

PETER MENEZES DOS REIS JÚNIOR

**INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO POLIMENTO
DO PORCELANATO NA FORMULAÇÃO DE BLOCO
INTERTRAVADO CERÂMICO**

Julho de 2024

PETER MENEZES DOS REIS JÚNIOR

INFLUÊNCIA DA INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DO POLIMENTO DO
PORCELANATO NA FORMULAÇÃO DE BLOCO INTERTRAVADO CERÂMICO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do IFBA, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Linha de Pesquisa: Processamento de Materiais

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Mirtânia Antunes Leão

Coorientador: Prof. Dr. Adriano Silva Fortes

Salvador, Julho de 2024

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELO SISTEMA DE BIBLIOTECAS DO IFBA, COM OS
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

R375i Reis Júnior, Peter Menezes dos

Influência da incorporação de resíduos do polimento do porcelanato na formulação de bloco intertravado cerâmico / Peter Menezes dos Reis Júnior; orientadora Mirtânia Antunes Leão; coorientador Adriano Silva Fortes -- Salvador, 2024.

81 p.

Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais) -- Instituto Federal da Bahia, 2024.

1. Bloco intertravado. 2. Massa cerâmica. 3. Resíduo do polimento do porcelanato. 4. Pavimentação. I. Leão, Mirtânia Antunes, orient. II. Fortes, Adriano Silva, coorient. III. TÍTULO.

CDU 62-431

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA BAHIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGEM

“Influência da Incorporação de Resíduos do Polimento do Porcelanato na Formulação de Bloco Intertravado Cerâmico.”

Peter Menezes dos Reis Júnior

Produto Gerado: Dissertação

Orientador(a): **Profa. Dra. Mirtânia Antunes Leão** – PPGEM/IFBA

Coorientador(a): **Prof. Dr. Adriano Silva Fortes** – PPGEM/IFBA

Banca examinadora:

Profa. Dra. Mirtânia Antunes Leão – Orientadora do PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Documento assinado digitalmente
 **MIRTANIA ANTUNES LEAO**
Data: 25/07/2024 16:53:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Antonio Pimentel Cavalcanti – Examinador Interno ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ANTONIO PIMENTEL CAVALCANTI**
Data: 01/08/2024 03:14:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Raimundo Jorge Santos Paranhos – Examinador Externo ao PPGEM – Instituto Federal da Bahia – IFBA

Documento assinado digitalmente
 **RAIMUNDO JORGE SANTOS PARANHOS**
Data: 02/08/2024 12:34:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Sandro Fábio César – Examinador Externo – Nome da instituição – UFBA

Documento assinado digitalmente
 **SANDRO FABIO CESAR**
Data: 25/07/2024 18:11:44-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela banca examinadora em 25/ 07 /2024.

DEDICATÓRIA

À Deus por toda a força e determinação. Aos meus pais, Peter (*in memoriam*) e Jandira, por todos os valores que me ensinaram. E à minha esposa, Caroline, e minha filha, Melissa, por toda paciência, carinho, apoio e incentivo nos momentos que precisei.

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, por me dar saúde, força e inteligência para que eu pudesse alcançar mais este objetivo.

À minha irmã Luciene, por sempre me incentivar todas as vezes que conversamos e para quem espero ser sempre uma inspiração.

Ao meu tio e professor Dr. Osvaldo Cruz, pelo incentivo e valioso apoio, desde a concepção até a conclusão deste trabalho.

À minha orientadora Dr^a. Mirtânia Antunes Leão, pela paciência, por estar sempre disposta a me ajudar e por ter acreditado em mim até o final.

Ao meu coorientador Dr. Adriano Silva Fortes, pelo apoio na execução dos ensaios e todo o incentivo para a realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Luiz Antônio Pimentel Cavalcanti por sempre estar bastante disposto à ajudar com relação às demandas referentes à coordenação do PPGEM.

Aos professores Dr. Raimundo Jorge Santos Paranhos, Dr. Aldemiro José Rocha Palma e Dr. Eduardo Jorge Vidal Dultra, por toda a ajuda durante a realização dos ensaios, inclusive tirando algumas dúvidas e dando algumas orientações pertinentes.

Ao professor Dr. Sandro Fábio César, da UFBA, além dos demais membros da banca, já citados anteriormente, por terem aceitado o convite para participar da avaliação deste trabalho, contribuindo com a versão final apresentada, através das sugestões dadas.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do IFBA, pelos conhecimentos transmitidos através das disciplinas ministradas.

À Amanda, da Tecnogres, e Eduardo, da Cerâmica Candeias, pela colaboração e fornecimento da matéria prima, além dos esclarecimentos disponibilizados.

Aos colegas do mestrado, pela colaboração nos trabalhos e aulas que cursamos juntos.

Aos colegas do grupo de pesquisa GCPC por todo apoio, especialmente à Prof. Dr. Pedro, Alberto Matheus e Carla Tainara, por estarem prontos para me apoiar quando precisei.

Aos professores Dr. Emmanuel Lima e Dr^a. Sandra Luz, da UNB, pela disponibilidade no desenvolvimento do ensaio de TGA/DTA.

Aos técnicos e funcionários do IFBA, bem como aos terceirizados de serviços gerais, por toda ajuda que me foi prestada para a realização dos meus ensaios em plena pandemia, em especial à Carina, Yuri e Hélder, do Campus Salvador e Leonardo, do Campus Simões Filho.

Enfim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que mais uma meta fosse concluída com sucesso em minha vida.

**“Por mais difícil que a vida possa parecer, existe
sempre algo que você pode fazer e alcançar.”**

Stephen Hawking

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Classificação de argilas para uso cerâmico com base na cor após queima a 950°C, 1250°C e 1450°C, em atmosfera oxidante	21
Figura 3.2 - Telhas e blocos cerâmicos	22
Figura 3.3 - Processo de fabricação de cerâmica vermelha	23
Figura 3.4 - Mudanças microestruturais nos grãos dos materiais durante a sinterização. a) material verde prensado. b) aproximação dos grãos e formação dos poros após início da sinterização. c) redução do tamanho dos poros e avanço na densificação	28
Figura 3.5 - Cabeças de polimento com tijolos abrasivos	30
Figura 3.6 - Tanques com resíduo em forma de lama proveniente do processo de polimento do porcelanato na Tecnogres – Dias D’Ávila/BA	30
Figura 3.7 - Seção transversal típica de um pavimento flexível	32
Figura 3.8 - Seção transversal típica de um pavimento com revestimento em bloco intertravado	33
Figura 3.9 - Pavimentações com bloco intertravado cerâmico em passeios na Espanha	34
Figura 3.10 - Paver cerâmico em formato retangular com dimensões de 200x100x50mm	34
Figura 4.1 - Fluxograma experimental utilizado	36
Figura 4.2 - Identificação dos corpos de prova – A=900°C, B=1000°C e C=1100°C	42
Figura 4.3 - Corpos de prova colocados no forno para sinterização	43
Figura 4.4 - Ciclo de queima dos corpos de prova	44
Figura 4.5 - Amostras no metalizador	48
Figura 4.6 - Microscópio eletrônico de varredura	48

Figura 5.1 - Difratoograma de raios X da argila	51
Figura 5.2 - Difratoograma de raios X do RPP	52
Figura 5.3 - Análise térmica TGA e DTA da argila	54
Figura 5.4 - Análise térmica TGA e DTA do RPP	55
Figura 5.5 - Gráfico da retração linear de queima das formulações	56
Figura 5.6 - Gráfico da absorção de água das formulações	58
Figura 5.7 - Gráfico da porosidade aparente das formulações	60
Figura 5.8 - Gráfico da massa específica aparente das formulações	61
Figura 5.9 - Gráfico da tensão de ruptura à flexão das formulações	62
Figura 5.10 - Curva de gresificação da formulação MR	64
Figura 5.11 - Curva de gresificação da formulação M5	65
Figura 5.12 - Curva de gresificação da formulação M10	65
Figura 5.13 - Curva de gresificação da formulação M15	66
Figura 5.14 - Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra MR sinterizada a 1000°C, com ampliação de 2000X (a) e (b)	67
Figura 5.15 - Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra M5 sinterizada a 1000°C, com ampliação de 2000X (a) e 5000X(b)	68
Figura 5.16 - Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra M10 sinterizada a 1100°C, com ampliação de 2000X (a) e 5000X(b)	69
Figura 5.17 - Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra M15 sinterizada a 1100°C, com ampliação de 500X (a) e 5000X(b)	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição química (% em massa) do resíduo do polimento do porcelanato	29
Tabela 3.2 - Especificações técnicas para produção de pavers cerâmicos, de acordo com a norma americana ASTM C902-22	35
Tabela 4.1 - Classificação das matérias primas quanto a plasticidade	39
Tabela 4.2 - Formulações dos corpos de prova	40
Tabela 4.3 - Parâmetros de queima das amostras a 900°C	43
Tabela 4.4 - Parâmetros de queima das amostras a 1000°C	43
Tabela 4.5 - Parâmetros de queima das amostras a 1100°C	44
Tabela 5.1 - Composição química das matérias primas	50
Tabela 5.2 - Limites de consistência das matérias primas	53
Tabela 5.3 - Resultados da retração linear de queima das formulações	56
Tabela 5.4 - Resultados da absorção de água das formulações	57
Tabela 5.5 - Resultados da porosidade aparente das formulações	59
Tabela 5.6 - Resultados da massa específica aparente das formulações	61
Tabela 5.7 - Resultados da tensão de ruptura à flexão das formulações	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABCERAM	Associação Brasileira de Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANFACER	Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres
ASTM	American Society for Testing and Materials
CP	Corpo de prova
DRX	Difração de raios X
DTA	Análise térmica diferencial
FRX	Fluorescência de raios X
ICDD	International Center for Diffraction Data
IP	Índice de plasticidade
ISO	International Organization for Standardization
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MEA	Massa específica aparente
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MR	Massa padrão de referência sem resíduo
M5	Formulação com 5% de resíduo
M10	Formulação com 10% de resíduo

M15	Formulação com 15% de resíduo
MX	Classe de pavimento indicado para uso exterior, mas não submetido a congelamento.
NBR	Norma Brasileira Registrada
NTC	Norma Técnica Colombiana
NX	Classe de pavimento indicado para uso interno
PA	Porosidade aparente
RC	Resistência à compressão
RLq	Retração linear de queima
RMS	Região Metropolitana de Salvador
RPP	Resíduo do polimento do porcelanato
SX	Classe de pavimento indicado para uso externo, podendo ser submetido a congelamento
TGA	Análise termogravimétrica
UNE	Una Norma Española
TRF	Tensão de ruptura à flexão

RESUMO

A partir do desenvolvimento industrial, os recursos naturais passaram a ser explorados de forma intensa e desordenada pelas civilizações, em busca de rápido crescimento econômico, gerando cada vez mais resíduos a serem descartados no meio ambiente. Atualmente, com a conscientização de uma parcela significativa da população mundial pela preservação e sustentabilidade do planeta, revelou-se um problema socioambiental, necessitando de soluções urgentes. O Brasil gera anualmente cerca de 100.000t de resíduo do polimento do porcelanato, através da produção de, aproximadamente, 1 bilhão de m² de revestimento, acarretando em elevados custos para o setor ceramista, devido a logística para seu descarte. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência da incorporação de resíduo do polimento do porcelanato em massas cerâmicas para produção de bloco intertravado. Utilizou-se diferentes proporções de substituição da argila, a fim de avaliar os efeitos sobre as suas características e propriedades, buscando a sua utilização em pavimentação. Foram feitos ensaios de caracterização das matérias primas, do ponto de vista físico, químico e mineralógico, realizando-se os ensaios de fluorescência de raios X, difração de raios X, índice de plasticidade, análise termogravimétrica e análise térmica diferencial, em seguida sendo formuladas as misturas com os percentuais de incorporação de resíduo em massa de 0%, 5%, 10% e 15% em relação à massa padrão. Os corpos de prova foram confeccionados por prensagem uniaxial, utilizando-se uma matriz de aço com cavidade retangular, obtendo-se as dimensões de 60 x 20 x 5mm, sendo sinterizados nas temperaturas de 900°C, 1000°C e 1100°C, e as suas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais determinadas através dos ensaios de retração linear de queima, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, tensão de ruptura à flexão e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Após os resultados obtidos, observou-se que a incorporação de resíduo do polimento do porcelanato contribuiu para melhorar a microestrutura e, conseqüentemente, as propriedades de resistência mecânica e absorção de água de todas as formulações, sendo que no percentual de 15% para a temperatura de 1000°C e nos percentuais de 5%, 10% e 15% para a temperatura de 1100°C, foi possível atender as exigências da norma ASTM C902-22, que especifica os blocos cerâmicos de pavimentação para tráfego leve. Assim, concluiu-se que a incorporação de resíduo do polimento do porcelanato para formulação de bloco intertravado cerâmico é viável tecnicamente, e seu reaproveitamento auxilia na redução do impacto ambiental e dos custos gerados pelo seu descarte.

Palavras-chave: bloco intertravado, massa cerâmica, resíduo do polimento do porcelanato, pavimentação.

ABSTRACT

Following industrial development, natural resources began to be exploited in an intense and disorderly manner by civilizations, in search of rapid economic growth, generating more and more waste to be discarded in the environment. Currently, with the awareness of a significant portion of the world's population regarding the preservation and sustainability of the planet, a socio-environmental problem has emerged, requiring urgent solutions. Brazil generates around 100,000t of porcelain polishing waste annually, through the production of approximately 1 billion m² of coating, resulting in high costs for the ceramic sector, due to the logistics for its disposal. This work aimed to evaluate the influence of incorporating porcelain polishing residue into ceramic masses for the production of interlocking blocks. Different clay replacement proportions were used in order to evaluate the effects on its characteristics and properties, seeking its use in paving. Tests were carried out to characterize the raw materials, from a physical, chemical and mineralogical point of view, carrying out tests for X-ray fluorescence, X-ray diffraction, plasticity index, thermogravimetric analysis and differential thermal analysis, then formulating mixtures with residue incorporation percentages by weight of 0%, 5%, 10% and 15% in relation to the standard mass. The test specimens were manufactured by uniaxial pressing, using a steel matrix with a rectangular cavity, obtaining dimensions of 60 x 20 x 5mm, being sintered at temperatures of 900°C, 1000°C and 1100°C, and their properties physical, mechanical and microstructural determined through tests of linear burning shrinkage, water absorption, apparent porosity, apparent specific mass, bending rupture stress and scanning electron microscopy (SEM). After the results obtained, it was observed that the incorporation of porcelain polishing residue contributed to improving the microstructure and, consequently, the mechanical resistance and water absorption properties of all formulations, with a percentage of 15% for the temperature of 1000°C and in the percentages of 5%, 10% and 15% for the temperature of 1100°C, it was possible to meet the requirements of the ASTM C902-22 standard, which specifies ceramic paving blocks for light traffic. Thus, it was concluded that the incorporation of porcelain polishing residue to formulate a ceramic interlocking block is technically viable, and its reuse helps to reduce the environmental impact and costs generated by its disposal.

Keywords: interlocking block, ceramic mass, porcelain polishing residue, paving.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA.....	17
CAPÍTULO 2: OBJETIVOS	19
2.1. OBJETIVO GERAL.....	19
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. MATERIAIS CERÂMICOS.....	20
3.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA OU ESTRUTURAL... 21	
3.2.1. Preparação das matérias primas.....	22
3.2.2. Preparação da massa.....	22
3.2.3. Conformação.....	23
3.2.4. Secagem e queima.....	24
3.2.5. Finalização.....	24
3.3. PORCELANATO.....	24
3.3.1. Composição do porcelanato.....	25
3.3.1.1. Materiais plásticos.....	25
3.3.1.2. Materiais fundentes.....	26
3.3.1.3. Materiais inertes.....	26
3.3.2. Processo de fabricação do porcelanato.....	27
3.3.3. Resíduo de polimento do porcelanato.....	28
3.4. PAVIMENTOS.....	31
3.4.1. Classificação dos pavimentos.....	32
3.4.2. Pavimentos intertravados.....	33
3.4.2.1. Bloco intertravado cerâmico.....	34
CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1. MATERIAIS.....	37
4.1.1. Coleta e preparação.....	37
4.2. MÉTODOS.....	38
4.2.1. Caracterização das matérias primas.....	38
4.2.1.1. Análise química por fluorescência de raios X (FRX).....	38
4.2.1.2. Análise mineralógica por difração de raios X (DRX).....	38
4.2.1.3. Índice de plasticidade (IP).....	38
4.2.1.4. Análise térmica (TGA e DTA).....	39

4.2.2. Preparação das formulações das massas cerâmicas	40
4.2.3. Confeção dos corpos de prova	41
4.2.4. Sinterização dos corpos de prova.....	42
4.2.5. Caracterização do produto final	44
4.2.5.1. Retração linear de queima (RLq)	45
4.2.5.2. Absorção de água (AA).....	45
4.2.5.3. Porosidade aparente (PA).....	46
4.2.5.4. Massa Específica Aparente (MEA).....	46
4.2.5.5. Tensão de ruptura à flexão (TRF)	47
4.2.5.6. Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)	48
CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	49
5.1.1. Análise química por FRX	49
5.1.2. Análise mineralógica por DRX.....	51
5.1.3. Índice de plasticidade (IP)	52
5.1.4. Análise térmica por TGA e DTA.....	53
5.2. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO FINAL	55
5.2.1. Retração linear de queima.....	55
5.2.2. Absorção de água.....	57
5.2.3. Porosidade aparente	59
5.2.4. Massa específica aparente.....	60
5.2.5. Tensão de ruptura à flexão.....	62
5.2.6. Curvas de gresificação	63
5.2.7. Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV).....	66
CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES	71
CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

CAPÍTULO 1: INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os impactos ambientais causados pela intensa exploração dos recursos naturais e pelo descarte dos resíduos gerados pelas indústrias na natureza, vem sendo um assunto amplamente discutido pela sociedade, sendo buscadas soluções pela comunidade científica através da pesquisa de materiais alternativos com a incorporação desses resíduos, com a missão de equilibrar os aspectos tecnológicos, ambientais e econômicos (SANTOS, 2013).

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de cerâmica, perdendo apenas para a China e Índia, tendo alcançado em 2021 a marca anual de 1,05 bilhão de metros quadrados de cerâmica de revestimento fabricados (ANFACER, 2022). Por conta desta elevada produtividade, este segmento consome uma parcela cada vez maior de argila, como sua matéria-prima principal, e gera uma grande quantidade de resíduos no processo de polimento do porcelanato, sendo descartados no meio ambiente (BREITENBACH *et al.*, 2017). Para cada 100.000m² de porcelanato polido produzidos são gerados cerca de 10t de resíduo, o que no Brasil corresponde a, aproximadamente, 100.000t anualmente, e considerando-se a China e a Índia juntos, alcança-se em torno de 1 milhão de toneladas (RAMOS *et al.*, 2020). Essa destinação dos resíduos industriais em aterros, além de gerar elevados custos, pode trazer também diversos problemas ambientais, como a contaminação do solo e degradação da vegetação no local (MATOS *et al.*, 2018).

Com o intuito de buscar soluções sustentáveis para a destinação dos resíduos produzidos, são desenvolvidas várias pesquisas visando a sua utilização, sendo várias delas para a aplicação na indústria cerâmica. Dentre esses estudos realizados, é possível citar a avaliação da incorporação de escória de alto forno em massa de cerâmica vermelha para a produção de blocos de vedação (ZACCARON *et al.*, 2020), o trabalho de Santos, Oliveira e Santos (2024) sobre a adição de resíduo de corte de granito em formulações cerâmicas para produção de tijolos, blocos e telhas e a pesquisa sobre o desenvolvimento de cerâmica de revestimento sustentável desenvolvida com resíduos industriais de caulim, granito e polimento do porcelanato realizada por Caetano *et al.* (2021).

Nesse contexto, foi estudada e desenvolvida, por meio deste trabalho, uma formulação de massa cerâmica através da mistura de argila e resíduo de polimento do porcelanato, com o intuito da fabricação de bloco intertravado cerâmico, também conhecido como paver ou adoquim cerâmico. Apesar do termo “resíduo” ser bastante utilizado, entende-se que para este trabalho, o RPP poderia ser denominado como “subproduto”, a partir do momento em que ele

deixa de ser descartado e passa a ser matéria-prima na fabricação de um novo produto, agregando-lhe valor.

O paver cerâmico, além de ser um produto inovador no Brasil, diversificando as alternativas de fabricação para a indústria de materiais cerâmicos, também se apresenta como uma possível solução para o problema de recuperação de passeios e calçadas, bem como para utilização no revestimento de taludes (SANTOS, 2013).

1.1. JUSTIFICATIVA

As indústrias cerâmicas, através da extração de argila e da geração de resíduos, se apresentam como grandes poluidoras do ambiente (SANTOS, 2013). O porcelanato polido, um dos produtos mais procurados pelo mercado, necessita de uma etapa de polimento durante a sua produção, o que gera grande quantidade de resíduo, acarretando em altos custos para a sua destinação pela indústria. Desta forma, a utilização é a solução mais indicada para a destinação do resíduo do polimento do porcelanato (RPP) (MATOS *et al.*, 2018).

Os passeios e calçadas de Salvador, geralmente formados por pedras portuguesas, encontram-se em situação muito ruim de manutenção, apresentando riscos para a segurança do trânsito de pedestres, no momento em que as pedras começam a se soltar, principalmente em bairros mais pobres (SANTOS, 2013). O paver cerâmico apresenta-se como uma alternativa economicamente viável, sendo largamente utilizado na Europa e em países da América Latina. Ele possui diversos pontos positivos, como: elevado valor agregado, alta resistência mecânica, facilidade de aplicação, baixo custo de manutenção, coloração natural, além de elevada resistência a ataques por agentes químicos, como o salitre, quando comparado com o bloco de concreto (DIAS *et al.*, 2016; FERREIRA *et al.*, 2019; CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2021). Acrescenta-se, também, o fato de sua utilização reduzir a emissão de poluentes na atmosfera, pela diminuição da utilização de cimento na produção de blocos intertravados de concreto, já que a produção de cada tonelada de cimento Portland lança na atmosfera, aproximadamente, 1 tonelada de CO₂ (MATOS *et al.*, 2018).

A partir destes argumentos, entende-se que a adição de resíduo do polimento do porcelanato na produção de bloco intertravado cerâmico para ser utilizado na pavimentação dos passeios públicos de Salvador, pode ser vantajoso. Isto pode ser justificado, tanto pelo surgimento de um novo produto para a indústria cerâmica brasileira, como pela redução do consumo de argila extraída da natureza e do volume de resíduos descartados no meio ambiente, prolongando a vida útil dos aterros e diminuindo o custo da logística de destinação pelo setor

ceramista, além de atuar como uma possível solução para a recuperação dos passeios da Região Metropolitana de Salvador – RMS, inclusive nas áreas litorâneas, sujeitas a incidência de salitre.

Desta forma, a fabricação de paver cerâmico com adição de RPP poderá auxiliar a indústria cerâmica na resolução da destinação sustentável dos resíduos gerados, além de impulsionar o mercado através da diversificação de novos produtos, tendo potencial de uso como solução para recuperação de passeios e calçadas.

CAPÍTULO 2: OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência da incorporação de resíduo do polimento do porcelanato na formulação de bloco intertravado cerâmico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar as características físicas, químicas, mineralógicas e morfológicas das matérias primas;
- Determinar as propriedades físicas, mecânicas e microestruturais das cerâmicas sinterizadas;
- Avaliar diferentes proporções de substituição da argila pelo RPP, na composição da matriz cerâmica para blocos intertravados;
- Determinar quais formulações atendem às exigências da norma ASTM C902-22 (Estados Unidos), para tráfego leve ou de pedestres, na falta de legislação específica no Brasil que regulamente a fabricação de blocos intertravados cerâmicos.

CAPÍTULO 3: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

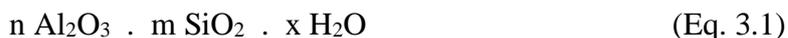
3.1. MATERIAIS CERÂMICOS

A palavra cerâmica, advém do termo grego “*kéramos*”, que significa “terra queimada” ou “argila queimada”, sendo o material artificial mais antigo produzido pelo homem (ANFACER, 2022).

Convencionou-se chamar de cerâmica, todo material proveniente da mistura de minerais, que é obtido através de um processo de moldagem e posterior queima, através do qual adquire propriedades como resistência e densificação, que garante a adequação às atividades a que será destinado (PALMA; PASKOCIMAS, 2021).

Os materiais cerâmicos podem ser divididos em tradicionais e avançados, sendo que o primeiro compreende os setores das cerâmicas brancas ou de revestimento e cerâmicas vermelhas ou estruturais, enquanto que o segundo diz respeito a materiais produzidos com matérias primas sintéticas, sob o mais alto rigor e tecnologia, atendendo a diversas áreas da indústria, como a espacial, nuclear, de biotecnologia, entre outras (ANFACER, 2022).

As argilas formam a composição básica dos materiais cerâmicos, sendo constituídas por hidrossilicatos de alumínio, na forma geral apresentada na Equação 3.1 (SANTOS, 2013):



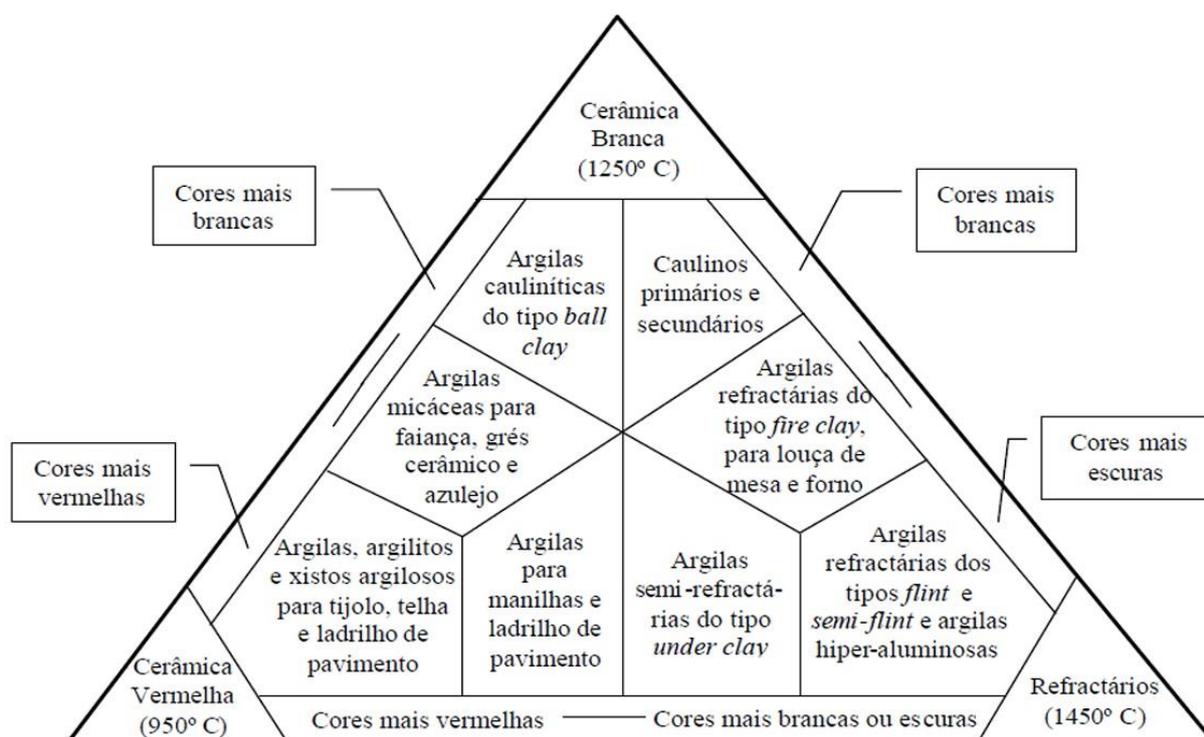
O termo argila, denomina o grupo de materiais inorgânicos, que possui comportamento plástico quando lhe é adicionado certa quantidade de água, podendo ser moldado, porém endurecendo após secagem e queima, e que é formado por um número restrito de minerais, denominados argilominerais, possuindo elevada quantidade de partículas com tamanho máximo de 2 μm (GOMES, 1988).

Os argilominerais formam estruturas em cadeias compostas de folhas tetraédricas de silício e octaédricas de alumínio, sendo identificados na análise de difratometria de raios X (DRX), e classificados em quatro grupos principais: caulinita, montmorilonita, illita e clorita. Um mineral argiloso pode conter cátions como alumínio, magnésio, ferro, cálcio e potássio, o que influencia em suas características durante o processo de sinterização (GOMES, 1988).

Uma argila pode ser composta, além dos argilominerais, por matéria orgânica, sais solúveis e minerais não argilosos, como quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita, entre outros (SANTOS, 1989).

De acordo com a cor após queima, as argilas são classificadas em relação ao seu uso cerâmico, como mostra o diagrama ternário da Figura 3.1.

Figura 3.1. Classificação de argilas para uso cerâmico com base na cor após queima a 950°C, 1250°C e 1450°C, em atmosfera oxidante.



Fonte: SANTOS, 2013

3.2. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA VERMELHA OU ESTRUTURAL

De acordo com a ABCERAM (2024), define-se como cerâmica vermelha ou estrutural os materiais caracterizados pela cor avermelhada após a sua sinterização, utilizados na construção civil, a exemplo de tijolos, telhas, blocos, elementos vazados, tubos cerâmicos, entre outros. Esta cor característica é causada pela utilização, como matéria prima para a fabricação, de uma argila contendo grandes quantidades de Fe_2O_3 em sua composição. A Figura 3.2, mostra alguns desses materiais.

Figura 3.2. Telhas e blocos cerâmicos



Fonte: AGUIAR *et al.*, 2022

O processo de fabricação de cerâmica vermelha pode ser dividido em algumas etapas, sendo elas: preparação da matéria prima, preparação da massa, conformação ou formação das peças, tratamento térmico (secagem e queima) e finalização. A Figura 3.3 apresenta um fluxograma detalhando esse processo.

3.2.1. Preparação das matérias primas

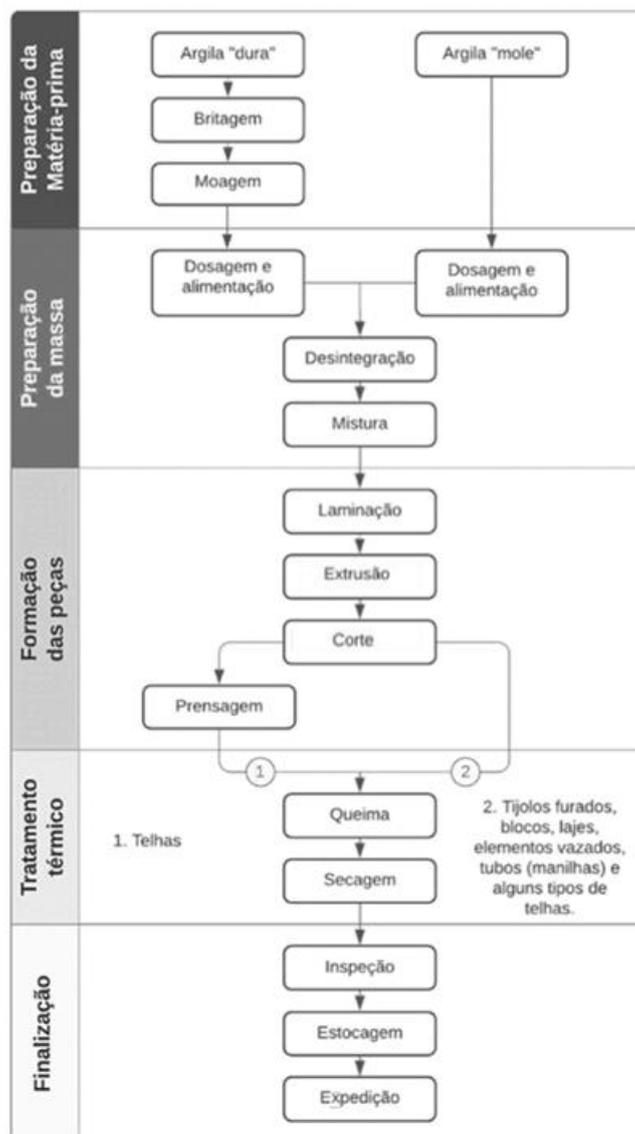
As matérias primas utilizadas na indústria cerâmica são, na grande maioria de origem natural, sendo necessário serem beneficiadas após sua extração. As atividades desta etapa são, geralmente, a desagregação, moagem e granulometria, além de purificação do material, para então iniciar, de fato, no processo de produção (ABCERAM, 2024).

3.2.2. Preparação da massa

Os produtos cerâmicos normalmente são fabricados com a mistura de dois ou mais tipos de argila, além de água e, em alguns casos, aditivos. Esta etapa requer muita atenção na dosagem dos componentes da formulação, a fim de que as características que se deseja obter no produto final, possam ser formados pela união das propriedades das matérias primas selecionadas. De modo geral, as massas cerâmicas são classificadas em: suspensão, também conhecida como barbotina e utilizada para a produção de peças em moldes; secas ou semi-secas,

de forma granulada, para prensagem das peças; e massas plásticas, que são utilizadas quando as peças serão fabricadas por extrusão (ABCERAM, 2024).

Figura 3.3. Processo de fabricação de cerâmica vermelha



Fonte: ABCERAM, 2024

3.2.3. Conformação

Trata-se de uma importante etapa do processo, em que se tem como objetivo dar forma às peças cerâmicas, sendo aplicados quatro métodos mais utilizados: colagem, prensagem, extrusão e torneamento. Na colagem, a barbotina é vertida para dentro de um molde de gesso, e após secagem adquire a sua forma. A prensagem é aplicada para massas granuladas e com

baixa umidade, e utiliza uma prensa para dar forma às peças, como algumas telhas, por exemplo. Na extrusão a massa plástica é colocada num equipamento chamado extrusora ou maromba, que empurra o material para passar por um bocal com seção definida, sendo realizados cortes nas dimensões previstas para obtenção dos tijolos desta forma, entre outros produtos. E o torneamento funciona como uma etapa posterior à extrusão, que usa tornos para dar a forma final para algumas peças (ABCERAM, 2024).

3.2.4. Secagem e queima

É uma etapa fundamental para garantir a qualidade dos produtos cerâmicos, pois é nesta operação que eles irão adquirir as propriedades finais necessárias para sua utilização. A secagem tem por objetivo eliminar, de forma lenta e gradual, a água utilizada na conformação que ainda permanece nas peças, a fim de evitar tensões durante a queima, que podem causar defeitos nos corpos cerâmicos. E na queima ou sinterização, as peças são submetidas a um tratamento térmico em temperaturas elevadas, que para a maioria dos materiais cerâmicos se situa entre 800°C e 1700°C, sendo realizado em três fases: aquecimento até a temperatura desejada, patamar nesta temperatura durante certo tempo e resfriamento até temperaturas menores que 200°C (ABCERAM, 2024).

Após esse processo, o corpo cerâmico sofre algumas transformações, como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea, soldagem dos grãos, resistência mecânica e perda de plasticidade (ABCERAM, 2024).

3.2.5. Finalização

Esta etapa consiste apenas na inspeção, armazenamento e expedição das peças concluídas, precisando-se, em alguns casos, de algum acabamento pós queima (ABCERAM, 2024).

3.3. PORCELANATO

O porcelanato é um material cerâmico amplamente utilizado atualmente como revestimento de pisos e paredes, sendo aplicado em edifícios residenciais, comerciais e industriais, tendo a aparência muito similar à de rochas e pedras naturais. Este produto apresenta

algumas características que o diferencia das cerâmicas tradicionais, como a elevada resistência à abrasão, a uniformidade de cores, a impermeabilidade etc (BRASILEIRO, 2020).

A norma ABNT NBR ISO 13006/20, que classifica as placas cerâmicas, especifica os critérios de absorção de água, de no máximo 0,5%, e módulo de resistência à flexão, de no mínimo 35MPa, para um revestimento cerâmico ser considerado porcelanato (Grupo BIa).

3.3.1. Composição do porcelanato

A massa do porcelanato é composta de argila, caulim, quartzo e feldspato, além de possíveis aditivos, sendo que cada um destes contribui para as propriedades do material, possuindo características distintas que os classificam como: plásticos, fundentes e inertes (ZANELLI *et al.*, 2019).

3.3.1.1. Materiais plásticos

As matérias primas plásticas são a argila e o caulim, que possuem a função de conferir plasticidade e resistência durante a fase conformação (SÁNCHEZ *et al.*, 2001; LERDPROM *et al.*, 2016).

Para a utilização em porcelanato, as argilas preferencialmente usadas são as cauliníticas, por conta da cor clara da queima e também da pouca plasticidade apresentada, que é favorecida na conformação pela alta pressão de compactação aplicada na prensagem, em torno de 50MPa, não comprometendo a resistência à verde. Além disso, a argila utilizada precisa conferir boas características fundentes para produção de fase vítrea e mulita durante a queima, garantindo boa resistência mecânica nos corpos sinterizados. (BIFFI, 2002).

O caulim é essencialmente formado de caulinita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que é um argilomineral que possui comportamento altamente refratário após a queima, tendo como função principal, conferir brancura à massa cerâmica, além de inserir alumina (Al_2O_3), que ajudará a regular o equilíbrio das reações durante a formação da fase líquida e participará da formação da mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), no final da queima, aumentando a resistência mecânica do corpo cerâmico. (BIFFI, 2002).

3.3.1.2. Materiais fundentes

As matérias primas consideradas fundentes mais utilizadas são os feldspatos, os filitos e os talcos, sendo responsáveis pela formação da fase vítrea em baixas temperaturas, garantindo a redução dos poros e, conseqüentemente a maior densificação do porcelanato (SÁNCHEZ *et al.*, 2001; LERDPROM *et al.*, 2016).

Segundo Araújo (2019), os feldspatos são sílico-aluminatos de metais alcalinos e alcalinos terrosos. Observando-se a sua composição química, podem ser classificados em: ortoclásio (KAlSi_3O_8) ou feldspato potássico, albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) ou feldspato sódico e anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ou feldspato cálcico. De acordo com Biffi (2002), estes minerais tem como papel fundamental reduzir a porosidade do corpo cerâmico a valores mínimos, alcançando também alta resistência mecânica, através da sua característica de alta fusibilidade e formação de eutéticos com outros elementos presentes, garantindo-se alcançar a gresificação em temperaturas relativamente baixas.

O filito é uma rocha metamórfica constituída basicamente de caulinita, quartzo e sericita, apresentando características fundentes, e por conta de sua composição química e mineralógica, ele se comporta como material plástico e não plástico (BRASILEIRO, 2020).

O talco é um filossilicato de magnésio ($3\text{MgO} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$), que é incorporado à massa de porcelanato em percentuais de até 4%, com o objetivo de aumentar a formação de líquido, através da formação de uma reação eutética com o feldspato, o que acarreta em uma maior resistência ao manchamento e um maior módulo de resistência à flexão (BIFFI, 2002).

3.3.1.3. Materiais inertes

Entre as matérias primas consideradas inertes se destaca o quartzo que propicia uma estabilidade térmica e dimensional, graças a seu elevado ponto de fusão (SÁNCHEZ *et al.*, 2001; LERDPROM *et al.*, 2016). O quartzo adicionado na massa de porcelanato tem como função principal a de funcionar como um esqueleto de sílica, quando os outros elementos se tornarem maleáveis, por efeito da temperatura, além de servir como regulador da retração e ajudar na relação entre a sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) para a formação da mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$). Um ponto que merece atenção em relação a este mineral, é o fato dele sofrer uma transformação alotrópica, por volta de 573°C , quando passa da fase alfa para a beta, no aquecimento, e na ordem inversa no resfriamento, o que gera variações volumétricas, pela alteração na estrutura cristalina, podendo causar microtrincas (BIFFI, 2002).

3.3.2. Processo de fabricação do porcelanato

A fabricação do porcelanato segue as mesmas etapas iniciais das cerâmicas tradicionais, sendo realizada a extração, moagem e dosagem, porém tendo como diferencial a necessidade de escolha de matérias primas de alta qualidade, com a realização de controle microestrutural e de processamento rigoroso e com o emprego de alta tecnologia, podendo-se compará-lo com o das cerâmicas avançadas, devido aos níveis elevados de densificação e resistência mecânica que esses corpos cerâmicos precisam atingir (DULTRA, 2013).

Na atomização, a barbotina desenvolvida na dosagem, que é uma suspensão aquosa de partículas sólidas, é pulverizada a alta pressão numa câmara aquecida, a uma temperatura entre 500°C e 600°C, de forma que as gotículas perdem água muito rapidamente assumindo uma forma esférica (SOUSA, 2014).

Segundo Silva e Bernardin (2013), todas as variáveis nesta etapa precisam ser cuidadosamente controladas, como granulometria e umidade, para evitar defeitos no produto final. Na sequência, o pó atomizado segue para silos, onde ficará 24hs para homogeneização da umidade.

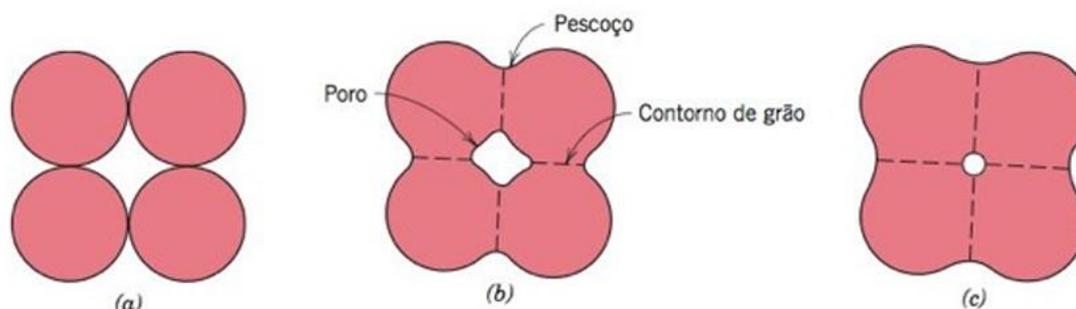
A prensagem tem como função, além da conformação do material, também de reduzir a porosidade interna do material, obtendo-se o maior empacotamento intergranular, a fim de aumentar a reatividade na queima, pelo maior contato entre partículas. A pressão de compactação utilizada deve estar entre 35 e 45MPa, para garantir a saída dos gases formados na queima, e impedir a formação de defeitos, com o aumento da porosidade (BIFFI, 2002).

Com a secagem, o corpo cerâmico verde perderá a água utilizada na etapa anterior, de forma a atingir um teor de umidade inferior a 0,5%, evitando-se o aparecimento de trincas e bolhas pela perda acelerada de água durante a sinterização (PARANHOS, 2015).

Durante a sinterização os corpos cerâmicos sofrem as transformações necessárias para obter as propriedades e características microestruturais adequadas para sua utilização, sendo influenciados pela temperatura, pressão, tempo, velocidade de aquecimento ou resfriamento e a natureza da atmosfera existentes no processo de queima (CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2021). A Figura 3.4. mostra um esquema com os estágios da sinterização com a aproximação dos grãos e conseqüentemente a densificação do material.

Figura 3.4. Mudanças microestruturais nos grãos dos materiais durante a sinterização.

a) material verde prensado. b) aproximação dos grãos e formação dos poros após início da sinterização. c) redução do tamanho dos poros e avanço na densificação.



Fonte: CALLISTER JR.; RETHWISCH, 2021

Os ciclos de queima para o porcelanato, variam entre 1190°C e 1230°C, durante 40 a 60min, com permanência de 6 a 8 minutos na temperatura máxima, segundo Biffi (2002), sendo necessários para a formação de fase vítrea e de mulita.

A etapa de polimento, posterior a queima, é uma inovação na produção de revestimento cerâmico, sendo bastante procurada pelo seu efeito estético e por facilitar a limpeza (BIFI, 2002). Porém, na realização deste processo, o equipamento remove uma camada de 0,5 a 1mm de espessura do porcelanato, expondo poros que estavam fechados e tornando a superfície mais suscetível a manchas (OLIVEIRA; HOTZA, 2015).

3.3.3. Resíduo de polimento do porcelanato

O porcelanato “polido” necessita de uma etapa de polimento durante sua produção a fim de regularizar os defeitos e dar brilho a superfície do produto final. No entanto, essa etapa do processamento gera grande quantidade de resíduo, particularmente com o aumento de produção que vem ocorrendo nos últimos anos, o que acarreta em aumento de custo para o setor, que necessita gerenciar e descartar adequadamente esse resíduo. A deposição de resíduos industriais em aterros, além dos elevados custos econômicos, pode ocasionar diversos problemas ambientais, como contaminação do solo, do lençol freático e agressão a vegetação presente no local. Nesse sentido a utilização é a solução mais indicada para a destinação da maioria dos resíduos industriais, como o resíduo do polimento do porcelanato (MARQUES *et al.*, 2007).

Por ser o porcelanato polido o mais comercializado no mercado, ocorre assim uma produção permanente de resíduo decorrente da intensa fabricação do mesmo. Segundo

informações da indústria Elizabeth Porcelanatos, localizada no estado da Paraíba, a produção de resíduo do polimento do porcelanato está entre 30 e 35 toneladas por dia (SOUZA, 2007). Já na Cecrisa, indústria localizada no estado de Minas Gerais, diariamente são produzidos, aproximadamente, 20 toneladas do resíduo (SILVA, 2005).

O resíduo do polimento do porcelanato pode ser definido como sendo a mistura de material cerâmico oriundo do polimento do porcelanato e material abrasivo desprendido durante o processo de polimento possuindo granulometria fina e composição química variada (BREITENBACH *et al.*, 2017).

Retirada da pesquisa realizada por Marques *et al.* (2007), a Tabela 3.1 apresenta a quantidade elevada de sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃) e óxido de magnésio (MgO) e baixas concentrações dos demais óxidos fundentes (Na₂O, K₂O) presentes na composição do resíduo do polimento de porcelanato, obtidos através da realização do ensaio de FRX (Fluorescência de raios X).

Tabela 3.1 - Composição química (% em massa) do resíduo do polimento do porcelanato

Amostra	PR^a	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	Na₂O	K₂O	RI^b
Resíduo	7,53	55,16	18,75	0,80	-	10,00	0,17	0,54	4,90

^a perda do rubro, ^b resíduo insolúvel (segundo o LAM – Laboratório de Análises Minerais da UFCG).

Fonte: Marques *et al.* (2007)

O processo de polimento do porcelanato ocorre em um equipamento que possui várias cabeças polidoras, conforme Figura 3.5, compostas basicamente de materiais abrasivos, que em contato direto com as peças em alta rotação e velocidade controlada em presença de água, executam o polimento utilizando gradativamente uma granulometria mais fina, até conseguir-se o resultado desejado (SOUZA, 2007).

O material abrasivo utilizado durante o polimento é geralmente composto por partículas de diamante ou carbetto de silício aglomerados por cimentos à base de cloretos magnesianos (MARQUES *et al.*, 2007).

De acordo com os estudos realizados por Silva (2005), a massa específica do resíduo do polimento do porcelanato é de aproximadamente 2,49 g/cm³.

Figura 3.5 - Cabeças de polimento com tijolos abrasivos



Fonte: SOUZA (2007)

Os pesquisadores Kummer *et al.* (2007) ainda acrescentam que grês porcelanato é atualmente a cerâmica para revestimentos que apresenta as melhores características técnicas e estéticas se comparadas com as demais encontradas no mercado. A massa cerâmica dos porcelanatos exige uma proporção de feldspato de até 50%. Esta indústria cerâmica gera resíduos, alguns enquadrados na classificação de resíduo sólido IIa (não-inerte), que devem ter um tratamento especial, pois seu armazenamento inadequado pode apresentar sérios riscos à saúde humana e ao meio ambiente, necessitando de tratamento prévio antes de seu descarte.

Na Figura 3.6 observa-se o armazenamento do resíduo RPP em tanques na empresa Tecnogres – Dias D’Ávila/BA.

Figura 3.6 - Tanques com resíduo em forma de lama proveniente do processo de polimento do porcelanato na Tecnogres – Dias D’Ávila/BA



Fonte: Autoria própria.

3.4. PAVIMENTOS

De acordo com Senço (2008), pavimento é uma estrutura construída sobre a terraplenagem, que visa:

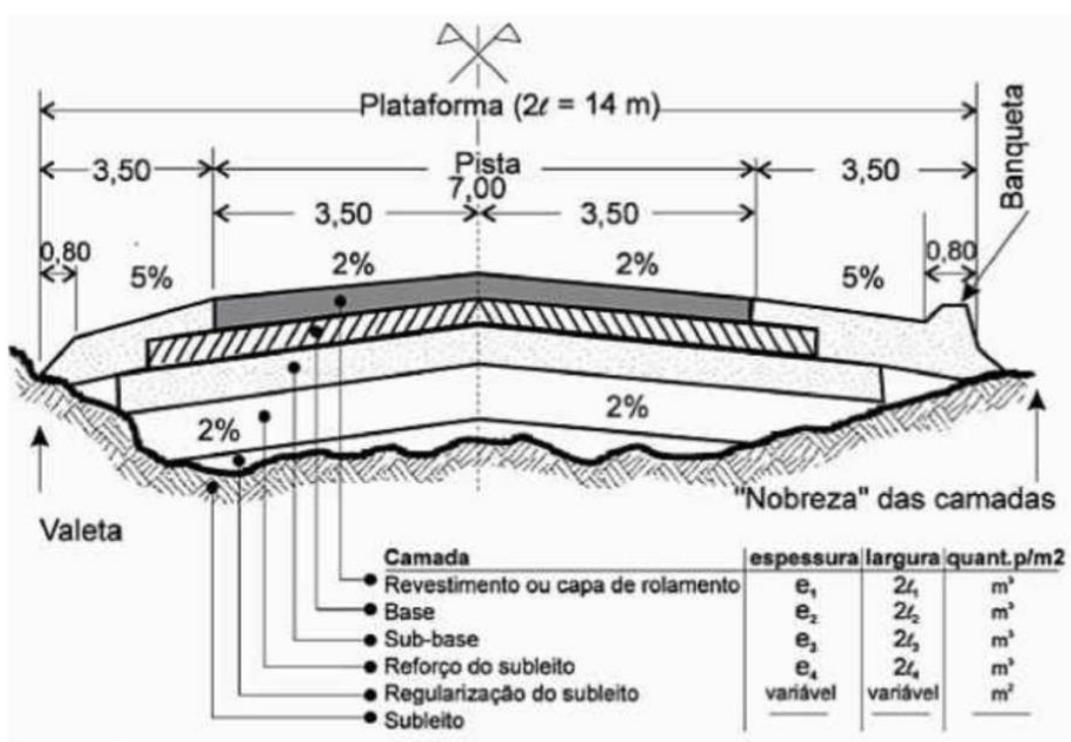
- resistir aos esforços verticais advindos do tráfego;
- resistir aos esforços horizontais, tornando mais durável a superfície de rolamento;
- melhorar as condições de rolamento, no que diz respeito a segurança e conforto.

Considerando-se uma seção transversal básica de um pavimento, de acordo com Senço (2008), é possível enumerar as seguintes camadas, que fazem parte dele:

- Subleito – camada de fundação do pavimento, que pode sofrer intervenções de terraplenagem ou regularização;
- Sub-base – camada complementar à base, quando não for viável construir a base imediatamente sobre o subleito;
- Base – camada que se destina a resistir e distribuir os esforços verticais provenientes do tráfego;
- Revestimento – camada, preferencialmente impermeável, que recebe diretamente a ação do tráfego, e tem como objetivo melhorar as condições de conforto e segurança da superfície de rolamento, sendo chamada também de capa de rolamento. Pode ser feita de concreto betuminoso, concreto de cimento, pavers, pedras naturais, entre outros.

A Figura 3.7 ilustra uma seção transversal de um pavimento flexível, exibindo as suas camadas.

Figura 3.7. Seção transversal típica de um pavimento flexível



Fonte: SENÇO, 2008

3.4.1. Classificação dos pavimentos

Os pavimentos, segundo Senço (2008), classificam-se, de forma geral, em:

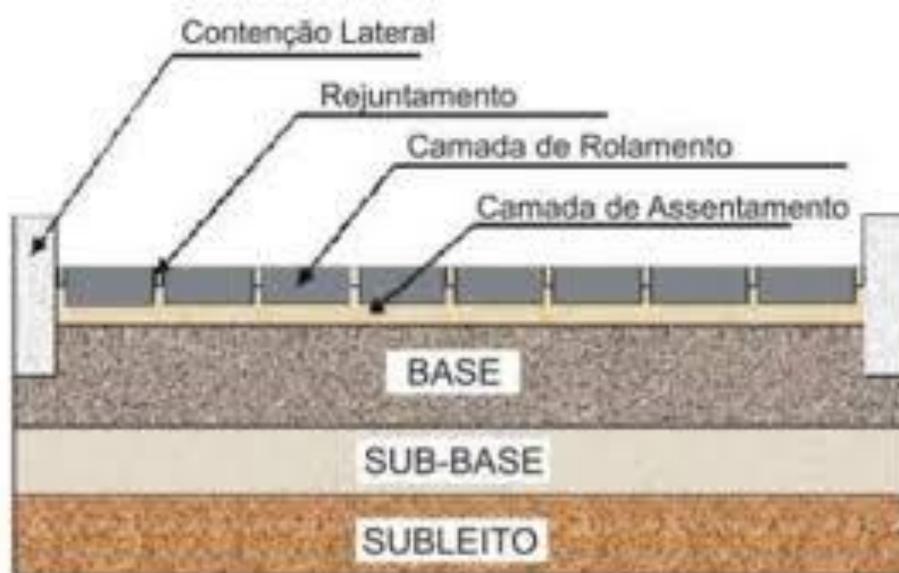
- Rígidos – são pavimentos pouco deformáveis que possuem como revestimento concreto de cimento, possuindo tendência a ruptura por tração ao serem submetidos à deformações;
- Flexíveis – são pavimentos que suportam determinado limite de deformação sem romper, sendo dimensionados para resistir à compressão e à tração na flexão, possuindo como revestimento o concreto betuminoso;
- Semi-rígidos – são pavimentos que possuem como revestimento, solo estabilizado ou tratado, como é possível citar o solo cimento, que é obtido a partir da mistura de solo com calda de cimento, em percentuais definidos, sendo em seguida, uniformizados e compactados.

3.4.2. Pavimentos intertravados

São blocos, também conhecidos como pavers, ou pavimentos drenantes, pelo fato de serem assentados sobre um colchão de areia, e existirem juntas entre eles, o que permite que a água de chuva consiga passar e seja absorvida pelo solo. O termo intertravado se justifica, pelo fato que os blocos precisam ficar confinados e travados por contenções laterais, além do atrito entre as peças. A forma dos blocos tem como função auxiliar no intertravamento entre eles, garantindo que não seja possível a ocorrência de rotação ou deslocamentos verticais e horizontais individuais das peças, em relação às adjacentes. Esse tipo de pavimento vem tendo grande aceitação no mundo, em particular no Brasil com os pavers de concreto, pela sua facilidade de execução e manutenção, além de apresentar-se como um pavimento permeável e possuir resistência mecânica compatível com as mais diversas utilizações. Por ser formado por diversas peças, o pavimento intertravado, é classificado como semi-rígido, estando entre o rígido, feito por placas de concreto de cimento Portland, e o flexível, formado por concreto betuminoso usinado a quente (INTERPAVI, 2024).

Na Figura 3.8 está retratado a seção transversal típica de um pavimento intertravado cerâmico.

Figura 3.8. Seção transversal típica de um pavimento com revestimento em bloco intertravado



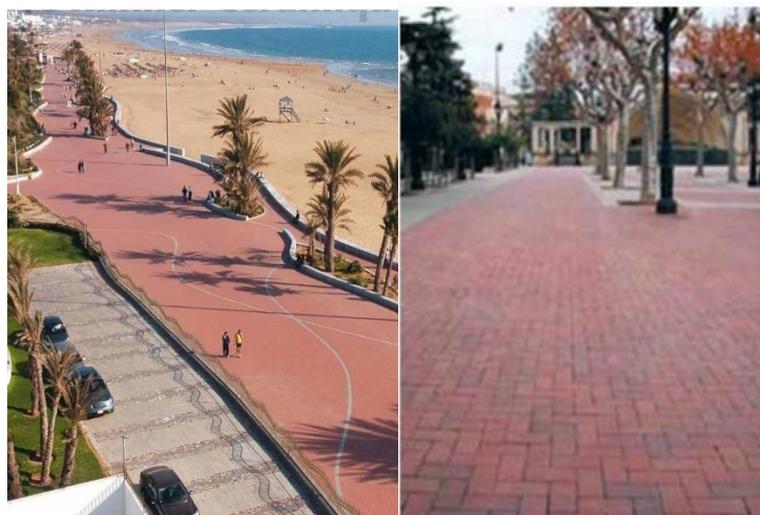
Fonte: MULLER, 2005

3.4.2.1. Bloco intertravado cerâmico

São blocos fabricados com argila plástica, de forma a garantir e facilitar a execução das etapas de conformação e secagem, em um processo de fabricação análogo ao de cerâmica estrutural. O paver cerâmico é de fácil instalação, sendo produzido com formas geométricas que possibilitem o perfeito funcionamento do intertravamento das peças do pavimento e correta distribuição das cargas oriundas do tráfego. As peças podem ser extrudadas ou prensadas, em formato retangular com dimensões de 200x100x50mm e possuindo massa de, aproximadamente, 2,25kg/peça. Na Espanha este produto é sinterizado em temperaturas que variam entre 1100°C e 1200°C, sendo maiores do que as temperaturas usuais de fabricação de cerâmicas vermelhas convencionais, devido às exigências mais elevadas, quanto a resistência mecânica, para os pavers cerâmicos (MALPESA, 2024).

Na Figura 3.9 são mostradas áreas pavimentadas com bloco intertravado cerâmico e a Figura 3.10 apresenta um exemplo de bloco intertravado cerâmico em formato retangular.

Figura 3.9. Pavimentações com bloco intertravado cerâmico em passeios na Espanha



Fonte: MALPESA, 2024

Figura 3.10. Paver cerâmico em formato retangular com dimensões de 200x100x50mm



Fonte: MALPESA, 2024

Os Estados Unidos, Colômbia e Espanha possuem normatização relativa à produção de pavers cerâmicos, através da ASTM, NTC e UNE-EN, respectivamente. No Brasil, pela falta de incentivo e por questões culturais, não existe norma que regulamente a produção de paver cerâmico no Brasil, somente a ABNT NBR 9781/2013: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio, que regulamenta a produção de blocos para pavimentação em concreto.

Com a falta de uma norma nacional, que especifique os critérios técnicos para produção de blocos intertravados cerâmicos, são utilizadas as normas estrangeiras, que não representam as condições ambientais e climáticas do Brasil, sendo necessária a elaboração de normatização brasileira que especifique as propriedades necessárias para a fabricação do paver cerâmico.

Na Tabela 3.2 são apresentados os parâmetros admissíveis para produção de pavers cerâmicos, segundo a norma americana ASTM C902-22.

Tabela 3.2 – Especificações técnicas para produção de pavers cerâmicos, de acordo com a norma americana ASTM C902-22

Tipo de tráfego	Classe	Especificações técnicas (média para 5 unidades)	
		AA (%)	RC (MPa)
Leve	SX	8	55,2
	MX	14	20,7
	NX	sem limite	20,7

AA – Absorção de água; RC – Resistência à compressão

Fonte: Modificado de SANTOS, 2013

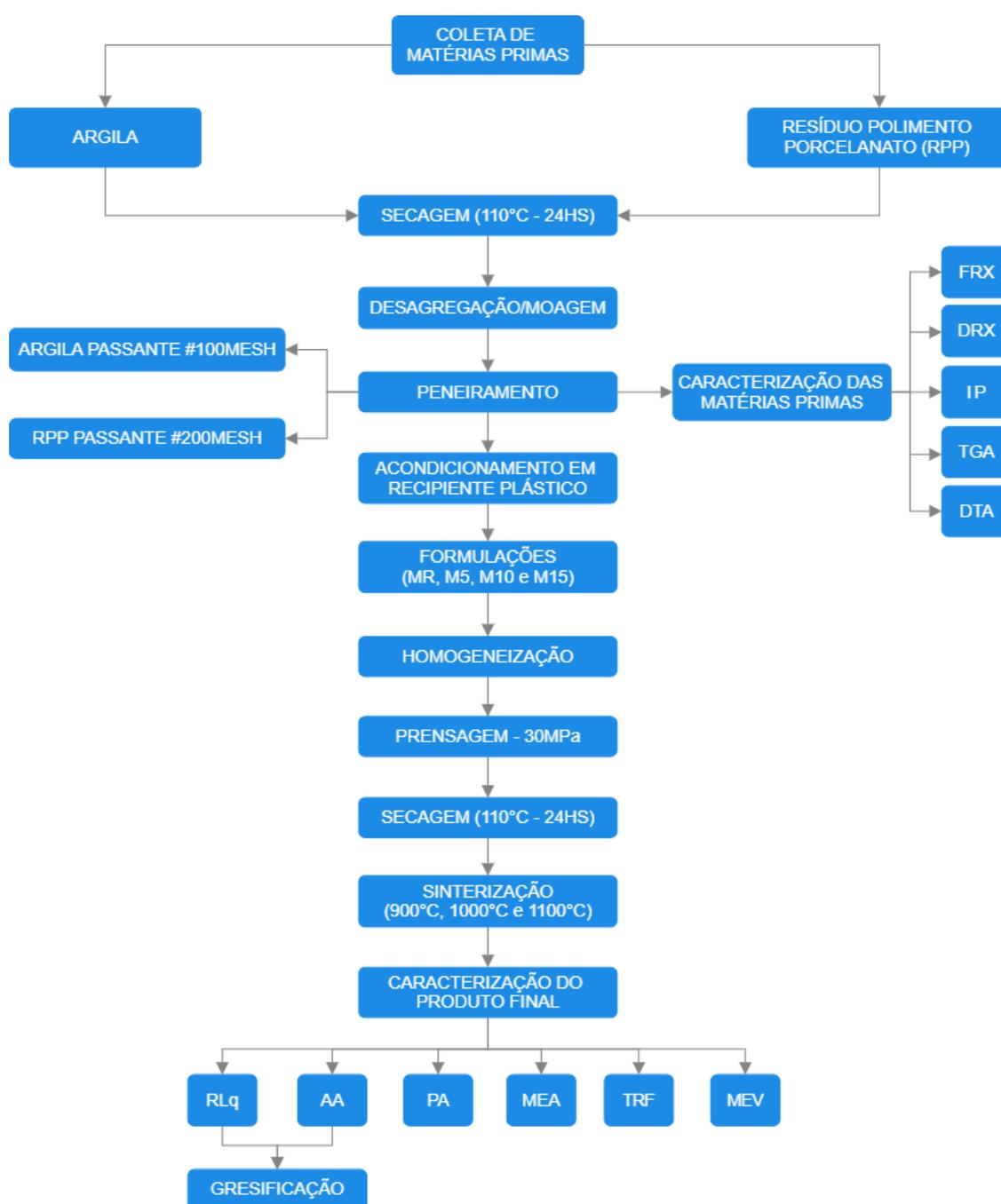
A classe SX refere-se aos pavimentos que são indicados para uso externo e podem ser submetidos a congelamento, a classe MX está relacionada aos pavimentos com indicação de uso externo, onde não sejam expostos ao congelamento e a classe NX diz respeito aos pavimentos indicados para uso interno.

CAPÍTULO 4: MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados, assim como os equipamentos e técnicas de caracterização empregados.

O fluxograma apresentado na Figura 4.1 descreve de forma resumida as etapas da metodologia adotada.

Figura 4.1. Fluxograma experimental utilizado



Fonte: Autoria própria.

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Coleta e preparação

Para o desenvolvimento desta pesquisa, foram utilizados argila e resíduo do polimento do porcelanato (RPP) como matérias primas, sendo coletadas na Região Metropolitana de Salvador/BA (RMS). A amostra de argila foi cedida pela Cerâmica Candeias, uma empresa produtora de blocos cerâmicos de vedação localizada no município de Simões Filho/BA e o resíduo RPP pela empresa Tecnogres, fabricante de revestimentos cerâmicos situada no município de Dias D'Ávila/BA.

Essas amostras foram coletadas em forma de torrões, secas a temperatura ambiente e identificadas, sendo levadas ao Laboratório de Solos, do IFBA – campus Salvador, onde foram submetidas ao processo de secagem em estufa elétrica, da marca Marconi, modelo MA035/1, à temperatura de 110°C pelo período de 24 horas.

Após estarem secas, as amostras foram destorroadas manualmente, com auxílio de almofariz e pistilo de porcelana, no Laboratório de Solos, do IFBA - campus Salvador, sendo a argila posteriormente desagregada em moinho de bolas, da marca Solab, modelo SL-34, durante 8 horas. A amostra de RPP não precisou passar pelo processo de moagem, por se apresentar como um pó bastante fino. Na sequência, as matérias primas passaram pelo peneiramento a seco, usando-se a peneira de 100mesh (abertura de 0,150mm) para a argila e 200mesh (abertura de 0,075mm) para o RPP. A variação na malha utilizada nas peneiras para cada matéria prima, teve como função se obter uma melhor distribuição granulométrica da mistura para maximizar, de forma positiva, o efeito do resíduo na matriz argilosa, melhorando a compactação e, posteriormente a densificação do material.

Com a conclusão da preparação, foram iniciadas as análises para caracterização das matérias primas.

4.2. MÉTODOS

4.2.1. Caracterização das matérias primas

4.2.1.1. Análise química por fluorescência de raios X (FRX)

A caracterização química das amostras, foi determinada através do método semiquantitativo de fluorescência de raios X, por meio de um espectrômetro de energia dispersiva, da marca Bruker, modelo S2 Ranger, do Laboratório de Caracterização de Materiais, do IFBA – campus Salvador, através do qual se obteve os elementos químicos constituintes das matérias primas.

Para a realização desse ensaio, foi necessária a preparação prévia de pastilhas de cada amostra, utilizando-se aproximadamente 10g de cada material em pó, um molde de aço com 38mm de diâmetro e uma prensa hidráulica da marca Somar, com capacidade de 15t, do Laboratório de Moagem de Alta Energia, do IFBA – campus Salvador.

4.2.1.2. Análise mineralógica por difração de raios X (DRX)

A composição mineralógica das amostras, foi obtida através do ensaio de difração de raios X, realizado no difratômetro, marca Shimadzu, modelo XRD 7000, do Laboratório de Caracterização de Materiais, do IFBA – campus Salvador.

Foram utilizados como parâmetros para esta análise, uma tensão de 30KV, uma intensidade de corrente de 20mA, uma faixa de ângulo de varredura de 5° a 80° e uma velocidade de varredura de 2°/min, utilizando-se a radiação do Cu.

Para realizar a análise qualitativa de cada matéria prima e se identificar as fases presentes, foi feita a comparação entre os difratogramas gerados e as cartas padrões do International Center for Diffraction Data (ICDD) utilizando-se o software X'Pert HighScore Plus.

4.2.1.3. Índice de plasticidade (IP)

Foram determinados os índices de plasticidade (IP) das amostras através do método de Atterberg. Neste método, são determinados os limites de liquidez (LL) e plasticidade (LP) através dos procedimentos descritos nas normas NBR 6459/2016: Solo – Determinação do limite de liquidez e NBR 7180/2016: Solo - Determinação do limite de plasticidade,

respectivamente, sendo calculado o índice de plasticidade através da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade, conforme observa-se na Equação 4.1 (CAPUTO; CAPUTO, 2022):

$$IP = LL - LP \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Após a obtenção do valor do IP, a classificação de cada matéria prima quanto a plasticidade, foi determinada através da Tabela 4.1, retirada de Caputo e Caputo (2022).

Tabela 4.1. Classificação das matérias primas quanto a plasticidade

ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)	CLASSIFICAÇÃO
$IP > 15$	ALTAMENTE PLÁSTICA
$7 < IP < 15$	MEDIANAMENTE PLÁSTICA
$1 < IP < 7$	FRACAMENTE PLÁSTICA
$IP = 0$	NÃO PLÁSTICA

Fonte: CAPUTO; CAPUTO, 2022.

4.2.1.4. Análise térmica (TGA e DTA)

Na análise termogravimétrica, são analisadas as variações de massa do material em função do aumento da temperatura, que podem ser positivas, como a oxidação, ou negativas, como perda de água, decomposição de carbonatos etc. (ACCHAR, 2006). Já a análise térmica diferencial avalia as mudanças de fase ocorridas no material durante o aquecimento, comparando-se a variação de temperatura medida na amostra investigada em comparação com um material de referência inerte (ACCHAR, 2006).

Na avaliação térmica das matérias primas, foram realizados os ensaios de análise termogravimétrica (TGA) e térmica diferencial (DTA) simultaneamente, sendo utilizado o equipamento da marca TA Instruments, modelo SDT Q600, do Laboratório de Análise Instrumental, da Universidade de Brasília (UNB) – campus Gama.

Os parâmetros considerados para a realização do ensaio, foram: massa da amostra de aproximadamente 15mg; cadinho de alumina; razão de aquecimento de 10°C/min; fluxo do gás nitrogênio de 50mL/min; faixa de temperatura, partindo da temperatura ambiente até 1100°C, pelo fato de ser o limite máximo do equipamento.

4.2.2. Preparação das formulações das massas cerâmicas

As formulações foram desenvolvidas através da variação da incorporação do percentual do resíduo RPP na matriz de argila, sendo considerada a massa padrão de referência (MR) como aquela que não possui incorporação de resíduo. Desta forma, foram definidas as proporções de percentual em massa de 0%, 5%, 10% e 15%, identificados como MR, M5, M10 e M15, respectivamente, fabricando-se 15 corpos de prova para cada formulação, que foram distribuídos entre as temperaturas de queima de 900°C, 1000°C e 1100°C, totalizando 60 corpos de prova, conforme observa-se na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Formulações dos corpos de prova

Formulação	Argila (%)	RPP (%)	Temperatura Queima (°C)	Quantidade CP's
MR	100	0	900	5
			1000	5
			1100	5
M5	95	5	900	5
			1000	5
			1100	5
M10	90	10	900	5
			1000	5
			1100	5
M15	85	15	900	5
			1000	5
			1100	5
Total				60

Fonte: Autoria própria.

A fase de preparação das formulações foi desenvolvida através das atividades de dosagem, mistura, homogeneização e armazenamento. Foram dosadas as matérias primas secas, nas proporções em massa definidas, com a utilização de balança digital da marca Shimadzu, modelo AUY220, com precisão de 0,0001g, do laboratório de Química, do IFBA – campus Salvador, sendo posteriormente pré-misturadas em recipiente plástico, e em seguida homogeneizados em moinho planetário da marca Yangzhou Nuoya Machinery, modelo NQM-2, do Laboratório de Moagem de Alta Energia, do IFBA – campus Salvador, durante 30 minutos. Em seguida, cada mistura recebeu a adição de 8% de água destilada, foi acondicionada em um saco plástico hermeticamente vedado, sendo desaglomerada manualmente, ainda dentro

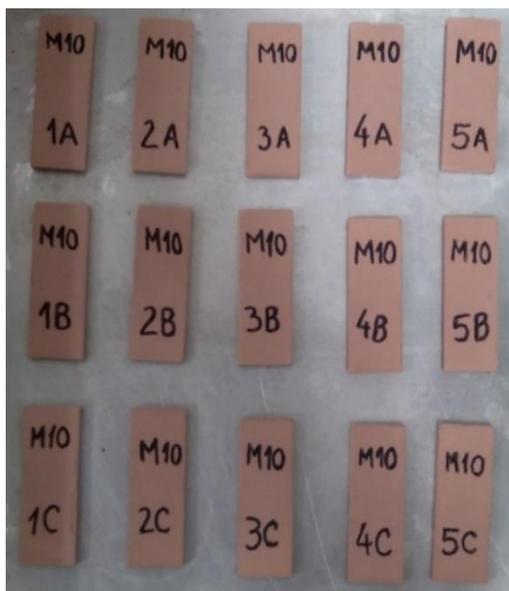
do saco, e depois armazenada em repouso pelo período de 24 horas, para garantir que a umidade fosse distribuída igualmente por todo o material. Este processo de umidificação funciona como lubrificante para auxiliar na organização das partículas durante a compactação e melhorar a resistência a verde dos corpos de prova, e o percentual adotado, seguiu os estudos realizados e a curva de umidade ótima definida por Santos (2013).

4.2.3. Confecção dos corpos de prova

A produção dos corpos de prova foi realizada utilizando-se uma matriz de aço SAE 1045 com cavidade retangular de dimensões 60 x 20 x 5mm e uma prensa hidráulica da marca Somar, com capacidade de 15t, do Laboratório de Moagem de Alta Energia, do IFBA – campus Salvador. Para a moldagem de cada corpo de prova, foi utilizado 13g do material previamente formulado e realizada a prensagem uniaxial com aplicação de uma carga de 3,6t, durante um intervalo de 1 minuto, resultando numa pressão de compactação de 30MPa, em conformidade com a pressão associada ao ponto de densidade máxima da curva de compactação desenvolvida em estudo feito por Santos (2013), e dentro da faixa estipulada por Santos (1989), para realização de ensaios cerâmicos.

Após a conformação, os corpos foram identificados de acordo com a formulação e a temperatura de queima a que seriam submetidos, conforme exemplo mostrado na Figura 4.2, e colocados em estufa para secar a uma temperatura de 110°C durante 24 horas. Em seguida foi efetuada a pesagem na mesma balança digital anteriormente citada e determinadas as dimensões lineares (comprimento, largura e espessura) das peças a verde com a utilização de um paquímetro digital da marca Mitutoyo, com precisão de 0,01mm, do Laboratório de Metrologia, do IFBA – campus Salvador.

Figura 4.2. Identificação dos corpos de prova – A=900°C, B=1000°C e C=1100°C



Fonte: Autoria própria.

4.2.4. Sinterização dos corpos de prova

Na etapa de sinterização dos corpos de prova foi utilizado um forno elétrico programável da marca Magnus, com capacidade de aquecimento de 1200°C, equipado com controlador eletrônico da marca Novus, modelo N480D. Para todas as temperaturas de sinterização foram adotados os mesmos parâmetros de queima, conforme descrito nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5: taxa de aquecimento de 5°C/min, com permanência de 30 minutos nos patamares em 450°C e na temperatura máxima, e resfriamento natural, permanecendo dentro do forno, até atingir a temperatura ambiente. Estes parâmetros foram baseados em estudo realizado por Santos (2013), através da análise do ciclo de queima. Na Figura 4.3 é possível observar a colocação dos corpos de prova no forno para a realização da queima e a Figura 4.4 ilustra o ciclo de queima.

Figura 4.3. Corpos de prova colocados no forno para sinterização

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.3. Parâmetros de queima das amostras a 900°C

Temperatura	Taxa de aquecim.	Duração
0 a 450°C	5°C/min	90min
450°C	Patamar	30min
450 a 900°C	5°C/min	90min
900°C	Patamar	30min
Total		240min

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.4. Parâmetros de queima das amostras a 1000°C

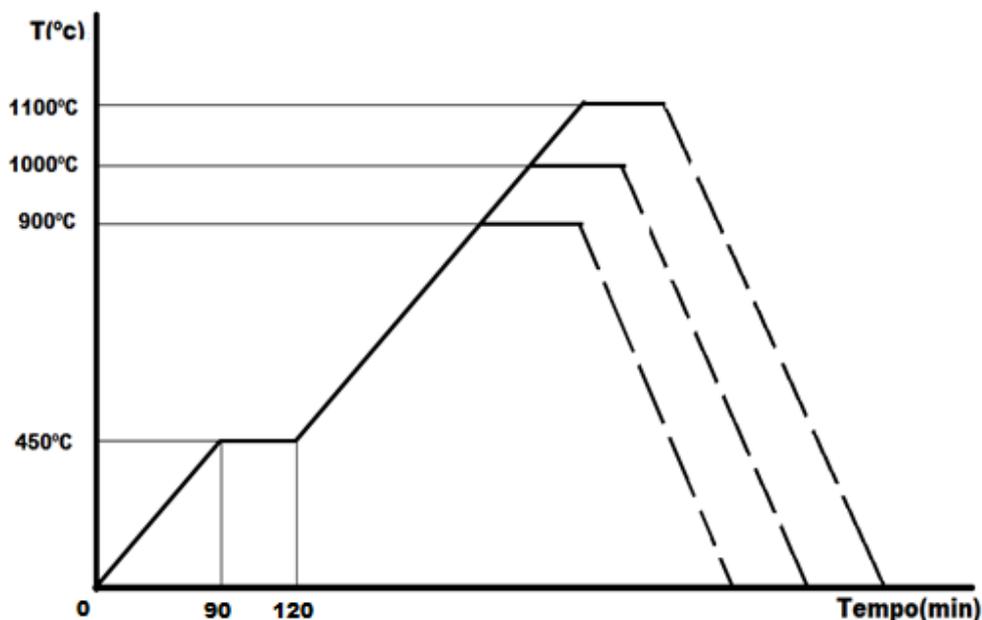
Temperatura	Taxa de aquecim.	Duração
0 a 450°C	5°C/min	90min
450°C	Patamar	30min
450 a 1000°C	5°C/min	110min
1000°C	Patamar	30min
Total		260min

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4.5. Parâmetros de queima das amostras a 1100°C

Temperatura	Taxa de aquecim.	Duração
0 a 450°C	5°C/min	90min
450°C	Patamar	30min
450 a 1100°C	5°C/min	130min
1100°C	Patamar	30min
Total		280min

Fonte: Autoria própria.

Figura 4.4. Ciclo de queima dos corpos de prova

Fonte: Autoria própria.

4.2.5. Caracterização do produto final

Para avaliação das propriedades físicas e mecânicas do produto sinterizado, foram realizados os ensaios de retração linear de queima (RLq), absorção de água (AA), porosidade aparente (PA), massa específica aparente (MEA) e resistência mecânica por tensão de ruptura à flexão (TRF). Além disso, foi feita a análise microestrutural dos corpos de prova após queima, por microscopia eletrônica de varredura (MEV) da região da fratura.

4.2.5.1. Retração linear de queima (RLq)

A retração é um fenômeno ocasionado pela aproximação das partículas através da ação das forças eletrostáticas, nos vazios deixados pela evaporação da água nos corpos feitos de argila, sendo uma importante propriedade a ser investigada na indústria cerâmica, a fim de evitar fissuras na etapa de secagem das peças sinterizadas.

Para determinação da retração linear, foram realizadas medições dos comprimentos dos corpos de prova a verde (após secagem em estufa por 24 horas) e após a queima, utilizando-se paquímetro digital da marca Mitutoyo, com precisão de 0,01mm, já citado anteriormente. Os valores de RLq foram calculados através da Equação 4.2 (SANTOS, 1989). Obtendo-se resultado positivo na equação, significa que houve retração, porém em caso negativo, houve expansão.

$$RLq (\%) = \frac{(Ls-Lq)}{Lq} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.2})$$

Em que, RLq é a retração linear de queima, dada em porcentagem, Ls é o comprimento do corpo de prova a verde e seco em estufa, em mm e Lq é o comprimento do corpo de prova após queima, em mm.

No cálculo da retração linear de queima, foi feita a média aritmética dos valores encontrados para os 5 corpos de prova de cada formulação, para cada temperatura de queima.

4.2.5.2. Absorção de água (AA)

Esta propriedade está relacionada a quantidade de água, em porcentagem, que os corpos sinterizados absorvem após o processo de queima.

Neste ensaio, os corpos de prova sinterizados foram secos em estufa a 110°C por 24 horas, sendo pesados em seguida, com a utilização de uma balança digital da marca Shimadzu, modelo AUY220, com precisão de 0,0001g, obtendo-se a massa do corpo de prova seco, após queima, e na sequência, os corpos de prova foram imersos em água destilada por 24 horas. Após o período de imersão, foi retirado o excesso de água superficial dos corpos de prova por meio de papel toalha umedecido, e pesados novamente, para obtenção da massa saturada. Os valores de absorção de água foram calculados pela Equação 4.3.

$$AA (\%) = \frac{(Mu - Mq)}{Mq} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.3})$$

Em que AA é a absorção de água, em porcentagem, Mu é a massa do corpo de prova saturado, em gramas e Mq é a massa do corpo de prova seco após queima, em gramas.

No cálculo da absorção de água, foi feita a média aritmética dos valores encontrados para os 5 corpos de prova de cada formulação, para cada temperatura de queima.

4.2.5.3. Porosidade aparente (PA)

A porosidade aparente tem como significado a razão entre o volume de poros abertos do corpo de prova e o seu volume total, indicando o grau de sinterização do produto.

O procedimento adotado consistiu na imersão dos corpos de prova sinterizados em água destilada por 24 horas, após serem pesados secos em estufa, sendo realizado simultaneamente ao ensaio de absorção de água. Então, após o período de imersão, além de determinar a massa saturada, os corpos de prova ainda úmidos também foram pesados imersos em água, através do método da balança hidrostática ou método de Arquimedes, com a utilização de uma balança digital da marca Shimadzu, modelo AUY220, com precisão de 0,0001g. Para o cálculo dos valores de porosidade aparente empregou-se a Equação 4.4.

$$PA (\%) = \frac{(Mu - Mq)}{(Mu - Mi)} \times 100 \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Em que PA é a porosidade aparente, em porcentagem, Mu é a massa do corpo de prova saturado, em gramas, Mq é a massa do corpo de prova seco após queima, em gramas e Mi é a massa do corpo de prova imerso em água, em gramas.

4.2.5.4. Massa Específica Aparente (MEA)

Esta característica reflete qual volume uma determinada massa de sólido ocupa, incluídos seus vazios e partículas que o compõem. É dada pela razão entre a massa do corpo de prova após queima, em gramas, e o seu volume aparente total, em cm³, podendo ser também determinada pela razão entre os valores da porosidade aparente e da absorção de água do corpo.

O método e as medidas efetuadas foram os mesmos utilizados para os ensaios de porosidade aparente e absorção de água, sendo a MEA determinada a partir da Equação 4.5.

$$MEA (g/cm^3) = \frac{PA}{AA} = \frac{Mq}{(Mu - Mi)} \quad (\text{Eq. 4.5})$$

Em que MEA é a massa específica aparente, dada em g/cm³, PA é a porosidade aparente e AA é a absorção de água, ambas em porcentagem, Mu é a massa do corpo de prova saturado, em gramas, Mq é a massa do corpo de prova seco após queima, em gramas, e Mi é a massa do corpo de prova imerso em água, em gramas.

4.2.5.5. Tensão de ruptura à flexão (TRF)

A resistência mecânica é uma importante propriedade a ser medida nas cerâmicas, principalmente aquelas para uso na construção civil, pois na fabricação de revestimentos, blocos de vedação ou estruturais e pavimentos em blocos intertravados cerâmicos, é necessário que estes elementos suportem as cargas a que serão submetidos durante a sua utilização.

Desta forma, a tensão de ruptura à flexão foi determinada pelo ensaio de flexão em três pontos, em que se aumentou uniformemente o valor da carga aplicada até causar a ruptura nos corpos de prova sinterizados.

A resistência mecânica dos corpos de prova foi determinada através da Equação 4.6 (NBR ISO 10545-4/20).

$$TRF (MPa) = \frac{3F \times L}{2b \times h^2} \quad (\text{Eq. 4.6})$$

Em que TRF é a tensão de ruptura à flexão, dada em MPa, F é a carga aplicada, em N, L é a distância entre os apoios, em mm, b é a largura do corpo de prova, em mm, e h é a espessura do corpo de prova, em mm.

O equipamento utilizado no ensaio de flexão em três pontos foi uma máquina de ensaios universal, marca EMIC, modelo 23-20, com célula de carga de 2,5KN, acoplada a um computador, do Laboratório de Caracterização de Materiais, do IFBA - campus Salvador. Foram adotados os parâmetros indicados pela NBR ISO 10545-4/20, como velocidade de aplicação de carga de 0,5mm/min e 50mm de distância entre os apoios.

4.2.5.6. Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Após a realização do ensaio de flexão, foram selecionadas as amostras da área de fratura, com o objetivo de observar as mudanças microestruturais ocorridas nos corpos de prova após sinterização. Com esse intuito, foram confeccionadas amostras menores da região de fratura, cortando-as com uso de lâmina de serra, em seguida sendo feito ataque químico em solução de ácido fluorídrico a 2% por 8 (oito) minutos e secagem em estufa a 130°C por 24 horas.

Para realização do ensaio, as amostras foram metalizadas com ouro em um metalizador da marca QUORUM, modelo Q150R ES, conforme Figura 4.5, sendo analisadas em um microscópio da marca TESCAN, modelo Vega 3LMU, do laboratório de Caracterização de Materiais, do IFBA - campus Salvador, conforme Figura 4.6.

Figura 4.5. Amostras no metalizador



Fonte: Autoria própria.

Figura 4.6. Microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Autoria própria.

CAPÍTULO 5: RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

A seguir, são apresentados os resultados dos ensaios de análise química, mineralógica e térmica, para caracterização das matérias primas.

5.1.1. Análise química por FRX

Os resultados de análise química das amostras, encontram-se na Tabela 5.1, onde observa-se uma grande concentração de óxido de silício, também chamado de sílica (SiO_2) e de óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3) nos materiais ensaiados, seja a argila ou o RPP, possuindo este último, alguns percentuais significativos de óxido de cálcio (CaO) e óxido de zinco (ZnO), se comparado com a argila.

A argila apresentou o maior teor do fundente óxido de ferro (Fe_2O_3), sendo 9,88%, o que somado aos demais fundentes (MgO e K_2O), perfaz um total de 12,99%. Já o RPP, apresentou um percentual baixo de óxido de ferro (Fe_2O_3), de 1,66%, porém as maiores concentrações de MgO , K_2O e CaO , que somados atingem um valor de 15,96%. Os metais alcalinos, como o óxido de potássio e os metais alcalinos-terrosos, no caso CaO e MgO , tem efeito fundente abaixo de 1100°C , promovendo a formação de fase líquida durante a sinterização. Estas concentrações devem contribuir na mistura para reduzir a temperatura de queima, bem como diminuir a absorção de água e a porosidade aparente das peças sinterizadas, elevando sua resistência mecânica.

O percentual elevado de óxido de ferro na argila (9,88%) juntamente com o óxido de titânio (1,36%), conferem a coloração avermelhada às peças cerâmicas sinterizadas, tendo variação de tonalidade com o percentual de resíduo incorporado, o que garante um efeito estético natural às peças produzidas.

A alta concentração de sílica e alumina com baixos teores de óxido de ferro, na composição química do resíduo do polimento do porcelanato, confirma que ele advém de uma argila utilizada na fabricação de porcelanato e a ocorrência do óxido metálico de zinco (ZnO) se deve ao processo de polimento em que são utilizados abrasivos.

Tabela 5.1. Composição química das matérias primas

Óxidos presentes	Concentração em massa (%)	
	Argila	RPP
SiO ₂	57,71	66,49
Al ₂ O ₃	27,37	10,17
Fe ₂ O ₃	9,88	1,66
K ₂ O	1,61	2,59
TiO ₂	1,36	0,42
MgO	1,50	1,80
CaO	-	9,91
SO ₃	0,15	0,08
ZrO ₂	0,05	0,12
ZnO	-	6,33
P ₂ O ₅	0,07	0,06
BaO	0,05	0,06
PF (Perda ao Fogo)	0,25	0,31

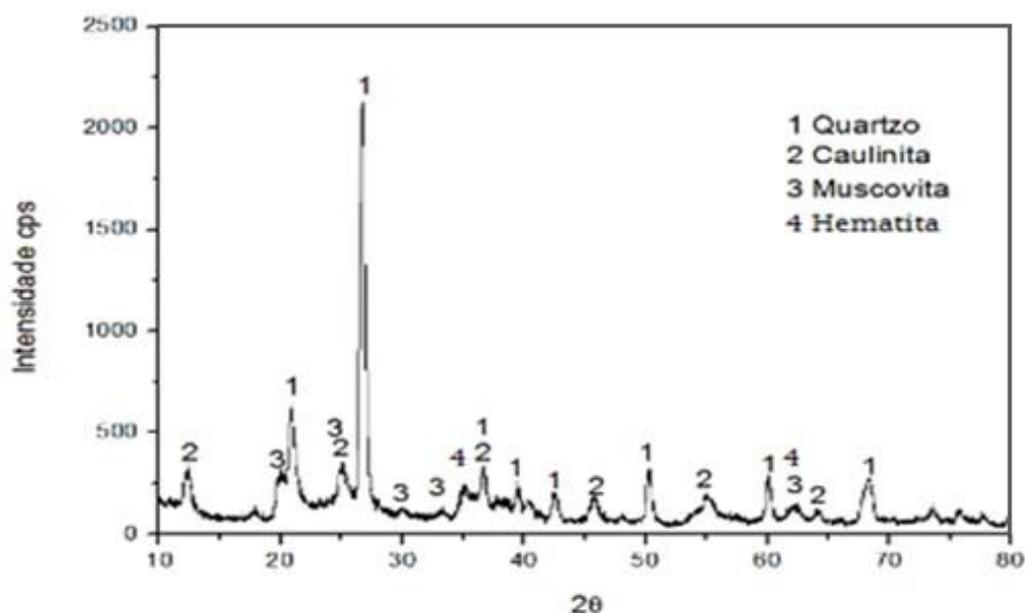
Fonte: Autoria própria.

5.1.2. Análise mineralógica por DRX

Os minerais contidos nas matérias primas utilizadas, foram identificados através da comparação dos difratogramas de raios X, obtidos no ensaio, com as cartas padrões cadastradas no International Center for Diffraction Data (ICDD).

Na análise mineralógica por difração de raios X da argila, Figura 5.1, pode-se observar a presença dos picos característicos de quartzo [SiO_2], que se justifica pela presença da sílica em forma de quartzo, com alta cristalinidade, seguido da Caulinita [$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], face a maior concentração de Al_2O_3 na análise química, característica de uma argila caulínica, e Muscovita [$\text{KMgAlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$] e Hematita [Fe_2O_3], justificadas pela presença dos óxidos de potássio, magnésio e ferro, respectivamente.

Figura 5.1. Difratograma de raios X da argila



Fonte: Autoria própria.

O DRX do resíduo do polimento do porcelanato, conforme ilustrado na Figura 5.2, mostra que as fases predominantes são sílica em forma de quartzo. A formação de fases vítreas ricas em sílica gera uma viscosidade mais elevada, o que provavelmente favorecerá a trabalhabilidade e a resistência final da peça sinterizada.

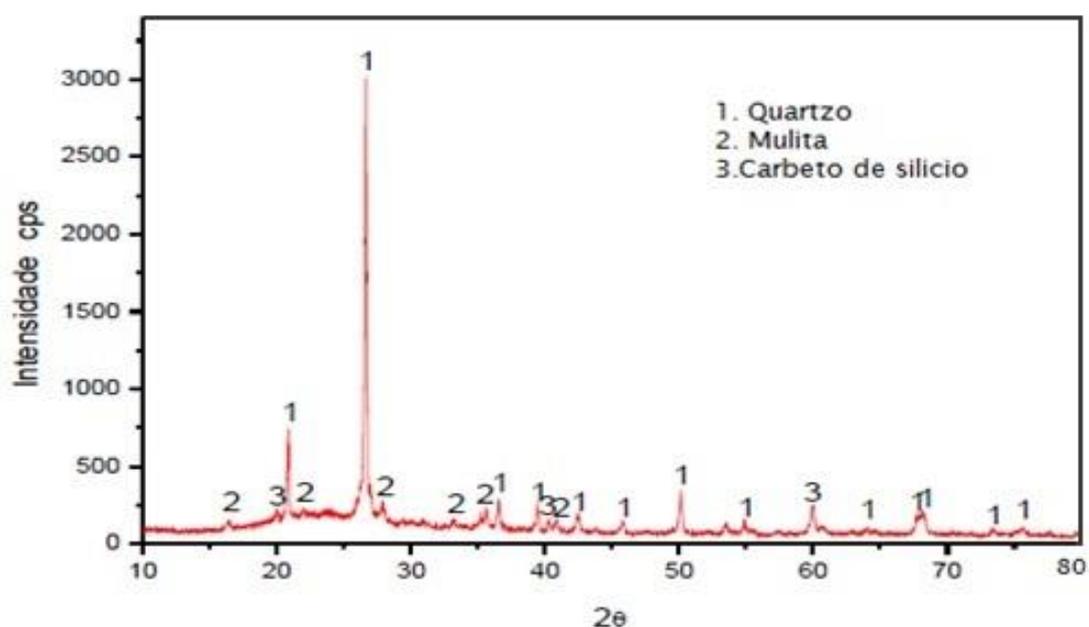
A presença de quartzo (SiO_2) em quantidades ideais e finamente divididas contribui para o aumento da resistência mecânica do produto, pois com o CaO forma o silicato de cálcio. Em

excesso a SiO_2 reduz muito a trabalhabilidade, a plasticidade e a resistência da massa (SANTOS, 2013).

A mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{Si}_2\text{O}_2$) é um elemento com excelentes propriedades térmicas e mecânicas. Sua formação ocorre quando a sílica e a alumina se combinam formando silicato de alumínio, o que acontece através de condições muito extremas de pressão e temperatura, como no processo de fabricação de porcelanato, sendo, por esse motivo, raro encontrá-la na natureza.

O carbeto de silício (SiC) é proveniente do material abrasivo liberado no processo de polimento do porcelanato.

Figura 5.2. Difratoograma de raios X do RPP



Fonte: Autoria própria.

5.1.3. Índice de plasticidade (IP)

Na Tabela 5.2 estão registrados os limites de consistência de Atterberg (limite de liquidez - LL, limite de plasticidade - LP e índice de plasticidade - IP), obtidos para as matérias primas, e de acordo com a classificação de Caputo e Caputo (2022), a argila foi classificada como altamente plástica, pois apresentou um $\text{IP}=21$, e o resíduo do polimento do porcelanato como não plástica, pois apresentou um $\text{IP}=0$.

Tabela 5.2. Limites de consistência das matérias primas

Matéria Prima	LL (%)	LP (%)	IP (%)	CLASSIFICAÇÃO
Argila	44	23	21	ALTAMENTE PLÁSTICA
RPP	1	1	0	NÃO PLÁSTICO

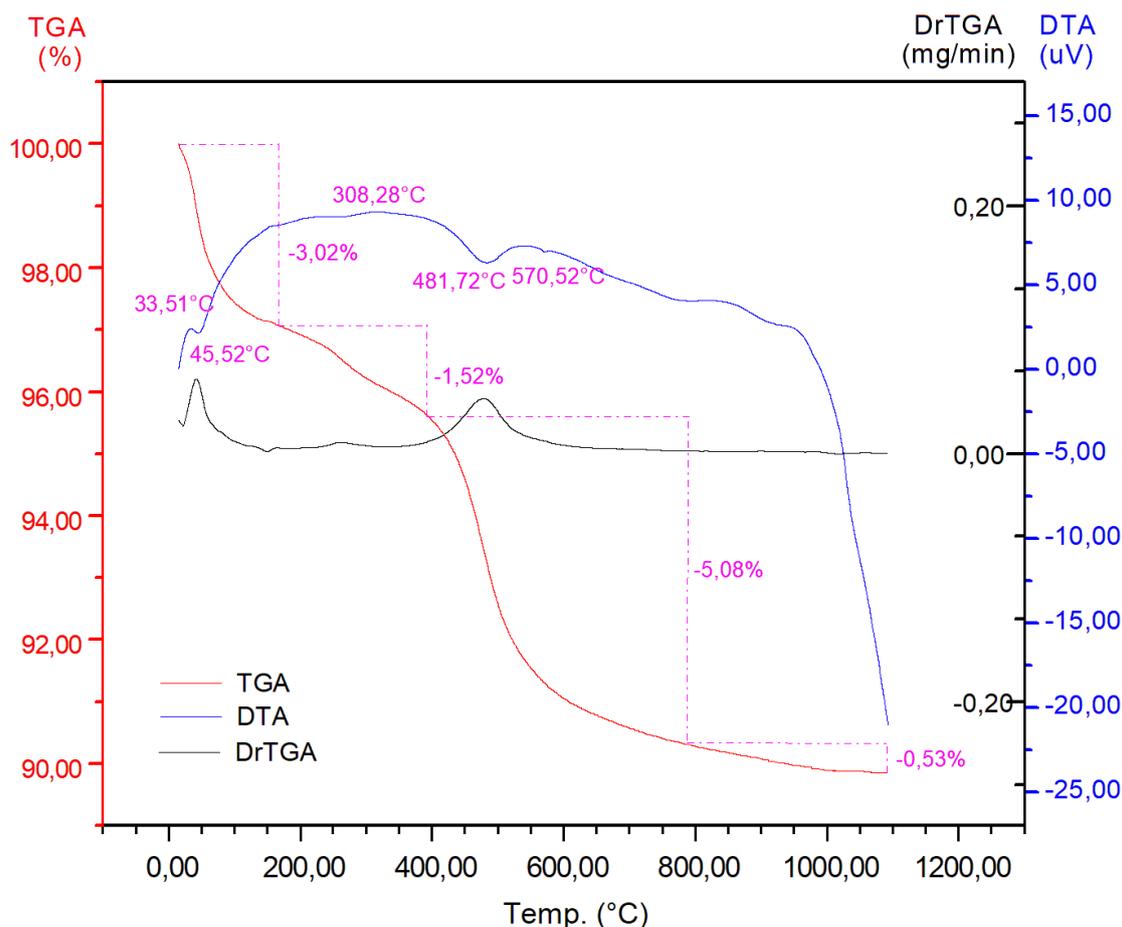
Fonte: Autoria própria.

O resíduo, por ser um material já sinterizado e com absorção mínima de água pelos grãos, diferentemente da argila, não possui plasticidade, conferindo a mistura uma melhor estabilidade dimensional durante a secagem e sinterização, evitando fissuras por retração.

5.1.4. Análise térmica por TGA e DTA

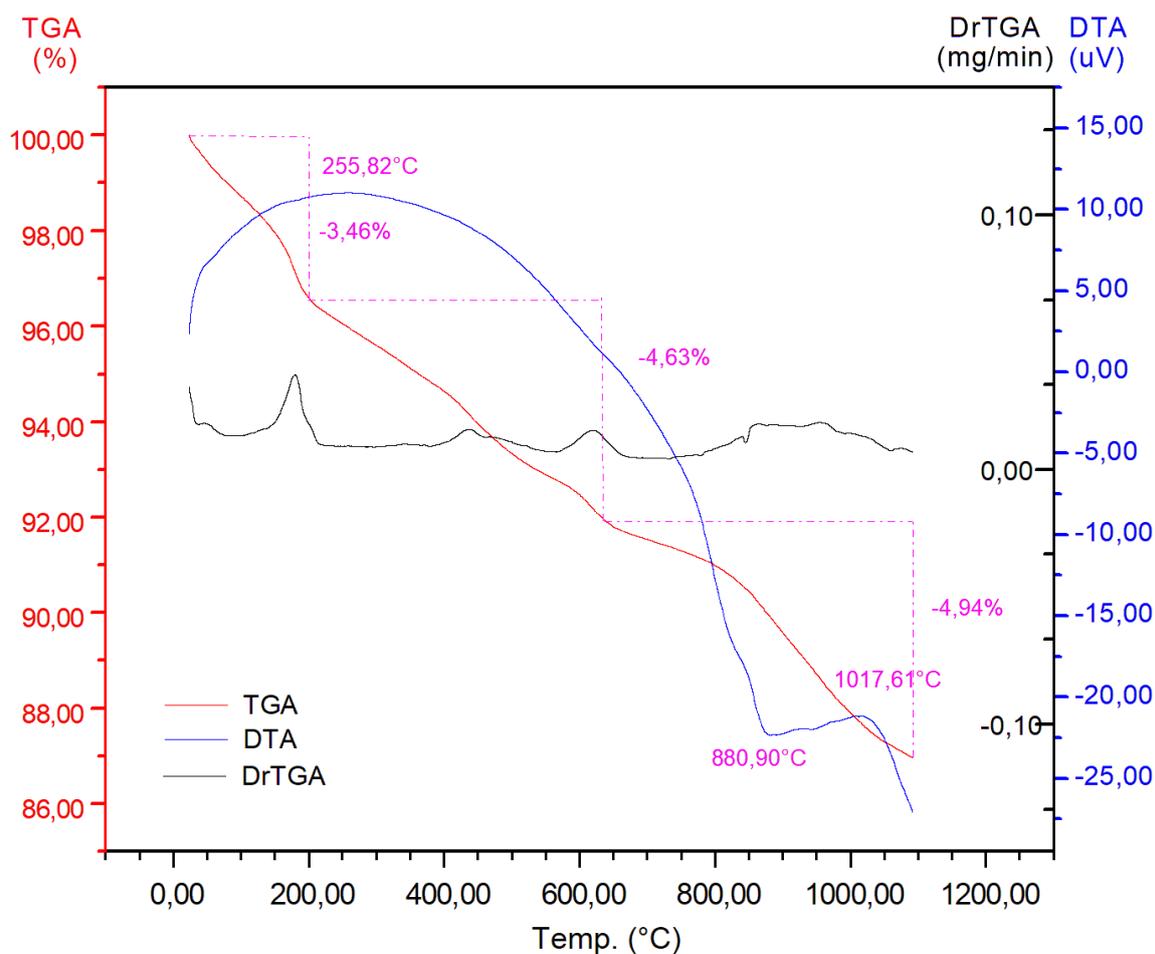
Na análise térmica, foi avaliado o comportamento das amostras durante o aquecimento, através do ensaio termogravimétrico e termodiferencial, sendo obtidas as curvas de TGA e DTA das matérias primas, que foram montadas em um mesmo gráfico.

A partir da análise do gráfico contendo as curvas de TGA e DTA da argila, mostrado na Figura 5.3, observa-se uma perda de massa total de 10,15% entre 20°C e 1100°C, sendo a perda de massa inicial de 3,02%, entre 20°C e 180°C, referente a evaporação de água adsorvida, com pico endotérmico em 45,52°C. Entre as temperaturas de 180°C e 400°C observou-se uma perda de 1,52%, correspondente à queima de matéria orgânica, apresentando pico exotérmico em aproximadamente 308,28°C. Em seguida, obteve-se a maior perda de massa, de 5,08% entre 400°C e 800°C, tendo pico endotérmico em 481,72°C, que pode ser explicado pela transformação da caulinita em metacaulinita, durante o processo de desidroxilação, com a perda de água estrutural. Ainda nesta mesma faixa de temperaturas, observa-se um pico endotérmico discreto em 570,52°C, indicando a transformação alotrópica do quartzo alfa em quartzo beta. Com a continuação do aquecimento, entre 800°C e 1100°C, observa-se uma redução na taxa de perda de massa, encontrando-se 0,53%, devido à perda de estrutura cristalina, pela transformação de metacaulinita em espinélio Si-Al.

Figura 5.3. Análise térmica TGA e DTA da argila

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.4 encontram-se as curvas termogravimétrica e térmica diferencial do resíduo do polimento do porcelanato, em que se pode observar uma perda de massa inicial, entre as temperaturas de 20°C e 180°C de 3,46%, correspondendo a perda de água de hidratação. Entre 180°C e 650°C, ocorre uma perda de 4,63%, devido a eliminação de hidroxilas (OH), através do processo de desidroxilação, com a transformação de caulinita em metacaulinita. Na faixa de temperatura entre 650°C e 1100°C, observa-se uma perda de massa de 4,94%, com um pico endotérmico em 880,90°C, que possivelmente está relacionado ao início da decomposição do carbeto de silício (SiC), que em contato com o oxigênio (O₂) forma sílica (SiO₂) e dióxido de carbono (CO₂) (CAETANO *et al.*, 2021). Neste mesmo intervalo de temperaturas, encontra-se um pico exotérmico em 1017,61°C, que possivelmente se deve a formação da fase mulita mais cristobalita. A perda de massa obtida durante todo o intervalo de aquecimento, de 20°C a 1100°C, foi de 13,03%.

Figura 5.4. Análise térmica TGA e DTA do RPP

Fonte: Autoria própria.

5.2. CARACTERIZAÇÃO DO PRODUTO FINAL

5.2.1. Retração linear de queima

Os resultados da retração linear de queima dos corpos de prova para cada formulação, por temperatura de sinterização, estão apresentados na Tabela 5.3, com seus respectivos desvios padrões.

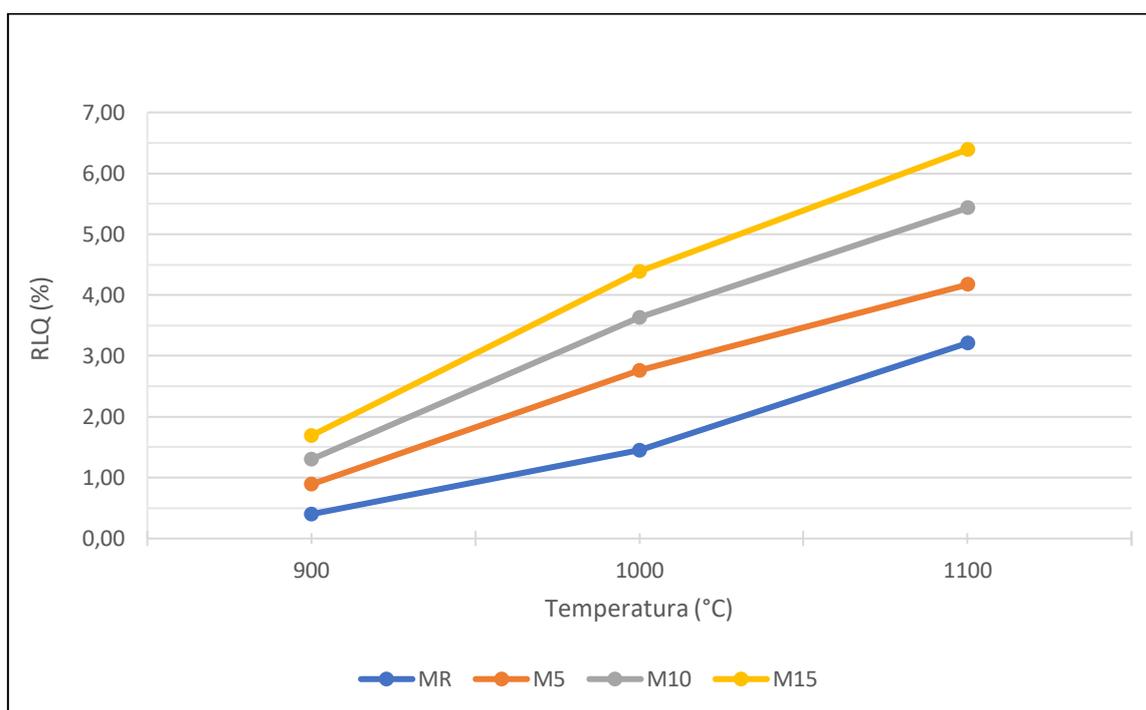
Pode-se observar que nenhuma formulação apresentou retração linear acima de 2% para a temperatura de queima de 900°C, mas que na temperatura de 1100°C, todas as formulações apresentaram valores elevados, tendo valor mínimo acima de 3% e chegando a ultrapassar a marca de 6%.

Tabela 5.3. Resultados da retração linear de queima das formulações

Formulações	Temperatura de Queima (°C)		
	900	1000	1100
MR	0,40 ± 0,033	1,45 ± 0,244	3,21 ± 0,222
M5	0,89 ± 0,086	2,76 ± 0,185	4,17 ± 0,131
M10	1,30 ± 0,121	3,63 ± 0,217	5,43 ± 0,175
M15	1,69 ± 0,207	4,39 ± 0,370	6,39 ± 0,202

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.5 pode-se observar o gráfico com os valores médios de retração linear para cada formulação por temperatura de queima, contidos na tabela 5.3, a fim de permitir a comparação entre elas.

Figura 5.5. Gráfico da retração linear de queima das formulações

Fonte: Autoria própria.

Observa-se que houve um aumento dos valores de retração linear de queima diretamente proporcional ao aumento do percentual de resíduo incorporado e a temperatura de queima, em que MR atingiu apenas 0,40% para 900°C, enquanto M15 alcançou 6,39% para 1100°C. Isto

pode ser explicado pelo fato do resíduo possuir uma quantidade significativa de fundentes na sua composição, que com o aumento da temperatura de sinterização, tendem a densificar cada vez mais os corpos de prova cerâmicos, reduzindo os vazios deixados pela evaporação da água de formação, aproximando as partículas e causando um aumento da variação dimensional das peças. Segundo BIFFI (2002), o RLq máximo aceitável para produção de cerâmicas é de 9%, constatando-se que todas as formulações em todas as temperaturas de queima atendem a essa exigência.

5.2.2. Absorção de água

Os resultados do ensaio de absorção de água dos corpos de prova sinterizados estão apresentados na Tabela 5.4, para cada formulação por temperatura de queima.

Tabela 5.4. Resultados da absorção de água das formulações

Formulações \ AA (%)	Temperatura de Queima (°C)		
	900	1000	1100
MR	14,22 ± 0,062	12,54 ± 0,274	9,64 ± 0,597
M5	12,06 ± 0,235	9,57 ± 0,217	7,47 ± 0,374
M10	10,04 ± 0,181	8,13 ± 0,221	4,59 ± 0,241
M15	9,61 ± 0,168	7,36 ± 0,518	3,25 ± 0,223

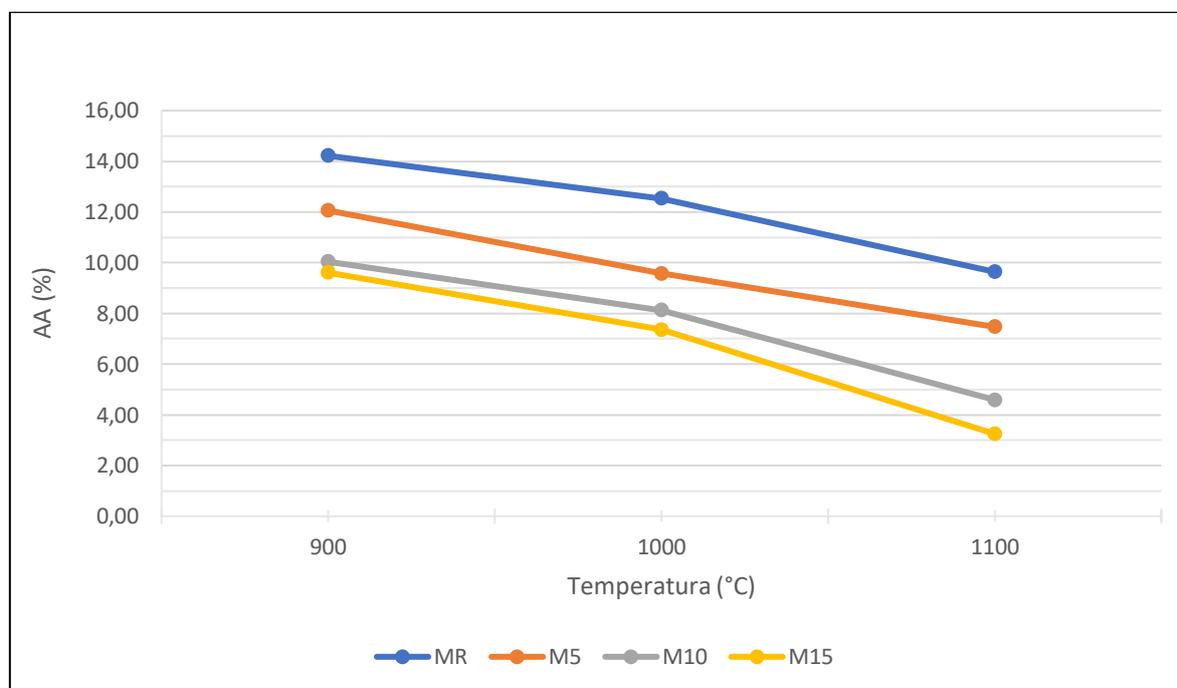
Fonte: Autoria própria.

Nota-se que os corpos de prova que apresentaram maior absorção de água, foram os que tiveram menor retração linear, comprovando a relação inversamente proporcional entre estas duas características.

Através da análise do gráfico com os valores médios de AA, que é apresentado na Figura 5.6, é possível confirmar que quanto maior a porcentagem de resíduo de porcelanato incorporado na argila e maior temperatura de queima, menor a taxa de absorção de água, como observa-se para as formulações M10 e M15 para a temperatura de 1100°C, com valores de absorção de 4,59% e 3,25%, respectivamente. Isto se deve ao fato de o resíduo ter auxiliado na densificação dos corpos de prova, com redução do percentual de vazios e, conseqüentemente, menor absorção de água, atuando como um corretor da alta plasticidade da argila. Além disso,

como o RPP possui uma grande quantidade de partículas com diâmetros menores, favorecendo o preenchimento de parte dos vazios deixados pela argila, obteve-se uma distribuição granulométrica mais contínua nas formulações feitas, tornando o material mais compacto.

Figura 5.6. Gráfico da absorção de água das formulações



Fonte: Autoria própria.

Com exceção apenas da formulação MR na temperatura de queima de 900°C, todas as outras expostas a todas as temperaturas estão dentro do limite recomendado pela norma ASTM C902-22 para bloco intertravado cerâmico para pavimentação de tráfego leve e de pedestres, que especifica para a classe MX um percentual máximo de 14% para absorção de água.

Ainda, de acordo com a norma ABNT NBR 15310/2009, constata-se que todas as formulações e em todas as condições de queima possuem valores de AA abaixo do limite máximo de 20%, atribuindo-lhe o uso para fabricação de telhas. E quando observadas as normas NBR 15270-1/2023 e 15270-2/2023, no que diz respeito a fabricação de blocos de vedação e estrutural, com exceção somente das formulações M15 para 1000°C e M5, M10 e M15 para 1100°C, todas as demais atendem a especificação de $8\% \leq AA \leq 25\%$.

5.2.3. Porosidade aparente

Os dados da Tabela 5.5 apresentam os resultados de porosidade aparente para as formulações, com os respectivos desvios padrões, para cada condição de queima.

Tabela 5.5. Resultados da porosidade aparente das formulações

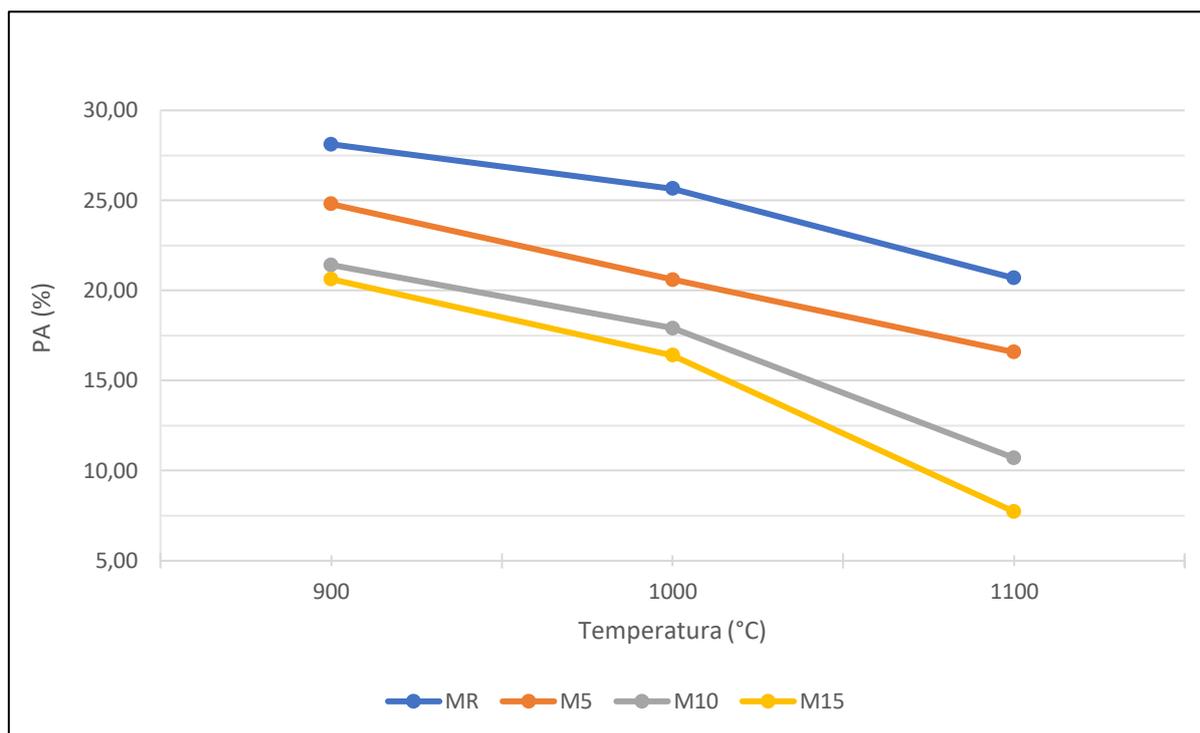
Formulações	PA (%)	Temperatura de Queima (°C)		
		900	1000	1100
MR		28,12 ± 0,102	25,66 ± 0,414	20,69 ± 1,041
M5		24,80 ± 0,357	20,60 ± 0,383	16,58 ± 0,706
M10		21,42 ± 0,309	17,91 ± 0,411	10,71 ± 0,525
M15		20,63 ± 0,293	16,40 ± 1,014	7,73 ± 0,526

Fonte: Autoria própria.

A porosidade aparente tem como significado a quantidade de poros abertos, ou seja, que se comunicam com a parte externa do corpo de prova sinterizado. Desta forma, observou-se que os resultados obtidos de PA apresentaram comportamento análogo aos de AA, o que reforça a correlação direta entre estas duas características, já que quanto maior a quantidade de poros externos, maior será a absorção de água.

No gráfico apresentado na Figura 5.7 foram plotadas as informações obtidas referentes a porosidade aparente dos corpos de prova, para uma melhor comparação entre as diferentes formulações.

Os menores valores de porosidade aparente foram obtidos para as formulações M10 e M15, na temperatura de 1100°C e o maior para a formulação MR, na temperatura de 900°C, conforme já era de se esperar, através dos resultados de absorção de água. Isto se deve a densificação causada pela adição do resíduo do polimento do porcelanato à matriz cerâmica, pela formação de fase vítrea através dos fundentes presentes, o que reduz a quantidade de poros e, conseqüentemente, o percentual da porosidade aparente e absorção de água, tendo, por outro lado, aumento na retração linear.

Figura 5.7. Gráfico da porosidade aparente das formulações

Fonte: Autoria própria.

5.2.4. Massa específica aparente

A MEA oferece uma boa noção sobre o grau de densificação dos corpos de prova sinterizados, tendo relação íntima com a absorção de água e a porosidade aparente, além de interferir diretamente na retração linear de queima.

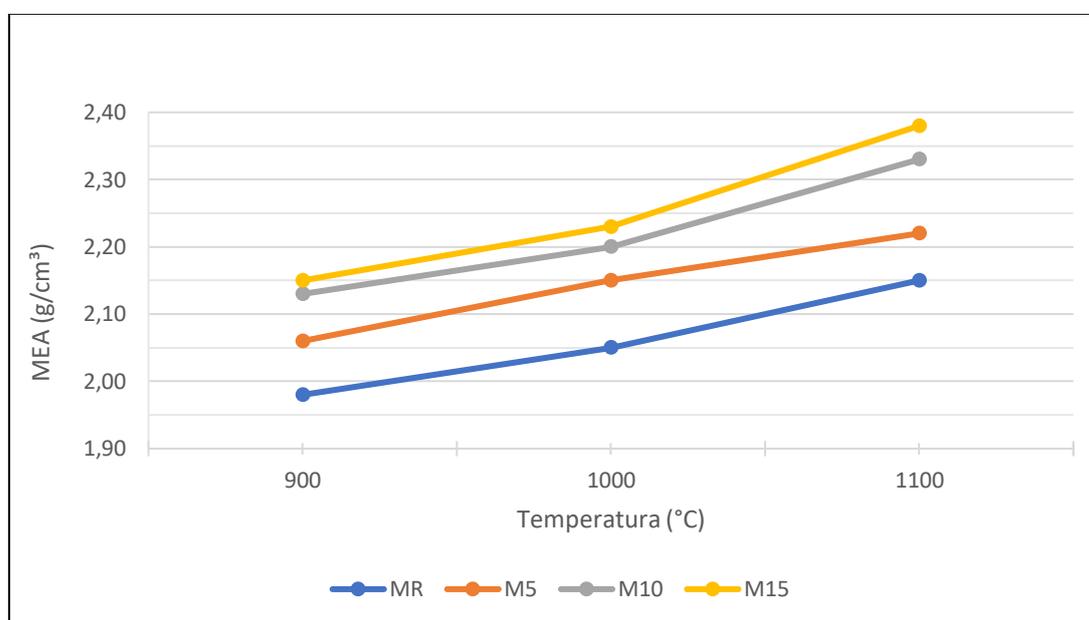
Na Tabela 5.6 e no gráfico apresentado na Figura 5.8, são descritos os resultados encontrados para a massa específica aparente das formulações, para cada temperatura de queima.

É possível observar na Tabela 5.6, que a formulação MR, na temperatura de 900°C, apresentou um MEA de 1,98g/cm³, enquanto que a M15 em 1100°C, obteve 2,38g/cm³ de massa específica aparente, se configurando nos dois extremos dos valores obtidos neste ensaio, e perfazendo a variação total desta propriedade entre todas as formulações.

Tabela 5.6. Resultados da massa específica aparente das formulações

Formulações \ MEA (g/cm ³)	Temperatura de Queima (°C)		
	900	1000	1100
MR	1,98 ± 0,002	2,05 ± 0,012	2,15 ± 0,024
M5	2,06 ± 0,011	2,15 ± 0,010	2,22 ± 0,017
M10	2,13 ± 0,008	2,20 ± 0,010	2,33 ± 0,008
M15	2,15 ± 0,007	2,23 ± 0,019	2,38 ± 0,003

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.8. Gráfico da massa específica aparente das formulações

Fonte: Autoria própria.

É possível observar no gráfico do MEA, que assim como foi para o RLq, o aumento do percentual de RPP incorporado e o aumento da temperatura, ocasionaram um aumento da massa específica aparente. Na temperatura de 900°C os resultados encontrados são mais baixos, acredita-se que isso deve-se ao fato da não formação da fase vítrea, que necessita de temperaturas mais elevadas para ocorrer. Com 1100°C, por exemplo, os valores encontrados foram aumentando de 2,15g/cm³, para MR, até chegar a 2,38g/cm³, para M15, sendo os maiores valores encontrados para cada formulação. Pelo mesmo motivo dito anteriormente, acredita-se que estes resultados se devem ao fato de o resíduo possuir uma maior quantidade de finos e fundentes, que geram um maior grau de densificação e, por sua vez, um menor número de poros.

5.2.5. Tensão de ruptura à flexão

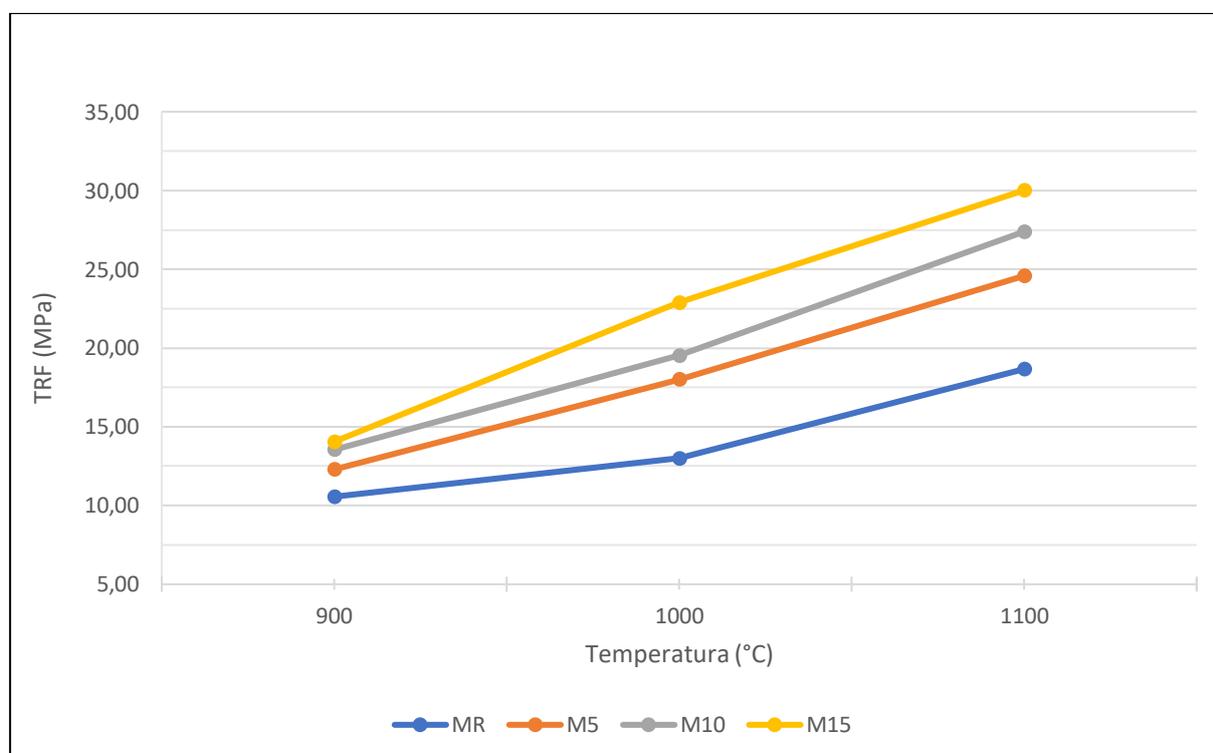
A partir da Tabela 5.7 que representa os valores da tensão de ruptura à flexão dos corpos cerâmicos sinterizados, para várias temperaturas, foi elaborado o gráfico de TRF para as diversas formulações, conforme a Figura 5.9.

Tabela 5.7. Resultados da tensão de ruptura à flexão das formulações

Formulações \ TRF (MPa)	Temperatura de Queima (°C)		
	900	1000	1100
MR	10,56 ± 1,193	13,00 ± 1,185	18,66 ± 3,008
M5	12,29 ± 0,858	18,00 ± 1,465	24,58 ± 1,130
M10	13,54 ± 1,429	19,53 ± 1,133	27,39 ± 1,786
M15	14,05 ± 1,326	22,89 ± 1,565	30,01 ± 3,060

Fonte: Autoria própria.

Figura 5.9. Gráfico da tensão de ruptura à flexão das formulações



Fonte: Autoria própria.

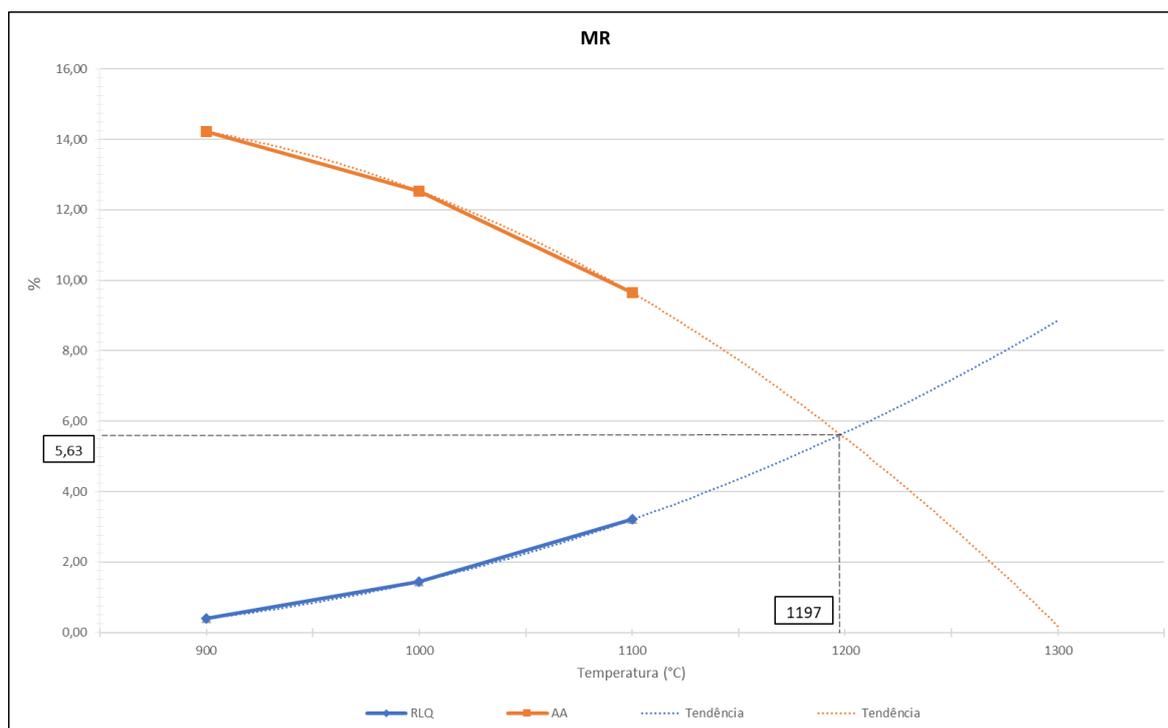
Seguindo o mesmo padrão para as características determinadas anteriormente, a tensão de ruptura à flexão aumentou juntamente com o aumento do percentual de RPP na formulação, bem como com o aumento da temperatura, demonstrando que estes dois fatores afetaram positivamente a resistência mecânica das peças pós queima. Observa-se que o maior valor da tensão de ruptura à flexão encontrada foi de 30,01MPa, para a temperatura de 1100°C referente a formulação M15.

As normas para pavers cerâmicos, não especificam o valor de tensão de ruptura à flexão mínimo a ser considerado para aceitação do material para utilização nestes casos, mas sim a resistência à compressão uniaxial. Porém, segundo Callister Jr. e Rethwisch (2021), os limites de resistência à tração dos materiais cerâmicos valem aproximadamente um décimo da sua resistência à compressão e Shackel (1990) afirma que estão sendo desenvolvidas pesquisas para estabelecer uma relação entre a resistência à compressão e a resistência à flexão para pavers de concreto, citando como regra geral os valores mínimos de 45MPa e 3,5MPa para resistência à compressão e resistência à flexão individuais, respectivamente, independente do ensaio adotado. Com base nessas informações, todas as formulações atenderam a essa propriedade de resistência mecânica.

5.2.6. Curvas de gresificação

Nas Figuras 5.10 a 5.13 são apresentadas as curvas de gresificação, demonstrando o comportamento térmico de cada formulação em função da temperatura de queima. Através destas curvas é medida a evolução microestrutural do produto cerâmico durante o processo de queima e o ponto de intersecção entre os gráficos sobrepostos de retração linear de queima e absorção de água, informa a temperatura de gresificação, em que AA e RLq possuem o mesmo valor, atingindo-se o equilíbrio entre porosidade e sinterização para aquele determinado material.

Para a formulação MR, observada na Figura 5.10, a temperatura de gresificação obtida foi de 1197°C, tendo como percentual de absorção de água e retração linear de queima, associados a este ponto, de 5,63%, quando adicionada a linha de tendência para as curvas analisadas, projetando os valores que seriam alcançados até temperaturas de 1300°C, já que a queima realizada nesta pesquisa só alcançou o valor de 1100°C.

Figura 5.10. Curva de gresificação da formulação MR

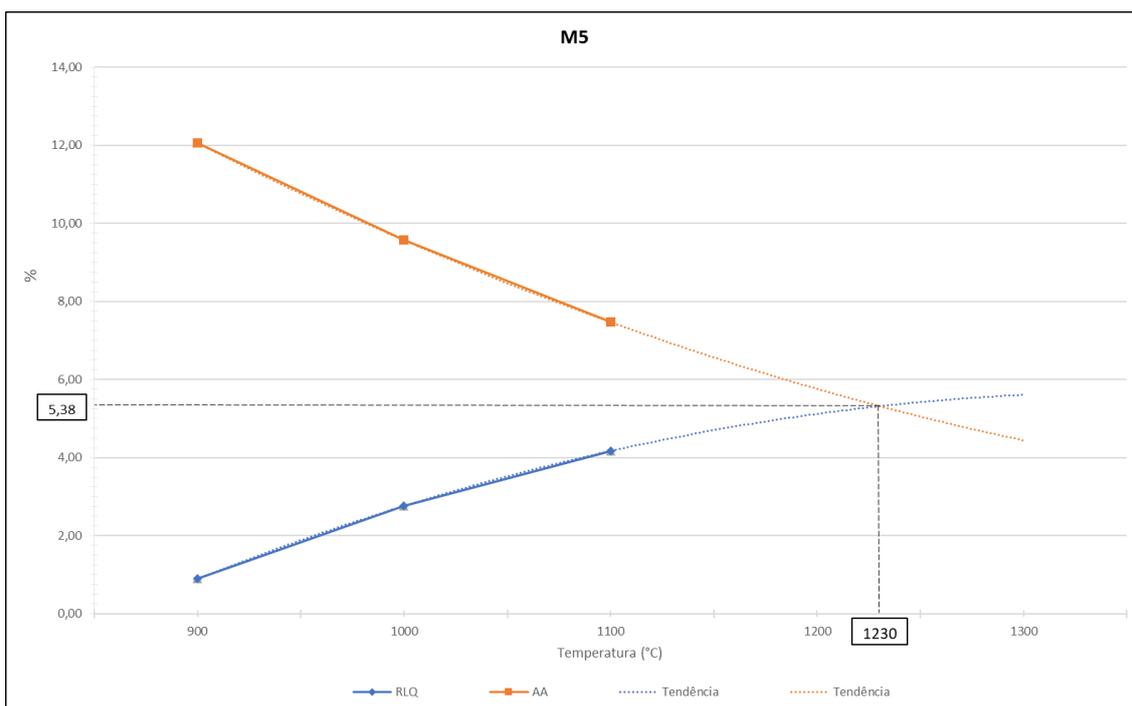
Fonte: Autoria própria.

Para a formulação M5, em que foi adicionado 5% de resíduo a massa cerâmica, a temperatura de gresificação encontrada na curva apresentada na Figura 5.11, foi de 1230°C, com valores de absorção e retração de 5,38%. Observou-se que houve um pequeno aumento na temperatura quando comparado com a formulação MR, diferente do que se observa nas formulações seguintes, mas acredita-se que isto se deve ao fato do percentual de RPP ser pequeno e também por alguma imprecisão na extrapolação das curvas pela linha de tendência utilizada em ambas as figuras.

No caso das curvas das formulações M10 e M15, apresentadas nas Figuras 5.12 e 5.13, respectivamente, observou-se um comportamento esperado com redução da temperatura de gresificação, quando comparados a formulação MR.

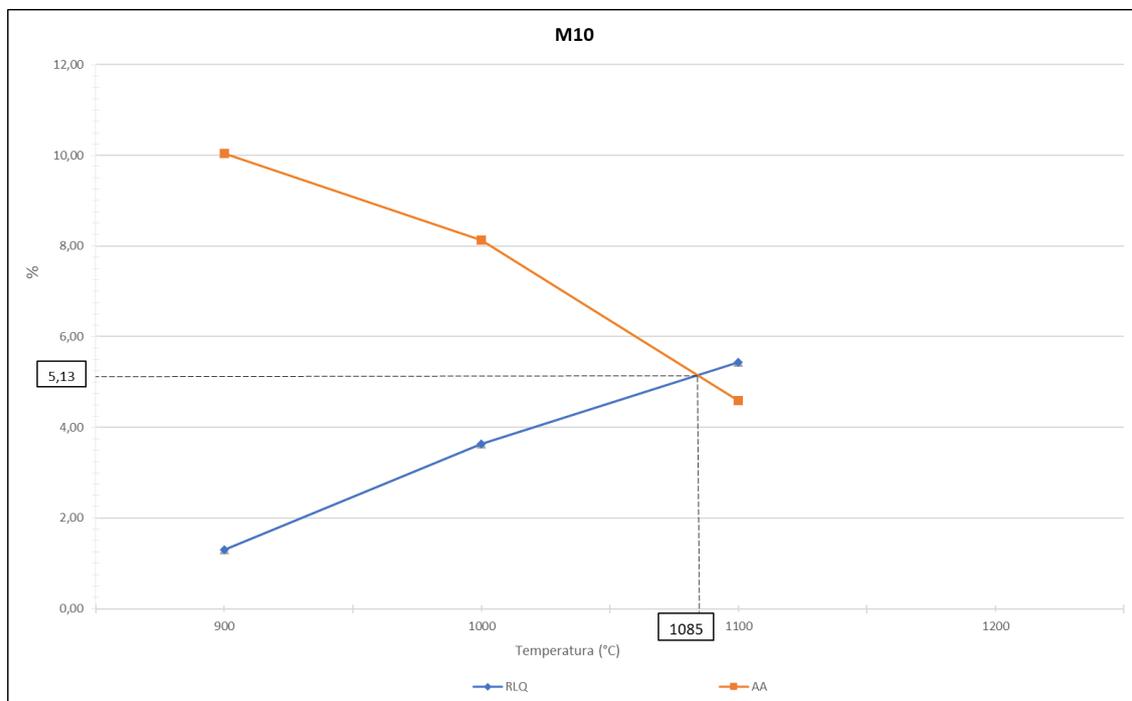
Quando analisado o comportamento do percentual de absorção de água e retração linear entre as curvas de cada formulação, observa-se que o mesmo não teve uma variação significativa, o que tem como explicação o fato de tratar-se de um material com composição muito similar, em que o valor do ponto de equilíbrio se mantém quase constante, variando apenas a temperatura em que o mesmo ocorre.

Figura 5.11. Curva de gresificação da formulação M5

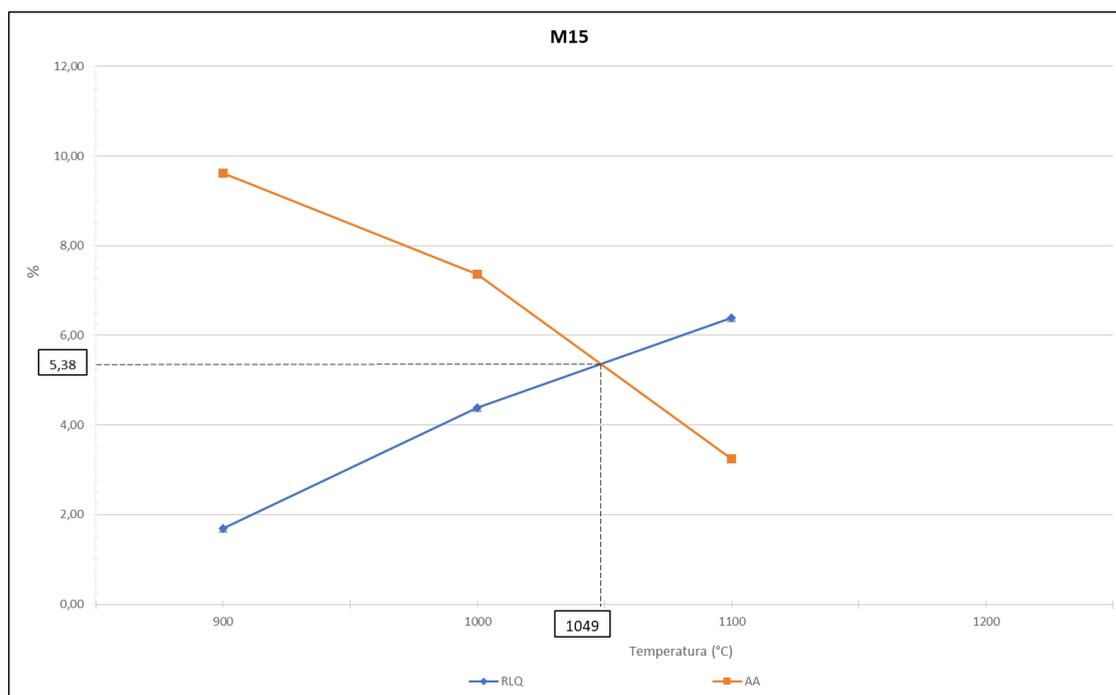


Fonte: Autoria própria.

Figura 5.12. Curva de gresificação da formulação M10



Fonte: Autoria própria.

Figura 5.13. Curva de gresificação da formulação M15

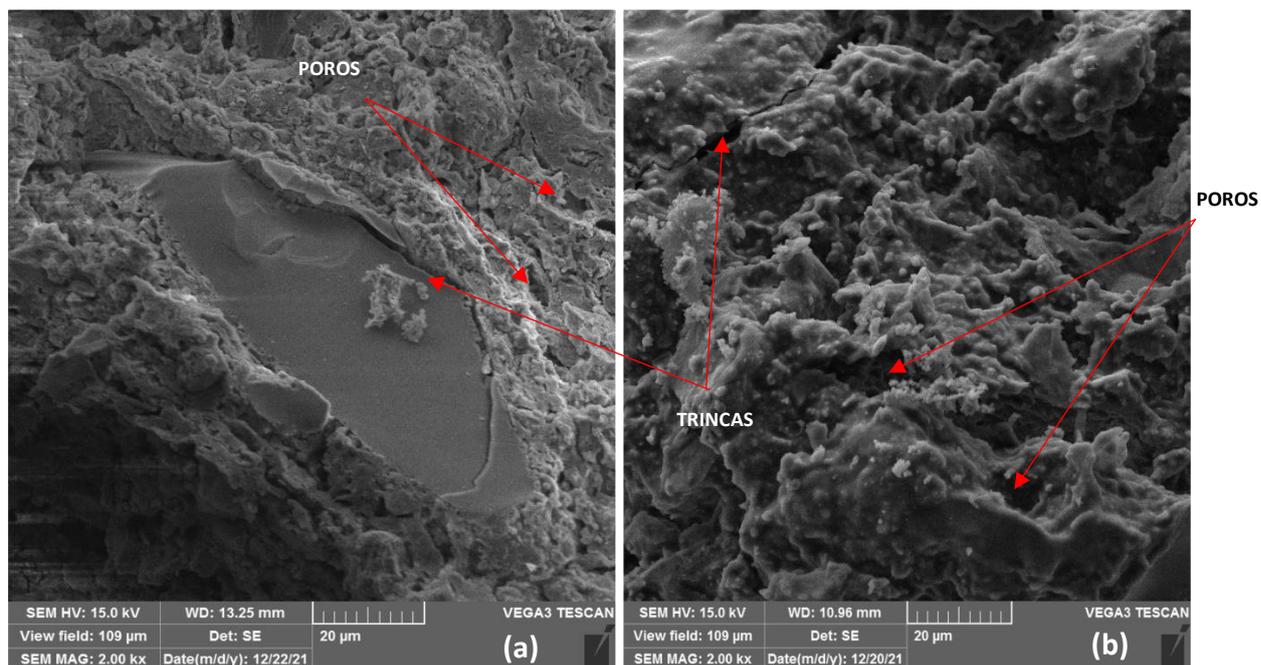
Fonte: Autoria própria.

Através da análise das curvas de gresificação, pode-se constatar que, caso seja necessário se obter uma peça com valores mínimos de absorção de água, como no caso da fabricação de porcelanato, por exemplo, a temperatura de queima deverá ser elevada, necessitando-se de menores temperaturas para as formulações com maiores teores de adição de resíduo, como a M15, que atingirá valores próximos de 0,5% aproximadamente com 1130°C, com pequeno acréscimo na retração linear, atingindo valor em torno de 7%, ainda abaixo do valor máximo aceitável.

5.2.7. Análise microestrutural por microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As Figuras 5.14 a 5.17 apresentam as microestruturas dos corpos de prova sinterizados para cada formulação e para diferentes temperaturas de queima.

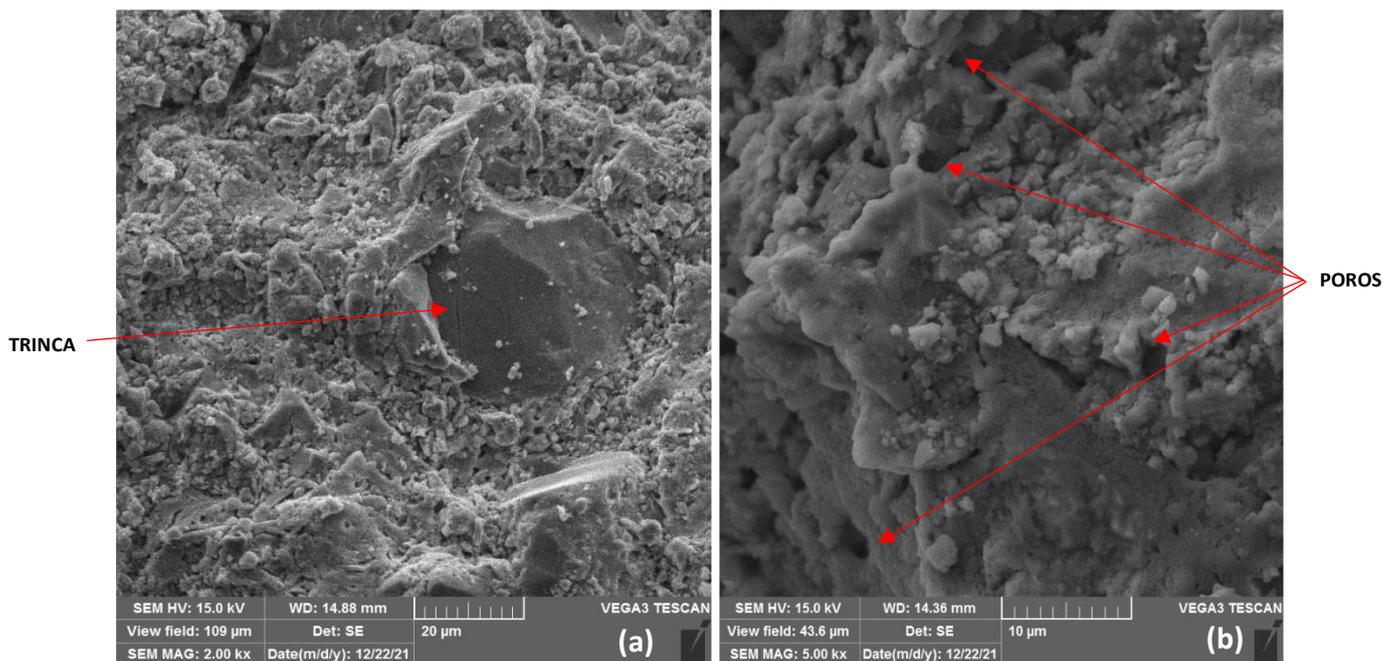
Figura 5.14. Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra MR sinterizada a 1000°C, com ampliação de 2000X (a) e (b).



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.14 observa-se a fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da formulação MR, com 100% de argila, sinterizada a temperatura de 1000°C. As fotomicrografias obtidas permitem identificar alguns defeitos nas regiões visualizadas, conforme apontado pelas setas, como trincas e poros, devido ao processo de compactação e reações de sinterização, principalmente pelo baixo teor de fundentes, característico de uma argila caulínica. As trincas podem ser vistas tanto na matriz (b), quanto na interface entre ela e os grãos de quartzo (a), o que pode ter sido causado pelo comportamento termodilatométrico do quartzo durante a queima, principalmente pela transformação alotrópica a que ele é submetido por volta de 570°C, com variação volumétrica. O formato irregular dos poros leva a interpretação de que são abertos, sendo causados pela densificação incompleta da amostra, pela pequena produção de fase vítrea no processo de queima (b). A existência de uma quantidade elevada de poros, gera uma fragilidade no material, que se comprova pelos resultados do ensaio de resistência mecânica realizado.

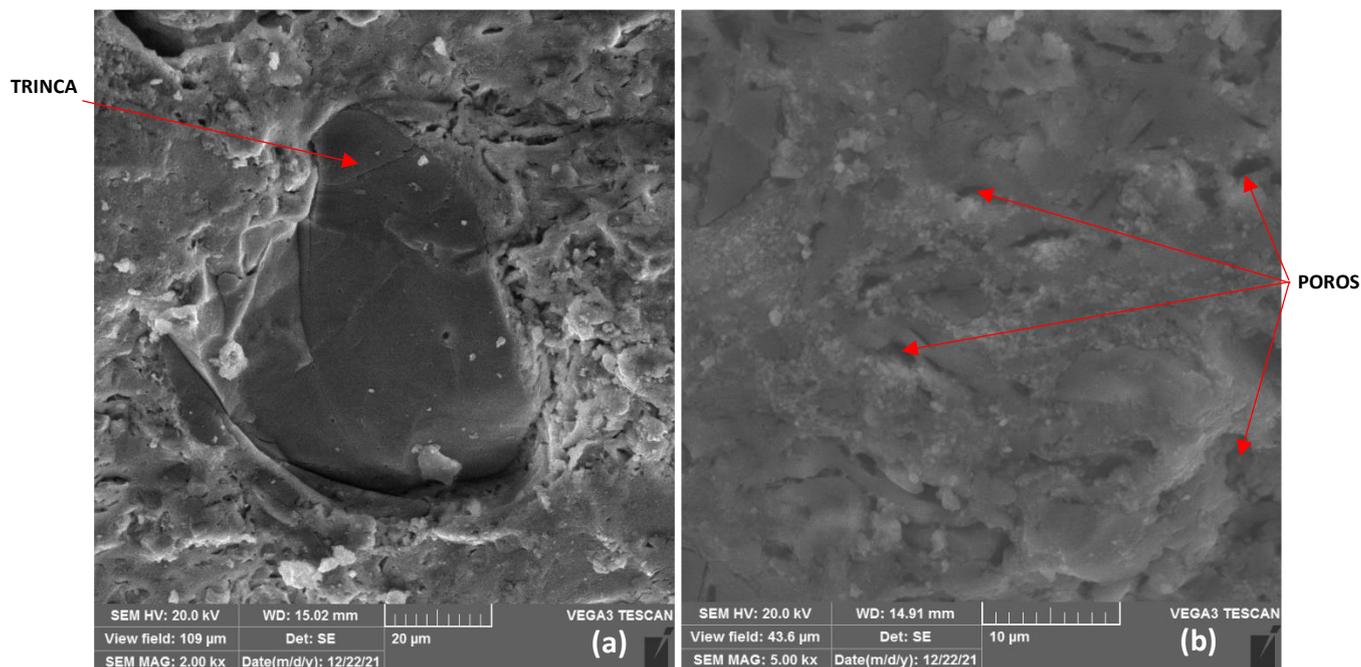
Figura 5.15. Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra M5 sinterizada a 1000°C, com ampliação de 2000X (a) e 5000X(b).



Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.15 mostra a fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da formulação M5, que possui 5% de RPP adicionado à argila, tendo sido sinterizada na temperatura de 1000°C. É possível visualizar grãos de quartzo bem inseridos e envoltos em matriz mais densa se comparada com a formulação MR, denotando um processo de sinterização melhor, o que pode ser explicado pela adição de fundentes na massa cerâmica, através da inclusão do percentual de resíduo. Contudo, também são encontrados alguns defeitos como poros (b), que devem ter sido causados pela liberação de fases gasosas durante a queima, e trincas no quartzo (a), que devem ter explicação na transformação alotrópica que ele sofre ao passar pela temperatura de 570°C, gerando fissuras pela sua variação volumétrica. A existência de poros em quantidade ainda significativa, também favorece o aparecimento de fissuras, pois eles atuam como concentradores de tensão.

Figura 5.16. Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra M10 sinterizada a 1100°C, com ampliação de 2000X (a) e 5000X(b).



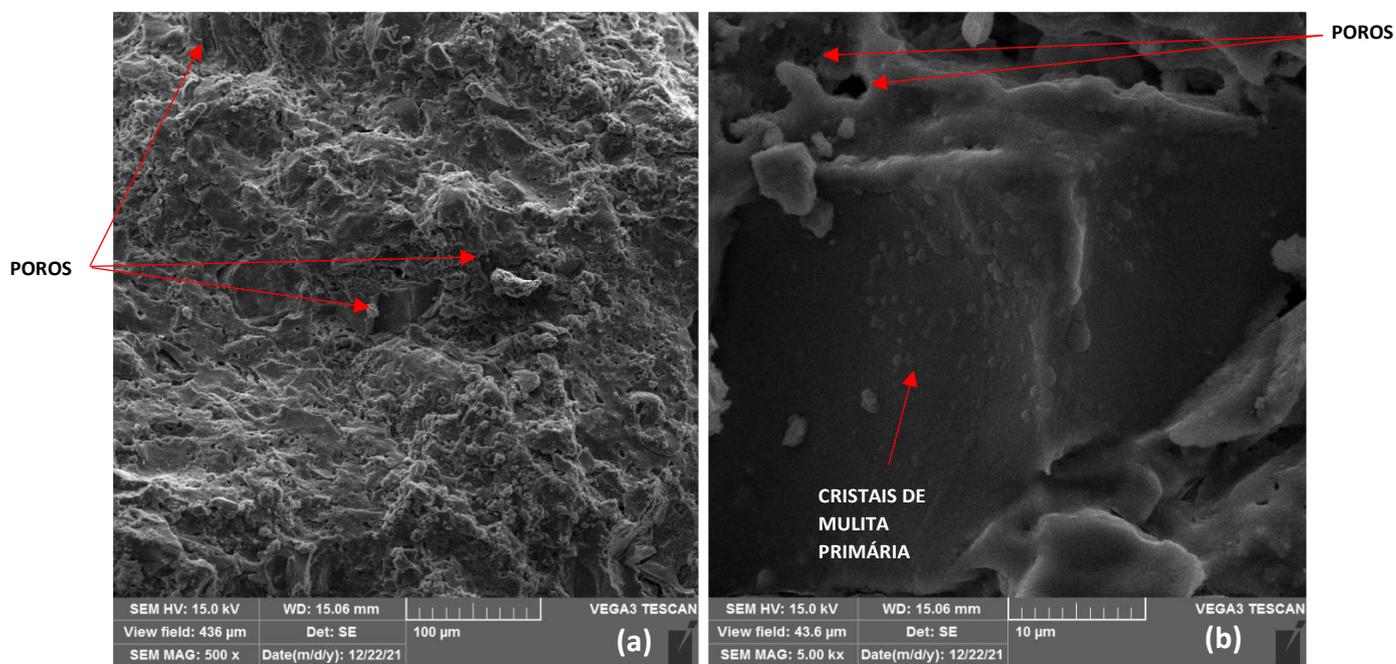
Fonte: Autoria própria.

A Figura 5.16 exibe a fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da formulação M10, em que foi adicionado 10% de resíduo de polimento do porcelanato a argila, sinterizada a temperatura de 1100°C. As fotomicrografias obtidas permitem visualizar uma microestrutura mais densa do que as anteriores, decorrente de um maior teor de fundentes na massa cerâmica, além da temperatura de queima, o que propiciou uma formação de fase líquida mais completa. Porém, podem ser encontrados poros abertos na matriz (b), evidenciando a liberação de gases no processo de queima, o que pode ser explicado pelo início da decomposição do carbetto de silício presente no RPP, vindo dos abrasivos utilizados no polimento, liberando dióxido de carbono como produto resultante, conforme observado na análise térmica do resíduo ao ultrapassar 1000°C. É possível observar uma fratura no quartzo (a), possivelmente resultante de seu comportamento durante a queima ou ocorrida no processo de compactação.

Na Figura 5.17 observa-se a fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da formulação M15, com a adição de 15% de resíduo à argila, sinterizada a 1100°C. Nas fotomicrografias obtidas é possível observar intensa presença do quartzo, textura mais densa da matriz, quando comparada com as formulações anteriores, evidenciada pela redução dos poros em tamanho e quantidade, além da visualização de região com crescimento de cristais de mulita,

confirmando o resultado da tensão de ruptura à flexão que atingiu seus maiores valores para essa formulação e temperatura de queima.

Figura 5.17. Fotomicrografia por MEV da superfície de fratura da amostra M15 sinterizada a 1100°C, com ampliação de 500X (a) e 5000X(b).



Fonte: Autoria própria.

CAPÍTULO 6: CONCLUSÕES

Tendo como objetivo formular bloco intertravado cerâmico com adição de resíduo do polimento do porcelanato, após o desenvolvimento deste trabalho, é possível concluir que:

- A argila utilizada é caulínica com composição química rica em SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , possuindo baixos teores de fundentes representados pelos elementos K_2O e MgO , porém com plasticidade alta; enquanto que o resíduo do polimento do porcelanato apresenta altos teores de fundentes, principalmente CaO , além de K_2O e MgO , sendo não plástico;
- A adição do resíduo do polimento do porcelanato na argila melhorou a microestrutura das formulações, pela redução da quantidade de poros, o aumento da densificação e o consequente aumento na retração linear de queima, massa específica aparente e tensão de ruptura à flexão, contribuindo também para redução na absorção de água e porosidade aparente dos corpos de prova sinterizados, para todas as temperaturas de queima estudadas, sendo estes efeitos diretamente proporcionais aos percentuais de incorporação de RPP;
- Todas as formulações com queima a 900°C atenderam as especificações das normas específicas de fabricação de blocos de vedação e estruturais e telhas, podendo ser utilizadas para tal fim;
- Diante da imprecisão das informações obtidas na literatura a respeito da adoção da tensão de ruptura à flexão como parâmetro de resistência mecânica para aprovação de blocos intertravados cerâmicos, e com o intuito de se trabalhar com uma margem de segurança, decidiu-se por considerar como formulações que atenderam às especificações da norma ASTM C902-22, apenas aquelas que possuíram valor de $\text{TRF} \geq 20,7\text{MPa}$, que é a resistência à compressão uniaxial mínima recomendada para as classes MX e NX, na média de 5 corpos de prova. Sendo assim, somente as formulações M15, para a temperatura de 1000°C e M5, M10 e M15 para 1100°C , atenderam esse requisito da norma;
- As formulações com 15% de incorporação de RPP e temperatura de queima de 1000°C e as formulações com 5%, 10% e 15% de incorporação de resíduo e temperatura de queima de 1100°C , atenderam as especificações exigidas pela norma ASTM C902-22, quanto a absorção de água e resistência mecânica, para as classes MX e NX, referente a

pavimentação de blocos intertravados cerâmicos para tráfego leve e de pedestres, podendo ser utilizados na resolução dos problemas de manutenção e recuperação de passeios em Salvador/BA;

- A adição do resíduo do polimento do porcelanato em matriz cerâmica, mostrou-se um produto com potencial sustentável por garantir a redução dos impactos ambientais, face a um destino dado com a utilização do resíduo e a redução na extração da matéria-prima, a argila. O presente trabalho aponta a possibilidade de um ciclo no qual o RPP gerado pode ser utilizado pela indústria cerâmica;
- A incorporação do RPP na massa de argila, para a formulação de bloco intertravado cerâmico, comprovou-se viável do ponto de vista técnico, alterando positivamente suas principais características.

CAPÍTULO 7: SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Avaliar a adição de percentuais maiores de resíduo nas formulações, a partir de 20% em massa, sinterizados nas temperaturas de 900°C e 1000°C;
- Realizar ensaio de resistência à compressão das formulações;
- Examinar a resistência à abrasão das peças pelos ensaios existentes, no padrão industrial;
- Avaliar a incorporação do RPP em diferentes matrizes cerâmicas;
- Realizar estudo de viabilidade socioeconômica para a produção de bloco intertravado cerâmico a nível industrial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACCHAR, W. Materiais cerâmicos: Caracterização e aplicações. Natal: Editora UFRN, 2006.

AGUIAR, M. C. de; GADIOLI, M. C. B.; SANT'ANNA, M. A. K.; ALMEIDA, K. M. de; GIORI, A. J. N. **Processos de fabricação de cerâmica vermelha**. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2022. 53 p. (Série Tecnologia Ambiental). Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2621>. Acessado em: 30 abr. 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C902-22**: Standard Specification for Pedestrian and Light Traffic Paving Brick. [s.l.]: ASTM, 2022.

ARAÚJO, R. dos S. G. de. **Estudo da adição de feldspato em massa cerâmica de telhas prensadas para produção de adoquim**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI, Teresina, 2019. Disponível em: <http://bia.ifpi.edu.br:8080/jspui/handle/123456789/786>. Acessado em: 18 mai. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA - ABCERAM. (Brasil) (org.) **Informações Técnicas: Processo de Fabricação**. 2024. Disponível em: <https://abceram.org.br/processo-de-fabricacao/>. Acessado em: 30 abr. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9781**: Peças de concreto para pavimentação – Especificação e métodos de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 10545-4**: Placas cerâmicas Parte 4: Determinação da carga de ruptura e módulo de resistência à flexão. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 13006**: Placas cerâmicas – Definições, classificação, características e marcação. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-1**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 1: Requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15270-2**: Componentes cerâmicos – Blocos e tijolos para alvenaria Parte 2: Métodos de ensaios. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15310**: Componentes cerâmicos – Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICAS DE REVESTIMENTO - ANFACER. Disponível em: <https://www.anfacer.org.br/mundial>. Acesso em: 13 março 2022.

BIFFI, Giovanni. **O Grês Porcelanato: manual de fabricação e técnicas de emprego**. Rio Claro: Faenza Editrice do Brasil, 2002. 262 p.

BRASILEIRO, C. T. **Estudo de massas de porcelanato esmaltado contendo filito como fundente**. 2020. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – UFSC, São Carlos, 2020.

BREITENBACH, S. B.; SANTOS, O. C.; ANDRADE, J. C. S.; NASCIMENTO, R. M.; MARTINELLI, A. E. Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. **Cerâmica**, [s.l.], v. 63, n. 367, p. 395–401, jul./set. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633672182>. Acessado em: 22 jun. 2024.

CAETANO, A. L. A.; MARQUES, V. C.; MACEDO, D. A. de; FERREIRA, H. S.; DUTRA, R. P. S.; MENEZES, R. R. N. Obtenção de cerâmica de revestimento sustentável desenvolvida com resíduos industriais. **Cerâmica Industrial**, [s.l.], v. 26, n. 1, p. 1-11, jan./dez. 2021. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2021.004>. Acessado em: 23 mar. 2024.

CALLISTER JR, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2021. 864 p.

CAPUTO, H. P.; CAPUTO, A. N. **Mecânica dos solos – teoria e aplicações**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2022. 288 p.

CIPRIANO, P. B.; FERRAZ, A. V. Caracterização e aproveitamento dos resíduos de argila e argilito provenientes da extração de gipsita no município de Araripina-Brasil como matérias-primas para cerâmica vermelha. **Cerâmica**, São Paulo, v. 65, n. 376, p. 611-619, out./dez. 2019.

COUVIGNOU, E. M. **Análise da conformidade e caracterização da matéria-prima empregada na fabricação de blocos cerâmicos na região metropolitana de Salvador**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – UFRN, Natal, 2007.

DIAS, L. L.; MENEGAZZO, A. P. M.; QUINTEIRO, E.; SERAFIM, M. A. Desenvolvimento de um novo produto cerâmico para pavimentação de passeios e áreas públicas. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 4, p. 155-165, out./dez. 2016.

DULTRA, E. J. V. **Adição de subprodutos da cinza da casca de café (*coffea canephora*) em massa cerâmica para porcelanato**. 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/12834>. Acessado em: 20 abr. 2024.

FERREIRA, D. S.; GOMES, R. M. M.; ARAÚJO, W. M. P.; SOARES, R. A. L. Estudo da potencialidade da produção de adoquim com massa cerâmica utilizada em telhas prensadas. **Cerâmica Industrial**, [s.l.], v. 24, n. 1, p. 40-46, jan./mar. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/cerind.2019.005>. Acessado em: 30 mar. 2024.

GOMES, C. F. **Argilas: o que são e para que servem**. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1988. 457 p.

INTERPAVI. Disponível em: <https://www.interpavi.com.br/brasil/tecnico.htm>. Acessado em: 23 abr. 2024.

KUMMER, L.; BASSETTI, F. de J.; RIELLA, H. G.; AZEVEDO, J. C. R. Reutilização dos resíduos de polimento de porcelanato e feldspato na fabricação de novo produto cerâmico. **Cerâmica industrial**. Revista. Vol. 12 .n. 3. Maio/jun, 2007. São Paulo/SP.

LAURSEN, A.; SANTANA, L. N. L.; MENEZES, R. R. Caracterização de argilas plásticas do nordeste brasileiro. **Cerâmica**, São Paulo, v. 65, n. 376, p. 578-584, out./dez. 2019.

LERDPROM, W.; CHINNAM, R. K.; JAYASEELAN, D. D.; LEE, W. E. Porcelain production by direct sintering. **Journal of the European Ceramic Society**, [s.l.], v. 36, n. 16, p. 4319-4325, dez. 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2016.07.013>. Acessado em: 30 abr. 2024.

MALPESA. **Pavé Klinker Ceramique**. 2024. Disponível em: <https://www.malpessa.es/en>. Acessado em: 18 mar .2024.

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. **REMAP**, v. 2.2, p. 34-42, 2007.

MATOS, P. R.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R.; OLIVEIRA, A. L.; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Use of porcelain polishing residue as a supplementary cementitious material in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, [s.l.], v. 193, p. 623-630, dez. 2018.

MULLER, R. M. **Avaliação de transmissão de esforços em pavimentos intertravados de blocos de concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – UFRJ, Rio de Janeiro. 2005.

NASCIMENTO, M. V. L. A. **Estudos de blocos intertravados de concreto para pavimentação com incorporação de resíduo do polimento do porcelanato**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Centro Acadêmico do Agreste, Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru, 2016.

OLIVEIRA, A. P. N. de; HOTZA, D. **Tecnologia de fabricação de revestimentos cerâmicos**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2015. 118 p. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/187929?show=full>. Acessado em: 13 abr. 2024.

PALMA, A. J. R.; PASKOCIMAS, C. A. Incorporação de resíduos cerâmicos na formulação da argila-padrão do isolador cerâmico de velas de ignição. **Revista Scientia**, [s.l.], v. 6, n. 1, p. 125-141, jan./abr. 2021. Disponível em: <https://www.revistas.uneb.br/index.php/scientia/article/view/9420>. Acessado em: 25 jun. 2024.

PARANHOS, R. J. S. **Uso da cinza do bagaço da cana-de-açúcar como matéria-prima na substituição dos fundentes para aplicações em porcelanato**. 2015. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/19889>. Acessado em: 30 abr. 2024.

RAMOS, G. A.; MATOS, P. R. de; PELISSER, F.; GLEIZE, P. J. P. Effect of porcelain tile polishing residue on eco-efficient geopolymers: Rheological performance of pastes and mortars. **Journal of Building Engineering**, [s.l.], v. 32, nov. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101699>. Acessado em: 22 jun. 2024.

SÁNCHEZ, E.; ORTS, M. J.; GARCÍA-TEN, J.; CANTAVELLA, V. Porcelain tile composition effect on phase formation and end products. **American Ceramic Society Bulletin**, [s.l.], v. 80, n.6, p. 43-49, 2001. Disponível em: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=4139663>. Acessado em: 30 abr. 2024.

SANTOS, O. C. **Avaliação da incorporação dos sedimentos de dragagem de canais com chamote e resíduo da liga de Mn, em matrizes cerâmicas para produção de paver.** 2013. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – UFRN, Natal, 2013.

SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia de argilas.** v. 1, 2. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1989. 408 p.

SANTOS, C. P. dos; OLIVEIRA, H. A. de; SANTOS, A. de J. Estudo da viabilidade da adição de resíduo de corte de granito na produção industrial de artefatos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, [s.l.], v. 29, n. 1, p. 1-10, jan./dez. 2024. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2024.038>. Acessado em: 13 abr. 2024.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** v.1, 2. ed. São Paulo: Pini, 2008. 764 p.

SHACKEL, B. **Design and construction of interlocking concrete block pavements.** 1^a ed. New York and London: Elsevier, 1990. 229 p.

SILVA, A.L.; BERNARDIN, A.M. Problemas no transporte vertical de pó atomizado com ar comprimido. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, 57., 2013, Natal. **Anais [...]**. [S.L.]: Associação Brasileira de Cerâmica, 2013. p. 1972-1983.

SILVA, G. J. B. **Estudo do comportamento do concreto de cimento Portland produzido com a adição do resíduo de polimento do porcelanato.** Belo Horizonte, 2005, 92 p. Dissertação (Mestrado). Escola de engenharia da universidade de Minas Gerais.

SOUSA, J. B. M. de. **Aproveitamento de resíduos de caulim e granito na formulação de massas cerâmicas para fabricação de grés porcelanato.** 2014. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Processos, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/2065?show=full>. Acessado em: 23 mai. 2024.

SOUZA, P. A. B. F. **Estudo do comportamento plástico, mecânico, microestrutural e térmico do concreto produzido com resíduo de porcelanato**. 2007. 230f. Tese (doutorado). Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, UFRN, Natal.

ZACCARON, A.; FERNANDES, P.; NANDI, V. de S.; ROSSO, F. Incorporação de escória de alto forno a carvão vegetal em massa de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, [s.l.], v. 25, n. 1, p. 34-42, jan./mar. 2020. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4322/cerind.2019.018>. Acessado em: 13 abr. 2024.

ZANELLI, C.; SOLDATI, R.; CONTE, S.; GUARINI, G.; ISMAIL, A. I. M.; EL-MAGHRABY, M. S.; CAZZANIGA, A.; DONDI, M. Technological behavior of porcelain stoneware bodies with Egyptian syenites. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, [s.l.], v. 16, p. 574-584, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/ijac.13102>. Acessado em: 27 abr. 2024.