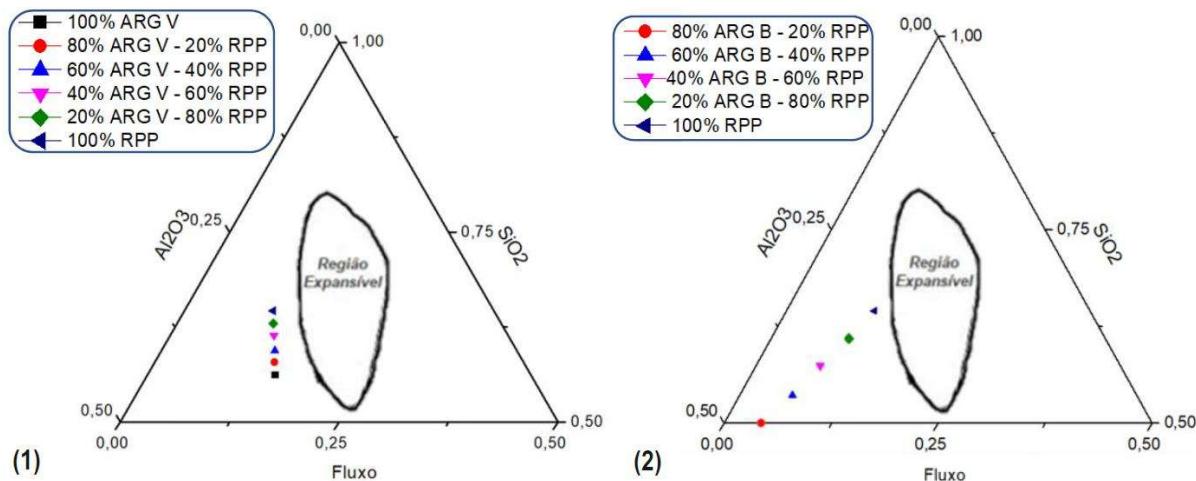


Figura 10 - Diagrama de Riley para as misturas com argila vermelha e resíduo do polimento do porcelanato (1) e argila branca e resíduo do polimento do porcelanato (2)

Fonte: PONTES, 2024.

Souza *et al.* (2020) realizaram o ensaio de termogravimetria (TG) e análise térmica diferencial (DTA) dos precursores de sua pesquisa, sendo um deles a argila branca. Na Figura 11, os autores discutem que o comportamento da argila branca é semelhante ao de uma argila refratária com elevados teores de sílica e alumina. As perdas de massa são atribuídas a liberação da água adsorvida (100 °C), queima de substâncias orgânicas à 400 °C e desidroxilação da caulinita a 550 °C e 1000 °C.

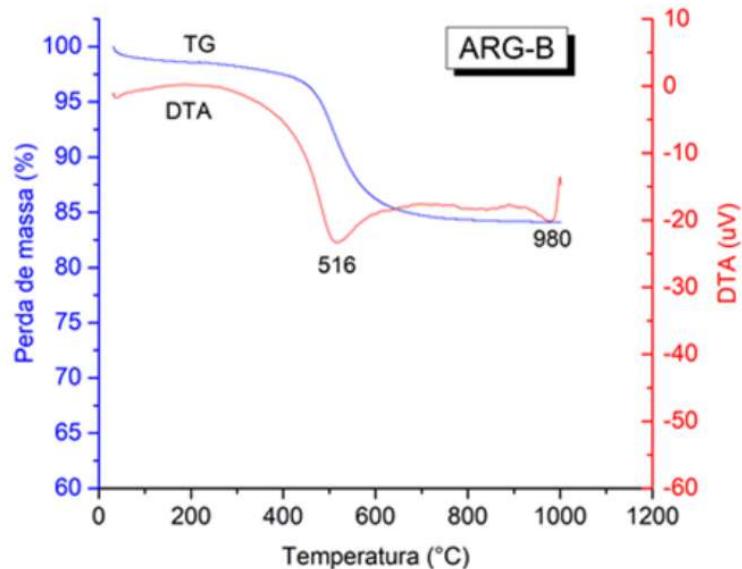


Figura 11 - TG, DTA e perda de massa da argila branca

Fonte: Souza *et al.* 2020.

No estudo de Souza (2019) foi apresentada a TGA-DTA para a argila vermelha (Figura 12) em que a perda de massa ocorreu de 125 °C até 710 °C, relacionada a água absorvida, combustão da matéria orgânica e desidroxilação dos argilominerais de ilita.

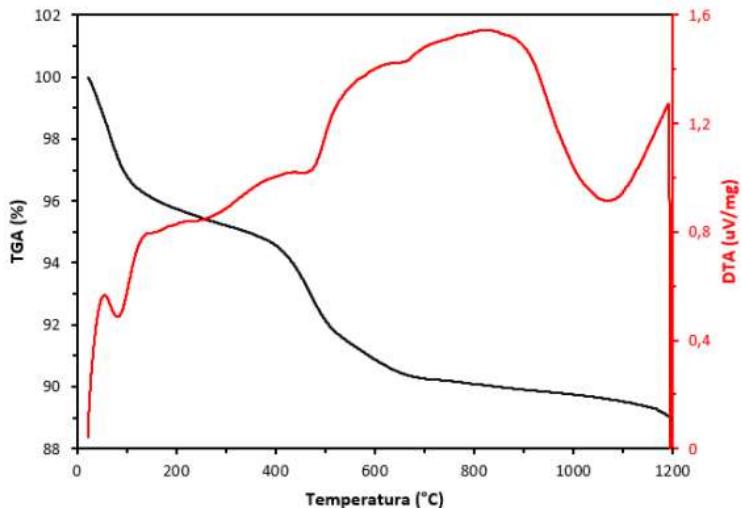


Figura 12 - TGA-DTA da argila vermelha

Fonte: SOUZA, 2019.

3.5 MÉTODO DE TAGUCHI

De acordo com Almeida *et al.* (2019), o método de Taguchi nada mais é que uma técnica estatística utilizada no planejamento experimental que almeja conceber sistemas altamente qualificados a custos mais baixos, visando reduzir a variabilidade, tornando os produtos com menor sensibilidade às variações dos fatores de controle (MARTINS, 2023).

O que torna este método atrativo é a realização de menores quantidades de experimentos para se obter a otimização de processos e/ou produtos, assim como a aptidão para determinar os fatores que possuem maior influência, tornando-se demasiado útil nas decisões sobre as mudanças nos processos que irão implicar nos resultados desejados.

Essa redução dos experimentos se torna possível porque Taguchi faz uso de matrizes ortogonais em substituição ao método fatorial, que são ferramentas utilizadas no *Design of Experiments* (DOE), ou, simplesmente, no planejamento de experimentos. Nas matrizes ortogonais os fatores são considerados de forma igual, o que permite que os fatores possam ser analisados de forma individual e independente. Como os seus efeitos não afetam as estimativas entre si, é possível reduzir o número de experimentos (MINITAB, 2024). O método tem o objetivo de avaliar a influência de cada variável e encontrar combinações ideais para os processos (MARTINS, 2023).

Além disso, o método de Taguchi busca identificar os parâmetros utilizados no processo que possuem impacto na qualidade do produto (MARTINS, 2023). Esses fatores são divididos em dois grupos: os de controle e os de ruído. Os fatores de controle são aqueles que podem ser controlados durante o processo, enquanto os fatores de ruído são aqueles que não podem ser controlados e causam variações no desempenho do processo e/ou produto (MINITAB, 2024).

Martins (2023) orienta que após identificar os fatores que são controláveis, deve-se indicar quais seus patamares ideais, como uma temperatura específica ou uma faixa na qual os valores podem variar. A ideia é encontrar valores que sejam capazes de proporcionar melhor desempenho e qualidade do produto. Definindo-se estes valores, pode-se partir para a aplicação das matrizes ortogonais que irão definir o plano de experimentos, que tem a função de especificar quais as combinações dos fatores de controle deverão ser testadas. Com isso, pode-se obter informações adequadas (respostas) para avaliar os efeitos de cada parâmetro.

No trabalho de Moita (2007) é explicado que o método avalia desvios dos resultados obtidos nos experimentos utilizando a relação entre sinal e ruído (S/R). Com essa relação, é possível identificar quais as variáveis de entrada ótimas para se obter o resultado esperado, levando em consideração se é desejado aumentar, diminuir ou centralizar um valor alvo.

O método estabelece as condições que devem ser escolhidas para cada resposta:

- Menor é melhor (minimização);
- Nominal é melhor (centralização); e,
- Maior é melhor (maximização).

O objetivo da relação é encontrar a combinação que diminua os ruídos (variações não desejadas) e aumente o sinal, que são as variações desejadas, alcançando assim uma qualidade robusta e estável para o produto (MARTINS, 2023).

O Minitab (2024) traz um exemplo real da aplicação do método de Taguchi em uma empresa japonesa, *Ina Tile*, que passava por um problema de qualidade em seus azulejos, os quais apresentavam grande variabilidade nas dimensões das peças finais. Ao realizar uma investigação, foi descoberto que a temperatura do forno na qual era feita a queima do material apresentava variações, o que provocava o problema dimensional do produto. Construir um novo forno era inviável, então a temperatura se tornou um fator não controlável (ruído). Após aplicar o método de Taguchi, foi possível encontrar um parâmetro controlável, que potencializava o sinal. Descobriram que, aumentando o teor de cal da argila utilizada na confecção das peças, os azulejos se tornavam mais resistentes à variação da temperatura, resultando na produção de azulejos com dimensões mais uniformes.

Existem estudos nas mais variadas áreas de conhecimento que usam o método de Taguchi como uma ferramenta a ser incluída em processos, como, por exemplo, o trabalho de Chen *et al.* (2017), cujo objetivo foi determinar condições ótimas para a produção de agregados leves a base de resíduos. Eles variaram fatores como a temperatura e tempo de sinterização em uma matriz com cinco fatores e quatro níveis em cada fator a fim de analisar os efeitos em resultados como a densidade, absorção de água e inchaço das pelotas.

Nas e Özbek (2019) estudaram os parâmetros que afetam no processo de torneamento do aço utilizando uma matriz L_{18} ($2^1 \times 3^2$), ou seja, analisou um parâmetro com dois níveis (ferramenta de corte) e dois parâmetros com três níveis (velocidade de corte e taxa de avanço). Com a aplicação do método, foi possível determinar quais desses fatores possuíam mais influência na rugosidade superficial e no desgaste do eixo.

O estudo de Chen *et al.* (2021), traz o uso do método de Taguchi para otimizar a produção de material controlado de baixa resistência com resíduo de rocha ornamental, utilizando uma matriz L_9 (3^4) em que os parâmetros analisados foram a dosagem do resíduo, a relação água/aglutinante, dosagem do acelerador e dosagem de agregado leve. Foi possível observar uma redução do custo de produção em 40,6% chegando a obter resistências de 8,83 MPa, valor estipulado pela Comissão de Construção Pública de Taiwan.

Ghani *et al.* (2004) concluem que o método de Taguchi busca uma melhoria nos processos e produtos fazendo uso da estatística, e com isso, diminui a variabilidade do processo e/ou produto e otimiza sua qualidade. Dessa forma, com a aplicação correta desse método, é possível reduzir custos e aumentar a satisfação do cliente.

4 METODOLOGIA

A metodologia desta pesquisa consistiu em uma primeira etapa, analisar trabalhos existentes na literatura relacionados à produção de agregados leves, assim como trabalhos relacionados ao uso do método de Taguchi. Em seguida foi realizada a definição de características iniciais (composição e tamanho) para a produção de agregados leves e a definição dos fatores de controle e propriedades desejadas para a elaboração do programa experimental. Logo após, foi feita a produção dos agregados leves, realização dos ensaios laboratoriais e aplicação do método de Taguchi e análise de variância. Por fim, foram gerados os gráficos de superfície e a elaboração de catálogo de aplicação dos agregados produzidos.

Na Figura 13, encontra-se, de forma sucinta, o esquema metodológico aplicado nesta pesquisa.

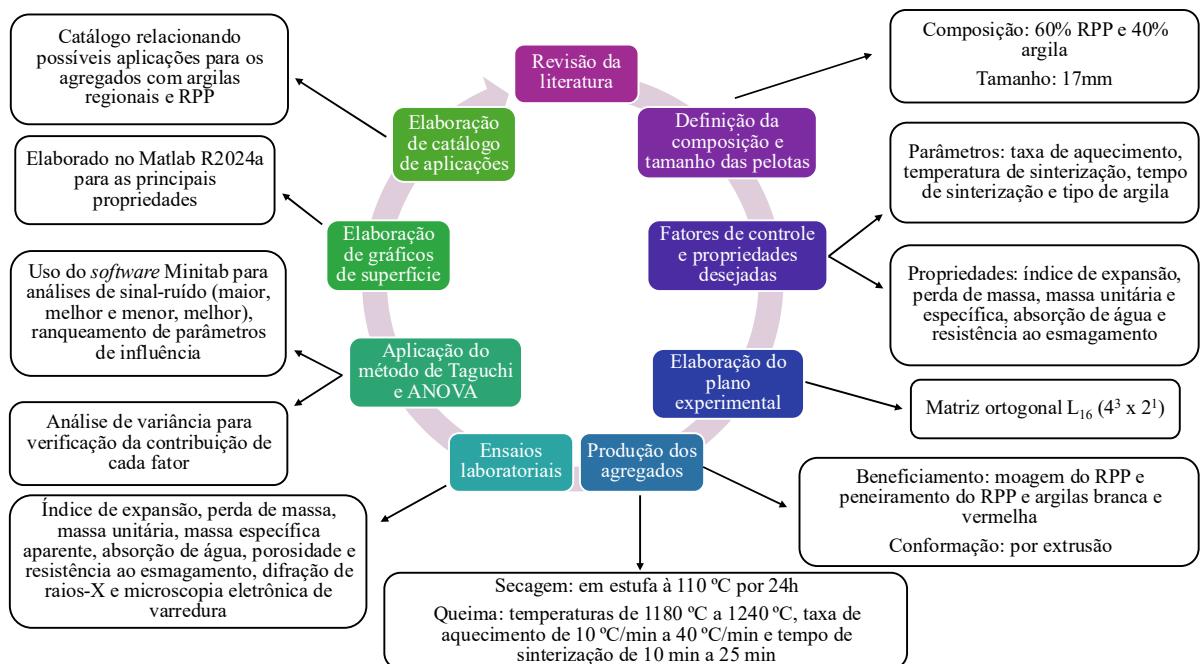


Figura 13 - Esquema metodológico

4.1 DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO E TAMANHO DAS PELOTAS

Inicialmente, se fez uma revisão na literatura e foi tomado como base o trabalho de Pontes (2024). Em uma análise crítica de seu trabalho, foi escolhida apenas uma composição para ser aplicada. Essa análise consistiu em verificar quais composições apresentaram, de forma conjunta, valores satisfatórios para o índice de inchaço, densidade, absorção de água e resistência mecânica, concluindo que a composição com 40% de argila e 60% de resíduo do polimento do porcelanato se saiu melhor perante as demais.

Dessa forma, esta foi a composição escolhida tanto para a argila vermelha quanto para a argila branca, a fim de padronização. Com relação ao tamanho da pelota, entre os três tamanhos apresentados pelo autor, a que se sobressaiu para a composição escolhida foi a maior, com 6 gramas (17mm) e, portanto, foi o tamanho escolhido para ser utilizado nesta pesquisa.

4.2 DEFINIÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Em seguida, foram definidos os parâmetros de entrada para o método de Taguchi, sendo eles: taxa de aquecimento, temperatura de sinterização, tempo de sinterização e tipo da argila utilizada. Cada parâmetro possui quatro níveis, sendo a taxa de aquecimento variando de 10 °C/min a 40 °C/min, temperatura de sinterização de 1180 °C a 1240 °C, tempo de sinterização de 10 minutos a 25 minutos e por fim, o tipo de argila, sendo ela branca ou vermelha. Com isso, foi determinada a matriz ortogonal L_{16} ($4^3 \times 2^1$), sendo necessárias 16 misturas.

A Tabela 8 apresenta o programa experimental determinado pelo *software* Minitab para o método de Taguchi.

Tabela 8 - Programa experimental determinado pelo método de Taguchi

Nº do Experimento	Taxa de Aquecimento (°C/min)	Temperatura de Sinterização (°C)	Tempo de Sinterização (min)	Argila
1	10	1180	10	Branca
2	10	1200	15	Branca
3	10	1220	20	Vermelha
4	10	1240	25	Vermelha
5	20	1180	15	Vermelha
6	20	1200	10	Vermelha
7	20	1220	25	Branca
8	20	1240	20	Branca
9	30	1180	20	Branca
10	30	1200	25	Branca
11	30	1220	10	Vermelha
12	30	1240	15	Vermelha
13	40	1180	25	Vermelha
14	40	1200	20	Vermelha
15	40	1220	15	Branca
16	40	1240	10	Branca

As saídas desejadas, ou respostas avaliadas, foram: o índice de expansão, a perda de massa, a massa unitária, a massa específica aparente, a absorção de água e a resistência ao esmagamento.

4.3 BENEFICIAMENTO E CONFORMAÇÃO

Com o programa experimental, iniciou-se a preparação do material a ser utilizado. Primeiramente, foi observada a necessidade em peso de cada argila e do resíduo do polimento do porcelanato, em que para cada experimento, foi determinado realizar 25 pelotas a fim de se obter uma boa amostragem, totalizando em 400 pelotas de 17 mm cada e, com isso, pode-se determinar a quantidade de argila e resíduo do polimento do porcelanato necessários.

As matérias-primas utilizadas (resíduo do polimento do porcelanato e argilas) foram obtidas no município de João Pessoa, na Paraíba. O resíduo do polimento do porcelanato adveio do chão de fábrica da indústria do porcelanato, enquanto as argilas foram advindas da área litorânea (PONTES, 2024).

4.3.1 Beneficiamento

O beneficiamento dessas matérias-primas foi realizado, inicialmente, colocando-as para serem secas em estufa a 110 °C por 24 horas (Figura 14a). Após a secagem, o resíduo do polimento do porcelanato foi moído em um moinho de discos de alumina (Figura 14b) para redução das partículas e a argila vermelha foi destorroada com o auxílio de um almofariz (Figura 14c), sendo realizado, posteriormente, o peneiramento das argilas e do resíduo na peneira de *mesh* 170 (Figura 14d) a fim de se obter pós-finos que podem resultar em uma expansão mais uniforme e consistente durante a sinterização (NUNES *et al.* 2021).

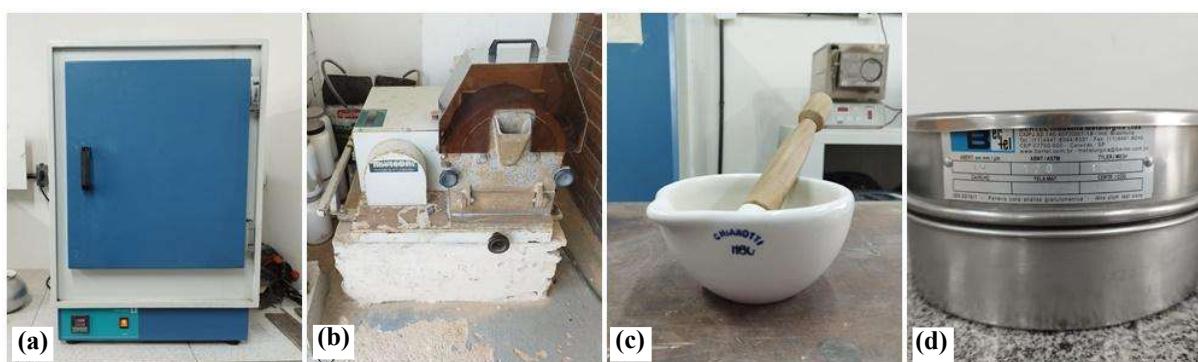


Figura 14 - Etapas do beneficiamento: (a) secagem em estufa; (b) moagem; (c) destorroamento; (d) peneiramento

Dessa forma, pode-se obter os pós-finos e de granulometria mais uniforme para o resíduo do polimento do porcelanato (Figura 15a), para a argila vermelha (Figura 15b) e para a

argila branca (Figura 15c). Estes procedimentos foram realizados no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal da Paraíba (LMC/UFPB).



Figura 15 - Pós obtidos após o beneficiamento: (a) do resíduo do polimento do porcelanato; (b) da argila vermelha; (c) da argila branca

4.3.2 Conformação

O processo de conformação das pelotas foi realizado no LMC e no Laboratório de Reologia da UFPB.

Com o auxílio de uma balança de precisão, foram medidas as massas para a confecção de pelotas com argila branca e resíduo do polimento do porcelanato, e argila vermelha e resíduo do polimento do porcelanato. Após a mistura dos pós, foi adicionada umidade a fim de se dar a plasticidade necessária para o processo de conformação por extrusão. Para a composição com argila vermelha, se utilizou 35% de umidade e para a composição com argila branca, 40% de umidade, gerando duas massas plásticas (Figura 16). Esses valores estão dentro dos limites ideais utilizados por Souza (2019) na geração de agregados leves com argilas branca e vermelha, que foi de 25% a 40%.



Figura 16 - Massas das composições com argila branca e vermelha

As massas foram deixadas por 24 horas ao ar livre. Em seguida, foi realizada a extrusão das pelotas através de uma extrusora, com bico de saída de 10 mm. Logo após a extrusão, as pelotas foram moldadas manualmente. Depois de conformadas, as pelotas ficaram por 24 horas ao ar livre, a fim de começar a retirar lentamente sua umidade (Figura 17), evitando a possível desintegração das amostras na etapa de sinterização devido a perda rápida de água.



Figura 17 - Pelotas de misturas com argila branca e vermelha antes da secagem em estufa

4.4 SECAGEM E SINTERIZAÇÃO

Após as pelotas serem secas ao ar livre por 24 horas, elas foram levadas para secagem em estufa à 110 °C por 24 horas. Por fim, para a queima, foi aplicado o programa experimental descrito na Tabela 8, variando a temperatura de sinterização, a taxa de aquecimento e o tempo de sinterização para as 16 misturas.

4.5 ENSAIOS TECNOLÓGICOS

4.5.1 Índice de Expansão

Devido à expansão do material ser uma característica importante nos agregados leves, foi calculado o índice de expansão (Equação 1) com o interesse de verificar quanto cada amostra expandiu (ou retraiu) após passar pela sinterização. Para isso, foram extraídas 3 medidas de diâmetro das pelotas com o auxílio de um paquímetro e calculado seu volume médio. Isso foi feito para as amostras secas em estufa (volume inicial) e sinterizadas (volume final), a fim de se captar a mudança dimensional.

$$I = \frac{v_i - v_f}{v_i} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

No qual,

I - índice de expansão médio, em porcentagem (%);

v_i - volume inicial (antes da queima), em cm^3 ; e,

v_f - volume final (pós-queima), em cm^3 .

4.5.2 Perda de Massa

Com a sinterização, a amostra pode perder massa, seja pela extração da umidade, seja pela liberação dos gases ou outros fatores associados. Diante disso, calculou-se a perda de massa (Equação 2) a fim de se verificar essa variação. Para isso, foram medidas as massas das amostras secas e sinterizadas com o auxílio de uma balança de precisão.

$$P_m = \frac{M_d - M_s}{M_d} \times 100 \quad (\text{Eq. 2})$$

No qual,

P_m - perda de massa média, em porcentagem (%);

M_d - massa seca, em gramas; e,

M_s - massa sinterizada, em gramas.

4.5.3 Massa Unitária

A massa unitária (Equação 3) leva em consideração a massa total dos agregados (inclusive o ar dos poros). Sua determinação é importante para a conversão de massa para volume em traços de concreto e argamassas. A NBR NM 45/2006 traz os procedimentos a serem realizados, que foram adaptados neste estudo utilizando apenas a massa sinterizada e o volume sinterizado de cada amostra.

$$\rho = \frac{M_s}{v_f} \quad (\text{Eq. 3})$$

No qual,

ρ - massa unitária média, em g/cm^3 ;

M_s - massa sinterizada, em gramas; e,

v_f - volume final (pós-queima), em cm^3 .

4.5.4 Massa Específica Aparente

A análise da massa específica aparente (Equação 4) é necessária, pois com esse dado é possível classificar se o material se configurará como agregado leve. Esse ensaio é realizado conforme a NBR 6458/2017, em que são medidas as massas imersas em água e saturadas (superficialmente secas). Para isso, foi necessário deixar as amostras imersas em água destilada por 24 horas.

$$P_{ap} (s) = \frac{M_s}{M_{sat} - M_i} \times P_w \quad (\text{Eq. 4})$$

No qual,

$P_{ap} (s)$ - massa específica aparente média, em g/cm^3 ;

M_s - massa sinterizada, em gramas;

M_{sat} - massa saturada, em gramas;

M_i - massa imersa, em gramas; e,

P_w - massa específica da água (g/cm^3) à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do ensaio.

A temperatura da água para os ensaios foi de $20\ ^{\circ}\text{C}$, com massa específica igual a $0,998\ \text{g}/\text{cm}^3$.

4.5.5 Absorção de Água

A análise da absorção de água é interessante para se verificar a capacidade do material em absorver água quando ele está imerso nela. Dessa forma, com as massas obtidas no ensaio de massa específica aparente, é possível realizar o cálculo da absorção de água (Equação 5). O ensaio de absorção foi realizado para as amostras inteiras e quebradas.

$$A_a = \frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \times 100 \quad (\text{Eq. 5})$$

No qual,

A_a - absorção de água média, em porcentagem (%);

M_{sat} - massa saturada, em gramas; e,

M_s - massa sinterizada, em gramas.

4.5.6 Porosidade

Esta análise se faz necessária, uma vez que é intrínseco ao agregado leve possuir porosidade. Com as massas obtidas no ensaio de massa específica aparente e densidade da água utilizada, é possível realizar o cálculo da porosidade (Equação 6). O ensaio da porosidade foi realizado para as amostras inteiras e quebradas.

$$p = \frac{M_s - M_{sat}/P_w}{M_i - M_s/P_w} \times 100 \quad (\text{Eq. 6})$$

No qual,

p - porosidade, em porcentagem (%);

M_s - massa sinterizada, em gramas;

M_{sat} - massa saturada, em gramas;

M_i - massa imersa, em gramas; e,

P_w - massa específica da água (g/cm^3) à temperatura ($^{\circ}\text{C}$) do ensaio.

A temperatura da água para os ensaios foi de $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, com massa específica igual a $0,998\text{ g}/\text{cm}^3$.

4.5.7 Resistência ao Esmagamento

O ensaio de resistência ao esmagamento foi realizado no Laboratório de Solidificação Rápida da UFPB através da máquina universal de ensaios com capacidade de aplicação de carga de 10 kN. A velocidade de carga utilizada foi de 1 mm/minuto.

4.5.8 Análise Visual

Foi realizada a análise visual das amostras antes e após a sinterização, assim como após o ensaio de resistência ao esmagamento, realizando registro fotográfico com câmera de celular de 108 MP, folha A4 branca para o fundo, uma régua transparente de 15cm e iluminação artificial existente no ambiente, a fim se de verificar as mudanças ocorridas perceptíveis a olho nu e observar se houve a formação de poros.

4.5.9 Composição Mineralógica e Morfologia

Foram realizados os ensaios de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura em superfície de fratura para quatro amostras selecionadas. O critério para a escolha foi analisar duas amostras dos grupos de agregados com argila branca e duas amostras do grupo de agregados com argila vermelha. Para a argila branca foram selecionadas as amostras 1 e 8, a primeira para tentar investigar o teor de absorção de água que destoou das demais e a segunda pelo fato de ter sido a única entre os agregados de argila branca a se enquadrar como agregado leve. Para a argila vermelha foram selecionadas as amostras 4 e 5, sendo a primeira pelo fato de ter dado a maior expansão e a segunda, a maior resistência entre os agregados com argila vermelha.

4.6 MODELAGEM ESTATÍSTICA

Para a modelagem estatística do método de Taguchi e análise de variância ANOVA, foi utilizado o *software* Minitab, enquanto a elaboração dos gráficos de superfície foi realizada com o auxílio do *software* Matlab R2024a.

Inicialmente, foi realizada a análise de Taguchi para cada saída (ou resposta) definida no programa experimental (Tabela 8), sendo analisados os fatores de controle em cada propriedade, obtendo as relações de sinal-ruído necessárias para realizar o ranqueamento dos parâmetros que influenciaram naquela propriedade em específico, assim como seus gráficos,

sendo possível definir os melhores níveis de cada fator para se obter os resultados desejados. No Quadro 2, são mostradas as análises realizadas e suas condições. Com relação a absorção de água, foi escolhida a condição menor é melhor levando-se em consideração a aplicação em concretos. Caso o interesse maior fosse em aplicações de jardinagem, por exemplo, a condição deveria ser alterada para maior é melhor.

Quadro 2 - Condições utilizadas nas análises pelo método de Taguchi

Análise	Condição
Índice de Expansão <i>versus</i> Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Argila	Maior é melhor
Perda de Massa <i>versus</i> Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Argila	Menor é melhor
Massa Unitária <i>versus</i> Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Argila	Menor é melhor
Massa Específica Aparente <i>versus</i> Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Argila	Menor é melhor
Absorção de Água <i>versus</i> Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Argila	Menor é melhor
Resistência ao Esmagamento <i>versus</i> Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Argila	Maior é melhor

Para a análise de variância, foi utilizado um modelo linear generalizado, em que se obteve, semelhante ao ranqueamento de Taguchi, a contribuição de cada fator para cada propriedade analisada, sem a interferência das condições de maior, é melhor ou menor, é melhor. Utilizou-se um nível de confiança de 95% e nível de significância de 5%.

Por fim, foram produzidos os gráficos de superfície para as principais propriedades dos agregados leves, sendo elas: massa específica aparente, absorção de água e resistência ao esmagamento, e em seguida, foi elaborado um catálogo de aplicações para cada grupo de amostras analisado. Para a produção do catálogo, foram consideradas as principais propriedades do agregado leve (as mesmas já citadas), assim como as principais aplicações do produto: concreto de alta resistência, leve estrutural e leve não estrutural, argamassas leves, geotecnia, jardinagem e paisagismo, e, isolamento termoacústico, comparando os resultados obtidos para cada grupo de amostras com os normativos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos do programa experimental definido pelo método de Taguchi, assim como a análise de variância (ANOVA) deles. Também serão apresentados os gráficos de superfície das principais propriedades dos agregados leves e um catálogo de aplicações.

5.1 DOS ENSAIOS TECNOLÓGICOS

Na Tabela 9, são mostrados os resultados obtidos para o índice de expansão, perda de massa, massa unitária, massa específica aparente, absorção de água (para a amostra inteira), porosidade (para a amostra inteira) e resistência ao esmagamento para cada experimento realizado.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios tecnológicos: índice de expansão, perda de massa, massas unitária e específica, absorção de água e porosidade, e, resistência ao esmagamento

Experimento	Índice de Expansão (%)	Perda de Massa (%)	Massa Unitária (g/cm ³)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Absorção de Água (%)	Porosidade (%)	Resistência ao Esmagamento (MPa)
1	-39,78	6,71	2,41	2,27	3,29	5,70	35,35
2	-39,68	6,52	2,43	2,35	0,00	0,00	37,93
3	54,24	3,67	1,01	1,01	0,40	0,47	8,81
4	91,69	5,10	0,81	0,99	0,66	0,66	4,57
5	11,89	5,75	1,47	1,44	0,39	0,58	15,31
6	16,17	4,98	1,38	1,33	0,31	0,38	14,69
7	-31,01	7,62	2,10	2,01	0,30	0,62	28,31
8	-27,60	7,15	1,98	1,85	0,56	1,04	24,92
9	-40,84	6,50	2,41	2,36	0,89	2,15	26,43
10	-40,55	6,90	2,40	2,28	0,08	0,18	32,52
11	27,22	4,43	1,25	1,19	0,40	0,58	10,88
12	69,43	4,39	0,94	1,00	0,26	0,34	7,87
13	17,02	4,36	1,39	1,32	0,21	0,30	14,08
14	32,54	4,29	1,24	1,17	0,21	0,21	11,38
15	-37,45	6,71	2,29	2,23	0,08	0,08	39,87
16	-34,59	6,78	2,23	2,10	0,17	0,25	32,31

É possível perceber que houve amostras que retrairam (índices de expansão negativos), algumas amostras apresentaram massa unitária e específica acima de 2 g/cm³, baixa absorção de água e porosidade para todas as amostras e em quase sua totalidade, resistências ao esmagamento acima de 5 MPa (mínimo para concreto de alta resistência). Devido os valores de

absorção de água terem dado muito baixos, o ensaio foi repetido com amostras quebradas, a fim de aumentar a superfície de contato porosa com a água, resultando nos dados da Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios tecnológicos: absorção de água e porosidade para amostras quebradas

Experimento	Absorção de Água (%)	Porosidade (%)
1	3,63	9,23
2	0,21	0,51
3	4,00	5,04
4	4,61	5,81
5	2,21	2,76
6	1,52	2,06
7	0,86	1,76
8	0,63	1,24
9	1,72	4,58
10	0,24	0,59
11	2,41	3,44
12	2,72	2,97
13	2,05	2,67
14	2,38	3,13
15	0,43	1,11
16	0,24	0,45

Observa-se que houve um aumento da absorção de água e porosidade em todas as amostras, porém os aumentos mais significativos foram para as amostras com argila vermelha (3 a 6 e 11 a 14), enquanto as amostras com argila branca (1 a 2, 7 a 10 e 15 a 16) apresentaram pouca diferença. Isso se deve ao fato de amostras com argila vermelha formarem uma fase vítreia, como uma película envolvendo a amostra, que quando medida a absorção da amostra inteira, impede a água de entrar em contato com os poros internos, resultando em uma baixa absorção de água, e quando a ensaio é feito com a amostra quebrada, os poros passam a ter contato com a água, indicando uma absorção maior.

A título de comparação entre os resultados, foram gerados gráficos relacionando as propriedades índice de expansão *versus* perda de massa, massa unitária *versus* massa específica aparente e absorção de água *versus* resistência ao esmagamento.

5.1.1 Índice de Expansão x Perda de Massa

A Figura 18 se refere ao comparativo entre o índice de expansão e a perda de massa.

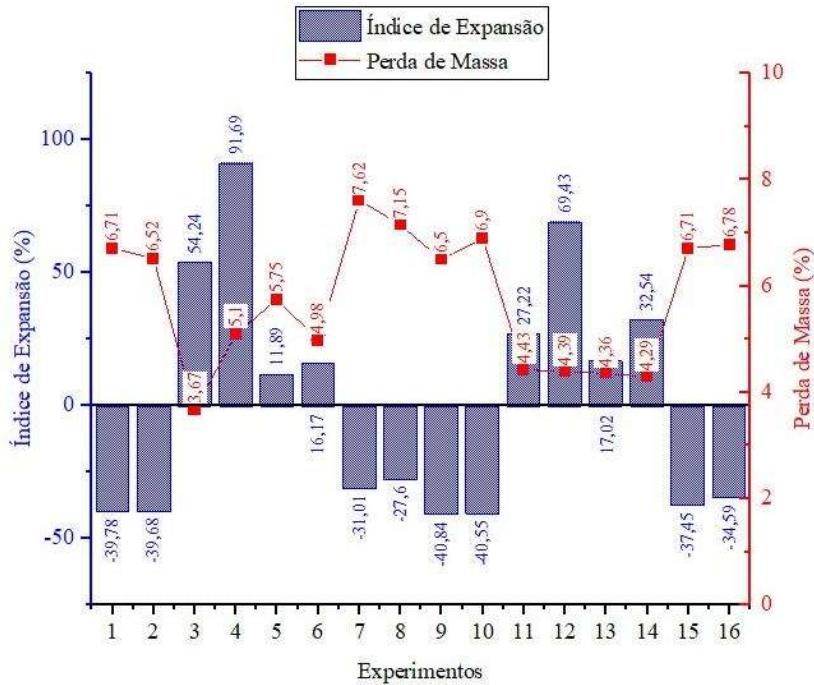


Figura 18 - Índice de expansão x perda de massa

A partir da Figura 18, observa-se que os experimentos 1, 2, 7, 8, 9, 10, 15 e 16 (com argila branca) apresentaram retração ao invés de expansão. Pode-se dizer que a não expansão das amostras de argila branca era esperada, uma vez que esta possui baixos teores de óxidos fundentes (ver Tabela 7), levando a não liberação e aprisionamento dos gases quando aquecida. Por outro lado, apesar do diagrama de Riley (ver Figura 10) apresentado por Pontes (2024) exibir que o resíduo do polimento do porcelanato tem potencial para a expansão, ainda assim este fica fora da zona de expansão, o que justifica as amostras produzidas com a argila branca e resíduo do polimento do porcelanato não terem expandido. Caso semelhante é visto no trabalho de Souza *et al.* (2020) em que houve a dificuldade em gerar expansão nos agregados desenvolvidos com argila branca.

A retração das amostras pode ser explicada a partir da termogravimetria da argila branca (ver Figura 11) apresentada por Souza *et al.* (2020), em que há significativas perdas de massa a temperaturas de aproximadamente 500 °C e 1000 °C, devido à desidroxilação da caulinita presente em sua mineralogia (ver Figura 9). É possível identificar que as maiores perdas de massa (6,5% para o experimento 9 a 7,62% para o experimento 7) se concretizaram nas amostras dos experimentos com argila branca (1, 2, 7, 8, 9, 10, 15 e 16) e que resultaram na retração das pelotas (-40,84% para o experimento 9 a -27,6% para o experimento 8). As maiores retrações ocorreram nas amostras que foram submetidas às menores temperaturas de sinterização (1180 °C e 1200 °C), semelhante ao descoberto por Pontes (2024), que o resíduo

do polimento do porcelanato em temperaturas mais baixas promove retracções maiores, ou seja, além da argila branca não ter potencial de expansão, a incorporação do resíduo do polimento do porcelanato na mistura aquecida a baixas temperaturas pode ser um agravante na retracção das amostras.

Diferentemente das amostras com argila branca (1, 2, 7, 8, 9, 10, 15 e 16), as amostras em que foi utilizada a argila vermelha (3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14) apresentaram elevada expansibilidade (11,89% para o experimento 5 a 91,69% para o experimento 4). Isso ocorre devido a argila vermelha apresentar maiores teores de óxidos fundentes em sua composição química (ver Tabela 7), em especial o óxido de ferro, que também é o responsável por dar a coloração avermelhada à argila. Com isso, quando submetida à elevadas temperaturas, os gases presentes na amostra são liberados e aprisionados pela formação da fase líquida viscosa, ocasionando sua expansão. Outras pesquisas também trouxeram resultados semelhantes com o uso da argila vermelha, como por exemplo, Moreno-Maroto *et al.* (2020), que trabalharam com diversas argilas para a obtenção de agregados leves, porém a que se destacou em relação à expansão foi a argila vermelha.

Percebe-se que, o aumento da temperatura (1240 °C) fez com que as amostras com argila vermelha (3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14) apresentassem maiores expansões, e estas foram reduzidas conforme a diminuição da temperatura de sinterização (1180 °C). Apesar de haver grandes variações nas expansões, pouca diferença se percebe nas perdas de massa, o que pode estar relacionado com as análises de TG (ver Figuras 11 e 12), nos quais é possível observar que a maior parte da perda de massa ocorre a temperaturas inferiores a 1000 °C, podendo-se especular que o aumento da temperatura após os 1000 °C não acarreta maiores perdas de massa.

De modo geral, foi percebido que menores taxas de aquecimento para uma mesma temperatura resultaram em maiores expansões e nas menores retracções. Isso ocorre devido as taxas lentas proporcionarem mais tempo para haver o aprisionamento dos gases e formação da fase viscosa que os aprisiona, fator importante para a expansão do material. Com relação ao tempo de sinterização, foi percebido que quanto maior ele é (para uma mesma temperatura), menor é a retracção e maior é a expansão. É provável que isso ocorra devido ao tempo muito pequeno não ser suficiente para que o material expanda por completo (ver Tabela 8 para a relação dos parâmetros de sinterização).

5.1.2 Massa Unitária x Massa Específica Aparente

A Figura 19 se refere ao comparativo entre a massa unitária e a massa específica aparente.

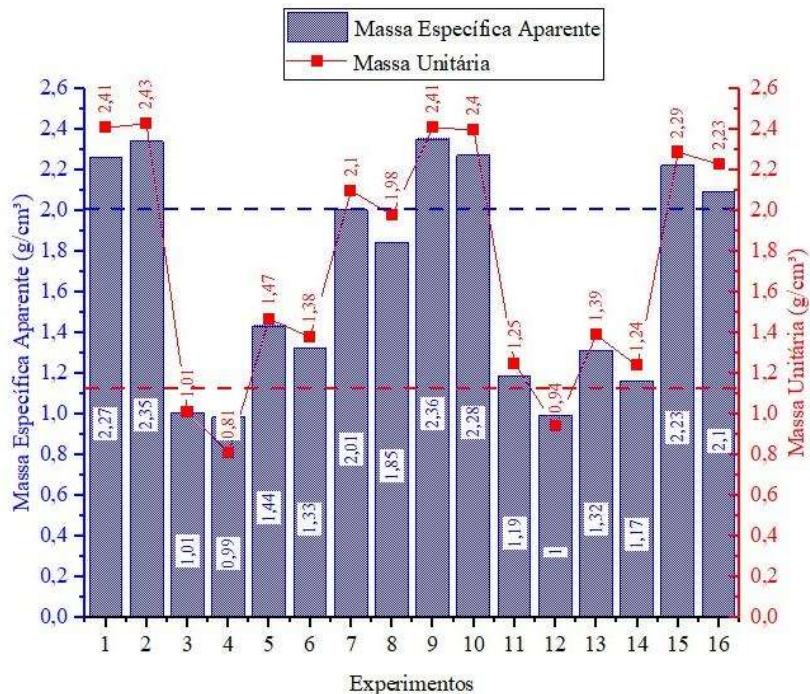


Figura 19 - Massa unitária (g/cm^3) x massa específica aparente (g/cm^3)

É possível observar que as curvas da massa unitária e da massa específica aparente apresentaram valores próximos, demonstrando pouca variação entre elas. Percebe-se que 7 experimentos (1, 2, 7, 9, 10, 15 e 16) resultaram em massas específicas acima de $2 \text{ g}/\text{cm}^3$ e 13 experimentos (1, 2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15 e 16) com massa unitária acima de $1,12 \text{ g}/\text{cm}^3$, limites normativos para classificação de agregados leves.

Como as amostras com a argila branca (1, 2, 7, 8, 9, 10, 15 e 16) mostraram retração, as pelotas ficaram mais densas, apresentando valores elevados para as massas específicas ($2,01 \text{ g}/\text{cm}^3$ para o experimento 7 a $2,36 \text{ g}/\text{cm}^3$ para o experimento 9). Das amostras com argila branca, somente o experimento 8 obteve resultado para se classificar como agregado leve do ponto de vista de massa específica ($1,85 \text{ g}/\text{cm}^3$).

Quando utilizada a argila vermelha (experimentos 3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14), as amostras incorreram em um comportamento diferente. Logo nota-se que todas elas apresentaram valores para massa específica aparente abaixo de $2 \text{ g}/\text{cm}^3$, caracterizando-se como agregados leves ($0,99 \text{ g}/\text{cm}^3$ para o experimento 4 a $1,44 \text{ g}/\text{cm}^3$ para o experimento 5). Isso se dá ao fato de que

as amostras perderam massa e expandiram, formando poros, conferindo leveza ao material e reduzindo assim sua massa específica e unitária.

Percebe-se também que a temperatura de 1200 °C para as amostras de argila vermelha (3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14) produziu agregados com as menores massas específicas (0,99 g/cm³ para o experimento 4 e 1 g/cm³ para o experimento 12), o que é compatível com a elevada expansão apresentada anteriormente.

A Tabela 11 apresenta um resumo dos agregados que atendem de forma simultânea aos limites para massa específica e massa unitária.

Tabela 11 - Atendimento simultâneo a massa específica e massa unitária

Experimento	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Unitária (g/cm ³)
3	1,01	1,01
4	0,99	0,81
12	1,00	0,94

Pode-se observar que os 3 experimentos (3, 4 e 12) pertencem ao grupo de agregados produzidos com argila vermelha (3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14), sinterizados nas maiores temperaturas (1220 °C para o experimento 3 e 1240 °C para os experimentos 3 e 12).

Com relação aos tempos de sinterização, foi percebido que quanto menor o tempo, maiores foram as massas específicas e unitárias, pois tempos muito curtos podem fazer com que os gases não sejam suficientemente liberados para a conferência de leveza ao material. Já as taxas de aquecimento mais lentas conferem materiais mais leves, caso contrário, taxas elevadas promovem formação desordenada de poros, suscetíveis ao colapso, ocasionando elevada densidade.

5.1.3 Absorção de Água x Resistência ao Esmagamento

A Figura 20 se refere ao comparativo entre a absorção de água (amostra inteira) e a resistência ao esmagamento.

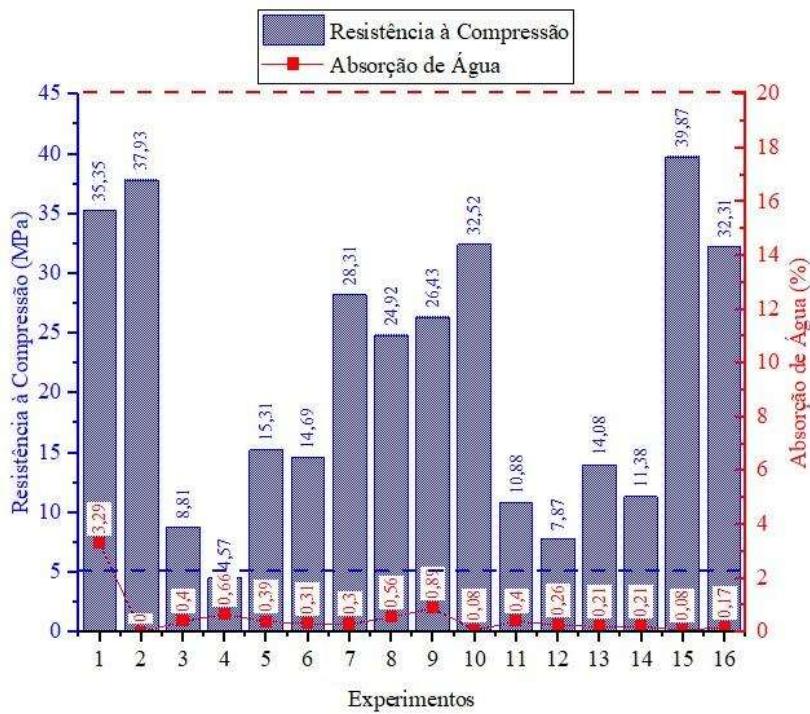


Figura 20 - Absorção de água x resistência ao esmagamento

Em geral, as amostras apresentaram absorção de água dentro dos limites recomendados (0% a 20%) para as principais aplicações dos agregados leves (concreto), variando de 0% para o experimento 2 a 3,29% para o experimento 1. Após a sinterização, as amostras com argila branca (1, 2, 7, 8, 9, 10, 15 e 16) se tornaram mais densas por causa de sua retração, ocasionando a diminuição da porosidade intergranular (SOUZA, 2019) que culminou em maiores valores para a massa específica aparente, baixa absorção de água e elevada resistência ao esmagamento (24,92 MPa para o experimento 8 a 39,87 MPa para o experimento 15).

Apesar das amostras com utilização da argila vermelha (3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14) em sua composição ocasionar elevada expansibilidade, baixa massa específica e consequente formação de poros, sua absorção de água se manteve ínfima, que, segundo Souza (2019), ocorre devido a diminuição da porosidade superficial provocada pela gradativa formação da fase líquida durante o processo de sinterização. Contudo, ao realizar o ensaio de absorção de água com as amostras quebradas, pode-se confirmar uma maior absorção de água das amostras quando seus poros internos ficam em contato direto com a água (Tabela 10).

Por outro lado, sua resistência ao esmagamento não é elevada quando comparada com as amostras de argila branca, pelo fato de sua porosidade interna tornar o elemento mais frágil. Contudo, as amostras mantiveram valores satisfatórios para agregados leves (4,57 MPa para o experimento 4 a 15,31 MPa para o experimento 5) com exceção do experimento 4 que resultou em uma resistência menor do que a indicada para concreto de alta resistência (5 MPa).

5.1.4 Inspeção Visual

A Figura 21 se refere as amostras de argila branca e vermelha antes da sinterização. Como não houve variação quanto à composição e tamanho, foram selecionadas 5 amostras para cada tipo de argila a fim de se realizar seu registro fotográfico.



Figura 21 - Amostras de argila branca e vermelha antes da sinterização

A Figura 22 são as amostras após a sinterização para cada experimento, sendo possível observar a parte interna e externa.



Figura 22 - Amostras após sinterização

As amostras com uso de argila branca (1, 2, 7, 8, 9, 10, 15 e 16) apresentaram coloração branco-acinzentado, opacidade e diminuição de tamanho, enquanto as amostras com argila vermelha (3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14) tornaram-se de um marrom escuro, brilhosas e de tamanhos maiores que os iniciais (antes da sinterização).

As pelotas com argila branca apresentaram baixa porosidade, havendo apenas alguns poros isolados. Em contrapartida, as pelotas com argila vermelha demonstraram porosidade mais elevada, especialmente para as que passaram por uma maior temperatura de sinterização (amostras 4 e 12, cuja temperatura foi de 1240 °C).

5.1.5 Difração de Raios-X e Microscopia Eletrônica de Varredura

As análises de difração de raios-X para as quatro amostras selecionadas podem ser observadas na Figura 23.

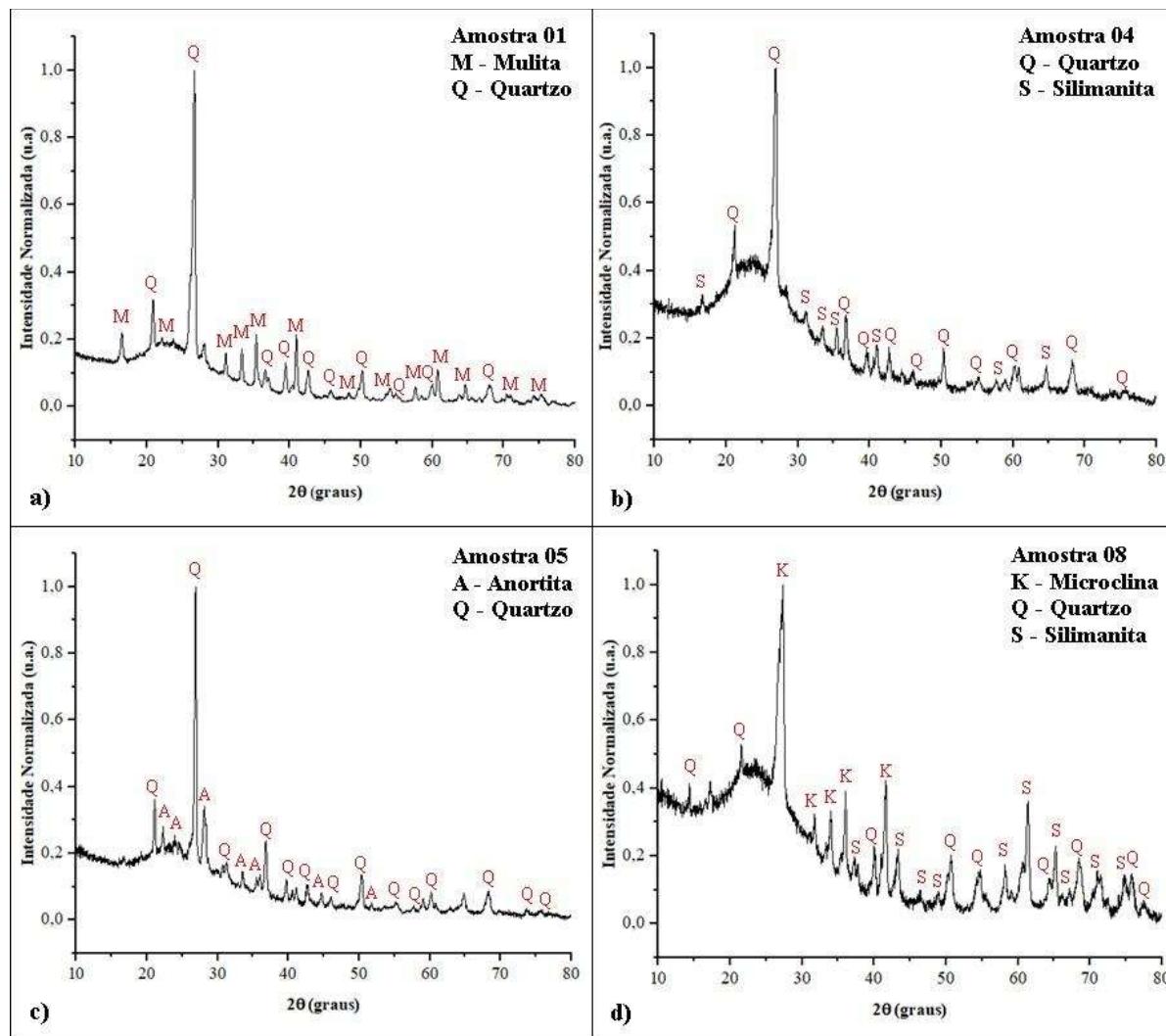


Figura 23 - Difração de raios-X: a) amostra 1 (1180 °C); b) amostra 4 (1240 °C); c) amostra 5 (1180 °C) e d) amostra 8 (1240 °C)

A sílica presente nos três materiais de partida (argila branca, argila vermelha e resíduo do polimento do porcelanato) quando sinterizada a altas temperaturas (acima de 1000 °C) pode formar o quartzo, justificando sua presença em todas as amostras analisadas (que possuem temperatura de sinterização acima de 1000 °C).

A alumina, que também está contida nas matérias-primas, somada à presença da sílica, quando sinterizadas a temperaturas mais baixas, podem formar a mulita presente amostra 1 (1180 °C), assim como a silimanita presente nas amostras 4 e 8 (1240 °C) quando sinterizadas a temperaturas um pouco mais elevadas.

O óxido de cálcio presente na argila vermelha e no resíduo do polimento do porcelanato, juntamente com a sílica e a alumina são capazes de favorecer a formação da anortita presente na amostra 5 (1180 °C) quando sinterizada a baixas temperaturas.

Quando a argila vermelha é trocada pela argila branca, pode-se observar nesta a presença de potássio (que também está no resíduo do polimento do porcelanato) e quando unido aos principais elementos (sílica e alumina) sinterizados a temperaturas mais elevadas, pode-se obter a microclina presente na amostra 8 (1240 °C).

As imagens do MEV podem ser observadas na Figura 24.

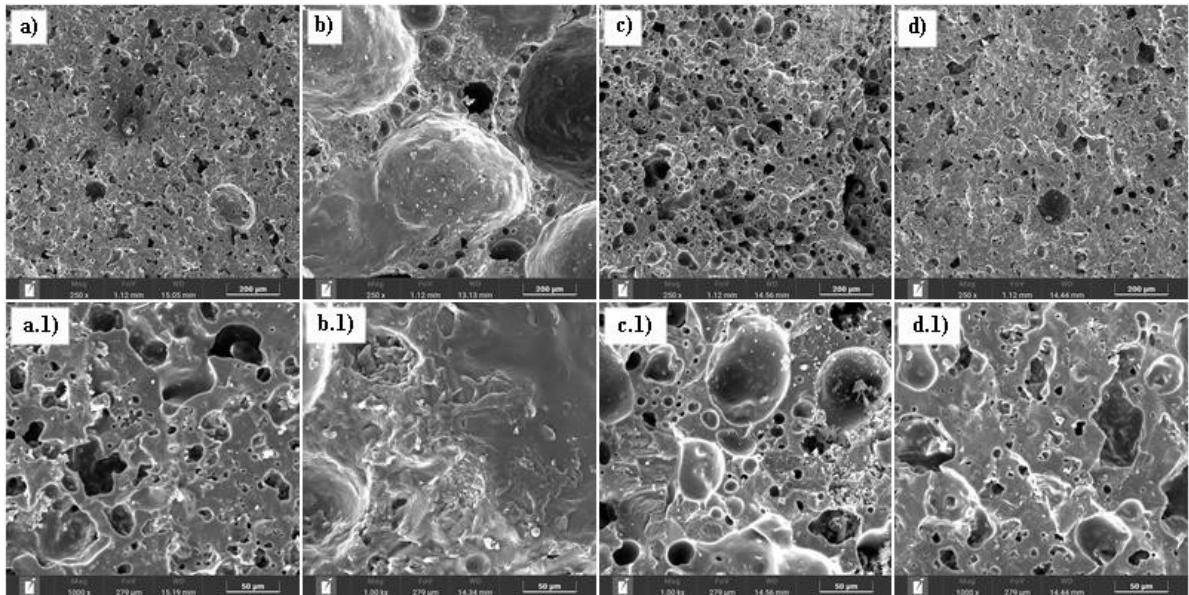


Figura 24 - MEV a 200 μm : a) amostra 1; b) amostra 4; c) amostra 5; d) amostra 8 e MEV a 50 μm : a.1) amostra 1; b.1) amostra 4; c.1) amostra 5 e d.1) amostra 8

Em todas as imagens é possível observar a presença de poros e grãos bem definidos. As amostras com argila branca (Figuras 24a e 24d) apresentaram poros aparentemente em baixa quantidade, enquanto as amostras com argila vermelha apresentaram poros em maior

quantidade e bem distribuídos (Figura 24b e 24c), confirmando a análise visual feita anteriormente.

Os grãos maiores estão relacionados ao quartzo observado também na difração de raios-X e estes estão envolvidos pela fase vítreia que circunda as partículas. A morfologia destes agregados confirma os dados obtidos para resistência ao esmagamento, pois as amostras com argila branca, apresentaram baixa porosidade e elevada resistência, enquanto as amostras com argila vermelha demonstraram alta porosidade e resistência ao esmagamento reduzida.

A confirmação da formação ou não dos poros também traz embasamento ao que foi apresentado sobre as massas específicas dos agregados: quanto mais poros, há mais expansão e redução da densidade.

A morfologia apresentada através da microscopia eletrônica de varredura entra em convergência com os dados calculados para a absorção de água e porosidade das amostras quebradas. Enquanto o MEV apresenta muitos poros (para as amostras com argila vermelha), a absorção de água e porosidade também se apresentam elevadas quando comparadas com as amostras de argila branca, que possui menor quantidade de poros. Porém, quando o MEV é comparado a absorção de água das amostras inteiras, há uma divergência que pode ser explicada por poros isolados da superfície, ou seja, não estão conectados com o exterior do material, impedindo a entrada de água (LA RUSSA *et al.*, 2013). Todavia, os poros observados no MEV e na inspeção visual são confirmados no ensaio de absorção e porosidade das amostras quebradas.

5.2 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Cada resultado possui um conjunto de variáveis único que afetam seu desempenho, não sendo possível compará-las facilmente. Desse modo, fez-se o uso do método de Taguchi e análise de variância ANOVA a fim de verificar estatisticamente como cada variável influiu em uma propriedade do agregado analisado.

Na Tabela 12 são apresentadas as relações sinal-ruído para os resultados obtidos nos experimentos. Nota-se que, as relações para o índice de expansão dos experimentos com a argila branca (1, 2, 7, 8, 9, 10, 15 e 16) apresentaram-se nulas, uma vez que não houve expansão do material. Do mesmo modo, a relação da absorção de água para o experimento 2 foi nula, pois não houve absorção de água nesta amostra (absorção relacionada a amostra inteira).

Tabela 12 - Resultados dos experimentos e relações sinal-ruído

Experimento	Resultados					Relações Sinal-Ruído (dB)						
	I (%)	P _m (%)	ρ (g/cm ³)	P _{ap} (s) (g/cm ³)	A _a (%)	R (MPa)	I	P _m	ρ	P _{ap} (s)	A _a	R
1	-39,78	6,71	2,41	2,27	3,29	35,35	0,00	-16,54	-7,64	-7,10	-10,34	30,97
2	-39,68	6,52	2,43	2,35	0,00	37,93	0,00	-16,28	-7,70	-7,41	0,00	31,58
3	54,24	3,67	1,01	1,01	0,4	8,81	34,69	-11,29	-0,07	-0,08	7,94	18,90
4	91,69	5,1	0,81	0,99	0,66	4,57	39,25	-14,15	1,87	0,08	3,67	13,19
5	11,89	5,75	1,47	1,44	0,39	15,31	21,50	-15,19	-3,34	-3,16	8,08	23,70
6	16,17	4,98	1,38	1,33	0,31	14,69	24,17	-13,95	-2,80	-2,47	10,04	23,34
7	-31,01	7,62	2,1	2,01	0,3	28,31	0,00	-17,64	-6,44	-6,08	10,57	29,04
8	-27,6	7,15	1,98	1,85	0,56	24,92	0,00	-17,09	-5,95	-5,32	5,00	27,93
9	-40,84	6,5	2,41	2,36	0,89	26,43	0,00	-16,25	-7,64	-7,45	1,01	28,44
10	-40,55	6,9	2,4	2,28	0,08	32,52	0,00	-16,78	-7,62	-7,15	22,12	30,24
11	27,22	4,43	1,25	1,19	0,4	10,88	28,70	-12,93	-1,97	-1,51	7,86	20,73
12	69,43	4,39	0,94	1	0,26	7,87	36,83	-12,84	0,56	0,00	11,69	17,92
13	17,02	4,36	1,39	1,32	0,21	14,08	24,62	-12,80	-2,86	-2,41	13,64	22,97
14	32,54	4,29	1,24	1,17	0,21	11,38	30,25	-12,65	-1,89	-1,40	13,51	21,12
15	-37,45	6,71	2,29	2,23	0,08	39,87	0,00	-16,54	-7,19	-6,96	21,91	32,01
16	-34,59	6,78	2,23	2,1	0,17	32,31	0,00	-16,62	-6,97	-6,43	15,57	30,19

5.2.1 Relações para o Índice de Expansão

A Tabela 13 apresenta os resultados da relação sinal-ruído para a análise do índice de expansão *versus* as variáveis controláveis, assim como um ranqueamento dos parâmetros que apresentam maior influência na obtenção de um resultado desejado.

Tabela 13 - S/R para índice de expansão

Sinal-Ruído Médio para Índice de Expansão <i>versus</i> Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Tipo da Argila						
Parâmetros	Níveis				Variação	Rankeamento
	1	2	3	4		
Taxa de Aquecimento (°C/min)	18,4830	11,4188	16,3821	13,7161	7,0642	3
Temperatura de Sinterização (°C)	11,5300	13,6050	15,8459	19,0193	7,4893	2
Tempo de Sinterização (min)	13,2174	14,5836	16,2334	15,9657	3,0160	4
Argila	0,0000	30,0001	-	-	30,0001	1

É possível observar que o tipo da argila utilizada é o fator que mais influencia para se obter uma maior expansão do material. De fato, como visto anteriormente, independentemente dos níveis nos parâmetros de aquecimento adotados, a argila vermelha expande enquanto a

branca, não. Isso se dá devido às características químicas e mineralógicas das matérias-primas, em especial, de cada argila utilizada. A Figura 25 apresenta as influências de forma mais clara.

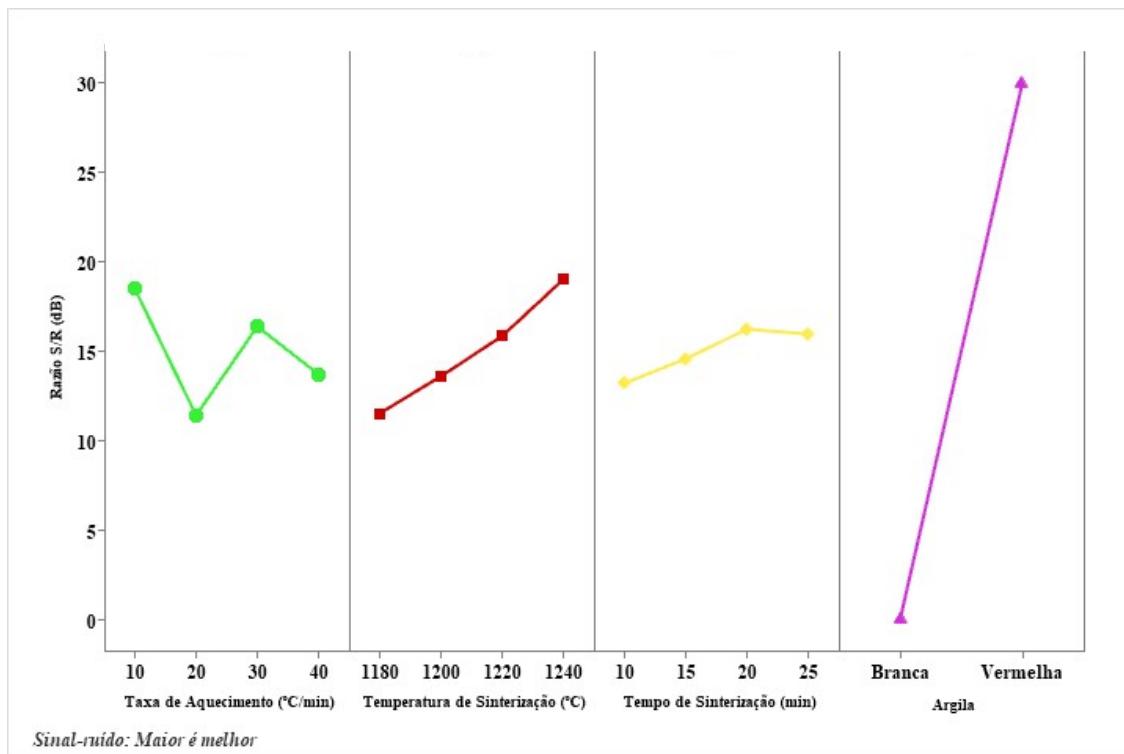


Figura 25 - Respostas S/R para o índice de expansão

Este gráfico reflete o ranqueamento da Tabela 13, sendo a curva para a argila a mais acentuada, e, portanto, a de maior significância. Quanto maior for a variação da curva, significa que maior é a relevância daquele parâmetro para o processo.

Analizando a ANOVA (Tabela 14), observa-se que o parâmetro que mais contribuiu para a expansão do material foi a argila, seguido da temperatura de sinterização.

Tabela 14 - Análise ANOVA para o índice de expansão

Parâmetro	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Contribuição
Taxa de Aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{min}$)	2062,10	3	687,37	17,27%
Temperatura de Sinterização ($^{\circ}\text{C}$)	2543,10	3	847,70	21,30%
Tempo de Sinterização (min)	553,00	3	184,33	4,63%
Argila	6091,10	1	6091,10	51,03%
Erro	687,70	5	137,54	5,76%
Total	11937,10	15	3979,03	100,00%

As análises Taguchi e ANOVA convergem na classificação dos parâmetros de maior influência para esta propriedade. Dessa forma, a combinação ideal para se obter uma maior expansão, de acordo com a Figura 25 é:

- Fazer o uso da argila vermelha, pois esta possui maior teor de óxidos fundentes, influenciando diretamente na expansão do material;
- Temperatura de sinterização de 1240 °C, pois as maiores temperaturas favorecem a formação de poros e consequente expansão;
- Taxa de aquecimento de 10 °C/min, pois uma taxa mais lenta favorece o aprisionamento dos gases, formando poros que levam a maiores expansões; e,
- Tempo de sinterização de 20 minutos, pois tempos mais elevados possibilitam que os poros sejam formados e estabilizados, conferindo expansão ao material.

5.2.2 Relações para a Perda de Massa

O ranqueamento apresentado na Tabela 15 indica que o tipo da argila é o fator que mais influencia na perda de massa, seguido da taxa de aquecimento, tempo de sinterização e temperatura de sinterização.

Tabela 15 - S/R para perda de massa

Parâmetros	Níveis				Variação	Ranqueamento
	1	2	3	4		
Taxa de Aquecimento (°C/min)	- 14,57	- 15,97	- 14,70	- 14,65	1,4	2
Temperatura de Sinterização (°C)	- 15,19	- 14,91	- 14,60	- 15,18	0,6	4
Tempo de Sinterização (min)	- 15,01	- 15,21	- 14,32	- 15,34	1,02	3
Argila	- 16,72	- 13,22	-	-	3,49	1

Para esta propriedade analisada, quanto maior for a relação sinal-ruído, menor será a variância da perda de massa em torno do valor desejado (quanto menor, melhor). Pela amplitude das curvas apresentadas na Figura 26, é possível confirmar o ranqueamento realizado na Tabela 15.

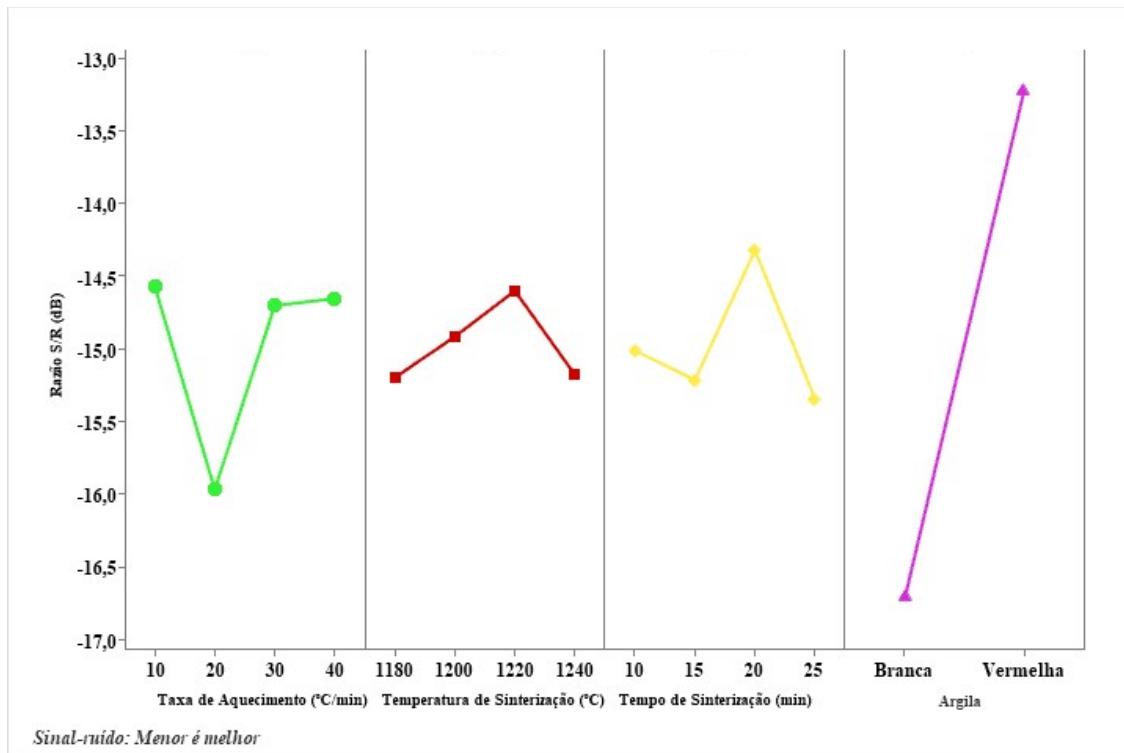


Figura 26 - Respostas S/R para a perda de massa

É interessante observar a importância de se ter mais de dois níveis sendo analisados, pois onde seria traçada uma reta ligando dois pontos, pode-se haver um terceiro entre eles. A falta deste terceiro ponto poderia culminar na perda de uma zona mais adequada para o resultado desejado.

No teste ANOVA (Tabela 16), nota-se que a classificação dos fatores de maior contribuição para a perda de massa converge com o método de Taguchi, resultando nas definições de uso da argila vermelha, taxa de aquecimento de 10 °C/min, tempo de sinterização de 20 minutos e temperatura de sinterização de 1220 °C.

Tabela 16 - Análise ANOVA para a perda de massa

Parâmetro	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Contribuição
Taxa de Aquecimento (°C/min)	2,1498	3	0,72	9,01%
Temperatura de Sinterização (°C)	0,1731	3	0,06	0,73%
Tempo de Sinterização (min)	0,7625	3	0,25	3,20%
Argila	20,0910	1	20,09	84,22%
Erro	0,6791	5	0,14	2,85%
Total	23,8556	15	7,95	100,00%

5.2.3 Relações para a Massa Unitária

A Tabela 17 para o sinal-ruído da massa unitária *versus* as variáveis controláveis mostram que o tipo da argila é o fator que possui maior influência para esta propriedade.

Tabela 17 - S/R para massa unitária

Sinal-Ruído Médio para Massa Unitária *versus* Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Tipo da Argila

Parâmetros	Níveis				Variação	Rankeamento
	1	2	3	4		
Taxa de Aquecimento (°C/min)	- 3,383	- 4,631	- 4,168	- 4,727	1,344	3
Temperatura de Sinterização (°C)	- 5,368	- 5,001	- 3,918	- 2,620	2,748	2
Tempo de Sinterização (min)	- 4,844	- 4,417	- 3,887	- 3,761	1,083	4
Argila	- 7,143	- 1,311	-	-	5,831	1

De fato, como a massa unitária tem relação direta com as massas e volumes dos agregados e estes, por sua vez, estão atrelados à expansão do material, que como foi visto, está relacionada com o tipo de argila utilizada, é natural que a massa unitária tenha a argila como sua principal contribuinte. As relações apresentadas na Tabela 17 podem ser visualizadas na Figura 27.

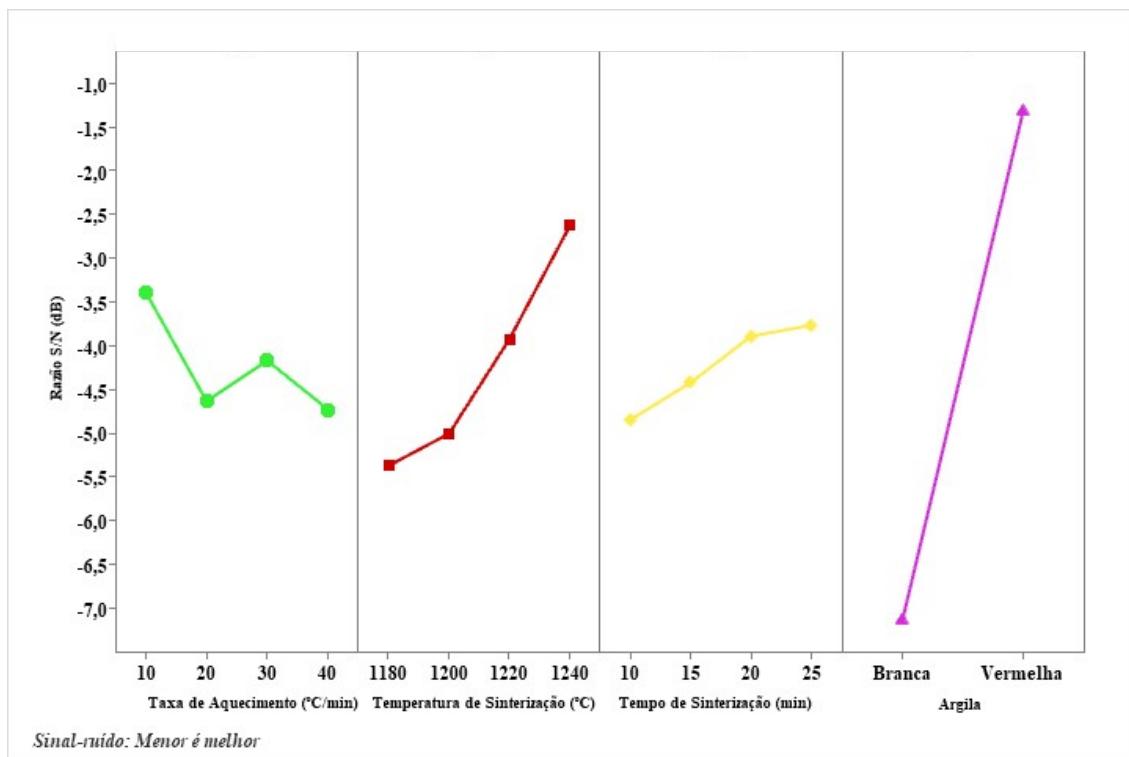


Figura 27 - Respostas S/R para a massa unitária

Na análise de variância (Tabela 18), é possível observar os parâmetros que mais contribuíram para a massa unitária, sendo eles: tipo da argila, seguido da temperatura de sinterização, tempo de sinterização e a taxa de aquecimento sendo o fator de menor contribuição.

Tabela 18 - Análise ANOVA para a massa unitária

Parâmetro	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Contribuição
Taxa de Aquecimento (°C/min)	0,03349	3	0,01	0,62%
Temperatura de Sinterização (°C)	0,46414	3	0,15	8,60%
Tempo de Sinterização (min)	0,07254	3	0,02	1,34%
Argila	4,79917	1	4,80	88,91%
Erro	0,02836	5	0,01	0,53%
Total	5,39771	15	1,80	100,00%

As análises se aproximam na classificação dos parâmetros de maior influência para a propriedade analisada. Dessa forma, a combinação ideal para se obter uma menor massa unitária, de acordo com a Figura 27 é fazer o uso dos seguintes níveis para cada parâmetro:

- Uso da argila vermelha;
- Temperatura de sinterização de 1240 °C;
- Taxa de aquecimento de 10 °C/min; e,
- Tempo de sinterização de 25 minutos.

5.2.4 Relações para a Massa Específica Aparente

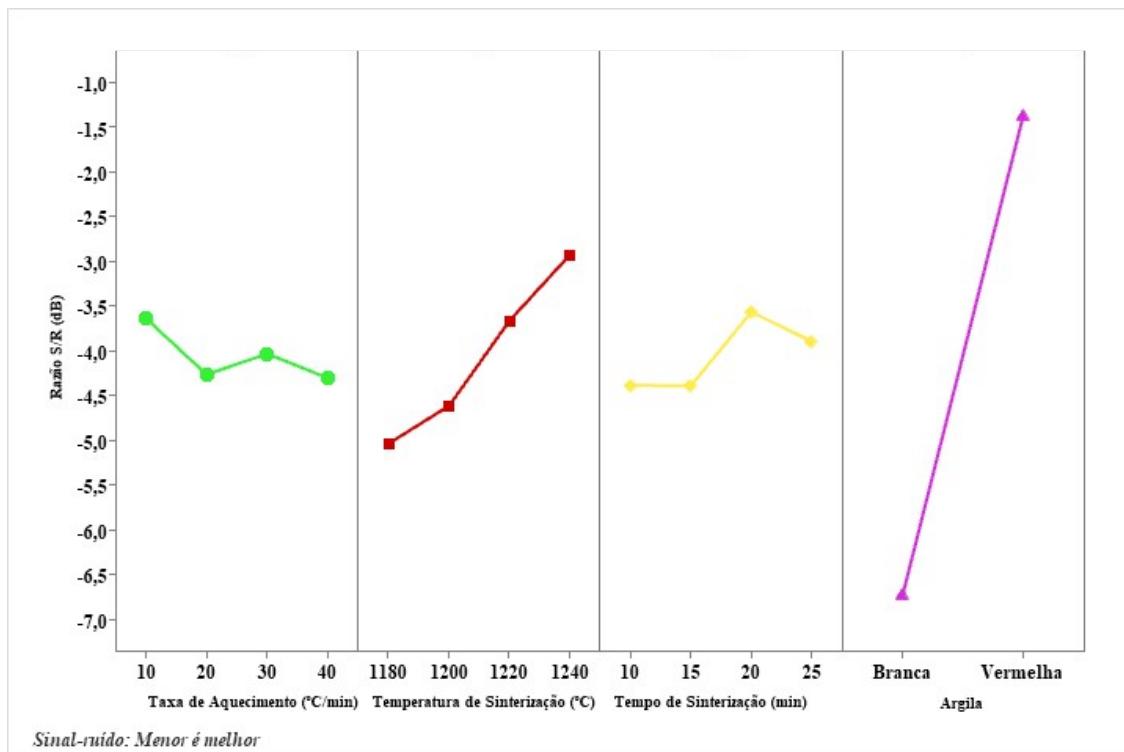
A Tabela 19 apresenta os resultados da relação sinal-ruído para a análise da massa específica aparente *versus* as variáveis controláveis, assim como um ranqueamento dos parâmetros que apresentam maior influência na obtenção de um resultado desejado.

Tabela 19 - S/R para massa específica aparente

Sinal-Ruído Médio para Massa Específica Aparente *versus* Taxa de Aquecimento, Temperatura de Sinterização, Tempo de Sinterização e Tipo da Argila

Parâmetros	Níveis				Variação	Rankeamento
	1	2	3	4		
Taxa de Aquecimento (°C/min)	- 3,629	- 4,260	- 4,028	- 4,302	0,673	4
Temperatura de Sinterização (°C)	- 5,031	- 4,608	- 3,658	- 2,920	2,111	2
Tempo de Sinterização (min)	- 4,381	- 4,386	- 3,561	- 3,890	0,825	3
Argila	- 6,738	- 1,371	-	-	5,367	1

É possível observar que o tipo da argila utilizada é o fator que mais influencia para se obter uma menor massa específica do material. De fato, como visto anteriormente, a massa específica está associada à expansão do material, e este, por sua vez, está associado ao tipo de argila utilizado. A Figura 28 apresenta as influências de forma mais clara.



Este gráfico reflete o ranqueamento da Tabela 19, sendo as curvas para a argila e para a temperatura de sinterização as mais acentuadas e de maior significância. Portanto, estes são os parâmetros de relevância para o processo.

Analizando a ANOVA (Tabela 20), observa-se que o parâmetro que mais contribuiu para a expansão do material foi a argila, seguido da temperatura de sinterização.

Tabela 20 - Análise ANOVA para a massa específica aparente

Parâmetro	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Contribuição
Taxa de Aquecimento (°C/min)	0,01023	3	0,00	0,23%
Temperatura de Sinterização (°C)	0,32499	3	0,11	7,37%
Tempo de Sinterização (min)	0,06013	3	0,02	1,36%
Argila	3,97652	1	3,98	90,21%
Erro	0,03628	5	0,01	0,82%
Total	4,40815	15	1,47	100,00%

As análises Taguchi e ANOVA convergem na classificação dos parâmetros de maior influência para esta propriedade. Dessa forma, a combinação ideal para se obter uma menor massa específica, de acordo com a Figura 28 é:

- Fazer o uso da argila vermelha, pois como sua composição química e mineralógica é mais favorável para a expansão, também se torna favorável para se obter menores densidades;
- Temperatura de sinterização de 1240 °C, semelhante ao tipo da argila, está associada a facilidade/assertividade em se obter expansão;
- Tempo de sinterização de 20 minutos, que também está relacionado a se obter uma maior expansão e consequente menor massa específica; e,
- Taxa de aquecimento de 10 °C/min, mais favorável para uma maior expansão e menor densidade.

5.2.5 Relações para a Absorção de Água

O ranqueamento apresentado Tabela 21 indica que a taxa de aquecimento é o fator que mais influencia na absorção de água (para a amostra inteira), seguido da temperatura de sinterização, tempo de sinterização e tipo da argila.

Tabela 21 - S/R para absorção de água

Parâmetros	Níveis				Variação	Rankeamento
	1	2	3	4		
Taxa de Aquecimento (°C/min)	0,4234	8,4225	10,6694	16,1591	15,7357	1
Temperatura de Sinterização (°C)	3,0976	15,2257	12,0706	8,9811	12,1281	2
Tempo de Sinterização (min)	5,7816	13,8916	6,8659	12,5024	8,1101	3
Argila	9,4055	9,5545	-	-	0,1490	4

Pela amplitude das curvas apresentadas na Figura 29, é possível confirmar o ranqueamento realizado na Tabela 21. Nota-se que o tipo da argila utilizada possui mínima relevância para a absorção de água.

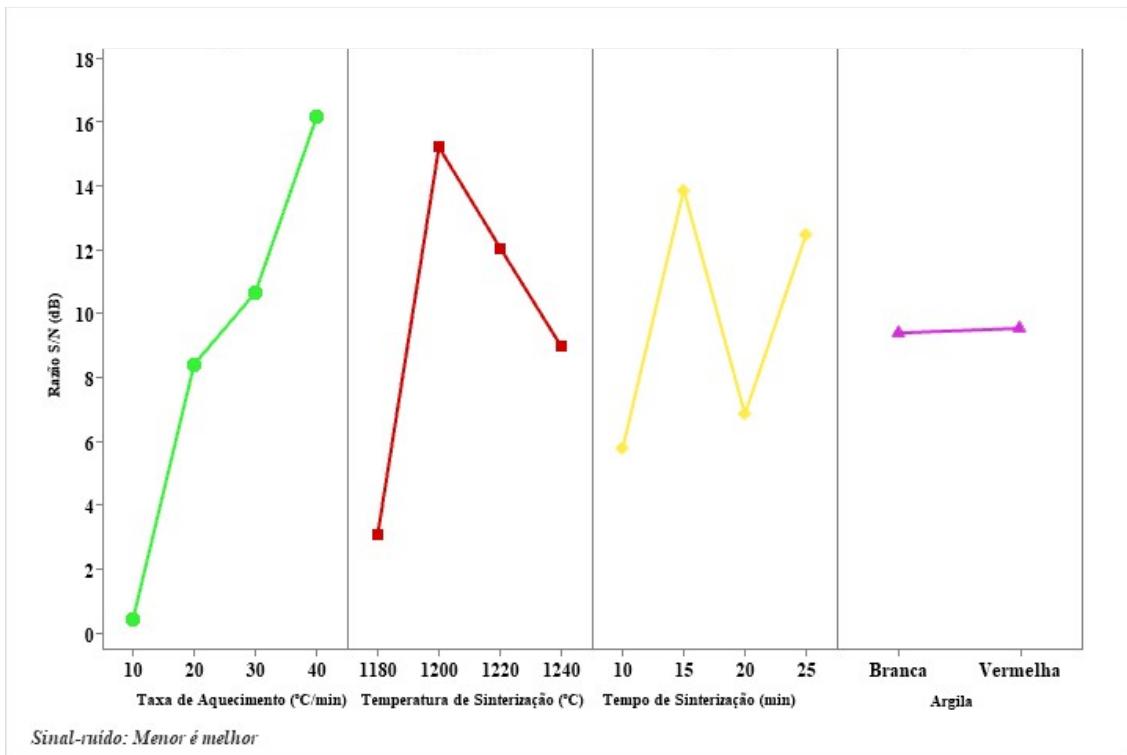


Figura 29 - Respostas S/R para a absorção de água

No teste ANOVA (Tabela 22), nota-se que a classificação dos fatores de maior contribuição para a absorção de água se assemelha com o ranqueamento apresentado pelo método de Taguchi, resultando nas definições de taxa de aquecimento de 40 °C/min, temperatura de sinterização de 1220 °C, tempo de sinterização de 15 minutos e uso da argila vermelha.

Tabela 22 - Análise ANOVA para a absorção de água

Parâmetro	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Contribuição
Taxa de Aquecimento (°C/min)	1,8975	3	0,63	21,08%
Temperatura de Sinterização (°C)	2,6178	3	0,87	29,07%
Tempo de Sinterização (min)	1,7261	3	0,58	19,17%
Argila	0,3949	1	0,39	4,39%
Erro	2,3672	5	0,47	26,29%
Total	9,0035	15	3,00	100,00%

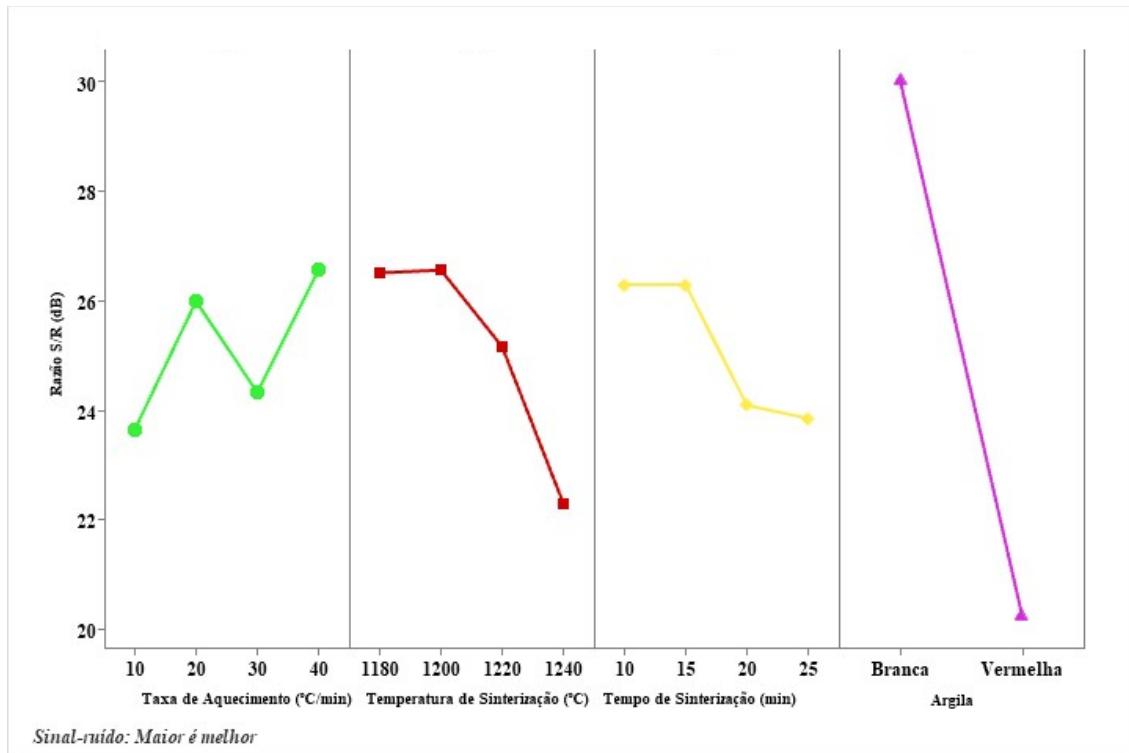
5.2.6 Relações para a Resistência ao Esmagamento

A Tabela 23 para o sinal-ruído da resistência ao esmagamento *versus* as variáveis controláveis mostram que o tipo da argila é o fator que possui maior influência para esta propriedade.

Tabela 23 - S/R para resistência ao esmagamento

Parâmetros	Níveis				Variação	Rankeamento
	1	2	3	4		
Taxa de Aquecimento (°C/min)	23,66	26,00	24,34	26,57	2,91	3
Temperatura de Sinterização (°C)	26,52	26,57	25,17	22,31	4,26	2
Tempo de Sinterização (min)	26,31	26,30	24,10	23,86	2,45	4
Argila	30,05	20,24	-	-	9,81	1

De fato, a resistência ao esmagamento tem relação com o tipo da argila utilizado, pois, como visto anteriormente, o uso da argila branca, independentemente dos outros parâmetros de aquecimento, foi a que resultou nos maiores valores para a resistência, enquanto a troca da argila para a vermelha fez com que a resistência diminuisse. Esses fatos estão atrelados às características químicas e mineralógicas das argilas utilizadas. As relações apresentadas na Tabela 23 podem ser visualizadas na Figura 30.

**Figura 30 - Respostas S/R para a resistência ao esmagamento**

Na análise de variância (Tabela 24), é possível observar os parâmetros que mais contribuíram para a resistência ao esmagamento, sendo eles: tipo da argila, seguido do tempo

de sinterização, temperatura de sinterização, e a taxa de aquecimento sendo o fator de menor contribuição.

Tabela 24 - Análise ANOVA para a resistência ao esmagamento

Parâmetro	Soma dos Quadrados	Grau de Liberdade	Variância	Contribuição
Taxa de Aquecimento (°C/min)	53,05	3	17,68	2,52%
Temperatura de Sinterização (°C)	101,89	3	33,96	4,83%
Tempo de Sinterização (min)	131,99	3	44,00	6,26%
Argila	1807,16	1	1807,16	85,72%
Erro	14,09	5	2,82	0,67%
Total	2108,18	15	702,73	100,00%

As análises se aproximam na classificação dos parâmetros de maior influência para a propriedade analisada. Dessa forma, a combinação ideal para se obter uma maior resistência ao esmagamento, de acordo com a Figura 30 é fazer o uso dos seguintes níveis para cada parâmetro:

- Uso da argila branca, pois devido à baixa presença dos óxidos fundentes, o material retrai e se torna mais denso, favorecendo a alta resistência;
- Temperatura de sinterização de 1200 °C, pois uma temperatura mais baixa dificulta a formação dos poros, aumentando sua densidade e resistência;
- Taxa de aquecimento de 40 °C/min, pois uma taxa acelerada pode colapsar a estrutura porosa que se forma, ocasionando em um material mais denso; e,
- Tempo de sinterização de 10 minutos, pois um tempo menor pode não facilitar a formação total dos poros e conferir maior densidade e resistência ao material.

5.2.7 Gráficos de Superfície

A Figura 31 apresenta resultados para a massa específica em função das principais variáveis destacadas pelo método de Taguchi, que foram a argila e a temperatura de sinterização.

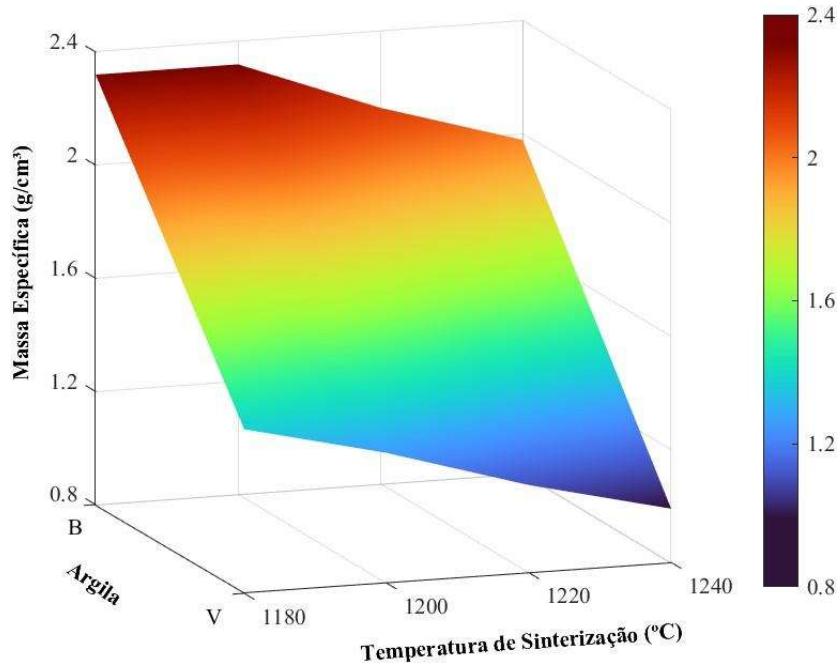


Figura 31 - Superfície para massa específica

Pode-se observar que, quando se faz uso da argila branca, as amostras apresentam massa específica mais elevada do que quando utilizada a argila vermelha. Além disso, quanto maior for a temperatura de sinterização, menor será a massa específica.

A Figura 32 apresenta resultados para a absorção de água (para a amostra inteira) em função das principais variáveis destacadas pelo método de Taguchi, que foram a taxa de aquecimento e a temperatura de sinterização.

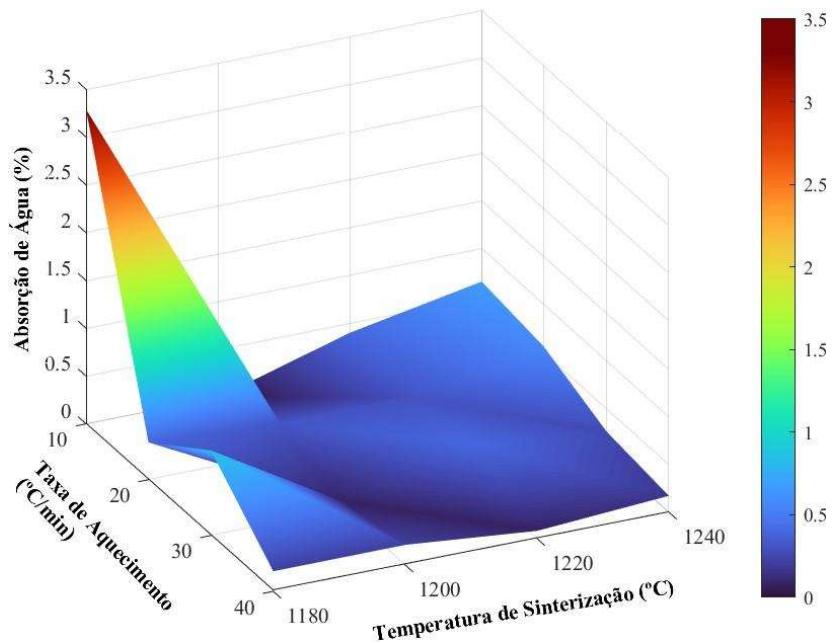


Figura 32 - Superfície para absorção de água

Observa-se que, em geral, independentemente da taxa de aquecimento utilizada e da temperatura de sinterização, a absorção de água se apresenta em níveis reduzidos, exceto quando é utilizada uma taxa de aquecimento de 10 °C/min a baixas temperaturas, que, mesmo assim, ainda se estabelece dentro dos limites de absorção para agregados leves.

A Figura 33 apresenta resultados para a resistência ao esmagamento em função das principais variáveis destacadas pelo método de Taguchi, que foram a argila utilizada e a temperatura de sinterização.

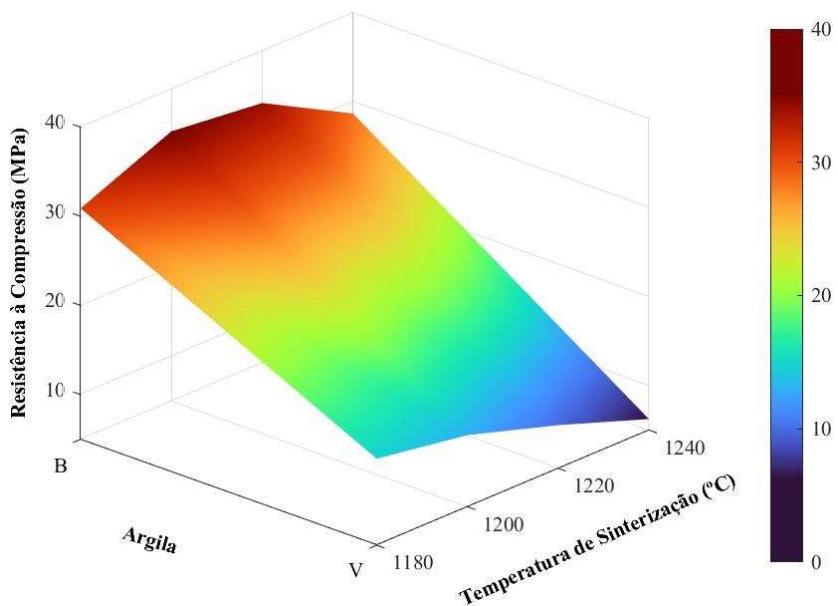


Figura 33 - Superfície para resistência ao esmagamento

Ao utilizar a argila branca, os agregados demonstram elevadas resistências, enquanto a argila vermelha resulta em agregados com resistências menores. O gráfico também mostra que, para a argila branca, o uso de temperaturas intermediárias de 1200 °C e 1220 °C culminam em maiores resistências aos agregados. Já no caso da argila vermelha, menores temperaturas resultam nas maiores resistências.

5.3 APLICAÇÕES

Com base nos limites de massa específica, absorção de água e resistência estabelecidos para um material se classificar como agregado leve (Tabela 3), foi realizada uma análise dos resultados obtidos para os 16 experimentos realizados, gerando o Quadro 3 que indica, para cada experimento, se ele atende aos critérios exigidos para alguma das principais aplicações dos agregados leves.

Quadro 3 - Aplicações dos agregados produzidos

Experimento	Aplicações				
	Concreto de alta resistência	Concreto leve estrutural	Concreto leve não estrutural e argamassas leves	Aplicações geotécnicas	Jardinagem e paisagismo, isolamento térmico e acústico
1	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-
3	✓	✓	✓	-	-
4	-	✓	✓	-	-
5	✓	✓	✓	-	-
6	✓	✓	✓	-	-
7	-	-	-	-	-
8	✓	✓	✓	-	-
9	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-
11	✓	✓	✓	-	-
12	✓	✓	✓	-	-
13	✓	✓	✓	-	-
14	✓	✓	✓	-	-
15	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-

Observa-se que, 7 experimentos (1, 2, 7, 9, 10, 15 e 16) não se aplicam de forma alguma. Estes são as amostras com argila branca que apresentaram massa específica maior que 2,00 g/cm³. Somente um experimento do grupo das argilas brancas atendeu aos critérios e se classificou como agregado leve (experimento 8). Por outro lado, as amostras com argila vermelha (3, 4, 5, 6, 11, 12, 13 e 14) se enquadram, quase em sua totalidade, para as 3 principais aplicações (concretos), com exceção do experimento 4 que não se enquadrou apenas para o concreto de alta resistência, por não atingir a resistência mínima exigida (5 MPa). Entretanto, nenhum dos 16 experimentos se enquadrou para as aplicações geotécnicas e para as áreas de jardinagem e paisagismo e isolamento termoacústico, pois, nenhuma das amostras atingiu a absorção de água necessária (10% a 38%).

Pode-se concluir que foi possível obter agregados leves de interesse comercial às 3 principais aplicações da engenharia (concretos), com uso de argilas branca e vermelha provenientes do litoral paraibano com a incorporação do resíduo do polimento do porcelanato em suas misturas e variação dos parâmetros de sinterização.

6 CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou perceber que, apesar de se estabelecer parâmetros fixos para os agregados, tais como o tamanho das pelotas e as porcentagens de resíduos utilizadas, a expansibilidade delas se mostrou elevada quando utilizada a argila vermelha na composição, e inexistente quando utilizada a argila branca, pois houve retração. Com relação à perda de massa, observou-se que os maiores percentuais ocorreram para as amostras com uso da argila branca.

Algumas amostras apresentaram massa unitária e massa específica acima dos limites estabelecidos para agregados leves, o que possui influência do índice de expansão, pois as amostras que não se enquadram como agregados leves do ponto de vista da massa específica são aquelas que retraíram. A absorção de água e a resistência ao esmagamento se mostraram com valores satisfatórios percebendo-se que as maiores resistências foram conferidas às amostras de argila branca.

Apesar da literatura indicar que o resíduo do polimento do porcelanato exerce influência na expansão por ter uma composição mineralógica favorável à formação de gases e obtenção de fase líquida viscosa e possuir composição química com elevadores teores de óxidos fundentes, não foi o observado para as amostras com uso de argila branca, sendo necessário realizar mais testes com porcentagens diferentes de resíduos, a fim de se verificar melhor a influência do resíduo do polimento do porcelanato nas composições com argila branca.

Para este estudo, observou-se que o tipo da argila e a temperatura de sinterização foram os fatores que mais afetaram nas propriedades, sendo, portanto, estes os que devem se concentrar os esforços para controle.

Em geral, as amostras com uso da argila branca nas composições de 40% argila e 60% de resíduo do polimento do porcelanato não se enquadram como agregados leves, pois resultaram em massas específicas acima de 2 g/cm^3 . Dos 16 experimentos realizados, somente uma amostra (nº 8) de argila branca ficou dentro dos critérios pré-estabelecidos, o que foi considerado um bom resultado, tendo em vista o desafio de se obter agregados leves a partir da argila branca. Todas as amostras estudadas utilizando argila vermelha podem ser classificadas como agregados leves.

É possível gerar agregados leves fazendo uso de argilas provenientes do litoral paraibano e resíduo do polimento do porcelanato, com alteração dos fatores de sinterização (taxa de aquecimento, temperatura e tempo) a depender da propriedade desejada, tornando-se uma opção tecnicamente viável.

O uso do resíduo do polimento do porcelanato como matéria-prima torna o agregado sustentável pelo fato de dar um destino adequado ao resíduo, conferindo-lhe valor comercial, porém, entende-se que é necessário realizar estudos ambientais e sobre o custo-benefício da utilização do resíduo do polimento do porcelanato na produção de agregados, a fim de se confirmar que este torna-se uma opção econômica e ambientalmente viável.

Os métodos estatísticos aplicados na área da engenharia de materiais, a exemplo do método de Taguchi e análise de variância utilizados neste estudo, são ferramentas que merecem diligência por seu potencial em indicar quais fatores de produção os profissionais devem voltar sua atenção, a fim de reduzir prejuízos econômicos e melhorar/padronizar o desempenho e qualidade dos produtos entregues à sociedade.

REFERÊNCIAS

ALHEIROS, M. M.; LIMA FILHO, M. F.; MONTEIRO, F. A. J.; OLIVEIRA FILHO, J. S. **Sistemas deposicionais na Formação Barreiras no Nordeste Oriental.** Congresso Brasileiro de Geologia, n. 35, v. 2, p. 753-60. Belém, 1988.

ALMEIDA, D. T.; SOUZA, J. H. C.; KUNTZ, M. R. K.; KNEBELKAMP, S. R. **SELEÇÃO DE PARÂMETROS ATRAVÉS DO MÉTODO DE TAGUCHI PARA SOLDAGEM DE LIGA DE ALUMÍNIO 5052H32 PELO PROCESSO MIG.** *Holos*, ano 35, v. 6, e.7121. 2019.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 213R-03: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete.** Farmington Hills, 2003.

ANFACER. Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. **Números do Setor Cerâmico.** Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>> Acesso em: 25/03/2024.

ARAÚJO, S. C. J. F. N. **Análise de microestrutura e de características geotécnicas de misturas de resíduo de polimento de porcelanato e solo.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm – Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 35: Agregados leves para concreto estrutural – Especificação.** Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, 2006.

AYATI, B.; FERRÁNDIZ-MAS, V.; NEWPORT, D.; CHEESEMAN, C. **Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate.** *Construction and Building Materials*, v. 162, p. 124-131. February, 2018.

BECHER, S. B. **DESENVOLVIMENTO DE ARGAMASSA PARA RESTAURAÇÃO UTILIZANDO RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO.** Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2013.

BERNARDIN, A. M.; SILVA, M. J.; CARVALHO, E. F. U.; RIELLA, H. G. **Cerâmicas Celulares Obtidas a partir de Resíduos de Polimento.** Cerâmica Industrial, v. 12. p. 31-35. 2007.

BITTENCOURT E. L.; BENINCÁ, E. **Aspectos Superficiais do Produto Grês Polido.** Cerâmica Industrial, v. 7, p. 40-46. Julho, 2002.

CHEN, H., LIN, H., TANG, C. **Application of the Taguchi Method for Optimization the Process Parameters of Producing Controlled Low-Strength Material by Using Dimension Stone Sludge and Lightweight Aggregates.** *Sustainability*, v. 13. 2021.

CHEN, H.; CHANG, S.; TANG, C. **Application of the Taguchi Method for Optimizing the Process Parameters of Producing Lightweight Aggregates by Incorporating Tile Grinding Sludge with Reservoir Sediments.** *Materials*, v. 10. November, 2017.

CHUNG, S.; SIKORA, P.; KIM, D. J.; MADAwy, M. E. E.; ELRAHMAN, M. A. **Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete.** *Materials Characterization*, v. 173, 2021.

CPRM. **Projetos Materiais de Construção Civil na Região Metropolitana de João Pessoa.** Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Serviço Geológico do Brasil. Informe de Recursos Minerais, Série Rochas e Minerais Industriais, n. 35. Recife, 2021.

DECLEER, J.; VIAENE, W. **Rupelian Boom clay as raw material for expanded clay manufacturing.** *Applied Clay Science*, v. 8, 2^a-3^a ed., p. 111-128. August, 1993.

DONDI M.; CAPPELLETTI P.; D'AMORE, M.; GENNARO, R.; GRAZIANO, S. F.; LANGELLA, A.; RAIMONDO, M.; ZANELLI, C. **Lightweight aggregates from waste materials: Reappraisal of expansion behavior and prediction schemes for bloating.** *Construction and Building Materials*, v. 127, p. 397-409. November, 2016.

DUTRAS, R. P. S.; VARELA, M. L.; NASCIMENTO, R. M.; GOMES, U. U.; PASKOCIMAS, C. A.; MELO, P. T. **Avaliação da Potencialidade de Argilas do Rio Grande do Norte – Brasil.** Cerâmica Industrial. v. 11, n. 2. 2006.

EN 13055:2016. **Lightweight aggregates.** 2016.

GHANI, J. A.; CHOUDHURY, I. A.; HASSAN, H. H. **Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters.** Journal Mater Process Technol, v. 145, n. 1, p. 84-92. January, 2004.

LA RUSSA, M. F.; RUFFOLO, S. A.; BELFIORE, C. M.; ALOISE, P.; RANDAZZO, L.; ROVELLA, N.; PEZZINO, A.; MONTANA, G. **Study of the effects of salt crystallization on degradation of limestone rocks.** Periodico di Mineralogia, v. 82. 2013.

LAU, P. C; TEO, D. C. L.; MANNAM, M. A. **Mechanical, durability and microstructure Properties of lightweight concrete using aggregate made from lime-treated sewage sludge and palm oil fuel ash.** Construction and Building Materials, v. 176. 2018.

MARQUES, L. N.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; SANTANA, L. N. L.; LIRA, H. L.; FERREIRA, H. C. **Re-aproveitamento do resíduo do polimento de porcelanato para utilização em massa cerâmica.** Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 2.2, p. 34-42. Agosto, 2007.

MARTINS, M. A. S. **Estudo e parametrização do processo e procedimento de texturização superficial por granalhagem com vista á automatização e controlo de produção.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade do Minho. Outubro, 2023.

MEHTA, P. K. MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETE: MICROSTRUCTURE, PROPERTIES, AND MATERIALS.** 4 ed. 2014.

MINITAB. **Experimentos Taguchi.** Disponível em: < <https://support.minitab.com/pt-br/minitab/help-and-how-to/statistical-modeling/doe/supporting-topics/taguchi-designs/taguchi-designs/> > Acesso em: 13/04/2024.

MOITA, N. F. V. C. **Implementação do método Taguchi e análise de experiências na fase de testes de moldes para injeção de plásticos.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Universidade de Lisboa. Lisboa, 2007.

MOLINARI, C.; ZANELLI, C.; GUARINI, G.; DONDI, M. **Bloating mechanism in lightweight aggregates: Effect of processing variables and properties of the vitreous phase.** *Construction and Building Materials*, v. 261. July, 2020.

MORAIS, M. L. V. N. **Aproveitamento de resíduo de beneficiamento do caulim na produção de porcelanato cerâmico.** Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.

MORENO-MAROTO, J. M.; GONZÁLES-CORROCHANO, B.; ALONSO-AZCÁRATE, J.; RODRÍGUEZ, L.; ACOSTA, A. **Manufacturing of lightweight aggregates with carbon fiber and mineral wastes.** *Cement and Concrete Composites*, v. 83, p. 335-348, 2017.

MORENO-MAROTO, J. M.; UCEDA-RODRÍGUEZ, M.; COBO-CEACERO, C. J.; COTES-POLOMINO, T.; MARTÍNEZ-GARCÍA, C.; ALONSO-AZCÁRATE, J. **Studying the feasibility of a selection of Southern European ceramic clays for the production of lightweight aggregates.** *Construction and Building*, v. 237, 2020.

NAS, E., ÖZBEK, N. A. **OPTIMIZATION OF THE MACHINING PARAMETERS IN TURNING OF HARDENED HOT WORK TOOL STEEL USING CRYOGENICALLY TREATED TOOLS.** *Surface Review and Letters*, v. 27, n. 5. 2019.

NP EN 206-1:2007. **Betão – Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.** 2^a ed. Junho, 2007.

NUNES, J. J. B. C.; TEIXEIRA, A. M. A. J.; SARAIVA, R. M. D. C. **Morphological characterisation of Brazilian expanded clay lightweight aggregate using AIMS.** Ambiente Construído. v. 21, n. 3, p. 213-227. Porto Alegre. 2021.

ONEGEOLOGY. **Mapa Geológico do Mundo.** Disponível em: < <https://portal.onegeology.org/OnegeologyGlobal/> > Acesso em: 14/04/2024.

PONTES, C. I. **Influência das adições de resíduo do polimento do porcelanato em argilas visando a obtenção de agregados leves.** Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2024.

RAMBALDI, E.; ESPOSITO, L.; TUCCI, A.; TIMELLINI, G. **Recycling of polishing porcelain stoneware residues in ceramic tiles.** *Journal of the European Ceramic Society*, v. 27, n. 12, p. 3509-3515. 2007.

REHMAN, M. U.; RASHID, K.; HAQ, E. U.; HUSSAIN, M.; SHEHZAD, N. **Physico-mechanical performance and durability of artificial lightweight aggregates synthesized by cementing and geopolymmerization.** *Construction and Building Materials*, v. 232, 2020.

RILEY, C. M. **Relation of Chemical Properties to the Bloating of Clays.** *Journal of the American Ceramic Society*, v. 34, 4^a ed., p. 121-128. April, 1951.

ROQUE, R. A. L.; PIERRI, A. C. **Uso inteligente de recursos naturais e sustentabilidade na construção civil.** *Research, Society and Development*, v. 8, n. 2, 2019.

ROSSIGNOLO, J. A. **CONCRETO LEVE DE ALTO DESEMPENHO MODIFICADO COM SB PARA PRÉ-FABRICADOS ESBELTOS - DOSAGEM, PRODUÇÃO, PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA.** Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

SANTOS, H. M. M. **USO DE RESÍDUO DO POLIMENTO DO PORCELANATO EM CONCRETO COMO ADIÇÃO E COMO MATERIAL CIMENTÍCIO SUPLEMENTAR.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade Federal de Pernambuco. Caruaru, 2019.

SANTOS, M. L. L. O. **Aproveitamento de resíduos minerais na formulação de argamassas para a construção civil.** Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

SEMBENELLI, P. **Los límites de Atterberg y su significado en la industria cerámica y ladrillera.** *Materiales de Construcción*, v. 16, n. 124, p. 630-643. Octubre/noviembre/diciembre, 1966.

SILVA, G. J. B. **Estudo do Comportamento do Concreto de Cimento Portland produzido com a Adição do Resíduo de Polimento do Porcelanato.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2005.

SILVA, M. G. AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO COMBINADA DOS RESÍDUOS DE CASCALHO DE PERFURAÇÃO DE POÇO PETROLÍFERO E DE POLIMENTO DO PORCELANATO EM CERÂMICA VERMELHA. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2012.

SOLTAN, A. M.; KAHL, W.; EL-RAOOF, F. A.; EL-KALIOUBY, B. A.; SERRY, M. A.; ABDEL-KADER, N. A. **Lightweight aggregates from mixtures of granite wastes with clay.** *Journal of Cleaner Production*, v. 117, p. 139-149, 2016.

SOUZA, J. A. S. ESTUDO E AVALIAÇÃO DO USO DE RESÍDUOS DO PROCESSO BAYER COMO MATÉRIA-PRIMA NA PRODUÇÃO DE AGREGADOS SINTÉTICOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL. Tese de Doutorado em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia. Universidade Federal do Pará. Belém, 2010.

SOUZA, M. M. DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE RESÍDUO DE SCHEELITA, LODO DE ESGOTO E CINZA DA CASCA DO ARROZ. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

SOUZA, M. M.; ANJOS, M. A. S.; SÁ, M. V. V. A.; SOUZA, N. S. L. **Developing and classifying lightweight aggregates from sewage sludge and rice husk ash.** *Case Studies in Construction Materials*, v. 12. 2020.

SOUZA, N. S. L. DESENVOLVIMENTO DE AGREGADOS LEVES A PARTIR DE RESÍDUOS INDUSTRIALIS E MATÉRIAS-PRIMAS LOCAIS (NORDESTE/BRASIL). Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2019.

SOUZA, N. S. L.; ANJOS, M. A. S.; SÁ, M. V. V. A.; FARIA, E. C.; MELLO, L. C. A. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de resíduo de corte de pedras ornamentais (granitos e mármores) e argila.** *Revista Matéria*, v. 25, n. 01. 2020.

SOUZA, N. S. L.; ANJOS, M. A. S.; SÁ, M. V. V. A.; FARIA, E. C.; SOUZA, M. M.; BRANCO, F. G.; PEREIRA, A. **Evaluation of sugarcane bagasse ash for lightweight aggregates production.** *Construction and Building Materials*, v. 27. 2021.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plásticos, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato.** Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2007.

UNITED NATIONS. **Global Waste Management Outlook 2024.** UN Environment Programme. *February, 2024.*