



Universidade Federal do Amazonas – UFAM
Faculdade de Tecnologia – FT
Departamento de Engenharia de Materiais – DEMA
Curso de Engenharia de Materiais



William Fenelon Bandeira Araujo

**ADIÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DE FORNO CERÂMICO PARA
APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE MASSA CERÂMICA PARA REVESTIMENTO**

Manaus – Amazonas

2023

William Fenelon Bandeira Araujo

**ADIÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DE FORNO CERÂMICO PARA
APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE MASSA CERÂMICA PARA REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
de Materiais, da Universidade
Federal do Amazonas, como parte
dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade

Manaus – Amazonas

2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo autor.

Araujo, William Fenelon Bandeira
A663a Adição de cinzas provenientes de forno cerâmico para aplicação
na formulação de massa cerâmica para revestimento / William
Fenelon Bandeira Araujo. 2023
100f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Jean Carlos Silva Andrade
TCC de Graduação (Engenharia de Materiais) – Universidade
Federal do Amazonas.

1. Indústria Regional. 2. Cerâmica. 3. Economia Circular. 4.
Cinzas. I. Andrade, Jean Carlos Silva. II. Universidade Federal do
Amazonas III. Título.

William Fenelon Bandeira Araujo

**ADIÇÃO DE CINZAS PROVENIENTES DE FORNO CERÂMICO PARA
APLICAÇÃO NA FORMULAÇÃO DE MASSA CERÂMICA PARA REVESTIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
de Materiais, da Universidade
Federal do Amazonas, como parte
dos requisitos necessários à
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia de Materiais.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Jean Carlos Silva Andrade
Presidente da Banca / Universidade Federal do Amazonas - UFAM



Prof. Dr. José Carlos Calado Sales Júnior
Universidade Federal do Amazonas - UFAM



Prof. Dr. Raimundo Humberto Cavalcante Lima
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Manaus – Amazonas

2023

DEDICATÓRIA

Para Deus, criador e sua obra prima: Natureza.
Também para minha família no suporte incondicional desde o primeiro dia de vida.

*“Eu não aceitaria a derrota – tampouco uma vitória
– sem antes lutar.”*

Yukio Mishima.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, e determinação incansável que me foi dada.

A minha família pela orientação e suporte que me permitiram alcançar maiores patamares.

Ao meu orientador, Jean Carlos Silva Andrade, pelo acompanhamento desde o início da vida acadêmica até a extremamente eficiente orientação neste trabalho árduo.

Ao professor João de Almeida e o técnico Nilson pela permissão em utilizar o Laboratório de Dosagens da Faculdade de Tecnologia da UFAM, espaço de grande utilidade durante o desenvolvimento das análises granulométricas.

Ao professor Nilton Campelo, o técnico Zeca e outros componentes da equipe do Laboratório de Pavimentação da Faculdade de Tecnologia da UFAM, o acesso facilitado ao espaço e a infinita paciência acima de tudo foram primordiais para realização da maior parte dos processos aqui descritos.

A equipe do Laboratório de Físico Química da Faculdade de Tecnologia da UFAM pelas Análises de FRX e TG/DSC, além de permitir o uso do espaço para diversas atividades.

Ao IFAM – Campus Manaus Centro pelas Análises de DRX.

Hei de agradecer também a ao professor Humberto e a equipe do Laboratório de Laminação do Instituto de Ciências Exatas. Sem o equipamento para promover a queima do material de estudo, o trabalho não teria sido viável em primeiro lugar, sem citar a importância do flexímetro também.

Por fim e não menos importante: a Alexandre Cascaes, colega de classe, sem o qual este trabalho teria enfrentado um grande contratempo.

RESUMO

O volume aqui composto apresenta um esforço investigativo a fim de entender quais os efeitos que a adição de cinza de madeira amazônica pode conferir a massas cerâmicas para utilização em revestimento, em especial os porcelanatos. O Amazonas possui polo produtor de cerâmicas para fins utilitários na forma de suas olarias. Esta indústria ainda se utiliza em grande parte de energia na forma de queima de lenha para cozimento dos blocos cerâmicos, gerando efeitos colaterais ao meio ambiente. A fim de apresentar ideias baseadas em economia circular, propor novas possibilidades para a economia estadual na forma de produção de bens de consumo de valor agregado e estudar a viabilidade da reciclagem de resíduos, propõe-se um estudo de produção de placas de revestimento cerâmico com adição de cinzas. Foram confeccionadas seis fórmulas com 0%, 2%, 4%, 6%, 8% e 10% de cinza acrescida, com a fórmula inicial servindo como parâmetro de comparação, a adição de cinza foi feita em conjunto com a redução da composição de quartzo da massa triaxial (argila, feldspato, quartzo) inicial. Os corpos de prova foram compactados em matriz uniaxial com medidas de 6x2x0,5 cm, receberam pressão equivalente a 45 MPa e foram umidificados a 10% de teor de água. Realizaram-se ensaios físico-químicos na forma de Fluorescência de Raios X, Difração de Raios X, TG/DSC e análise granulométrica. Os corpos de prova foram queimados em 1090°C, 1120°C, 1150°C e 1180°C e tiveram suas propriedades tecnológicas: retração linear, massa específica aparente, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura a flexão analisadas. Os resultados evidenciam que as cinzas possuem efeitos benéficos na confecção de massas triaxiais, sua adição em massas cerâmicas para revestimento é tecnicamente viável e sua inclusão pode gerar lajotas com propriedades equivalentes as de produtos com grande valor agregado, com os valores tecnológicos atingindo índices ótimos de 7,688 ($\pm 0,098$) % em RLq, 0,304 ($\pm 0,113$) % em AA, 0,593 ($\pm 0,241$) % em PA, 33,689 ($\pm 2,189$) MPa em TRF e 2,281g/cm³ ($\pm 0,061$) em MEAq. Valores correspondentes às categorias porcelanato e grés de acordo com normas nacionais e internacionais. A execução do experimento em cenários de baixo custo é possível, mas pequenos ajustes de projeto devem ser feitos para otimização da proposta.

Palavras-chave: Indústria Regional. Cerâmica. Economia Circular. Cinzas

ABSTRACT

The volume composed here presents an investigative effort in order to understand what effects the addition of amazonian wood ash can proportionate to ceramic masses for use in tiling, especially porcelain tiles. The Amazon has a production center of ceramics for utilitarian purposes in the form of its brick yards. This industry still uses a large amount of energy in the form of burning wood to cook the ceramic blocks, generating side effects to the environment. In order to present ideas based on circular economy, propose new possibilities for the state economy in the form of production of value-added consumer goods and study the feasibility of recycling waste, a study of the production of ceramic tiles with addition of ash. Six formulas were made with 0%, 2%, 4%, 6%, 8% and 10% added ash, with the initial formula serving as a comparison parameter, the addition of ash was done together with the reduction of the composition of quartz of the initial triaxial mass (clay, feldspar, quartz). The specimens were compacted in a uniaxial matrix measuring 6x2x0.5 cm, received a pressure equivalent to 45 MPa and were humidified at 10% water content. Physical-chemical tests were carried out in the form of X-Ray Fluorescence, X-Ray Diffraction, TG/DSC and granulometric analysis. The specimens were fired at 1090°C, 1120°C, 1150°C and 1180°C and had their technological properties: linear shrinkage, apparent specific mass, water absorption, apparent porosity and flexural rupture stress analyzed. The results show that ashes have beneficial effects in the manufacture of triaxial masses, their addition in ceramic masses for tiling is technically feasible and their inclusion can generate slabs with properties equivalent to those of products with high added value, with technological values reaching optimal indices of 7.688 (± 0.098) % in Linear Retraction, 0.304 (± 0.113) % in Apparent Absortion, 0.593 (± 0.241) % in Apparent Porosity, 33.689 (± 2.189) MPa in Flexural Strength and 2.281g/cm³ (± 0.061) in MEAq. Values corresponding to the porcelain and stoneware categories in accordance with national and international standards. The execution of the experiment in low-cost scenarios is possible, but small design adjustments must be made to optimize the proposal.

Keywords: Regional Industry. Ceramic. Circular Economy. Ashes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição dos pólos produtores de placas cerâmicas no ano de 2017..	22
Figura 2 - Chaminé de olaria no município de Iranduba. Apesar da vigência de regulações ambientais ainda é possível verificar que algumas empresas ainda as descumprem.....	25
Figura 3 - Estrutura típica da Argila Caulinítica.	28
Figura 4 - Estrutura típica do feldspato potássico.	29
Figura 5- Estruturação típica do quartzo.	30
Figura 6 - Exemplo de diagrama triaxial para cerâmicas.	33
Figura 7 - Exemplo de fontes energéticas do setor cerâmico e possibilidades de resíduo para uso em cerâmicas.	34
Figura 8 - Fluxograma representativo da metodologia adotada.	40
Figura 9 - Jogo de peneiras analíticas utilizadas para análise granulométrica.....	42
Figura 10 - Mostra do refino da argila. Da esquerda para a direita: contentor de amostra bruta, argila processada e peneira #200 mesh usada para o processo.	43
Figura 11 - Mostra do processo de separação de MP's. Em destaque, o processo de pesagem e separação do feldspato.	44
Figura 12 - Líquido advindo do processo de homogeneização das MP's em pó.....	46
Figura 13 - Estufa para secagem de amostras. Maquinário no qual a mistura líquida foi deixada para remoção da água por 24 horas.	47
Figura 14 - Torrão após secagem e antes do desagregamento.....	47
Figura 15 - Pulverização do torrão.	48
Figura 16 - Mensuração da quantidade apropriada de massa para manufatura do corpo de prova.	49
Figura 17 - Pesagem do teor indicado de água + CMC para homogeneização do CP a se fabricar.....	50
Figura 18 - Corpo de prova a verde já prensado e sendo pesado pós processo.	50
Figura 19 - Bandeja com CP's separados para o processo de queima.....	51
Figura 20 - Disposição dos CP's no forno de queima.....	52
Figura 21 - Bandejas com corpos já queimados e posicionados em estufa pra armazenamento. No sentido horário: 1090°C, 1120°C, 1180° e 1150°C.	52

Figura 22 - Corpos de prova imersos em recipiente para absorção de água por 24 horas.	53
Figura 23 - Setup para pesagem hidrostática dos corpos de prova. Primeiramente pesam-se os corpos saturados de água na balança. Em seguida, a balança é posta sobre a banqueta e o suporte é afixado em um gancho na parte inferior da balança.	54
Figura 24 - Flexímetro ao início do processo de rompimento dos CP's.	55
Figura 25 - Corpo de prova rompido pós aplicação de carga pelo flexímetro.	55
Figura 26 - Setup com microscópio e suporte para visualização de amostra utilizado no processo de microscopia óptica.	56
Figura 27 - Microscopia óptica da amostra FIII. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.	76
Figura 28 - Microscopia óptica da amostra FV. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.	77

LISTA DE EQUAÇÕES

$$RLq = \frac{(L_0 - L_f)}{L_f} \times 100 (\%) - \text{Retração Linear após Queima (RLQ)}$$

$$MEA = \frac{M}{V} (\text{g/cm}^3) - \text{Massa específica aparente} - (\text{MEA})$$

$$AA = \frac{(M_F - M_0)}{M_0} \times 100 (\%) - \text{Absorção de água (AA)}$$

$$PA = \frac{(M_F - M_0)}{(M_F - M_I)} \times 100 (\%) - \text{Porosidade Aparente (PA)}$$

$$TRF = \frac{3PL}{2bh} \times 0,0980665 (\text{MPa}) - \text{Tensão de ruptura à flexão (TRF)}.$$

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de peças cerâmicas por região.	23
Tabela 2 - Formulações de massas cerâmicas do estudo.	45
Tabela 3 - Resultado das análises químicas das matérias-primas estudadas (% em peso).	57
Tabela 4 - Resultado da análise granulométrica.	63
Tabela 5 - Classificação tecnológica das fórmulas conforme o aumento de temperatura e inclusão de cinza na massa.	78

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Gráfico de DRX para a amostra de Argila.	59
Gráfico 2 - Gráfico de DRX para a amostra de cinza	60
Gráfico 3 - Curva TG/DSC para argila.....	61
Gráfico 4 - Curva TG/DSC para cinza.	62
Gráfico 5 - Distribuição granulométrica passante das matérias primas.....	64
Gráfico 6 - Distribuição granulométrica retida das matérias primas.	65
Gráfico 7 - Distribuição granulométrica de retidos acumulados das matérias primas.	66
Gráfico 8 - Resultados da Retração Linear Pós Queima (%) dos corpos de prova. .	68
Gráfico 9 - Resultados da Massa Específica Aparente pós queima (%) dos corpos de prova.	70
Gráfico 10 - Resultados da Absorção de água (%) dos corpos de prova.....	71
Gráfico 11 - Resultados da Porosidade Aparente (%) dos corpos de prova.	73
Gráfico 12 - Resultados da Tensão de Ruptura à Flexão (MPa) dos corpos de prova.	74

LISTA DE SIGLAS

CP/CP's – Corpos de prova.

PA – Porosidade aparente.

AA – Absorção de água.

TRF – Tensão de ruptura à flexão.

RLq – Retração linear após queima.

MEA – Massa específica aparente.

CMC – Carboximetilcelulose.

DRX – Difração de Raios-X.

FRX – Fluorescência de Raios-X.

DSC – Differential Scanning Calorimetry.

TG – Thermogravimetry.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

FT – Faculdade de Tecnologia.

UFAM – Universidade Federal do Amazonas.

IFAM – Instituto Federal do Amazonas.

F(n) – Formulação. O numeral romano que acompanha a letra indica qual formulação está sendo discutida.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVOS	20
2.1. Objetivos gerais	20
2.2. Objetivos específicos	20
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
3.1. Histórico Ceramista Nacional	22
3.2. Histórico do Polo Ceramista no Amazonas	24
3.3. Aspecto Ambiental	24
3.4. Das matérias primas	27
3.4.1. Argila	27
3.4.2. Feldspato	29
3.4.3. Quartzo	30
3.4.4. Cinzas	31
3.5. Cerâmicas Triaxiais	33
3.6. Incorporação de resíduos em Massas Cerâmicas	34
3.7. Cerâmicas para revestimento	35
3.7.1. Porcelanatos	36
3.8. Experiências anteriores com a incorporação de cinzas em Massas Cerâmicas e pontos comuns	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1. Materiais	39
4.1.1. Vantagens e limitações instrumentais:	39
4.2. Métodos	40
4.2.1. Análise de propriedades das Matérias Primas	41
4.2.1.1. Análise química	41
4.2.1.2. Análises de fases	41
4.2.1.3. Análise térmica	41
4.2.1.4. Análise granulométrica	42
4.2.2. Refino de matéria e formulação	43
4.2.2.1. Processamento de argila e cinza	43
4.2.2.2. Separação de MP's por percentual mássico	43
4.2.2.3. Formulação da massa cerâmica	45
4.2.3. Homogeneização e pulverização da matéria	45
4.2.4. Testes de pressão e umidade ideal	48
	15

4.2.5.	Manufatura dos Corpos de Prova (a verde)	48
4.2.6.	Queima	51
4.2.7.	Peso úmido e peso imerso	53
4.2.8.	Rompimento	54
4.2.9.	Microscopia Óptica	55
4.2.10.	Escrita e tratamento de dados	56
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1.	Caracterização química por FRX	57
5.2.	Caracterização de fases via DRX	58
5.3.	Análise térmica	61
5.4.	Análise granulométrica	63
5.5.	Retração Linear Pós Queima	67
5.6.	Massa Específica Aparente (MEA)	69
5.7.	Absorção de água	71
5.8.	Porosidade aparente	72
5.9.	Tensão de Ruptura à Flexão	74
5.10.	Microscopia óptica	75
5.11.	Classificação tecnológica e demais observações	77
6.	CONCLUSÃO	81
	REFERÊNCIAS	82
	ANEXOS	90

1. INTRODUÇÃO

A indústria cerâmica é parte integrante do esforço industrial e tecnológico moderno, exercendo assim um papel importante na economia global. No entanto, a produção desses materiais gera uma quantidade significativa de resíduos prejudiciais ao meio ambiente, soma-se isto a estratégias inadequadas de descarte, possível desequilíbrio do bioma advindo da retirada de matéria de seu local de origem e emissões do processo de mineração e industrial. Na construção civil, especialmente na área cerâmica, encontra-se um ótimo veículo para a recepção de resíduos, os quais representam grande prejuízo a partir da ação de descarte inadequado [1].

A riqueza de recursos da região amazônica é tema recorrente e um dos recursos que atrai os holofotes nestas ocasiões são as madeiras. Algumas olarias e indústrias cerâmicas de estrutura mais rudimentar utilizam-se da lenha como fonte energética, contudo esta escolha e o subsequente descarte do material carbonizado em forma de cinzas representam um balanço ambiental negativo que deve ser contraposto por técnicas como o manejo sustentável. Conferir uma nova utilidade a este rejeito é uma maneira de reduzir os danos ambientais, além de oferecer uma alternativa viável para a produção de eco materiais [2].

Diante desse contexto, surge um projeto de utilizar os rejeitos de madeira (cinzas) em adição a massa trigonal na produção de materiais cerâmicos. A proposta tem como principal justificativa a contribuição para o desenvolvimento de materiais cerâmicos mais sustentáveis [3], além de oferecer uma nova perspectiva para a utilização de resíduos e matérias primas cerâmicas provenientes da região amazônica.

Uma formulação que possa receber resíduos possui grande potencial comercial e econômico. A construção civil é um setor com tendência a crescer [4], o que tem atraído investimentos de grandes empresas do ramo. De acordo com a mesma fonte, a instalação de novas indústrias cerâmicas na região pode ser impulsionada por incentivos fiscais e pelo mercado consumidor em expansão. Nesse sentido, os resultados deste estudo podem fornecer dados relevantes para a prospecção de empresas cerâmicas que queiram se instalar em Manaus ou na Grande Manaus, contribuindo para o desenvolvimento econômico e social da região.

Dessa forma, a presente pesquisa busca atender demandas da indústria cerâmica através da utilização de recursos regionais, trazendo também uma inovação ao propor novas composições formadas em parte por materiais alternativos e sustentáveis. A abordagem proposta pode representar uma contribuição significativa para o conhecimento a respeito de materiais cerâmicos, bem como para a promoção do desenvolvimento sustentável. O presente trabalho encontra sua justificativa em propor alternativas sustentáveis para o setor de produção de materiais cerâmicos. A adição de cinzas provenientes de madeira amazônica na formulação de massa cerâmica para revestimento pode trazer benefícios tanto econômicos quanto ambientais, se a cinza advém de algum processo anterior. Contudo é também importante destacar a importância do manejo florestal e soluções para repor as árvores utilizadas no processo de queima de cerâmicas, mantendo a floresta em suas condições originais e até mesmo estendendo-a quando possível.

Além disso, o setor de construção civil é um dos principais motores da economia brasileira. Como meios de reaquecê-lo e retomar o crescimento econômico do país após notórias recessões, é preciso oferecer alternativas '*cost efficient*' durante a recuperação do mesmo. Nesse sentido, a adição de cinzas na formulação de massa cerâmica pode contribuir para o desenvolvimento econômico e social da região, com este estudo servindo como material de prospecção para empresas que venham a se instalar na região de Manaus e grande Manaus além de proporcionar uma opção mais sustentável e econômica para a produção de materiais de construção.

Porém, apesar dos benefícios potenciais, a adição de cinzas na formulação de massa cerâmica também pode apresentar desafios técnicos, como a necessidade de ajustes nas proporções dos componentes da massa para garantir a qualidade do produto final. Além disso, é importante avaliar os impactos ambientais e econômicos de longo prazo da utilização dessas cinzas na produção de revestimentos cerâmicos. Nesse sentido, este trabalho pretende contribuir para a identificação e avaliação desses empecilhos, buscando soluções sustentáveis para a produção de revestimentos cerâmicos a partir da utilização de cinzas provenientes de madeira amazônica. O uso de cinzas provenientes de madeira como aditivo em massa cerâmica para revestimento é uma temática atual que já conta com certo arcabouço literário, mas vê-se que regionalizações e adaptações econômicas do método a diferentes regiões do mundo são necessárias. É gerado um alto volume de resíduos

em forma de cinzas, lenha e serragem que podem ser reaproveitados em diferentes setores da indústria, incluindo a cerâmica. A utilização desses resíduos como aditivos na produção de massa cerâmica fornece uma alternativa ao descarte inadequado e estimula a conscientização quanto ao volume e a própria utilização de madeiras como fonte energética.

É então importante que se desenvolva uma tecnologia de produção de massa cerâmica mais sustentável e que possa ser aplicada na indústria cerâmica da região amazônica. Além disso, a pesquisa pode contribuir para a redução de impactos ambientais gerados pelo descarte inadequado de resíduos de madeira. Entre os possíveis empecilhos para o desenvolvimento desse trabalho, destaca-se a formulação de um novo tipo de massa cerâmica, ao haver a determinação se a massa base é estruturalmente coesa e qual o percentual ideal de cinza, quais os efeitos, se há fragilização ou reações adversas advindas deste aditivo.

Dessa forma, o problema que se formula é: como a adição de cinzas provenientes de madeira amazônica pode influenciar as propriedades mecânicas e físicas da massa cerâmica para revestimento?

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos gerais

Propor a utilização de cinza na formulação de massa base para placas cerâmicas.

2.2. Objetivos específicos

- Caracterização de matérias primas iniciais;
- Misturar e homogeneizar das matérias em massa triaxial;
- Conformer e sinterizar corpos de prova;
- Analisar cerâmicas tecnologicamente;
- Propor uma formulação em uma faixa de utilização de matérias primas adequadas para a região.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A etimologia da palavra cerâmica advém do grego *keramos*, termo que se relaciona a fabricação de artigos baseados em argila e elementos similares por meio de aquecimento ou queima^[5], o que, entre o vocabulário popular, veio a descrever de modo genérico diversas aplicações feitas pelo homem por meio deste processo. Tal qual: blocos cerâmicos, revestimentos, utensílios de cozinha, vasilhames e refratários.

Há critérios comuns que podem ser utilizados no ato de definir o que seria um material cerâmico, ou, o que não pode se considerar como tal. Cerâmicas são materiais com mais de um tipo de ligação química, consistindo na ligação entre elementos não metálicos e metálicos^[6], sendo compostos por ao menos dois elementos nesta ligação^[7], e com poucos elétrons livres em sua estrutura, ligando-se preferencialmente por ligações iônicas e covalentes.

A predominância das ligações supracitadas, com destaque para as do tipo iônico, são responsáveis por determinadas características físico químicas dos materiais cerâmicos. Cerâmicas normalmente são quebradiças em temperatura ambiente devido a configuração organizacional dos átomos em uma ligação iônica que dificulta a movimentação ao longo de planos de deslizamento^[8].

Estes materiais não são bons condutores térmicos tampouco elétricos devido à dificuldade de transferência de elétrons pela estrutura atômica e organização regular desta, propriedade que pode ser alterada por meio de manipulações estruturais como dopagens com outros elementos^[9].

Cerâmicas são pouco tenazes e possuem baixa resistência a esforços de tração, mas são bastante resistentes no que toca a esforços de compressão. Há ainda como propriedade característica a estabilidade química e térmica que caracteriza materiais cerâmicos, o que faz desta classe resistente a ataques de agentes químicos prejudiciais de diversas classes (e.g.: ácidos) e seu baixo coeficiente de expansão térmico, que o torna ideal para aplicações em altas temperaturas tanto em cenários residenciais quanto industriais^[10].

É relevante destacar que existem exceções, cerâmicos que são tenazes, bons condutores, que apresentam resistência a tração e outras contradições as propriedades gerais da classe que foram apresentadas. Estas características

dependem do planejamento, propósito, elementos a serem incorporados na massa cerâmica e do processo de escolha ^[11].

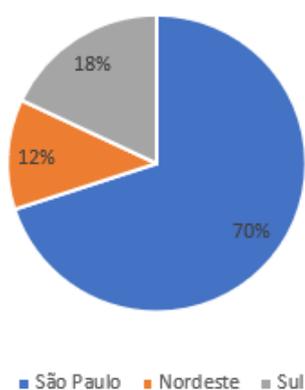
3.1. Histórico Ceramista Nacional

A manufatura de artigos de cerâmica em território nacional remonta a tempos anteriores a colonização do Brasil, de onde povos indígenas que ocupavam a região da ilha do Marajó faziam trabalhos com argila para fins decorativos, cerimoniais e utilitários com temas comuns ao cotidiano. Estas peças exibem padrões decorativos complexos e sua composição e estudos revelam alta sofisticação técnica da sociedade que os produziu ^[12].

O desenvolvimento de trabalhos com cerâmica continuou durante a colonização e assentamento de povos Europeus no Brasil. Nos primórdios ainda era fabricada de modo que pode ser descrito em maior parte como amador ou artesanal, com a maior parte da tecnologia sendo retida em centros urbanos, sendo ela caracterizada por baixa replicabilidade e as técnicas herdadas dos indígenas ainda sendo aplicadas em territórios distantes das metrópoles ^[13].

Figura 1 - Distribuição dos pólos produtores de placas cerâmicas no ano de 2017.

Produção Nacional de Revestimentos Cerâmicos



Fonte: Anfacer, 2017.

Em meados do século XIX, o crescimento das cidades e o aumento do poder de compra popular exigiu maior qualidade de fabricação e uma industrialização efetiva da produção cerâmica nacional. As primeiras indústrias cerâmicas *de facto* a se

instalarem no Brasil foram empreendimentos de imigrantes europeus. A disponibilidade de matéria prima de excelente qualidade, aliada ao crescimento do poder econômico da população por meio de fenômenos como a exportação do café e imigrantes com expertise técnica que viam o Brasil como um bom investimento formaram as condições ideais para o crescimento e estabelecimento de uma indústria ceramista nacional [14].

Atualmente, a indústria cerâmica é um setor forte com ligações íntimas ao mercado da construção e engenharia civil. Apesar do maior volume de produção se concentrar no Sul e Sudeste, outras regiões já se desenvolvem nesta área, como o Nordeste, que já tem 12% da produção total do setor cerâmico nacional como denotado pela figura 1, há também consumo na casa dos milhões de toneladas no país como demonstrado pela tabela 1. Em termos de localização, é interessante que uma nova empresa respeite leis ambientais e de zoneamento e esteja atenta a critérios como localização da matéria prima e pólo consumidor, proximidade a rodovias e modais que permitam o escoamento da produção, volume de produção, suprimento de água e outros. Considerando a distribuição uniforme de matérias primas de qualidade, a estrutura de transporte no Brasil e a tradição do país na fabricação de artigos cerâmicos, torna-se fácil entender o porquê de a indústria cerâmica se tornar tão distribuída em território nacional [15].

Tabela 1 - Consumo de peças cerâmicas por região.
Consumo Peças Cerâmica (Bi peças / Mi ton)

Região	Quant (bi peças)	%	Mi ton
Norte	6,1	6,80	12,2
Nordeste	18,9	21,00	37,8
Centro Oeste	9,0	10,00	18,0
Sudeste	41,0	45,60	82,1
Sul	15,0	16,60	29,9
	190 bi		180 Mi ton

Fonte: In The Mine, 2014

3.2. Histórico do Polo Ceramista no Amazonas

A indústria ceramista no estado do Amazonas confunde-se com a história de seus habitantes nativos e o processo gradual de colonização e a exploração de regiões do país em busca de mais recursos naturais para alimentar a indústria. Inicialmente, a maior parte da produção cerâmica no estado era proveniente das populações indígenas ^[16].

Durante esse período, a cerâmica no Amazonas tinha uma utilitária e ritual, atendendo ao conjunto de costumes sociais vigentes. Os indígenas já produziam cerâmicas de maneira artesanal em tempos pré-colombianos, utilizando técnicas tradicionais transmitidas de geração em geração. Com a chegada e assentamento de europeus, esses conhecimentos foram mesclados com influências trazidas pelos colonizadores ^[17], o que se assemelha com o modo com o qual a cerâmica se desenvolveu em outras regiões, salvo as unicidades devidas aos diferentes povos nativos.

Foi somente no final do século XIX e início do século XX que a indústria ceramista no Amazonas começou a se estabelecer de forma mais estruturada. A descoberta de jazidas de argila de boa qualidade impulsionou o desenvolvimento dessa atividade. Inicialmente, a produção estava voltada para cerâmicas utilitárias, como tijolos, telhas e vasos, destinadas principalmente à construção civil e ao comércio local ^[18].

O desenvolvimento da indústria ceramista no estado tem tido renovada atenção à preservação ambiental. Com os olhos do mundo voltados a Amazônia, buscam-se práticas inovadoras de sustentabilidade em toda a cadeia produtiva. O uso de matérias-primas locais, a reciclagem de resíduos e a adoção de processos eco eficientes são algumas das estratégias adotadas para reduzir o impacto ambiental advindo destas atividades ^[19].

3.3. Aspecto Ambiental

A indústria ceramista possui impactos ambientais significativos devido aos processos de extração de matérias-primas, produção, uso de energia e gestão de resíduos. Os últimos anos trouxeram consigo um aumento na conscientização sobre a importância dos processos sustentáveis e da redução do impacto ambiental nesse

setor, ações para mitigar possíveis danos têm sido implantadas desde o planejamento de produto até o processo de transporte [20].

Uma das principais preocupações ambientais relacionadas à indústria ceramista é a extração de matérias-primas, como argila e areia. Essa atividade pode causar a degradação de habitats naturais e a perda da biodiversidade. Além disso, o transporte dessas matérias-primas também pode gerar emissões de gases de efeito estufa [21].

No processo produtivo, o consumo energético apresenta-se como um fator relevante. A indústria ceramista geralmente utiliza fornos de alta temperatura que consomem grandes quantidades de energia, seja na forma de eletricidade ou combustíveis. O uso de fontes de energia mais limpas e eficientes, como a energia renovável e a recuperação de calor, tem sido uma estratégia adotada para reduzir o impacto ambiental [22].

Além disso, a gestão adequada dos resíduos é uma questão crucial para a indústria ceramista. Durante o processo de produção, podem ser gerados resíduos sólidos, líquidos e gasosos [23]. É essencial implementar medidas para reduzir a geração de resíduos, reutilizar estes materiais sempre que possível e adotar práticas de reciclagem. O tratamento adequado dos efluentes líquidos e a minimização das emissões atmosféricas também são importantes para a preservação do meio ambiente.

Figura 2 - Chaminé de olaria no município de Iranduba. Apesar da vigência de regulações ambientais ainda é possível verificar que algumas empresas ainda as descumprem.



Fonte: Revista Cenarium Amazônia, 2020.

Outro aspecto relevante é a emissão de poluentes atmosféricos durante a queima dos produtos cerâmicos, como visto na figura 2. Essas emissões podem incluir gases tóxicos e partículas finas, que têm impactos negativos na qualidade do ar e na saúde humana. A adoção de tecnologias de controle de emissões, como filtros e sistemas de depuração, contribui para a redução desses impactos [24].

No contexto da sustentabilidade, a indústria ceramista em um aspecto mundial tem buscado a inovação e o desenvolvimento de produtos mais sustentáveis. Isso inclui a produção de cerâmicas com menor consumo de recursos naturais, como cerâmicas de alta performance que requerem menor espessura e menor quantidade de matéria-prima. Além disso, há uma demanda crescente por cerâmicas eco eficientes, que possuam maior durabilidade, sejam recicláveis ou contenham materiais reciclados em sua composição [25].

As certificações ambientais, como o ISO 14001, têm sido adotadas por empresas do ramo como uma forma de garantir e implantar práticas mais sustentáveis e transparentes em relação ao meio ambiente. Essas certificações incentivam a adoção de políticas ambientais, a melhoria contínua dos processos por ferramentas da qualidade e a redução dos impactos ambientais [26]. As indústrias ceramistas instaladas em regiões como a Amazônia enfrentam desafios e oportunidades específicos em relação ao balanço ambiental. Essas regiões possuem uma rica biodiversidade e ecossistemas sensíveis, o que torna o planejamento ambiental essencial e uma etapa complexa do planejamento fabril local.

No contexto amazônico, as fabricantes devem estar atentas à preservação da floresta e dos recursos naturais. A extração de matérias-primas deve ser realizada de forma sustentável, levando em consideração a conservação do solo, a recuperação dos recursos de áreas degradadas e o respeito às normas ambientais vigentes. Além disso, a gestão adequada dos resíduos e o controle das emissões atmosféricas são fundamentais para evitar danos ao ecossistema local [27].

No que diz respeito às políticas ESG (Environmental, Social and Governance), a indústria ceramista adapta-se a demanda crescente por práticas sustentáveis e responsáveis aliadas a integração tecnológica. As políticas ESG visam avaliar o desempenho das empresas em questões ambientais, sociais e de governança corporativa integrando-se ao conceito moderno de indústria. Para as indústrias

ceramistas, isso implica em adotar práticas que minimizem o impacto ambiental, promovam a inclusão social e garantam uma gestão transparente e ética [28].

Quando do aspecto ambiental, programas do tipo ESG incentivam a redução das emissões de gases de efeito estufa, a preservação dos recursos naturais, a adoção de fontes de energia limpa e a gestão sustentável dos resíduos, logo, com estes objetivos no horizonte; as indústrias produtoras de cerâmica são levadas a implementar tecnologias mais eficientes, melhorar a eficiência da utilização de energia nos processos e investir em inovação para desenvolver produtos mais sustentáveis [29].

Um princípio do ESG também envolve a divulgação transparente de informações relacionadas ao desempenho ambiental das empresas, permitindo que investidores, consumidores e outras partes interessadas possam tomar decisões mercadológicas com base em critérios de sustentabilidade [30].

As indústrias fabricantes de cerâmicas instaladas em regiões como a Amazônia podem se beneficiar ao adotar programas do tipo ESG como uma estratégia de negócio. Essas políticas têm o potencial de atrair investidores preocupados com a sustentabilidade, fortalecer a reputação das empresas, abrir novas oportunidades de mercado e contribuir para a conservação do meio ambiente [31].

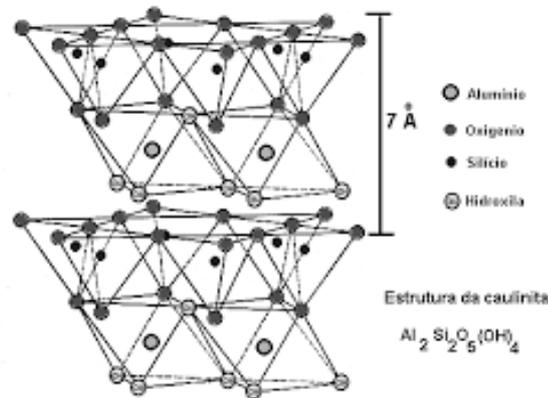
3.4. Das matérias primas

3.4.1. Argila

A argila desempenha um papel fundamental na fabricação de cerâmicas triaxiais, contribuindo com suas características mineralógicas únicas. A mineralogia se relaciona com as propriedades físico químicas da argila e o tipo de componente formado em etapas posteriores de processo determinam suas propriedades, as quais afetam diretamente a qualidade e o desempenho das cerâmicas [32].

A argila é composta principalmente por minerais argilosos, como a caulinita, a illita e a montmorilonita, que são responsáveis por suas propriedades plásticas e de ligação. A caulinita, a depender da região de estudo, é um dos minerais mais comuns encontrados na argila, conferindo estabilidade térmica e baixa retração durante a secagem e a queima das cerâmicas [33].

Figura 3 - Estrutura típica da Argila Caulinítica.



Fonte: PUC Rio, 2011.

A presença de minerais como a illita e a montmorilonita na argila confere características importantes aos produtos acabados. A illita possui uma estrutura cristalina organizada em camadas que apresenta contribuições para a plasticidade e a resistência mecânica das cerâmicas [34]. A montmorilonita, por sua vez, possui uma estrutura expansível, capaz de reter água e promover a plasticidade da argila, facilitando o processo de moldagem das cerâmicas [35].

Além da mineralogia, as propriedades físicas da argila também influenciam as cerâmicas triaxiais. A granulometria da argila, ou seja, o tamanho e a distribuição das partículas, afeta diretamente a plasticidade, a homogeneidade e a resistência das cerâmicas [36]. Uma argila com uma distribuição granulométrica adequada permite uma melhor compactação e uma menor porosidade nas cerâmicas.

A composição química dos argilominerais também desempenha um papel importante nas cerâmicas triaxiais. Elementos como alumínio, silício, ferro e outros elementos traços presentes no argilomineral podem interagir durante a queima, formando fases vitrificadas através de propriedades fundentes que conferem densidade, resistência mecânica e propriedades estéticas às cerâmicas [37].

A combinação das características mineralógicas, físicas e químicas do argilomineral permite a fabricação de fórmulas triaxiais com propriedades mecânicas, térmicas e estéticas adequadas. A escolha cuidadosa da argila, levando em consideração suas propriedades intrínsecas, é essencial para garantir a qualidade e o desempenho das cerâmicas finais.

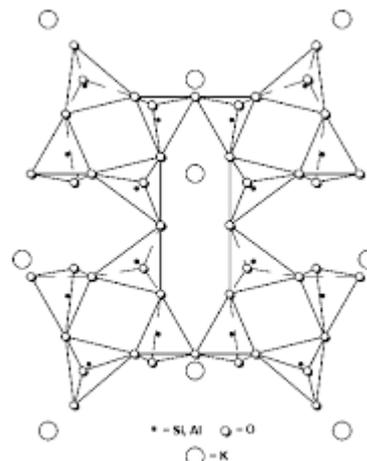
3.4.2. Feldspato

O feldspato é um componente essencial na construção de cerâmicas triaxiais, contribuindo com suas características mineralógicas e propriedades químicas. Sua presença na formulação cerâmica tem um impacto significativo nas propriedades finais do material.

O feldspato é um mineral aluminossilicato de potássio, sódio ou cálcio, que ocorre em abundância na natureza. Sua estrutura cristalina única é composta por tetraedros de silício e alumínio, ligados a íons de potássio, sódio ou cálcio [38]. Essa estrutura fornece estabilidade térmica e química às cerâmicas triaxiais, contribuindo para sua resistência e durabilidade.

Uma das principais características do feldspato é sua capacidade de formar fases vítreas durante a queima das cerâmicas. Essas fases vítreas são responsáveis pela sinterização das partículas cerâmicas, promovendo a densificação do material e melhorando sua resistência mecânica [39]. Além disso, a presença de feldspato ajuda a reduzir a temperatura de sinterização, contribuindo para a economia de energia e redução do tempo de processo [40].

Figura 4 - Estrutura típica do feldspato potássico.



Fonte: Lira, H.L.; Neves, G.A, 2013.

O feldspato também desempenha um papel importante na modificação das propriedades térmicas das cerâmicas triaxiais. Sua baixa condutividade térmica ajuda a minimizar as perdas de calor e a distribuição uniforme da temperatura durante a queima, evitando tensões térmicas indesejadas [41]. Isso é particularmente relevante em aplicações onde a resistência ao choque térmico é necessária, como em cerâmicas para revestimentos de fornos industriais.

Outro aspecto significativo do feldspato é sua interação com outros componentes da formulação cerâmica. A combinação do feldspato com argilominerais e outros componentes pode resultar em reações de formação de fases adicionais, que podem afetar a microestrutura e as propriedades das cerâmicas. Essas reações podem resultar em uma matriz vítrea homogênea, melhorando a densidade e a resistência mecânica do material [42].

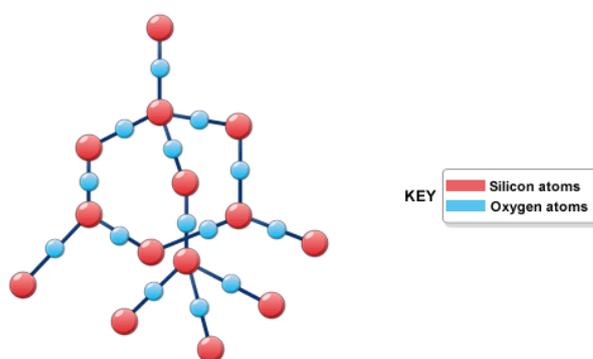
A seleção adequada do tipo e teor de feldspato na formulação cerâmica é crucial para obter as propriedades desejadas nas cerâmicas triaxiais. O feldspato possui características específicas que influenciam a fusão, a viscosidade e a cristalização das cerâmicas [43]. Além disso, a quantidade de feldspato na formulação também pode afetar a plasticidade, a resistência mecânica e a estabilidade dimensional das cerâmicas [44].

3.4.3. Quartzo

O quartzo desempenha um papel importante na construção de cerâmicas triaxiais, contribuindo com suas características mineralógicas e propriedades físicas. Sua presença na formulação cerâmica influencia diretamente as propriedades e o desempenho do material final.

O quartzo é um mineral composto de dióxido de silício (SiO_2) e possui uma estrutura cristalina trigonal. Sua alta dureza e estabilidade térmica são características marcantes, o que o torna um componente valioso nas cerâmicas triaxiais. O quartzo contribui para a resistência mecânica das cerâmicas, conferindo-lhes maior durabilidade e capacidade de suportar cargas e impactos [45].

Figura 5- Estruturação típica do quartzo.



Fonte: Nanografi, 2019.

Além disso, o quartzo possui uma baixa taxa de expansão térmica, o que significa que ele tem uma resistência excepcional a mudanças bruscas de temperatura. Essa propriedade é essencial para aplicações que envolvem exposição a altas temperaturas, como fornos industriais e revestimentos refratários [46].

Outro aspecto importante do quartzo é sua contribuição para a estabilidade dimensional das cerâmicas triaxiais. Sua presença na formulação cerâmica ajuda a minimizar a contração durante a queima e a secagem, o que é fundamental para garantir a precisão dimensional das peças cerâmicas [47].

A adição de quartzo também pode afetar a viscosidade da suspensão cerâmica, influenciando a facilidade de moldagem e conformação. O quartzo atua como um agente de reforço, melhorando a plasticidade e a resistência da massa cerâmica, permitindo a produção de peças mais complexas [48].

Além disso, a presença de quartzo na composição cerâmica pode influenciar as propriedades ópticas do material. Em cerâmicas transparentes ou translúcidas, o quartzo pode contribuir para a transmissão de luz, resultando em peças cerâmicas esteticamente atraentes [49].

A quantidade e o tamanho das partículas de quartzo na formulação cerâmica são fatores importantes a serem considerados para obter as propriedades desejadas. A granulometria e a distribuição das partículas de quartzo afetam a densidade, a resistência mecânica e a porosidade das cerâmicas triaxiais [50].

O quartzo desempenha um papel crucial nas cerâmicas triaxiais, contribuindo com suas características mineralógicas e propriedades físicas. Sua presença influencia a resistência mecânica, a estabilidade dimensional, a viscosidade da suspensão e as propriedades ópticas das cerâmicas. Compreender e controlar a presença e o tamanho das partículas de quartzo na formulação cerâmica é fundamental para garantir a qualidade e o desempenho das cerâmicas triaxiais.

3.4.4. Cinzas

As cinzas provenientes da queima de lenha, madeira de manejo, e resíduos têm sido amplamente utilizadas como componente na construção de cerâmicas triaxiais, devido às suas características mineralógicas e propriedades físicas. Essas cinzas são consideradas um subproduto da combustão da madeira e têm potencial para agregar valor na produção cerâmica.

As cinzas de madeira são compostas principalmente por óxidos inorgânicos, como sílica (SiO_2), alumina (Al_2O_3), óxido de potássio (K_2O), óxido de cálcio (CaO) e óxido de magnésio (MgO). Esses elementos são provenientes de componentes orgânicos presentes na madeira, como a lignina e a celulose [51]. A composição mineralógica das cinzas de madeira pode variar dependendo da espécie da madeira queimada e das condições de queima.

A presença desses óxidos nas cinzas de madeira confere propriedades benéficas às cerâmicas triaxiais. A sílica presente nas cinzas atua como um fundente, promovendo a fusão das partículas cerâmicas durante a queima e melhorando a densidade do material final [52]. A alumina, por sua vez, contribui para a resistência mecânica e a estabilidade térmica das cerâmicas [53].

Além das propriedades físicas, as cinzas de madeira podem apresentar efeitos interessantes no comportamento reológico das suspensões cerâmicas. Estudos têm demonstrado que a adição de cinzas de madeira em suspensões cerâmicas pode influenciar a viscosidade, a plasticidade e a reologia do material, resultando em melhores propriedades de moldagem e conformação das peças cerâmicas [54].

Outro aspecto relevante das cinzas de madeira é o seu potencial como fonte de matéria-prima sustentável. A utilização dessas cinzas na produção cerâmica promove a valorização de um subproduto da indústria madeireira, reduzindo o descarte inadequado e contribuindo para a economia circular. Além disso, a substituição de parte dos materiais convencionais por cinzas de madeira pode resultar em uma redução do consumo de matérias-primas naturais, contribuindo para a sustentabilidade do setor cerâmico [55].

No entanto, é importante ressaltar que a utilização das cinzas de madeira na produção de cerâmicas triaxiais requer estudos específicos para avaliar a composição e a influência dessas cinzas nas propriedades finais das cerâmicas. As condições de queima da madeira e a composição mineralógica das cinzas podem variar, o que pode afetar as propriedades desejadas das cerâmicas [56].

As cinzas provenientes da queima de madeira possuem características mineralógicas e propriedades físicas que as tornam uma opção interessante como componente na construção de cerâmicas triaxiais. Sua composição química, incluindo a presença de sílica e alumina, contribui para a fusão, a densidade e a resistência das cerâmicas. Além disso, as cinzas de madeira podem influenciar a reologia das

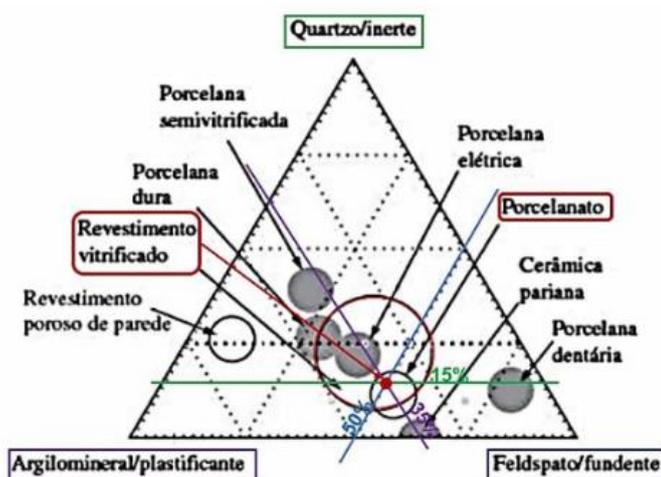
suspensões cerâmicas e têm potencial como fonte de matéria-prima sustentável. No entanto, é importante considerar as características específicas das cinzas de madeira, como a composição mineralógica/orgânica e as condições de queima, para garantir resultados consistentes e desejáveis nas cerâmicas triaxiais.

3.5. Cerâmicas Triaxiais

Determinadas cerâmicas são feitas a partir de um sistema de três elementos onde temos materiais que assumem um papel de plastificante, fluxo e material inerte. Usualmente, devido a diversas formulações e experimentos contendo estes três materiais, temos que uma boa combinação é feita entre argila (plastificante), feldspato (fluxo) e quartzo (inerte/filler). A argila atua com propriedades de moldabilidade e consolidação da massa cerâmica, o feldspato auxilia na redução do ponto de fusão e estabilização das propriedades térmicas do corpo a ser queimado e o quartzo proporciona controle dimensional e melhoramento das propriedades mecânicas da cerâmica a ser fabricada [57].

A composição de cerâmicas triaxiais pode ser manipulada com a inclusão de materiais correspondentes a região de fabricação ou a alteração dos percentuais de massa correspondentes a cada eixo, deve ser lembrado, no entanto, que modificações no espectro composicional devem ser feitas com a aplicação final em mente. A literatura dá exemplos (como na figura 6), na forma de diagramas trigonais, das diversas aplicações que podem ser atendidas por meramente alterar a composição percentual de cada elemento em uma massa triaxial [58].

Figura 6 - Exemplo de diagrama triaxial para cerâmicas.



Fonte: Norton, 1975.

3.6. Incorporação de resíduos em Massas Cerâmicas

A adição de resíduos em massa de cerâmicas triaxiais tem sido uma abordagem promissora para promover a sustentabilidade e a economia circular na indústria cerâmica. A incorporação de resíduos como matéria-prima nas formulações cerâmicas apresenta benefícios ambientais, econômicos e técnicos, desde que atendam a certos requisitos e considerações. A figura 7 apresenta diferentes insumos energéticos utilizados na queima de cerâmicas e que apresentam possibilidades de incorporação como resíduo.

Figura 7 - Exemplo de fontes energéticas do setor cerâmico e possibilidades de resíduo para uso em cerâmicas.

Gráfico 1
Distribuição relativa dos tipos de insumos energéticos utilizados pelas cerâmicas de Crato (2010)



Fonte: elaboração própria com dados da pesquisa (2010).

Fonte: Alencar-Linard et al. (2010)

Um dos principais benefícios da adição de resíduos em massa de cerâmicas triaxiais é a redução da demanda por matérias-primas naturais. A utilização de resíduos como substitutos parciais dos materiais convencionais contribui para a preservação dos recursos naturais e redução dos impactos ambientais associados à extração de matérias-primas [59]. Além disso, essa prática pode ajudar a minimizar a geração de resíduos e a diminuir a dependência de aterros sanitários.

Outro benefício é a redução dos custos de produção. A incorporação de resíduos em massa nas formulações cerâmicas pode resultar em uma redução significativa dos custos de matéria-prima, especialmente quando os resíduos são

obtidos localmente ou provenientes de processos industriais próximos. Isso pode tornar as cerâmicas triaxiais mais competitivas no mercado [60].

No entanto, a adição de resíduos em massa de cerâmicas triaxiais requer considerações e requisitos específicos. A compatibilidade química e física entre os resíduos e a matriz cerâmica é um fator essencial para garantir a integridade estrutural e as propriedades desejadas do produto final. É importante avaliar a interação entre os resíduos e os componentes cerâmicos, como a adequação das temperaturas de queima e as transformações mineralógicas que podem ocorrer [61].

Além disso, a granulometria, a distribuição e a quantidade de resíduos adicionados devem ser cuidadosamente controladas para evitar impactos negativos na homogeneidade e nas propriedades finais das cerâmicas triaxiais. A escolha do processo de incorporação, como moagem, mistura ou sinterização, também é crucial para obter uma distribuição uniforme dos resíduos na matriz cerâmica [62].

As características comuns observadas em resíduos adicionados em massa de cerâmicas triaxiais incluem a presença de elementos como sílica, alumina, óxidos de ferro, carbonatos e compostos orgânicos. Esses componentes podem influenciar as propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas, como densidade, resistência, porosidade e absorção de água. Portanto, é fundamental realizar análises detalhadas das propriedades dos resíduos para avaliar seu impacto na qualidade das cerâmicas [63].

3.7. Cerâmicas para revestimento

As cerâmicas para revestimento são materiais amplamente utilizados na construção civil devido às suas propriedades estéticas, durabilidade e resistência.

Esses materiais são projetados para revestir pisos, paredes e superfícies, proporcionando proteção, facilidade de limpeza e valor estético aos ambientes.

Uma das principais características das cerâmicas para revestimento é a sua capacidade de resistir a desgastes e abrasão. Essas cerâmicas são formuladas com matérias-primas selecionadas e submetidas a processos de fabricação específicos, como prensagem e queima em alta temperatura, que conferem a elas uma alta resistência mecânica e a capacidade de suportar cargas e tráfego intenso [64]. Além disso, a aplicação de esmaltes e acabamentos superficiais contribui para a proteção contra manchas, riscos e produtos químicos.

Outra característica importante das cerâmicas para revestimento é a sua resistência à umidade e à ação da água. Esses materiais são projetados para serem impermeáveis, evitando a absorção de água e prevenindo a proliferação de fungos e bactérias. A alta densidade das cerâmicas e a aplicação de camadas protetoras, como esmaltes e glazes, contribuem para essa resistência, tornando-as ideais para áreas úmidas, como banheiros, cozinhas e áreas externas [65].

A diversidade de formatos, cores e texturas disponíveis nas cerâmicas para revestimento é outra característica marcante. As técnicas de fabricação permitem a produção de peças cerâmicas em uma ampla variedade de tamanhos, desde pequenos mosaicos até grandes placas, além da possibilidade de criação de texturas e relevos. Isso oferece uma ampla gama de possibilidades de design e personalização de espaços, atendendo às diferentes preferências estéticas e estilos arquitetônicos [66].

Além das características estéticas e funcionais, as cerâmicas para revestimento também apresentam propriedades sustentáveis. Muitos fabricantes adotam práticas de produção ambientalmente responsáveis, como a utilização de matérias-primas recicladas, o aproveitamento de resíduos e a eficiência energética nos processos de fabricação. Além disso, as cerâmicas são materiais duráveis e de longa vida útil, reduzindo a necessidade de substituição frequente e contribuindo para a redução do consumo de recursos naturais [67].

Sendo materiais versáteis e duráveis, eles tornam-se adequados para aplicações em pisos, paredes e superfícies. Sua resistência mecânica, impermeabilidade, variedade de designs e sustentabilidade são características fundamentais que as tornam uma escolha popular na construção civil.

3.7.1. Porcelanatos

Os porcelanatos cerâmicos são revestimentos de alto desempenho amplamente utilizados na construção civil devido às suas características estéticas, durabilidade e resistência. Esses materiais são conhecidos por sua aparência sofisticada e por apresentarem uma série de propriedades técnicas vantajosas em comparação com outros tipos de cerâmicas para revestimento.

Uma das características distintivas dos porcelanatos cerâmicos é a sua composição formulaica. Esses revestimentos são fabricados a partir de uma mistura

de matérias-primas cuidadosamente selecionadas, incluindo argilas de alta qualidade, feldspatos, quartzo e aditivos. A proporção precisa desses componentes e o controle adequado do processo de produção resultam em uma massa cerâmica compacta e de alta densidade, que é responsável pela resistência e durabilidade dos porcelanatos [68].

Além da composição formulaica, a tecnologia de fabricação também desempenha um papel fundamental na qualidade dos porcelanatos cerâmicos. Esses revestimentos são submetidos a um processo de prensagem a seco, seguido de uma queima em alta temperatura, em geral acima de 1200°C. Esse processo confere aos porcelanatos uma estrutura interna densa e homogênea, tornando-os altamente resistentes à abrasão, impactos e manchas [69].

Outra característica relevante dos porcelanatos cerâmicos é a sua baixa absorção de água. Graças à sua composição e processo de fabricação, esses revestimentos possuem uma absorção de água muito reduzida, geralmente inferior a 0,5%. Essa baixa absorção garante uma alta resistência à umidade e torna os porcelanatos ideais para áreas sujeitas a altos níveis de exposição à água, como banheiros, cozinhas e áreas externas [70].

A resistência mecânica dos porcelanatos cerâmicos é outra característica destacada. Esses revestimentos são conhecidos por sua alta resistência à flexão e compressão, o que os torna adequados para aplicações em áreas com tráfego intenso, como pisos comerciais e residenciais. Além disso, a resistência aos riscos e a capacidade de suportar cargas pesadas contribuem para a durabilidade e longevidade dos porcelanatos [71].

Além disso, os porcelanatos cerâmicos também oferecem benefícios em termos de sustentabilidade. Durante o processo de fabricação, esses revestimentos podem incorporar uma porcentagem significativa de material reciclado, como resíduos cerâmicos e vidro moído. Isso contribui para a redução do desperdício e a minimização do impacto ambiental, além de possibilitar a utilização de recursos de forma mais eficiente [72]. Além disso, a longa vida útil dos porcelanatos, combinada com sua resistência e durabilidade, resulta em uma redução da necessidade de substituição frequente, gerando menos resíduos e consumo de recursos ao longo do tempo.

A qualidade e as características dos porcelanatos cerâmicos são amplamente estudadas e documentadas na literatura científica. A pesquisa aborda diferentes

aspectos, desde a formulação dos materiais até os parâmetros de processamento e propriedades finais dos revestimentos. Esses estudos têm como objetivo aprimorar a compreensão dos porcelanatos cerâmicos e otimizar seu desempenho em termos de resistência mecânica, absorção de água, resistência à abrasão, entre outros aspectos.

3.8. Experiências anteriores com a incorporação de cinzas em Massas Cerâmicas e pontos comuns

A incorporação de cinzas em massas cerâmicas para revestimento tem sido objeto de estudos e pesquisas visando explorar seu potencial como um componente alternativo na formulação de cerâmicas. Diversos estudos foram conduzidos para investigar os efeitos da adição de cinzas provenientes de diferentes fontes, como a queima de biomassa, resíduos industriais e cinzas de carvão, nas propriedades e características das massas cerâmicas.

Um estudo revisado ^[73] investigou a incorporação de cinzas de biomassa e cinzas volantes de carvão em massas cerâmicas para revestimento. Os resultados demonstraram que a adição de cinzas alterou as propriedades reológicas das massas, influenciando a trabalhabilidade e a plasticidade. Além disso, a presença de cinzas afetou a temperatura de sinterização e as propriedades mecânicas dos materiais cerâmicos.

Outra dissertação ^[74] avaliou a viabilidade técnica e a influência das cinzas provenientes da queima de resíduos do esgoto na produção de revestimentos cerâmicos. Os resultados indicaram que a adição de cinzas proporcionou melhorias nas características físicas e mecânicas dos materiais cerâmicos, como a densidade aparente, absorção de água e resistência mecânica.

Um ponto comum observado nos estudos é que a incorporação de cinzas nas massas cerâmicas pode afetar as características e propriedades dos materiais finais. A composição química das cinzas, incluindo a presença de óxidos e elementos traço, pode influenciar as reações durante a sinterização e afetar as propriedades físicas e mecânicas dos revestimentos cerâmicos.

Além disso, os estudos destacam a importância do controle adequado das proporções e das condições de processamento ao incorporar cinzas nas massas cerâmicas. A adição de cinzas em excesso pode levar a alterações indesejáveis nas propriedades das massas, tal qual excesso da formação de fase vítrea, deformações

e fragilidades estruturais, comprometendo a qualidade final dos revestimentos cerâmicos. Portanto, é essencial realizar um planejamento cuidadoso e realizar testes de caracterização para determinar as proporções ideais de cinzas a serem adicionadas nas massas cerâmicas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

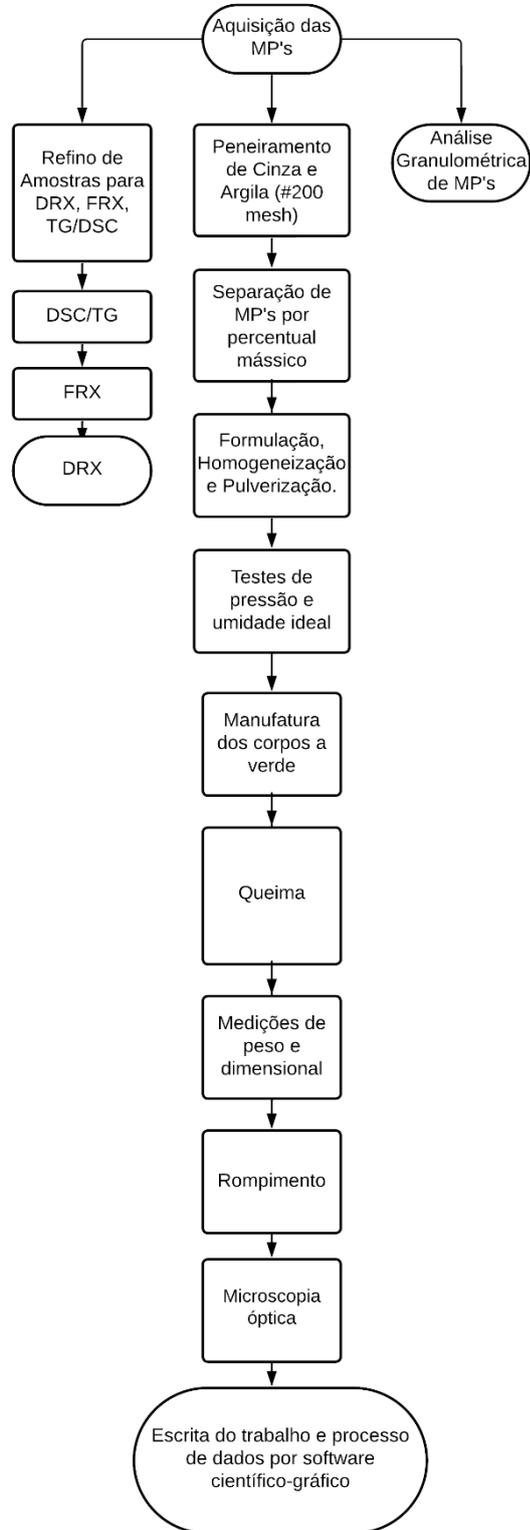
As matérias primas de escolha para o estudo em questão consistiram em argila (Pólo Cerâmico do Iranduba – Amazonas, extraída de jazida anexa a Olaria), cinzas provenientes da queima de madeira (Obtida no forno de Olaria em Iranduba – Amazonas), Feldspato (granulometria #325, Casa do Ceramista), Quartzo (granulometria #200, Casa do Ceramista), Silicato de Sódio em formato líquido (Casa do Ceramista), Carboximetilcelulose (CMC) (Casa do Ceramista) em pó e água destilada. Os instrumentos de processo consistiram em peneiras de teste em latão e aço, escovas e pincel de cerdas poliméricas, esferas de cerâmica para moinho de bolas, estufa, forno, conjunto de almofariz e pistilo, instrumentos para medição dimensional, de massa e resistência flexural.

4.1.1. Vantagens e limitações instrumentais:

Os benefícios de processo dos instrumentos disponíveis são: facilidade de acesso e convencionalidade. O maquinário utilizado para o estudo localiza-se quase que em sua totalidade no setor norte, na Faculdade de Tecnologia (FT) e Instituto de Ciências Exatas (ICE) do Campus Senador Arthur Virgílio Filho da UFAM e os que estão externos são facilmente acessíveis por meio de formulários e agendamentos, tornando o fluxo de trabalho dinâmico e ágil. Permitindo replicações deste trabalho, em tempo relativamente reduzido. As limitações se dão por conta da baixa tecnologia agregada em alguns processos, como o de análise granulométrica.

4.2. Métodos

Figura 8 - Fluxograma representativo da metodologia adotada.



Fonte: Do autor.

Os métodos dizem respeito a metodologia adotada para condução do estudo. Os quais foram sintetizados por meio do fluxograma presente na figura 8 e por meio de textos que terão por função explicar e detalhar cada processo a fim de possibilitar a replicação do estudo (guardadas as devidas particularidades de método e ambiente) em outros cenários, tanto acadêmicos quanto industriais. O fluxograma acima divide-se em três ramos de processo a partir da separação de MP's para o estudo. Cada quadrado de cantos arredondados marca um processo e as elipses marcam o processo final de cada ramo.

4.2.1. Análise de propriedades das Matérias Primas

4.2.1.1. Análise química

As matérias-primas foram submetidas a análise química para verificar sua composição percentual de elementos. O processo foi conduzido através de análises de fluorescência de raios X (FRX) no Laboratório de Físico-Química na UFAM em um equipamento de marca PANalytical no modelo Epsilon3-XL.

4.2.1.2. Análises de fases

Para a determinação das fases cristalinas presentes nos materiais foi realizado o teste de Difração de Raios X (DRX) na forma de pó, obtidos em um equipamento difratômetro de raio-X (XRD-7000 Shimadzu) com varredura contínua na faixa de 10° a 100° , ao passo de $0,02^\circ$, com velocidade de $2^\circ/\text{min}$, analisados na Central Analítica Campus Manaus Centro – IFAM. A interpretação do difratograma será feita utilizando a base de dados do International Center for Diffraction Data – ICDD.

4.2.1.3. Análise térmica

Utilizando partes das matérias primas e das formulações, foram feitas análises de calorimetria diferencial de varredura e termogravimetria (DSC-TG) no equipamento de marca TA Instruments, modelo SDT Q600 para identificar transformações físico-químicas a temperaturas final de 1200°C , com taxa de aquecimento $10^\circ\text{C}/\text{min}$ com

fluxo de gás N 5.0 de 30 ml/min, realizados no laboratório de ensaio físico-químico na UFAM.

4.2.1.4. Análise granulométrica

Com o processo de refino feito, 100 gramas foram separados de cada massa para análise granulométrica, a qual foi feita por meio da passagem dos materiais em uma sequência de peneiras analíticas, sequência esta constituída por: 50 (300 μ m), 100 (150 μ m), 200 (75 μ m), 275 (53 μ m) e 500 (25 μ m) mesh. Esta etapa foi executada no Laboratório de Pavimentação da FT – UFAM e no Laboratório de Dosagens FT – UFAM.

Figura 9 - Jogo de peneiras analíticas utilizadas para análise granulométrica.



Fonte: Do autor.

4.2.2. Refino de matéria e formulação

4.2.2.1. Processamento de argila e cinza

Após o processo e coleta para análises, foi efetuado novo peneiramento de matéria, com o mesmo setup utilizado para seleção de matérias para análises físico-químicas. Primeiro, houve separação e peneiramento de argila e cinzas, estas MP's encontravam-se em estado análogo ao *in natura*. De modo a refinar o tamanho de grão ambas foram passadas por peneira de graduação 200 mesh, a mesma utilizada para seleção dos grãos de quartzo pela empresa que o comercializa.

Figura 10 - Mostra do refino da argila. Da esquerda para a direita: contentor de amostra bruta, argila processada e peneira #200 mesh usada para o processo.



Fonte: Do autor.

4.2.2.2. Separação de MP's por percentual mássico

Pós refino, foram feitos cálculos de modo a mensurar a quantidade necessária de matéria prima para executar o estudo, cálculo baseado na quantidade de

formulações e corpos de prova por formulação. No total, cada formulação conta com vinte corpos de prova, foram feitas seis formulações, totalizando 120 CP's.

Ademais, cada CP é constituído por 13 (no máximo 13,15) gramas de matéria homogeneizada. Com isto, foram separadas as composições percentuais máximas de cada MP nas seguintes proporções:

- 546 gramas de Argila (35%);
- 780 gramas de Feldspato (50%);
- 234 gramas de Quartzito (15%);
- 156 gramas de Cinza (10%).

Totalizando 1716 gramas de MP. Em seguida, foi feita a distribuição de modo proporcional durante a fase de homogeneização da massa. Estas etapas foram executadas no Laboratório de Pavimentação da FT – UFAM e no Laboratório de Dosagens FT – UFAM.

Figura 11 - Mostra do processo de separação de MP's. Em destaque, o processo de pesagem e separação do feldspato.



Fonte: Do autor.

4.2.2.3. Formulação da massa cerâmica

A formulação da massa cerâmica padrão (FI) se deu a partir da sugestão literária (Norton, 1975). Todas essas porcentagens são em relação ao peso das massas cerâmicas, conforme Tabela 1. Após isso, as massas cerâmicas serão homogeneizadas e misturadas em processo via úmida.

Tabela 2 - Formulações de massas cerâmicas do estudo.

Identificação	Composições das matérias-primas (em peso)			
	Argila (%)	Feldspato Potássico (%)	Quartzo (%)	Resíduo de cinza de madeira (%)
FI	35	50	15	0
FII	35	50	13	2
FIII	35	50	11	4
FIV	35	50	9	6
FV	35	50	7	8
FVI	35	50	5	10

Fonte: Do autor.

4.2.3. Homogeneização e pulverização da matéria

Com o fim da análise granulométrica, iniciou-se a mistura para obtenção de pós que viriam a constituir a matéria pulverizada para confecção dos corpos de prova. Foram separadas partes proporcionais de matéria para cada uma das seis misturas, as quais foram acrescidas de 130 gramas de água, aproximadamente 130 gramas em carga de bolas de moagem, mais proporção de 0,3% de silicato de sódio, o qual atuará como defloculante, facilitando a desintegração por almofariz e pistilo em uma etapa posterior. A mistura é feita da seguinte forma: após a pesagem de cada matéria, separa-se uma quantidade de água equivalente à metade (50%) da massa que se intenciona misturar e 0,3% em peso de silicato de sódio, mistura-se inicialmente o silicato a água e é feita mistura prévia e reserva dos pós em um recipiente plástico à parte. Após as misturas em separado, a água é adicionada de modo gradual e agita-

se o recipiente (com as bolas) para promover a mistura entre o líquido e o sólido a fim de criar uma barbotina a partir da mistura.

Figura 12 - Líquido advindo do processo de homogeneização das MP's em pó.



Fonte: Do autor.

Ao se verificar homogeneidade da mistura, tampou-se o recipiente e foi feita uma agitação mais vigorosa pelo período de 15 minutos, ao final da qual, a massa foi despejada em um recipiente adequado e a matéria remanescente nas paredes e tampa do pote foi lavada com água destilada por meio de pisseta. O resultado da lavagem foi despejado no recipiente que recebe a massa.

A mistura líquida foi mantida em estufa por 24 horas a 90° graus celsius. Ao fim deste período obteve-se um torrão sólido, o qual foi desagregado em sistema de almofariz e pistilo a fim de obter matéria pulverizada a qual deve passar por um processo posterior de seleção na forma de passagem pela peneira 100 mesh. Esta etapa foi executada no Laboratório de Pavimentação da FT – UFAM.

Figura 13 - Estufa para secagem de amostras. Maquinário no qual a mistura líquida foi deixada para remoção da água por 24 horas.



Fonte: Do autor.

Figura 14 - Torrão após secagem e antes do desagregamento.



Fonte: Do autor.

Figura 15 - Pulverização do torrão.



Fonte: Do autor.

4.2.4. Testes de pressão e umidade ideal

Antes de definir a mistura definitiva em pressão e umidade, foram feitos testes de pressão e umidade ideal a fim de definir quais faixas de umidificação e prensagem retornavam o melhor resultado de compactação/densidade. Primeiramente foram empregados os testes de umidade ideal, donde foram preparados (com a massa original inalterada, isto é: 35% argila; 50% feldspato e 15% quartzo) seis corpos de prova seguindo a sequência em teor de umidade: 7, 8, 9, 10, 11 e 12% de teor de umidade e seis outros corpos de prova, seguindo a massa original com seis sequências diferentes de pressão: 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa. Esta etapa foi executada no Laboratório de Pavimentação da FT – UFAM.

4.2.5. Manufatura dos Corpos de Prova (a verde)

Com a definição dos dados ideais de umidade e pressão, ou seja, aqueles que retornariam os melhores dados de compactação e densidade. Seguiu-se a manufatura

das massas para conseguinte confecção dos corpos de prova, com adição do teor de umidade escolhido, mais 0,5% de massa constituído por CMC (carboximetilcelulose) dissolvido em água, material que serviu como agregador de partículas. Com a mistura entre os pós e a água acrescida de CMC, houve a separação das massas em pequenas porções entre 13 e 13,15 gramas com o auxílio de pequenos sacos plásticos.

A manufatura dos corpos de prova se deu com o uso de prensa hidráulica e um jogo de matrizes com cavidade dimensionada em 6 x 2 centímetros (60 x 20 milímetros). Inicialmente, montou-se a matriz encaixando as paredes na parte inferior e despejando o pó neste receptáculo, o qual foi fechado por meio do êmbolo e posicionado sob a prensa, que teve sua válvula de pressão fechada e bombeada até alcançar a pressão determinada.

Após a aplicação do esforço, houve repouso por 15 segundos. Passados os 15 segundos, retirou-se a parte inferior, colocando um receptáculo forrado para aparar a queda do corpo de prova no processo de retirada (semelhante ao de aplicação de pressão). Após a fabricação, o corpo a verde teve suas medidas e peso aferidos imediatamente para resultados otimizados. Esta etapa foi executada no Laboratório de Pavimentação da FT – UFAM.

Figura 16 - Mensuração da quantidade apropriada de massa para manufatura do corpo de prova.



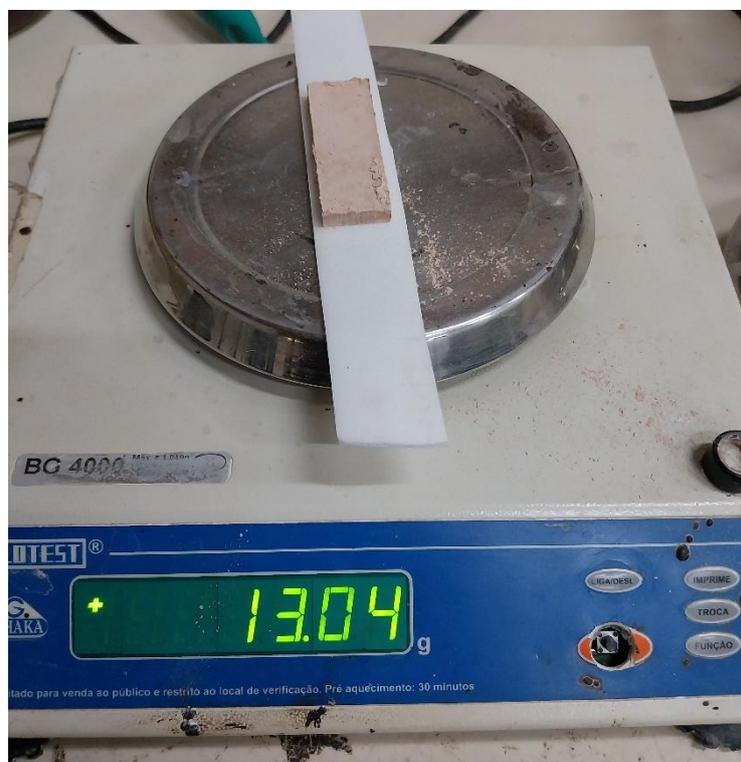
Fonte: Do autor.

Figura 17 - Pesagem do teor indicado de água + CMC para homogeneização do CP a se fabricar.



Fonte: Do autor.

Figura 18 - Corpo de prova a verde já prensado e sendo pesado pós processo.



Fonte: Do autor

4.2.6. Queima

Com o término da fabricação dos corpos a verde, eles foram movidos para bandejas metálicas (um total de quatro) e foram separados cinco corpos de prova de cada faixa mássica em cada receptáculo, os quais foram previamente secos em estufa à 90° graus celsius por 24 horas, repetiu-se então o processo de medidas e pesagem empregado nos corpos a verde para os corpos de prova já secos.

Após a secagem e medidas, os corpos de prova foram movidos para o forno onde foram queimados, de onde foram designadas quatro faixas de temperatura (1090°C, 1120°C, 1150°C e 1180°C), correspondente as quatro bandejas mencionadas anteriormente. Após a queima, os corpos cerâmicos foram movidos para os recipientes de origem, de onde foram novamente aferidos o peso e medidas, mais observações qualitativas de aspecto como cor e alterações dimensionais (diminuições, estricções, flambagens, etc.). Esta etapa foi conduzida no Laboratório de Laminação do ICE – UFAM.

Figura 19 - Bandeja com CP's separados para o processo de queima.



Fonte: Do autor

Figura 20 - Disposição dos CP's no forno de queima.



Fonte: Do autor.

Figura 21 - Bandejas com corpos já queimados e posicionados em estufa pra armazenamento. No sentido horário: 1090°C, 1120°C, 1180° e 1150°C.



Fonte: Do autor.

4.2.7. Peso úmido e peso imerso

Com o processo de aferição pós queima sendo concluído, os corpos de prova foram separados em recipientes individuais, cada um assignado a uma faixa de temperatura empregada na queima. Os corpos de prova foram dispostos de modo organizado e os recipientes foram enchidos com água destilada, de modo que estes encontrem-se imersos e possam absorver volume relevante de água por um período de 24 horas.

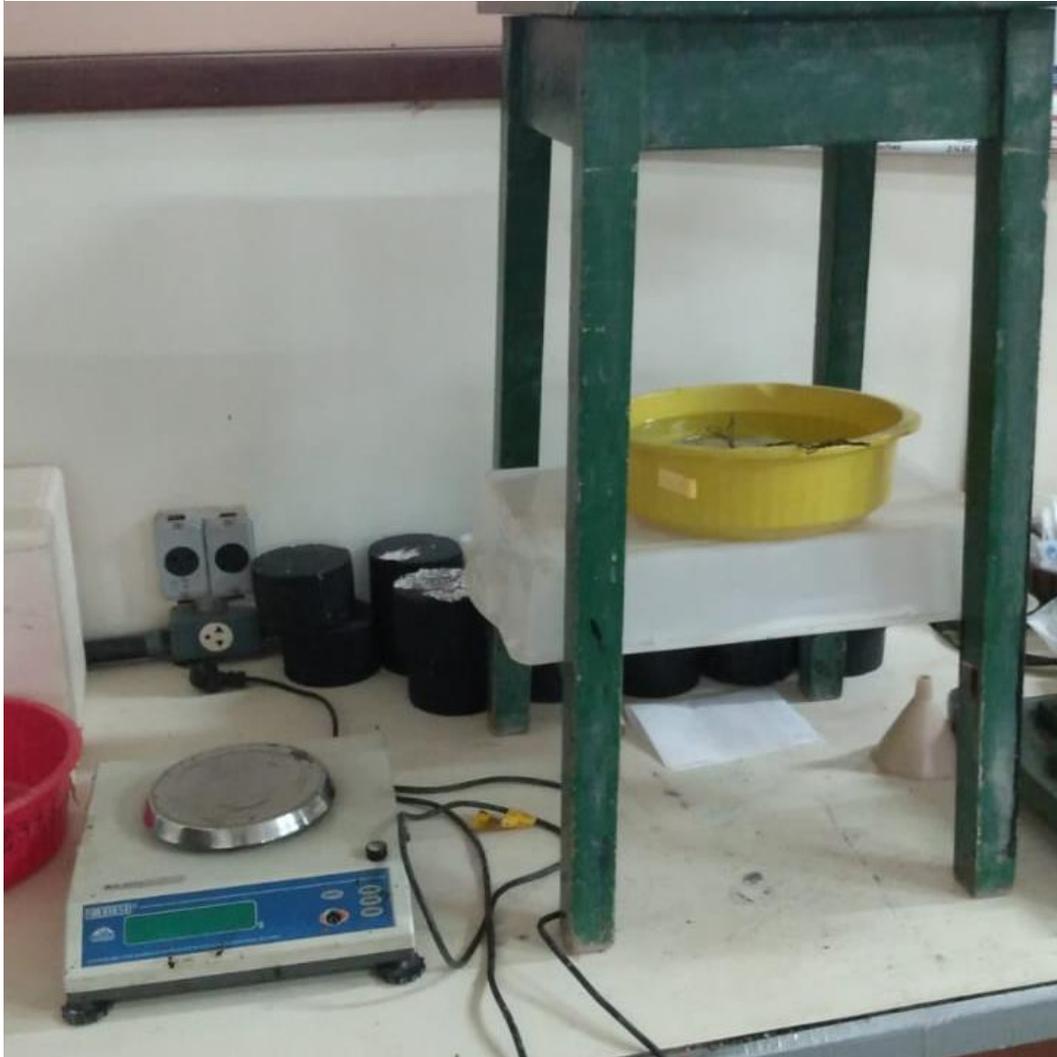
Após as 24 horas de imersão, os corpos de prova foram retirados de seu recipiente, tiveram a superfície levemente seca por meio de um pano e foram pesados. Em seguida, constrói-se um dispositivo por meio da utilização de uma banquetta com um orifício central, uma bacia d'água, uma balança e um suporte aquático, este que é destinado a aferir o peso imerso de cada corpo de prova por meio do princípio de Arquimedes. Esta etapa foi executada no Laboratório de Pavimentação da FT - UFAM

Figura 22 - Corpos de prova imersos em recipiente para absorção de água por 24 horas.



Fonte: Do autor.

Figura 23 - Setup para pesagem hidrostática dos corpos de prova. Primeiramente pesam-se os corpos saturados de água na balança. Em seguida, a balança é posta sobre a banquetela e o suporte é afixado em um gancho na parte inferior da balança.



Fonte: Do autor.

4.2.8. Rompimento

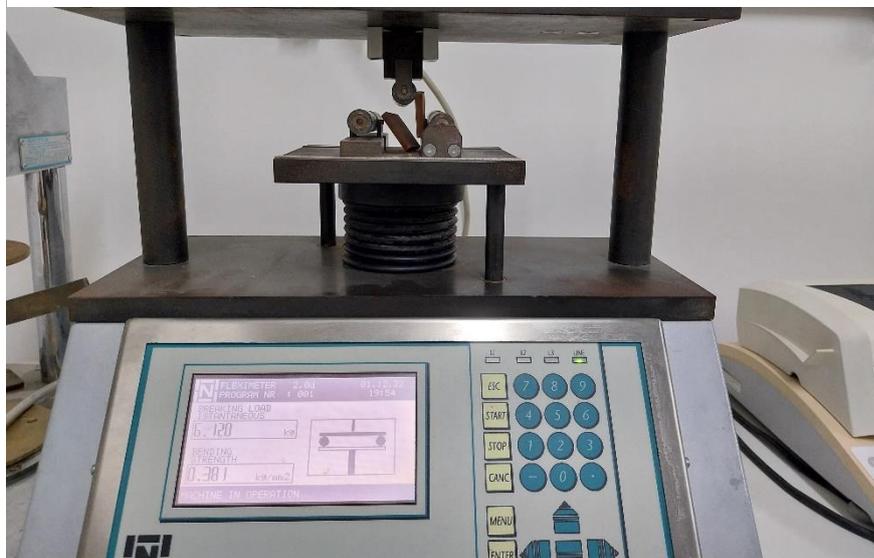
Após as aferições de peso saturado e imerso, os corpos de prova foram postos em repouso por 48 horas e ao final deste período, foram submetidos a teste de força flexural por meio do flexímetro Nannetti CC-96-2006, localizado no Laboratório de Laminação do ICE - UFAM. Os dois pontos de apoio inferiores foram colocados a distância de 2,5cm um do outro, com o programa sendo executado em kg (quilograma) para leitura e obtenção de dados para cálculo.

Figura 24 - Flexímetro ao início do processo de rompimento dos CP's.



Fonte: Do autor.

Figura 25 - Corpo de prova rompido pós aplicação de carga pelo flexímetro.



Fonte: Do autor.

4.2.9. Microscopia Óptica

A fim de analisar a organização estrutural, formação de fases e características gerais dos corpos de prova confeccionados, foi feita uma análise por microscopia

óptica em ampliações 200 e 400x. O estudo foi realizado no Laboratório de Físico-Química da FT – UFAM.

Figura 26 - Setup com microscópio e suporte para visualização de amostra utilizado no processo de microscopia óptica.



Fonte: Do autor.

4.2.10. Escrita e tratamento de dados

Após coleta de detalhes minuciosos no âmbito textual, numérico e fotográfico, o trabalho escrito foi constituído. Houve organização por tópicos, com ilustrações pertinentes mais a inserção de tabelas, quadros, gráficos e figuras relevantes para o entendimento dos dados. Os dados numéricos foram processados por meio do software Microsoft Excel e posteriormente convertidos em gráficos quando necessário por meio da utilização do software Origin.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante esta seção apresentam-se os resultados obtidos por meio da prática e confecção dos corpos de prova cerâmicos. Primeiro, apresentar-se-ão os dados em forma de tabelas ou gráficos pós processo, para que assim possa haver parâmetro no

que toca a discussão subsequente, com o propósito de entender sucessos e pontos a melhorar no trabalho em questão.

5.1. Caracterização química por FRX

O método de fluorescência de raios X (FRX) foi empregado para entendimento da composição química das matérias primas incluídas no estudo. A tabela com os resultados e a porcentagem em peso de cada elemento constituinte das MP's é como segue:

Tabela 3 - Resultado das análises químicas das matérias-primas estudadas (% em peso).

MP cerâmica (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	Na ₂ O	CaO	MnO	P ₂ O ₅	MgO	SO ₃	*PF	Outros
Argila	61,14	22,20	12,10	2,09	1,30	-	0,24	0,06	0,42	0,15	-	8,43	0,45
*Feldspato	66,40	18,20	0,05	11,20	-	3,55	-	0,02	-	-	-	0,40	0,33
Quartzo	99,80	0,15	0,02	-	-	-	0,01	-	-	-	-	0,14	0,02
*Cinza	9,64	9,28	1,15	28,35	0,22	-	40,44	0,55	1,77	4,24	3,55	17,3	0,81

*PF: Perda ao fogo, Feldspato potássico e Cinza de madeira.

Fonte: Do Autor/Laboratório de Físico-Química UFAM.

Observa-se a presença relevante de silício (Si) na Argila, no Feldspato e no Quartzo, além da presença de alumínio (Al) em grande quantidade na Argila e no Feldspato, uma quantidade razoável de ferro (Fe) na Argila e volumes relevantes de potássio (K₂O), cálcio (Ca) e Oxigênio (O) entre as cinzas, além de traços de elementos já observados em outras matérias, como SiO₂ e Al₂O₃. Feldspato e Quartzo têm baixa perda ao fogo (0,40 e 0,14% respectivamente), enquanto há uma perda ao fogo considerável por parte da Argila e da Cinza (8,43 e 17,3%).

De acordo com a literatura; SiO₂ na formulação de uma massa triaxial para revestimento pode ser utilizado para controle da retração durante secagem e queima, proporcionando estabilidade dimensional ao conjunto, além da melhora de propriedades mecânicas, proporcionando maior resistência, outra característica inerente ao SiO₂ quando presente em massas triaxiais é a participação na formação da fase líquida junto ao feldspato, criando um líquido viscoso em temperaturas de fusão.

O Al_2O_3 estabiliza reações e junto ao SiO_2 , o qual é encontrado em grandes quantidades nas matérias primas analisadas, pode formar a fase mulita. O efeito estabilizador evita o surgimento de grandes deformações e instabilidades dimensionais durante o processo da queima por meio da redução de piro plasticidade, ademais, a alumina também atua como um agente beneficiador no que concerne a melhoria de propriedades mecânicas do revestimento por conta de sua tendência estruturante.

K_2O e CaO são óxidos com efeito fundente, reduzindo a temperatura necessária para criação de fase líquida durante a queima do porcelanato, estes são óxidos alcalinos encontrados no feldspato e nas cinzas, com o Feldspato escolhido para este estudo tendo um percentual bastante interessante de K_2O e também de óxido de sódio (Na_2O) para a formulação de porcelanatos, entretanto; deve-se observar que a cinza possui teores muito maiores destes dois óxidos em sua composição química.

Em adição a estes, a Argila possui uma quantidade relevante de Fe_2O_3 , o óxido de ferro (III) possui efeito visual na composição, conferindo cores do espectro avermelhado (indo do róseo ao marrom escuro) que variam de intensidade conforme a temperatura de queima. Este óxido, de acordo com alguns autores, apresenta também característica fundente e é indesejável em determinadas fórmulas de porcelanato sob o aspecto estético ^[86].

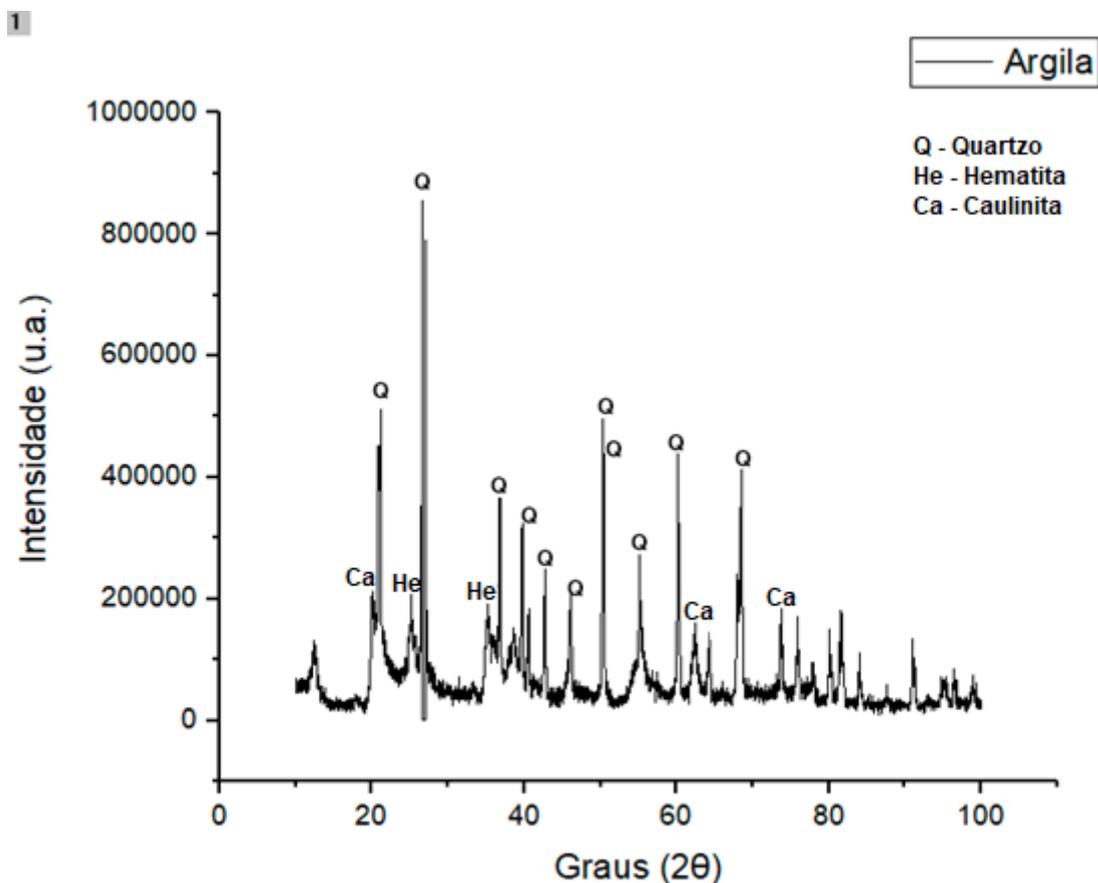
Os teores de óxidos, de acordo com a análise química encontram-se em níveis aceitáveis e padronizados conforme a literatura ^[59], prevendo uma boa formação triaxial no que toca o porcelanato vitrificado. Entretanto, é necessário direcionar atenção ao alto nível de elementos fundentes contido nas cinzas e ao nível apreciável de óxido ferro na argila, para além da questão estética (tornando a queima avermelhada ao contrário da tradicional queima clara) o óxido de ferro também pode agir como fundente e vir a causar um excesso de fase vítrea a depender da formulação na qual esteja presente.

5.2. Caracterização de fases via DRX

Para entender a composição e o comportamento de fases minerais das matérias primas, foi empregada análise por difração de raios X (DRX), análise que é

complementada pelos resultados obtidos pela análise por Fluorescência de Raios X (FRX). Os gráficos das matérias primas serão discutidas a seguir.

Gráfico 1 - Gráfico de DRX para a amostra de Argila.

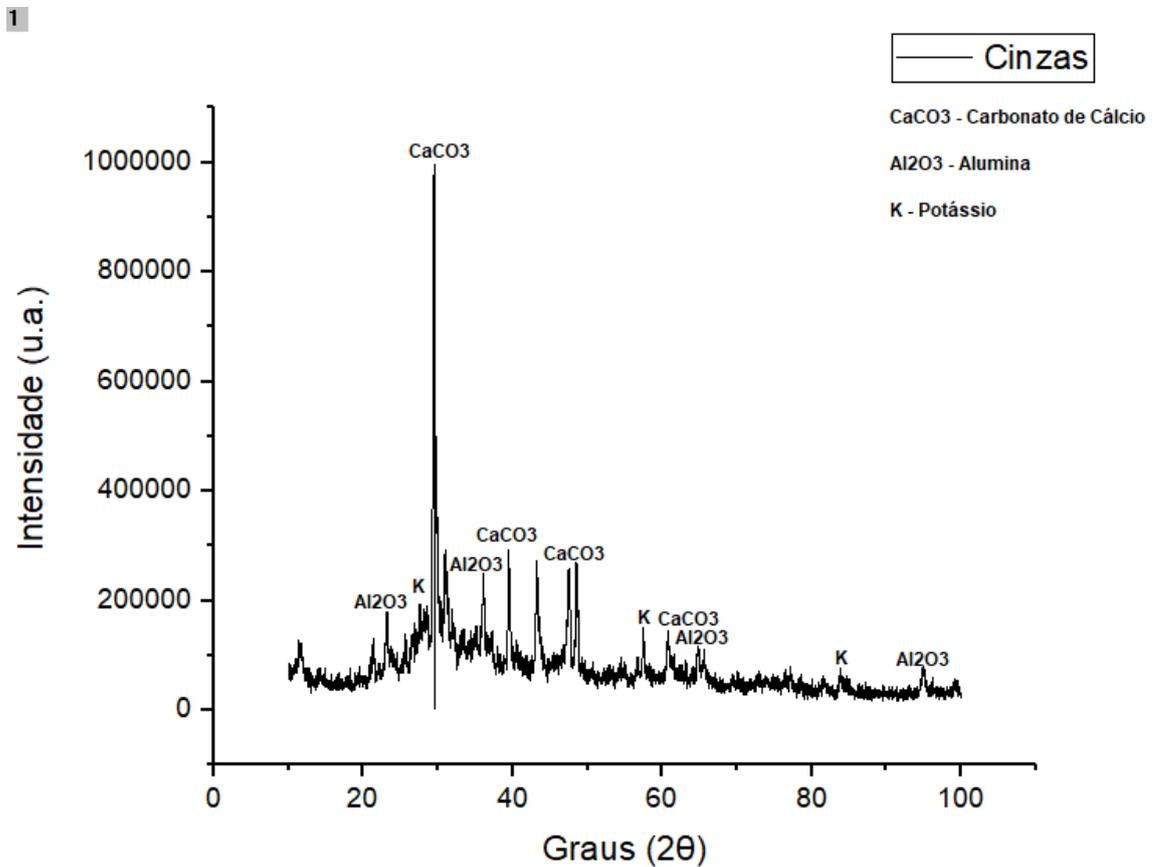


Fonte: Do autor/CMC – IFAM

O gráfico 1 para a análise da argila revela em seus picos de maior intensidade a presença de quartzo SiO_2 e compostos de silício, tal como revelado através da análise por FRX, outros picos relevantes são aqueles formados por Fe_2O_3 , apresentando-se primariamente na forma de Hematita, reforçando a presença de ferro em seu estado oxidado e sendo responsável pela coloração avermelhada/rósea vista na matéria prima pré processada. A parte destes há alguns picos que cuja fase é característica de Al_2O_3 e uma menor concentração de elementos que podem ser considerados como 'traço'. Há indicação de que a presença relevante de SiO_2 e Al_2O_3

indica que esta argila pode ser Caulinítica. Hipótese reforçada pelos resultados de FRX e a semelhança do gráfico de DRX com os de outras amostras Cauliníticas [48].

Gráfico 2 - Gráfico de DRX para a amostra de cinza



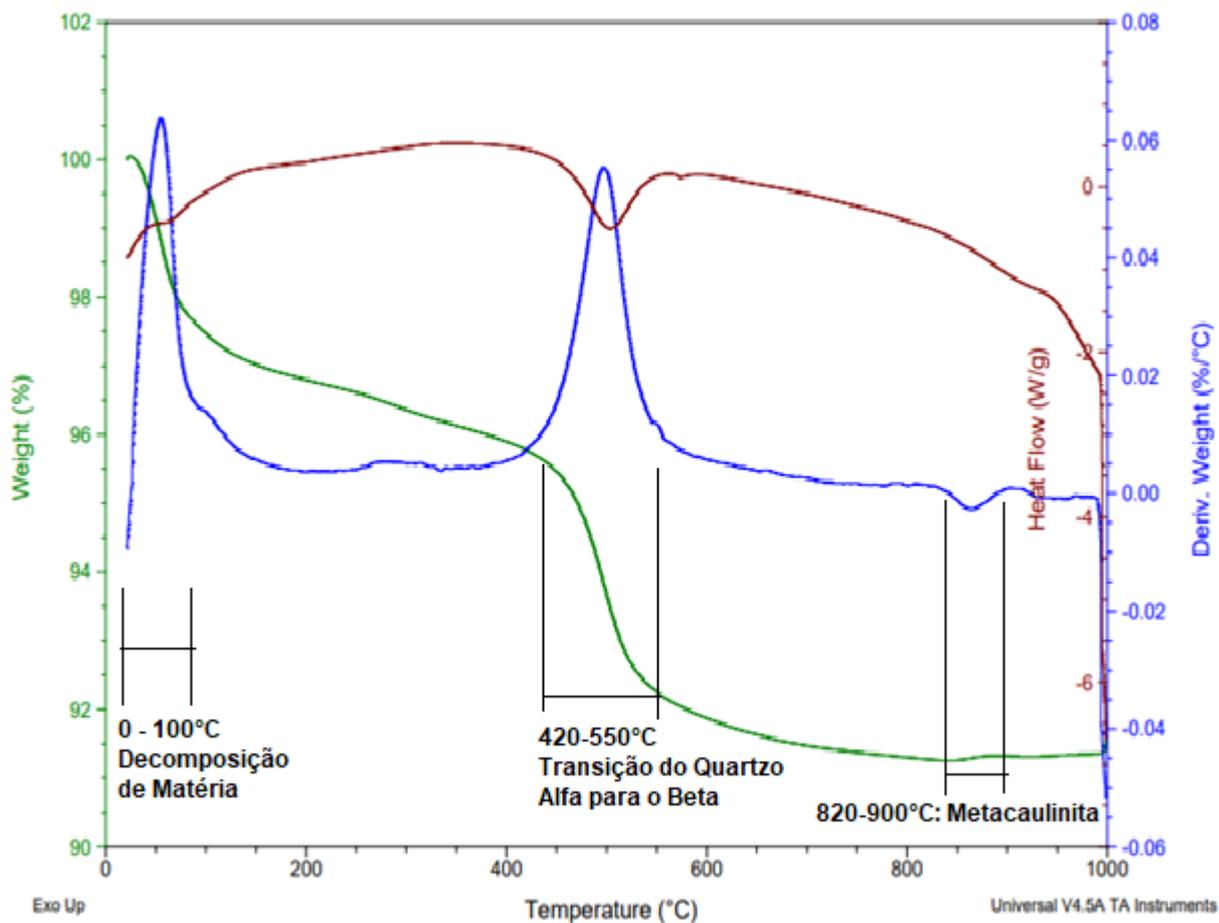
Fonte: Do autor/CMC – IFAM

A amostra de cinza revela predominância de carbonato de cálcio CaCO_3 , revelando a possibilidade que o óxido de cálcio tem de formar um carbonato através de reações com outros elementos constituintes da cinza. Em menor escala temos picos formados por Al_2O_3 e K, dois elementos com participação razoável na constituição mássica da matéria prima analisada por este gráfico. Elementos de menor participação na massa devem ser considerados como contaminantes advindos do modo de retirada empregado para obter as cinzas [79].

5.3. Análise térmica

A análise térmica foi conduzida em amostras de argila e cinza a fim de entender seu comportamento mediante aquecimento. As curvas obtidas foram como seguem:

Gráfico 3 - Curva TG/DSC para argila.

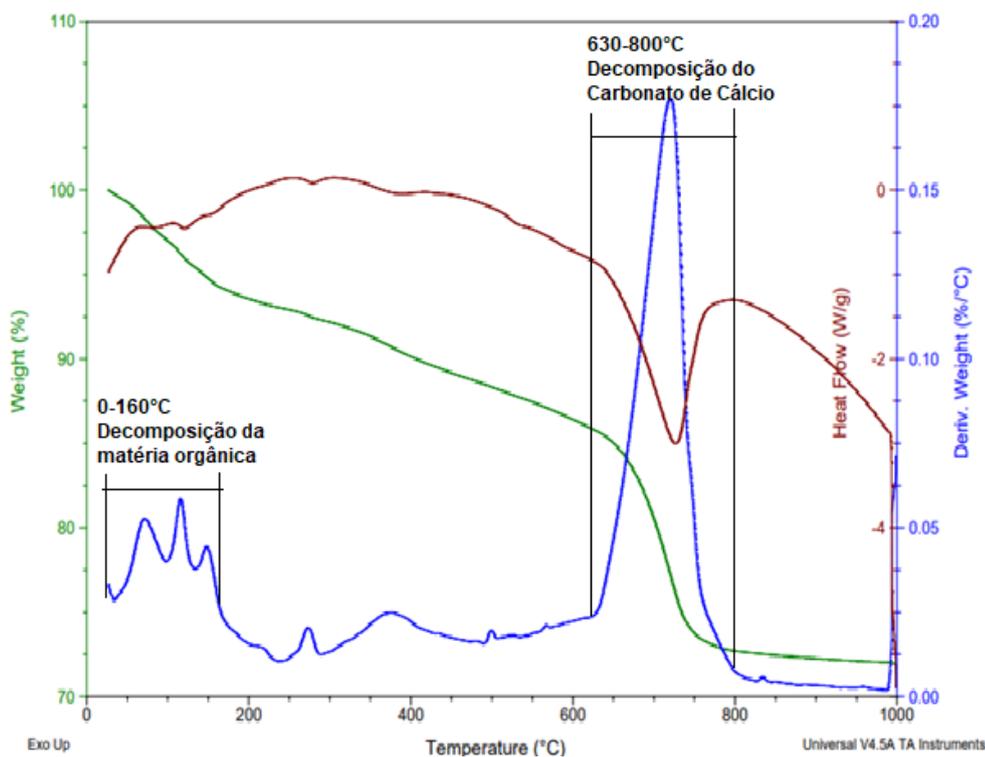


Fonte: Do autor/ Laboratório de Físico-Química - UFAM

No gráfico de TG/DSC para a argila, vê-se dois picos endotérmicos e um pico exotérmico ao final, bastante discreto. Estes podem ser descritos da seguinte forma: o primeiro pico, situado entre 0 e 100 °C diz respeito ao início da decomposição de matéria orgânica e componentes com baixa temperatura de decomposição presentes na argila e esta tendência é acompanhada por uma diminuição no peso, correspondente ao fenômeno assinalado pelo primeiro pico. No segundo pico, entre ~420 °C e 550 °C, vemos a representação da mudança de fase do Quartzo, de α para β , coincidindo novamente com um decréscimo do peso da amostra, sendo este mais acentuado que outras quedas de peso no gráfico. O pico exotérmico entre 820 °C e 900 °C assinala a formação de Metacaulinita por meio da desidroxilação. No geral, a

forma das curvas apresentadas apresenta boa correspondência com amostras de caulinita, não apenas na aparência, como também no comportamento, temperaturas de ocorrência dos picos e no percentual de perda de massa. A análise conjunta dos métodos de FRX, DRX e TG/DSC permite visualizar que a argila utilizada para formulação dos CP's é uma argila de natureza caulínica com adição de Fe_2O_3 .

Gráfico 4 - Curva TG/DSC para cinza.



Fonte: Do autor/ Laboratório de Físico-Química - UFAM

Quanto a cinza, vê-se um número alto de picos. A série de picos entre 0°C e 160°C assinala a perda de água e de matéria orgânica com menor temperatura de decomposição, o pico mais relevante após a série de pequenos picos entre 0°C e 550°C localiza-se entre ~630°C e 800°C. Em cinzas de origem vegetal, estudos apontam que este pico corresponde a decomposição de CaCO_3 , com a liberação de CaO e CO_2 . Como em argila, o gráfico obtido para as cinzas é similar em forma e comportamento a outras análises térmicas performadas no mesmo tipo de resíduo.

Todavia, observam-se duas peculiaridades: O número grande de picos logo no início da análise junto a alguns picos diminutos antes da decomposição da Calcita, usualmente outros gráficos que analisaram cinza proveniente de madeira utilizada

como lenha apresentaram regularidade maior de picos. O segundo ponto a se ressaltar é a grande perda de massa, foi observada uma redução muito maior do que as apresentadas em outros gráficos presentes na literatura. Estes pontos podem ser explicados por uma maior presença de componentes orgânicos na cinza.

5.4. Análise granulométrica

Foi feita uma análise granulométrica nos materiais. Para tanto, colheram-se amostras representativas com peso de 100g de cada uma das matérias primas e foi executado processo de peneiramento através de um jogo de peneiras com as graduações: #48, #100, #200, #270 e #500 Mesh. Foram pesadas as frações retidas e passantes de cada material e os dados foram processados em forma de tabela e gráfico.

A granulometria das partículas tem importância na manufatura de matéria cerâmica, influenciando a densificação, agregamento das partículas, melhorando a distribuição de propriedades físico-químicas pela extensão do corpo de prova, com todos estes aspectos proporcionando um produto de maior qualidade. As frações mássicas das matérias pós processo são como segue:

Tabela 4 - Resultado da análise granulométrica.

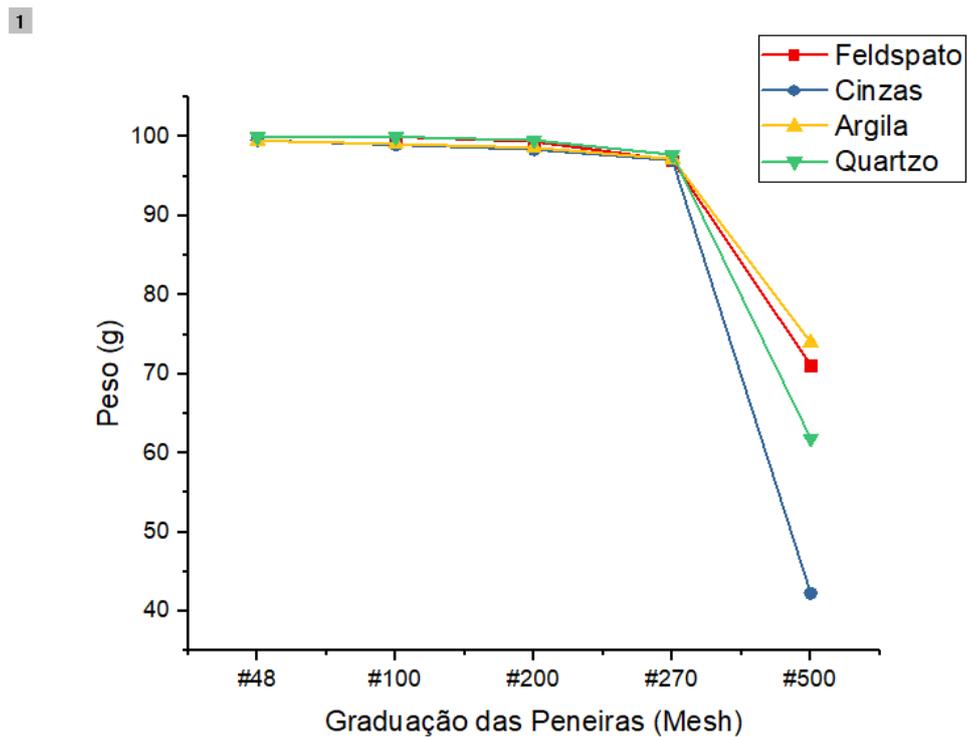
Resultados das peneiras (passantes)				
Peneiras (Mesh)	Feldspato (g)	Cinzas (g)	Argila (g)	Quartzo (g)
#48	100	99,5501	99,5213	100
#100	100	99,0021	99,0940	100
#200	99,4097	98,4021	98,6127	99,5700
#270	97,0350	97,0521	97,2121	97,7538
#500	71,1091	42,2518	73,9863	61,8434
Resultado das peneiras (retidos)				
Peneiras (Mesh)	Feldspato (g)	Cinzas (g)	Argila (g)	Quartzo (g)
#48	0	0,4499	0,4787	0
#100	0	0,5480	0,4273	0
#200	0,590	0,6000	0,9647	0,4300
#270	2,3747	1,3500	1,4006	1,8162
#500	25,9259	54,8003	23,2258	35,9104
Acúmulo dos retidos				

Peneiras (Mesh)	Feldspato (g)	Cinzas (g)	Argila (g)	Quartzo (g)
#48	0	0,4499	0,4787	0
#100	0	0,9979	0,9060	0
#200	0,590	1,5979	1,8707	0,4300
#270	2,9647	2,9479	3,2713	2,2462
#500	28,8906	57,7482	26,4971	38,1566

Fonte: Do Autor/Laboratório de Pavimentação UFAM.

E os gráficos advindos da tabela são:

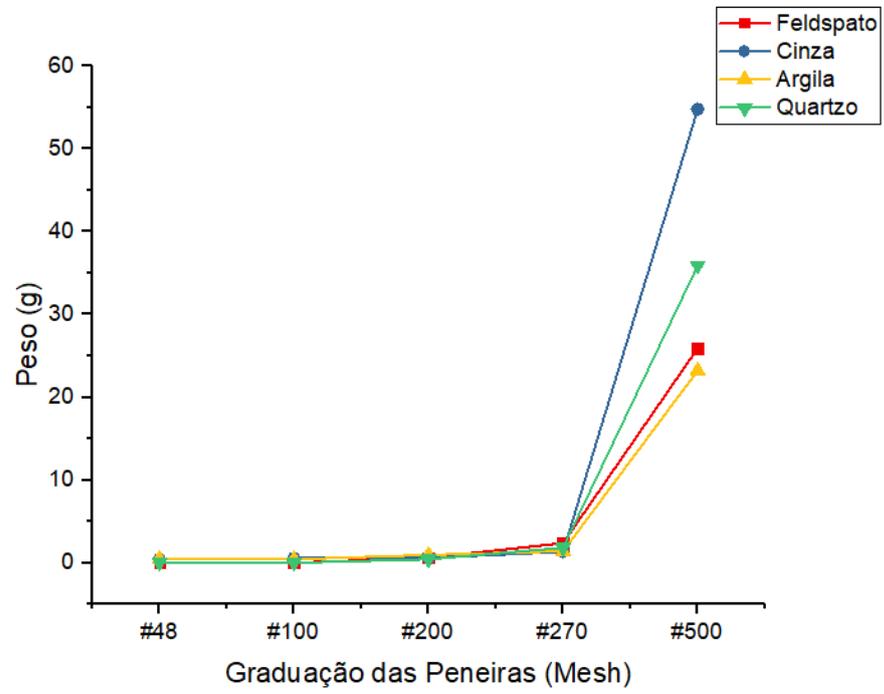
Gráfico 5 - Distribuição granulométrica passante das matérias primas.



Fonte: Do autor

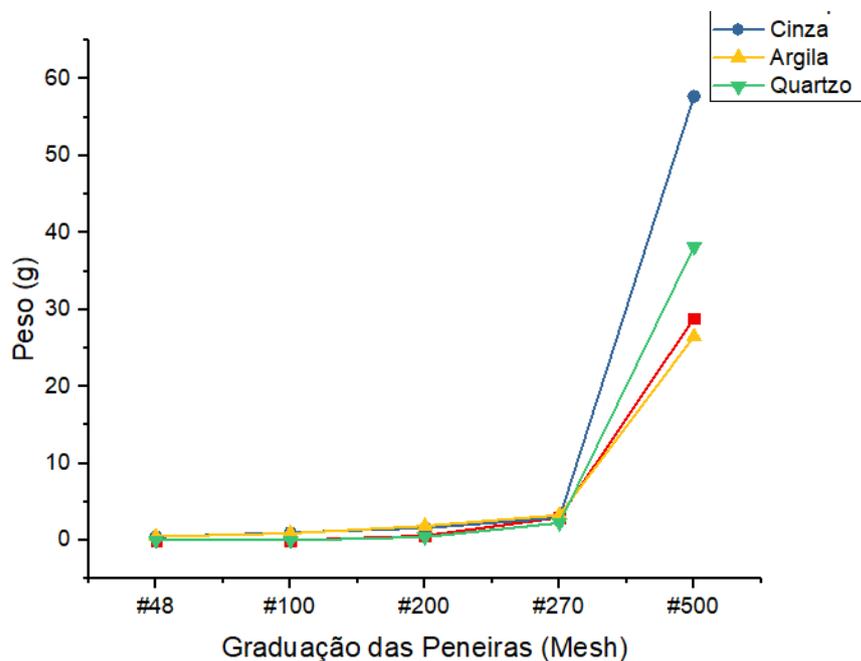
Gráfico 6 - Distribuição granulométrica retida das matérias primas.

1



Fonte: Do autor

Gráfico 7 - Distribuição granulométrica de retidos acumulados das matérias primas.



Fonte: Do autor

No geral, a análise dos resultados de FRX, DRX e TG/DSC para a Argila evidenciam que esta é uma argila do tipo caulinítica. argilas cauliníticas são desejáveis nas formulações cerâmicas devido a boa estabilidade estrutural após queima, boa plasticidade durante a fase de conformação e confecção cerâmica e conferência de resistência mecânica e química ao produto acabado [75], é, no entanto, desejável que estas argilas estejam livres de componentes colorantes (como o Fe_2O_3).

A presença majoritária de SiO_2 , Al_2O_3 e elementos fundentes em menor composição, são outras pistas relevantes do caráter caulinítico da Argila escolhida para o estudo [76]. Deve-se atentar para a presença relevante de Fe_2O_3 , esta é geralmente indesejada junto as argilas cauliníticas, pois em questão estética é preferível que o produto da queima seja branco ou de cores claras, para além disso este elemento pode atuar como fundente [77]. É um ponto que leva a cuidados ao considerar que a cinza já possui certa concentração de fundentes e que o conteúdo de feldspato da massa já é relativamente alto.

Outra conclusão sobre a caracterização das MP's é que as cinzas também seguem resultados comuns da bibliografia. Com altos teores de CaO e K_2O , mais outros elementos traço [78], outro ponto que chama bastante a atenção é a riqueza de elementos fundentes. De acordo com outros estudos [84] [87] [90] a adição de resíduo em

formato de cinzas em massas de porcelanato é benéfica no sentido de aumentar a resistência mecânica, a densidade dos corpos e diminuir a temperatura de queima [79]. Contudo, é preciso prestar atenção no alto teor de fundentes, ainda mais considerando que o Feldspato continuará com o mesmo teor por todas as formulações e o mesmo já possui quantidades razoáveis de elemento fundente.

Quanto ao estudo de granulometria, temos uma boa distribuição de grãos entre as amostras, sem um comportamento particularmente dissonante por parte de nenhuma MP. O que foi de grande auxílio nas etapas de homogeneização, tanto na criação da base pulverizada para os CP's quanto na conformação dos mesmos durante a fase verde. A granulometria é um critério importante para a qualidade de cerâmicas, para porcelanatos, é ideal que o tamanho de partículas se encontre entre 10 a 30 μm [80], granulometrias menores levam a maior rapidez de reação, contudo, deve-se atentar ao caso de serem empregados excesso de finos, o que levará a uma reação de difícil controle [81].

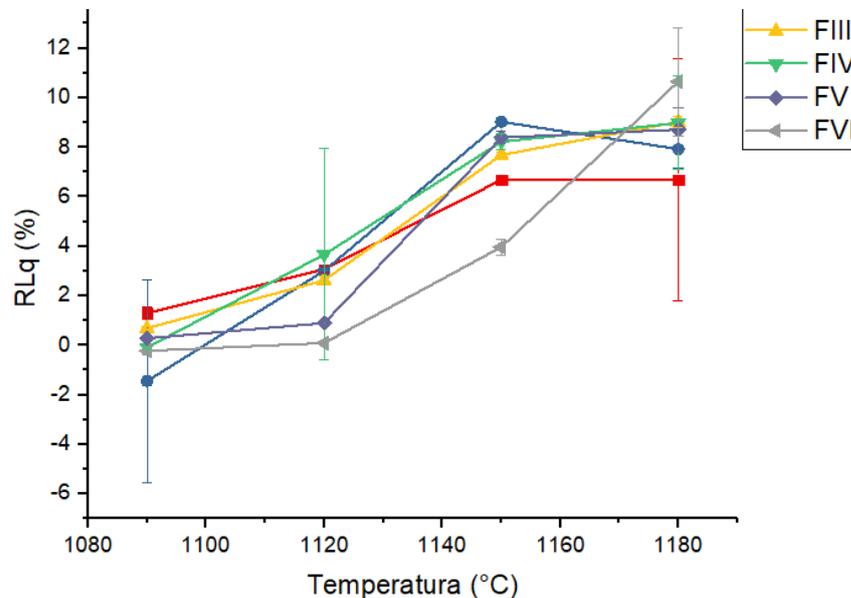
No estudo, as partículas estão distribuídas majoritariamente entre as faixas #200 e #320 mesh. Estado atribuído ao pré processo de Argila e Cinza nas peneiras #200 mesh pelo autor e pela obtenção comercial de Quartzo e Feldspato pré processados (em #200 e #320 respectivamente). Em termos de μm , temos que as partículas estão contidas entre 74 e 44 μm . A formação de trincas e outros defeitos nestas dimensões de grão são gerenciáveis, de fato #200 mesh é um padrão de indústria para partículas formadoras de barbotina [82], mas para a garantia de melhores resultados, seria melhor que os teores necessários de MP's fossem totalmente passantes pela peneira 500 mesh, de modo a certificar que as partículas se encaixem no range teórico de 10-30 μm .

5.5. Retração Linear Pós Queima

Após a queima, as dimensões dos corpos de prova em cada faixa de temperatura foram mensuradas a fim de obter o percentual de retração linear apresentado, não apenas por faixas de temperatura, mas pelas seis formulações determinadas. As quais serão representadas por seis linhas individuais, representativas de seus desempenhos.

O gráfico de Retração Linear Pós Queima (RLq [%]) é como segue:

Gráfico 8 - Resultados da Retração Linear Pós Queima (%) dos corpos de prova.



Fonte: Do autor.

As curvas demonstram o comportamento de retração de cada uma das formulações. O maior índice de contração é apresentado pela formulação VI, à 1180°C e as fórmulas III, IV e V em seguida, entretanto, deve-se observar o índice alto de retração apresentado pela fórmula II, que chegou a ser o maior de todos na temperatura de 1150°C, comportamento inesperado por esta fórmula apresentar a menor concentração de cinza entre as massas que receberam este novo componente de fórmula. O desvio padrão permite visualizar que houve melhor controle dimensional na temperatura de 1150°C.

Comparando os resultados aos de estudos similares e normas relevantes [83]. A retração da massa estudada obteve níveis aceitáveis e em linha com estudos de conteúdo similar, onde são citados percentuais máximos de retração entre 8 e 9% como os percentuais máximos que devem ser apresentados pelos CP's [84][85]. Neste sentido, a maior parte das formulações obedece a este critério através das temperaturas de processo, com apenas a FVI atingindo um índice de retração linear considerado excessivo de 10,372% na temperatura de queima de 1180°C.

O aumento do percentual de cinza na formulação seguido do aumento de temperatura apresenta, na maioria das curvas, uma tendência ao aumento da retração linear, com a única exceção sendo apresentada pela FII. A decomposição de matérias orgânicas, de água, da própria parte da cinza e a atuação dos fundentes presentes na cinza podem ser responsáveis pelo fenômeno observado. Há de se explicar, no

entanto, o comportamento da curva de FII, com o descréscimo de RLq ao final da curva, uma hipótese possível pode ser início e, por consequência, um encerramento precoce dos efeitos da cinza no que tange a influência desta MP em RLq, uma evidência favorável desta hipótese é o formato da curva.

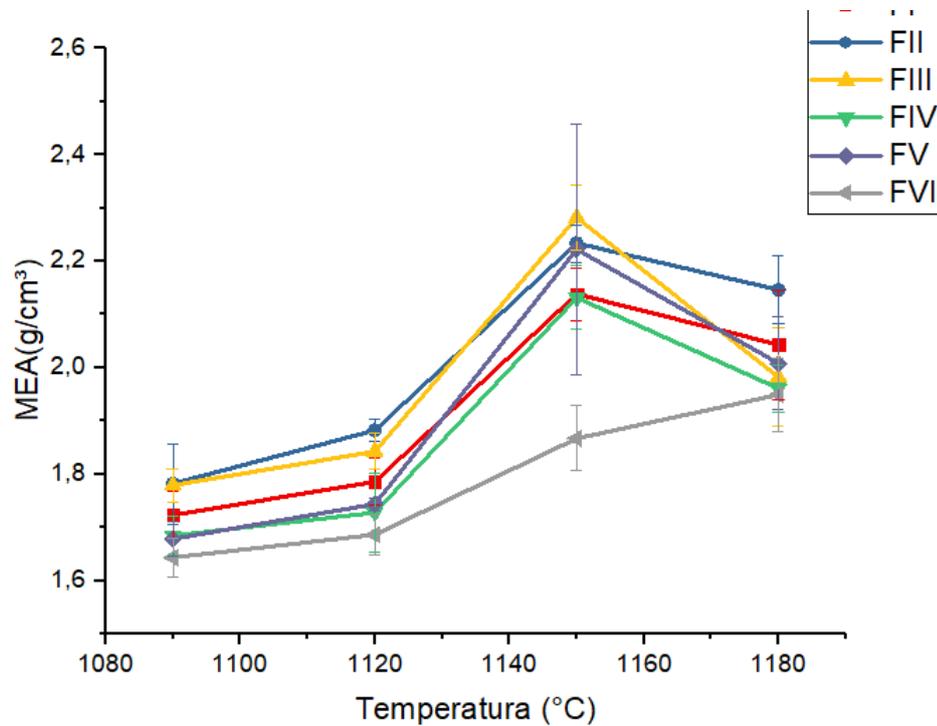
Outro comportamento de curva interessante e que merece destaque é o de FVI, o qual se assemelha a uma exponencial. De 1080° até 1150°C, os índices de RLq para esta formulação foram menores do que o de todas as outras fórmulas, nomeadamente, as médias de RLq para cada temperatura em FVI foram: -0,225; 0,078; 3,927; 10,372. Este comportamento pode se relacionar ao teor 'excessivo' de cinzas na massa, com maior dificuldade de processo ao início, porém gradualmente desencadeando reações muito rápidas, tendência que seria interessante de se observar em temperaturas maiores de processo (de 1200° até 1300°C por exemplo).

A curva da FI, a Formulação padrão, sem a adição de cinzas em detrimento do Quartzo, exibiu comportamento semelhante as outras curvas, com aumento da retração conforme a temperatura, mas em índices relativamente menores e com aumento tímido da retração final, fornecendo outra confirmação de que as cinzas agem como um potencializador do parâmetro de retração junto a temperatura de processo.

5.6. Massa Específica Aparente (MEA)

A Massa Específica Aparente, também podendo ser denominada por densidade, é um parâmetro relevante na formulação de corpos cerâmicos, implicando em um produto com menos vazios e poros em sua estrutura, levando a maior qualidade do produto manufaturado. Através da medição das dimensões e do peso dos corpos de prova pós queima, pôde-se estudar as alterações na densidade dos mesmos e o efeito que as diferentes formulações e temperaturas de queima exerceram na fabricação dos CP's. O gráfico de Densidade pós queima é como segue:

Gráfico 9 - Resultados da Massa Específica Aparente pós queima (%) dos corpos de prova.



Fonte: Do autor.

No geral as curvas mostraram que as formulações tendem a apresentar uma densificação crescente até 1150°C, tendo uma queda no índice percentual a partir de 1180°C, as exceções a esta observação, são a FI e a FVI. Estas apresentam um comportamento mais modesto em relação as suas contrapartes, mas sua densificação continua crescente em 1180°C.

Seria padrão aumentar a densidade conforme o aumento de temperatura, entretanto, há presença de elementos alcalinos e orgânicos advindos da cinza que se decompõem com a temperatura e formam gases e poros [85], o que fornece contexto a queda abrupta do parâmetro na temperatura final do ensaio, este mais outros fenômenos como mudanças de fase podem auxiliar o entendimento do comportamento apresentado pelas formulações. O comportamento dissonante por parte de FVI pode ser entendido da mesma forma que em RLq, maior tempo de processo das cinzas devido a um excesso em seu percentual, o que talvez possa levar a resultados semelhantes ao das outras curvas somente em temperaturas mais altas de processo.

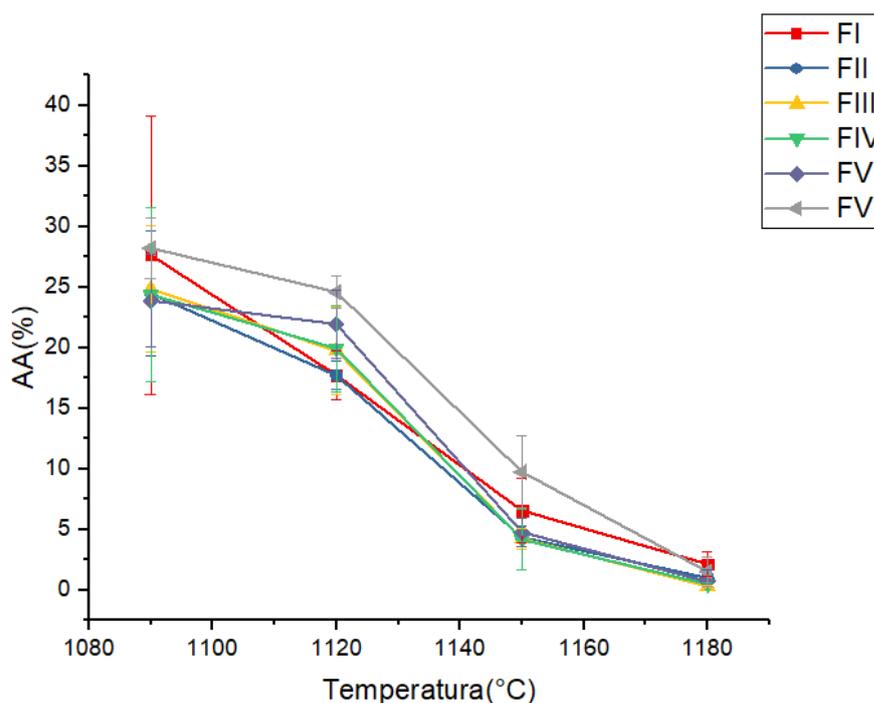
O parâmetro MEA passa a atender a norma europeia CEN-EN 87 a partir da temperatura de 1150°C. Esta dita que placas de revestimento da categoria grés

porcelanato devem possuir massa específica aparente maior que $2,0\text{g/cm}^3$ [87], apenas FVI (em 1150°C), FIII e FVI (as duas últimas em 1180°C) não superam ou ao menos igualam o número estabelecido.

5.7. Absorção de água

A absorção de água é um dos critérios patentes na fabricação de materiais cerâmicos a depender de sua aplicação. É extremamente relevante em pisos e revestimentos cerâmicos por determinar sua interação com o líquido e comportamentos advindos desta, como fragilidade. Este dado pode determinar a classificação de um revestimento entre porcelanato e poroso. Este critério foi calculado com base no peso dos CP's, a seco e saturado. O gráfico de absorção de água é como segue:

Gráfico 10 - Resultados da Absorção de água (%) dos corpos de prova.



Fonte: Do autor.

Os CP's absorvem menos líquido conforme densificam, no geral, é observado um comportamento desejado onde há um menor percentual de absorção de água conforme aumenta a temperatura de queima. Em alusão ao estudo de MEA, massas com teor intermediário de cinzas apresentam melhor desempenho, absorvendo menos líquido e, na última temperatura de queima (1180°C) os CP's apresentaram

um comportamento desejável de absorção, com seus percentuais variando entre a classificação semi-grés e porcelanato. Em 1150°C, vêem-se desempenhos esperados de pisos semi-porosos a grés e em 1090°C e 1120°C temos que os corpos de prova têm o desempenho esperado de um revestimento poroso. As menores variações são atestadas em 1180°C.

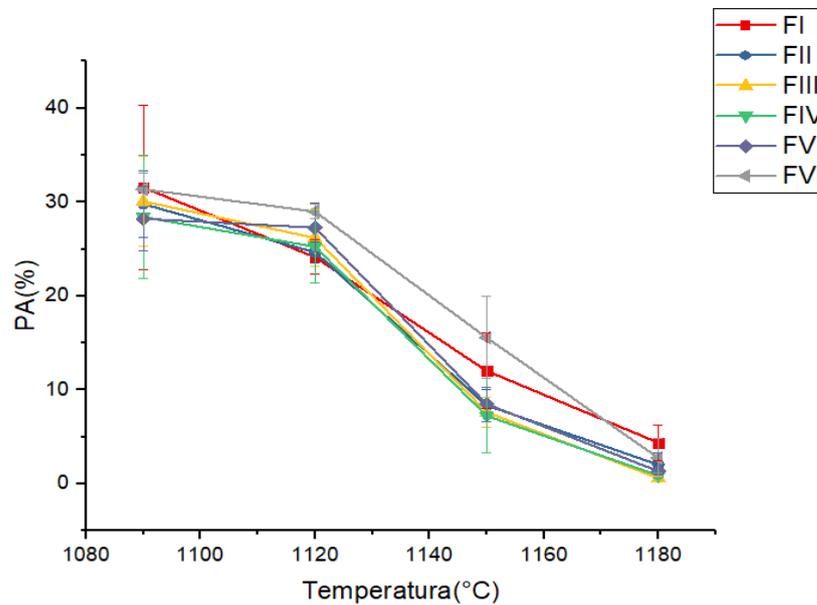
Todas as formulações apresentam comportamento decrescente de absorção de água, com os menores percentuais sendo obtidos nas duas últimas temperaturas de queima. A formação de fase líquida, a vitrificação, o empacotamento estimulado pela sinterização e o preenchimento das cavidades são responsáveis pela menor absorção de água conforme o aumento de temperatura e no gráfico que representa os CP's deste estudo, as curvas das formulações apresentam-se bem próximas, denotando um comportamento uniforme no que toca a redução de absorção de água conforme o aumento de temperatura.

O acréscimo de cinza leva a um maior percentual de elementos fundentes na amostra, acelerando a reação de vitrificação e aumentando o volume de fase líquida. A curva de FI mostra percentuais maiores de absorção de água em relação as Formulações dotadas de cinza. A FVI assim como em outros gráficos mostra reação mais lenta, mas ainda assim obtém índice de absorção de água menor do que o de FI em 1180°C. De acordo com as normas competentes ^{[88][89]}, todas as formulações em 1180°C podem ser consideradas grés ou porcelanato, em 1150°C as formulações apresentam comportamento que varia do semi-grés ao semi-poroso. Antes dessas faixas, em 1090 e 1120°C, todas as formulações comportam-se como revestimento poroso.

5.8. Porosidade aparente

Porosidade aparente trata-se de um critério que se relaciona fortemente com densidade e absorção de água, a porosidade aparente é a razão entre espaços vazios, os poros, e a distribuição de massa nos CP's. Sua aferição foi feita a partir das medições de peso seco, imerso e saturado. O gráfico de porosidade aparente é como segue:

Gráfico 11 - Resultados da Porosidade Aparente (%) dos corpos de prova.



Fonte: Do autor.

O comportamento é semelhante ao gráfico de absorção, com melhora das propriedades conforme aumento da temperatura. É também semelhante no que concerne as massas com melhor desempenho, sendo que as de teor intermediário de cinza se saíram melhor em relação a outras formulações. Resultado que alude a uma boa formação de fase líquida para preenchimento de cavidades e integridade geral do corpo de prova. As menores variações são atestadas em 1180°C.

Observa-se novamente que as curvas possuem traçados bastante próximos, a exceção das curvas representativas de FI e FVI, contudo todas seguem um padrão geral de diminuição da porosidade conforme aumento da temperatura. Em relação a fórmula padrão, a adição de cinza faz com que a redução de porosidade dos CP's seja mais acentuada, ainda que FVI apresente uma dificuldade maior de reação que faz com que sua PA apenas seja marginalmente menor do que FI em 1090°C e apreciavelmente menor a partir de 1180°C.

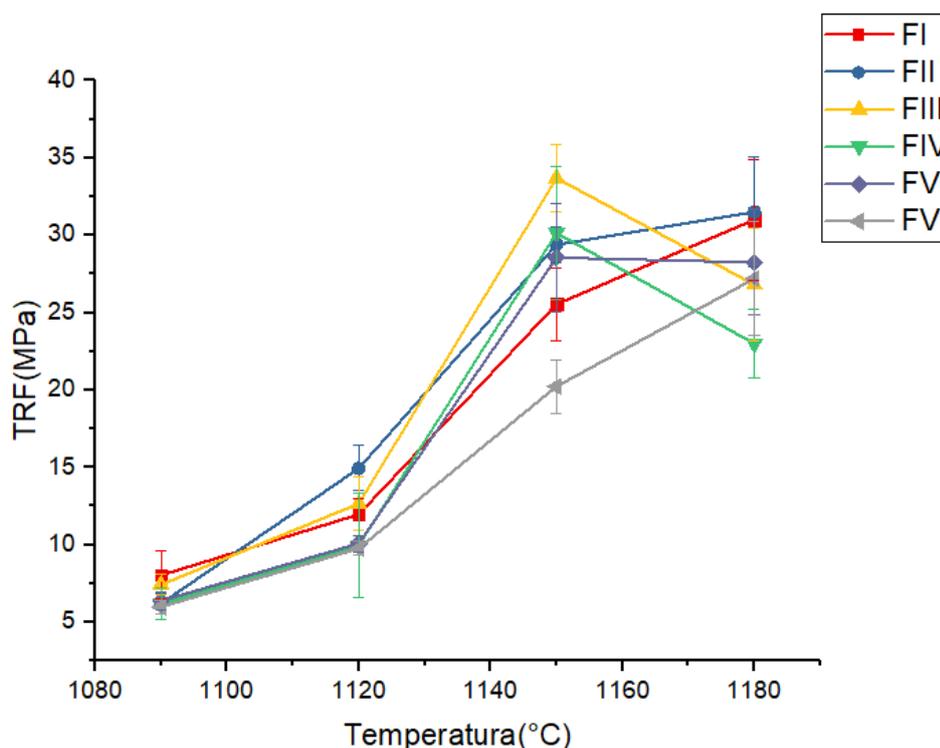
Fenômenos explicitados em seções anteriores deste volume explicam o comportamento de PA das Formulações. O acréscimo de cinza diminui a temperatura usual de vitrificação para uma massa de porcelanato, muito por conta do alto conteúdo de fundentes em sua composição e, considerando que o feldspato foi mantido intacto por todas as fórmulas, o volume de fase líquida tende a aumentar. É possível que o

'excesso' destes elementos em FVI cause um retardo na reação, com resultados sendo apreciados apenas a partir de temperaturas mais altas (no caso deste estudo 1180°C).

5.9. Tensão de Ruptura à Flexão

Por fim, em análise de propriedades tecnológicas, foi aferida a Tensão de Ruptura à Flexão (TRF) por meio de ensaio em flexímetro. É importante obter e analisar este critério, pois este determina a resistência do revestimento e em que categoria de utilização (trânsito) ele pode ser encaixado a dependerem dos resultados O gráfico de TRF é como segue:

Gráfico 12 - Resultados da Tensão de Ruptura à Flexão (MPa) dos corpos de prova.



Fonte: Do autor.

O comportamento apresentado encontra-se dentro do esperado e visto durante os outros gráficos de propriedades tecnológicas, com melhora das propriedades com o aumento da temperatura de queima e com as formulações intermediárias apresentando melhor desempenho.

TRF é um dos critérios mais importantes no que toca a formulação de um revestimento cerâmico, adquirindo um destaque no caso da formulação em estudo ser

destinada a confecção de pisos. Há bastante semelhança do gráfico de TRF com o gráfico de MEAq, neste caso as massas tendem a aumentar a resistência a esforços fletores apenas até determinada temperatura, com decréscimo deste critério a partir deste ponto, que no caso foi assinalado pela temperatura de 1150°C, comportamento coerente com a formação de poros e vazios e conseqüente fragilização.

Em relação a norma e estudos que se utilizaram de metodologia similar, inclusive em dimensão dos CP's ^[90], os resultados de TRF em MPa atendem as normas competentes para classificação de pisos cerâmicos prensados, com os índices vistos a partir de 1150°C categorizando as formulações em nível de resistência que alude a categoria grés e a categoria porcelanato, como já foi visto na avaliação de outras propriedades tecnológicas.

Alguns estudos utilizam os resíduos como substituintes ao Feldspato no que toca a função de fundente ^{[85][87]}. Contudo, outros estudos seguem a mesma rota adotada de substituição do quartzo pelas cinzas, inclusive no dimensional dos CP's ^[3]. Pode então se atestar que as cinzas também podem ter atuação na condição de filler, não comprometendo o desempenho da formulação cerâmica ao substituir o quartzo.

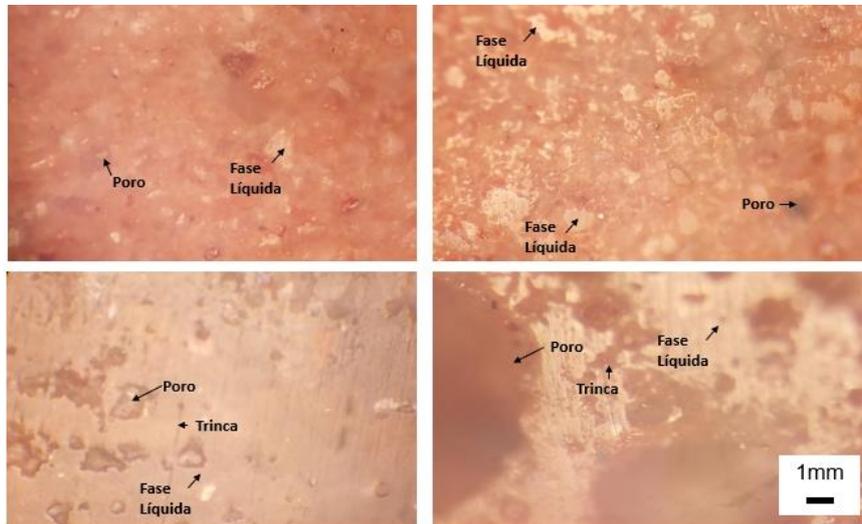
5.10. Microscopia óptica

A microscopia óptica revela resultados representativos da evolução que a mudança de temperatura e de composição impôs ao processo de manufatura dos CP's. A temperatura, primeiramente, teve influência na coalescência e formação da microestrutura; conforme aumentada, este parâmetro permitiu o aumento da sinterização e levou a formação da fase líquida, que foi a responsável pelo preenchimento de poros e densificação, efeitos que levaram a melhores resultados de AA, PA, MEA e TRF por parte dos corpos de prova que foram queimados a partir de 1150°C. A maior estruturação conforme o aumento de temperatura permitiu também a observação de trincas e contornos de grão.

A micrografia relativa à amostra FIII fora utilizada como recurso ilustrativo desta etapa devido a sua superioridade geral em relação a outras formulações, inclusive sendo a amostra que obteve o maior TRF. É visível o surgimento de pequenos núcleos de fase líquida e seu crescimento com o aumento de temperatura, a evolução microestrutural também evidencia defeitos estruturais com mais intensidade, como

trincas e poros. Os contornos de grão são pouco evidentes, ainda que possam ser visíveis nas ampliações de escolha.

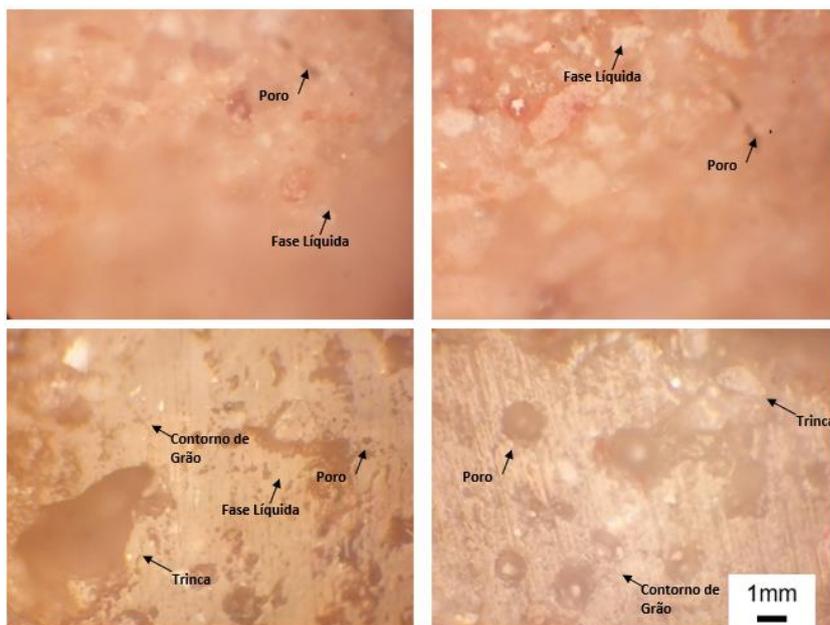
Figura 27 - Microscopia óptica da amostra FIII. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



Fonte: Do autor.

A temperatura de queima assinalada por 1150°C trouxe efeitos de processo visíveis também a olho nu e particularmente interessantes aos corpos de prova. Puderam ser vistas transformações superficiais e de cor, com cada formulação podendo ser identificada por uma cor em particular, levando a um gradiente de cores através das fórmulas. Outro efeito foi a vitrificação, que se tornou evidente a partir da formulação III, com regiões e fragmentos superficiais cobertos por um material de aspecto esmaltado, efeito que se tornou mais evidente à medida que se aumentava o percentual de cinzas e a temperatura. A partir de 1150°C, observaram-se também empenamentos e deformação superficial dos corpos, efeito com intensidade que progrediu conforme a presença de cinza e o aumento da temperatura.

Figura 28 - Microscopia óptica da amostra FV. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



Fonte: Do autor.

Na microscopia, a evolução microestrutural conforme o aumento de temperatura e adição de cinzas é evidente. Sequências que ilustram tanto a seção de resultados quanto os anexos mostram o crescimento da fase vítrea, contorno de grão, trincas e a coalescência dos grãos. No geral todas as amostras seguem um padrão de comportamento neste âmbito, com o desenvolvimento de fase vítrea por consequência do fundente e preenchimento de poros e cavidades, mais o crescimento de grãos e surgimento de contornos, áreas limite e trincas em algumas ocasiões. Os resultados corroboram com as análises tecnológicas feitas anteriormente, mostrando uma boa densificação dos corpos cerâmicos. Destaca-se o surgimento evidente de alguns poros devido a queima de compostos orgânicos e geração de gás em algumas amostras.

5.11. Classificação tecnológica e demais observações

A tabela indexada abaixo auxilia na classificação de cada formulação e no entendimento da evolução das propriedades tecnológicas com a progressão da queima.

Tabela 5 - Classificação tecnológica das fórmulas conforme o aumento de temperatura e inclusão de cinza na massa.

FI	RLQ (%)	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)	TRF (MPa)
1090°C	1,298	1,772	27,657	31,566	8,033
1120°C	3,072	1,831	17,734	24,132	11,951
1150°C	6,679	2,091	6,557	12,027	25,542
1180°C	6,682	2,214	2,132	4,3614	30,995
FII	RLQ (%)	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)	TRF (MPa)
1090°C	-1,446	1,782	24,487	29,786	6,1875
1120°C	3,003	1,881	17,703	23,642	14,934
1150°C	9,024	2,234	4,337	8,337	29,392
1180°C	7,927	2,145	0,988	2,029	31,497
FIII	RLQ (%)	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)	TRF (MPa)
1090°C	0,692	1,778	24,852	30,068	7,416
1120°C	2,5284	1,843	19,739	26,187	12,655
1150°C	7,6893	2,281	4,233	7,617	33,689
1180°C	9,024	1,982	0,3052	0,594	26,797
FIV	RLQ (%)	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)	TRF (MPa)
1090°C	-0,087	1,685	24,385	28,399	6,182
1120°C	3,668	1,728	19,934	25,238	9,964
1150°C	8,225	2,130	4,147	7,230	30,141
1180°C	8,984	1,960	0,465	0,8851	22,988
FV	RLQ (%)	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)	TRF (MPa)
1090°C	0,277	1,679	23,901	28,224	6,371
1120°C	0,898	1,744	21,944	27,275	10,081
1150°C	8,391	2,221	4,765	8,479	28,545
1180°C	8,716	2,007	0,681	1,320	28,243

FVI	RLQ (%)	MEA (g/cm ³)	AA (%)	PA (%)	TRF (MPa)
1090°C	-0,225	1,644	28,229	31,366	5,979
1120°C	0,077	1,687	24,590	28,984	9,761
1150°C	3,927	1,866	9,735	15,563	20,227
1180°C	10,372	1,949	1,507	2,736	27,191
Legenda					
	Grupo de Absorção BIII (prensado) – poroso.				
	Grupo de Absorção BIIb (prensado) – semi-poroso.				
	Grupo de Absorção BIIa (prensado) – semi-grés.				
	Grupo de Absorção BIb (prensado) – grés.				
	Grupo de Absorção BIa (prensado) – porcelanato.				

Fonte: Do autor.

Demais observações dizem respeito ao aspecto dos corpos a olho nu. O conteúdo de cinza gera um gradiente de coloração nas amostras à medida que a temperatura de processo aumenta. Durante a queima em 1090° e 1120°C, os matizes de cor são extremamente sutis, com apenas os CP's de FVI se destacando à primeira vista por sua palidez. A partir de 1150°C, cada formulação obtém uma cor única, indo do vermelho escuro em FVI, passando por tons cada vez mais escuros de marrom avermelhado em FII até FIV e adquirindo tons cinzentos amarronzados em FV e FVI, sendo que este efeito atinge seu ápice nas formulações que foram queimadas em 1180°C. É uma observação interessante a se fazer, pois ajustes da massa podem fazer com que a cinza tenha ação colorante, podendo sobrepor o Fe₂O₃ neste quesito.

Outro efeito dimensional/visual foi a distorção dos corpos de prova a partir de 1150°C, conforme o aumento do teor de cinzas e o aumento da temperatura, as dimensões sofreram alterações significativas, com distorções em comprimento, largura e altura, além de empenamentos e ondas. Este efeito foi reportado por outros autores em seus trabalhos ^[91], em diversos tipos de formulação cerâmica acrescida de resíduo em forma de cinza, desde lenha até fuligem de chaminés ^[92]. No geral, a deformação vista nos CP's deste trabalho pode ter sido causada por fatores pertinentes a cinética de reação durante a queima, nomeadamente a decomposição de matéria orgânica, criação de bolhas de gás e poros, velocidade da reação aumentada por conta da cinza incluída na massa, mudanças de fase e retração rápida.

A partir de 1150°C, as cerâmicas atingem suas melhores propriedades tecnológicas, com a maior parte das propriedades podendo ser encaixadas (referir-se a tabela 5) na categoria grés ou porcelanato. No apanhado geral de classificação, FIII é a formulação que apresenta melhores resultados gerais, com RLq, MEA e TRF atingindo seu ápice em 1150°C e AA e PA apresentando melhores resultados em 1180°C. FIII não pode ser qualificado totalmente como porcelanato, mas poderia ser colocado na categoria grés-porcelanato, FII e FV também apresentam resultados apreciáveis, podendo ser classificados também como grés-porcelanato, a depender da temperatura de queima na qual sejam avaliados.

6. CONCLUSÃO

Considerando os resultados, as discussões e as repostas que estes tópicos proporcionam para os objetivos e a problemática que norteou o estudo, pode-se considerar que a utilização de resíduos, na forma de cinzas de madeira amazônica, é sim uma opção coerente para a indústria ceramista e pode levar a produção de itens de alto valor agregado. Considerações específicas são como seguem.

- As matérias primas apresentam propriedades adequadas para a manufatura de placas cerâmicas, ainda que fosse interessante reduzir a granulometria.
- A adição de cinzas melhora as propriedades tecnológicas RLq, MEA, AA, PA, TRF.
- O aumento de temperatura também exerce melhora nestas propriedades.
- Há proposição de economia energética considerando que as temperaturas de queima estudadas foram relativamente baixas para a produção de porcelanato.
- As propriedades tecnológicas mensuradas foram satisfatórias e conformes com normas nacionais e internacionais, as massas atingiram nível de qualidade compatível com as classificações grés e porcelanato.
- A formulação com as melhores propriedades gerais foi a FIII (35% de argila, 50% de feldspato, 11% de quartzo e 4% de cinza) na temperatura de 1150°C.
- Corpos de prova com teores 'intermediários' de cinza (a exemplo de FII, FIII e FIV) tendem a apresentar melhores resultados de propriedades tecnológicas. Por conta da velocidade de processo apreciável e da conferência de melhora nas propriedades tecnológicas.
- A utilização de cinzas em porcelana vitrificada triaxial é uma proposta viável e retorna propriedades desejadas, contudo, estudos futuros podem melhorar ainda mais esta proposta com ajustes na massa composicional e experimentos em novas faixas de temperatura.

REFERÊNCIAS

- [1] ANDRADE, C. et al. Compósito para a construção civil a partir de resíduos industriais. **Revista Matéria**, v. 21, n. 2, p. 321-329, 2016.
- [2] CIPRIANO, P.B et al. Produção de cerâmica vermelha utilizando argila proveniente da mineração de gipsita e resíduo de gesso. **Acta Brasiliensis**, v. 3, n. 1, p. 25-29, 2019.
- [3] DANA, K. et al. Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin-quartz-feldspar system. **Journal of The European Ceramic Society**, v. 24, n. 10-11, p. 3169-3175, 2004.
- [4] DUARTE, G. V. et al. Formulação de massa cerâmica para revestimento poroso utilizando resíduos de madeiras tropicais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 4, p. 2348-2371, out./dez. 2022.
- [5] OLDFATHER, W.A. A Note on the Etymology of the Word “Ceramic”. **J. Am. Ceram. Soc.**, [s.l.], v.3, n.7. p.537–542, 1920.
- [6] NIÈPCE, J.C.; BOCH, P. Ceramic Materials: Processes, Properties and Applications. Estados Unidos: ISTE Ltd, 2007.
- [7] NORTON, F.H. Introdução à Tecnologia Cerâmica. São Paulo: Edgar Blucher, 1973.
- [8] VAN VLACK, L. H., Princípios de Ciência dos Materiais. São Paulo: Edgar Blucher, 2000.
- [9] BARSOUM, M.W. Fundamentals of Ceramics. Filadélfia: IoP Publishing Ltd, 2003.
- [10] CARTER, C.B.; NORTON, M.G. Ceramic Materials: Science and Engineering. Estados Unidos: Springer, 2013.
- [11] SHACKELFORD, J.F. Ciência dos Materiais. São Paulo: Pearson, 2008.
- [12] TOYOTA, R.G. Caracterização Química da Cerâmica Marajoara. Dr. Casimiro Sepúlveda Munita. 2009. 99p. Dissertação (Mestrado) – Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, IPEN, USP, São Paulo, 2009.
- [13] VIEIRA, P.H. Análise histórica do polo cerâmico de Santa Gertrudes/SP: sua relevância no município de Cordeirópolis/SP. *Revista Geoaraguaia*, Barra do Garças, v.12, n.1, p.157-175. Jul. 2022.
- [14] SOUZA, W.J.V. et al. Eco-innovation practices in the brazilian ceramic tile industry: The case of the Santa Gertrudes and Criciúma clusters. *Journal of Cleaner Production*, v.199, n.1, p.1008-1019. Jun. 2018.

- [15] ANFACER. Números do Setor Cerâmico. 2023. Disponível em: <<https://www.anfacer.org.br/setor-ceramico/numeros-do-setor>> Acesso em: 14 mai. 2023.
- [16] ALVES, M.L. Objetos distribuídos do Baixo Amazonas: um estudo da cerâmica Konduri. Dr^a. Fabíola Andréa Silva. 2019. 419p. Dissertação (Mestrado) – Arqueologia, Museu de Arqueologia e Etnologia, USP, 2019.
- [17] MARTINS, R.M.A. Cuias, cachimbos, muraquitãs: a arqueologia amazônica e as artes do período colonial ao modernismo. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, v. 12, n. 2, p. 403-426, 2017.
- [18] MACIEL, C.F. et al. Globalização, reestruturação produtiva e controle do trabalho no Polo Oleiro-Cerâmico de Iranduba – AM. Novos Cadernos NAEA, v.15, n.1, p.311-331, 2012.
- [19] PINTO, F.F. Simulação de Custos no Uso de Fontes Alternativas de Energia nas Indústrias Ceramistas de Manacapuru e Iranduba. Dr^a. Mariomar de Sales Lima. 2012. 90p. Dissertação (Mestrado) – Desenvolvimento Regional, Faculdade de Estudos Sociais, UFAM, Manaus, 2012.
- [20] GÓMEZ, L. et al. THE ROLE OF CERAMIC TILES IN THE NEW SYSTEM OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT. Qualicer '12. V.1, n.1, p.1-12, 2012.
- [21] CAVALCANTE, R.D. et al. O Pólo Ceramista do Estado do Amazonas e sua contribuição para degradação ambiental In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 54., 2010, Foz do Iguaçu - PR. p. 2364 – 2375.
- [22] DELPECH, B. et al. A review on waste heat recovery from exhaust in the ceramics industry. E3S Web of Conferences, v.22, n.34, p.1-8. 2017.
- [23] KARA, M. YILDRIM, S.T. CERAMIC TILE WASTE AS A WASTE MANAGEMENT SOLUTION FOR CONCRETE In: International Conference on Industrial and Hazardous Waste Management, 3., 2012, Creta. p.1-8.
- [24] MONFORT, E. et al. Characterisation of acid pollutant emissions in ceramic tile manufacture. Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio, v.50, n.4, p.1-68. 2011.
- [25] MEDINA, C. et al. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. Cement and Concrete Composites. v.34, n.1, p.48-54. 2012.

- [26] International Organization for Standardization (ISO). ISO 14001:2015 - Environmental management systems - Requirements with guidance for use. Recuperado de <https://www.iso.org/standard/60857.html>
- [27] DO CARMO, A.L.V et al. Análise de Cenários para Implantação de Uma Pequena Indústria Cerâmica na Região Amazônica. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, v. 16, n. 1, p. 82-87, 2019.
- [28] CONTINI, G. et al. Developing key performance indicators for monitoring sustainability in the ceramic industry: The role of digitalization and industry 4.0 technologies *Journal of Cleaner Production*, v. 414, s.n., 2023.
- [29] APPOLLONI, A. et al. Green recovery in the mature manufacturing industry: The role of the green-circular premium and sustainability certification in innovative efforts. *Ecological Economics*, v. 193, 2022.
- [30] BECKER, M.G. et al. The power of ESG transparency: The effect of the new SFDR sustainability labels on mutual funds and individual investors. *Finance Research Letters*. v.47, parte B, 2022.
- [31] GERARD, B. ESG and Socially Responsible Investment: A Critical Review. *Beta*, v. 33, n.1, p. 61-83, 2019.
- [32] NGUN, B. K. Using design of mixture experiments to optimize triaxial ceramic tile compositions incorporating Cambodian clays. *Applied Clay Science*, v. 87, p. 97-107, 2014.
- [33] OLSON, R. E. Shearing Strengths of Kaolinite, Illite, and Montmorillonite. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, v.100, n.11, 1974.
- [34] EBERL, D; HOWER, J. Kinetics of illite formation. *GSA Bulletin*, v.87, n.9, 1976.
- [35] HEPPER, E. N. et al. Clay mineralogy, cation exchange capacity and specific surface area of loess soils with different volcanic ash contents. *Geoderma*, v. 135, p. 216-223, 2006.
- [36] MORAES, R.P. et al. Influence of granulometry and organic treatment of a Brazilian montmorillonite on the properties of poly(styrene-co-n-butyl acrylate)/layered silicate nanocomposites prepared by miniemulsion polymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, v.112, n.4, 2009.
- [37] ACCHAR, W.; DULTRA E.J.V. Thermal analysis and X-ray diffraction of untreated coffee's husk ash reject and its potential use in ceramics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 111, p. 1331-1334, 2013.
- [38] RIBBE, P. H. *Feldspar Mineralogy*. 2ed. Providence: Mineralogical Society of America, 1983.
- [39] BERNASCONI, A. et al. Feldspar and firing cycle effects on the evolution of sanitary-ware vitreous body. *Ceramics International*, v.40, n.5, 2014.

- [40] SILVA, A. C.; MELLO CASTANHO, S.R.H. Silicate glasses obtained from fine silica powder modified with galvanic waste addition. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 348, p. 211-217, 2004.
- [41] BÓ, M.D. et al. Influence of beta-to-alpha quartz transition on residual stresses of a feldspar glass matrix composite: A relationship with catastrophic fracture due to thermal shock. *Journal of the European Ceramic Society*, v.43, n.10, p.4562-4572, 2023.
- [42] KARA-SAL, B.K. et al. Production of Densely Sintered Ceramic Articles Using Feldspar-Zeolite Raw Material From Tuva. *Glass and Ceramics*, v. 72, p. 331-334, 2016.
- [43] BARCA, D; PAPPARELLA, F.C. Chemical Characterization of Vitreous Finds from Cosenza Cathedral (Calabria – Italy) by the Combined Use of Analytical Techniques. *De Gruyter*, v.6, n.3, p. 63-85, 2020.
- [44] JOLIAT, R.W. et al. MoSi₂/Al₂O₃/Feldspar Composites for Injection-Molded Ceramic Heating Elements. *Advanced Engineering Materials*, v.23, n.9, 2021.
- [45] HOJAMBERDIEV, M. et al. Utilization of muscovite granite waste in the manufacture of ceramic tiles. *Ceramics International*, v.37, n.3, p. 871-876, 2011.
- [46] ANTONOVIC, V. et al. Effect of quartz sand on the properties and alkali resistance of refractory aluminosilicate castables. *Construction and Building Materials*, v.351, [s.n.], 2022.
- [47] SOARES, R. A. L. et al. Comparison of Firing of the a Mass for Ceramic Tiles in Laboratory and Industrial Furnace. *Trans Tech Publications*, v.805, [s.n.], p. 547-552, 2014.
- [48] KARAMANOVA, E. et al. Ceramics from blast furnace slag, kaolin and quartz. *Journal of the European Ceramic Society*, v.31, n.5, p. 989-998, 2011.
- [49] BAHTLI, T.; ERDEM, Y. The use of foundry waste sand from investment casting in the production of porcelain tiles. *Ceramics International*, v.48, n.1, p. 27067-27972, 2022.
- [50] SILVA, M.C.A. Incorporation of quartzite fines in the production of red ceramics. *Journal of Cleaner Production*, v. 288, [s.n.], 2021.
- [51] MISRA, M.K. et al. Wood ash composition as a function of furnace temperature. *Biomass and Bioenergy*, v. 4, n. 2, p. 103-116, 1993.
- [52] COSTA, T.P.C. et al. Environmental assessment of valorisation alternatives for woody biomass ash in construction materials. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 148, [s.n], p. 67-79, 2019.
- [53] WANG, H. et al. Synthesis of a ceramic tile base based on high-alumina fly ash. *Construction and Building Materials*, v. 155, [s.n], p. 930-938, 2017.
- [54] OLGUN, A. et al. Development of ceramic tiles from coal fly ash and tincal ore waste. *Ceramics International*, v. 31, n.1, p. 153-158, 2005.

- [55] DENG, Y. Sustainable utilization of municipal solid waste incineration fly ash for ceramic bricks with eco-friendly biosafety. *Materials Today Sustainability*, v. 1-2, [s.n], p. 32-38, 2018.
- [56] HOSSAIN, S.S.; ROY, P.K. Sustainable ceramics derived from solid wastes: a review. *Journal of Asian Ceramic Societies*, v.8, n.4, p. 984-1009, 2020.
- [57] TARVORNPANICH, P. et al. Microstructural Evolution in Clay-Based Ceramics II: Ternary and Quaternary Mixtures of Clay, Flux, and Quartz Filler. *Journal of the American Ceramic Society*, v.91, n.7, p.2272-2280, 2008.
- [58] RICCARDI, M.P. et al. An approach to the dynamics of clay firing. *Applied Clay Science*, v. 15, n. 3-4, p. 393-409, 1999.
- [59] DANA, K. et al. Effect of substitution of fly ash for quartz in triaxial kaolin–quartz–feldspar system. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 24, n. 10-11, p. 3169-3175, 2004.
- [60] COUTINHO, N.C. et al. Effect of Firewood Ash Waste on the Densification Behavior of Electrical Siliceous Porcelain Formulations. *Silicon*, v. 14, p. 10591-10601, 2022.
- [61] CORREIA, S.L et al. Predicting porosity content in triaxial porcelain bodies as a function of raw materials contents. *Journal of Materials Science*, v. 43, p. 696-701, 2008.
- [62] IQBAL, Y.; LEE, W.E. et al. Microstructural Evolution in Triaxial Porcelain. *Journal of the American Ceramic Society*, v. 83, n. 2, p. 3121-3127, 2004.
- [63] DAS, S.K et al. The Effect of Basic Oxygen Furnace Slag and Fly Ash Additions in Triaxial Porcelain Composition: Phase and Micro Structural Evolution. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 66, p. 213-220, 2013.
- [64] GORINI, A.P.F.; CORREA, R.A. Cerâmica para revestimentos. BNDES Setorial, v.10, p.201-252. 1999.
- [65] TEIXEIRA, G.T. et al. Resistência de Aderência à Tração de Placas Cerâmicas, com Variação da Expansão por Umidade e Absorção de Água, Utilizando Simples e Dupla Colagem. *Cerâmica Industrial*, v.23, n.2, p.22-30. 2018.
- [66] GOMES, T.E. Design de Superfície: Valorizando a Identidade do Design Brasileiro por Meio do Desenvolvimento de Revestimento Cerâmico. Tese (Bacharelado em Design) – Centro de Ciências Aplicadas e Educação, Universidade Federal da Paraíba. Rio Tinto, p. 96. 2019.
- [67] ESPERANTE, F.M.A.; FERRARI, D.O.A. AZULEJARIA BRASILEIRA E SUSTENTABILIDADE In: Encontro Senac de Conhecimento Integrado, 8., 2019, Ribeirão Preto. p.46-53.
- [68] SÁNCHEZ, E., et al. Porcelain tile microstructure: Implications for polished tile properties. *Journal of the European Ceramic Society*, v.26, n.13, p. 2533-2540, 2006.

- [69] SÁNCHEZ, E., et al. Porcelain tile: Almost 30 years of steady scientific-technological evolution. *Ceramics International*, v.36, n.3, p. 831-845, 2010.
- [70] HAO, D. et al. Low water absorption and pyroplastic deformation of alumina-strengthened porcelain with petalite and Gairome clay. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, v.17, n.5, p. 639-660, 2020.
- [71] MÁRQUEZ, J.M. et al. Effect of microstructure on mechanical properties of porcelain stoneware. *Journal of the European Ceramic Society*, v. 30, n.15, p.3063-3069. 2010.
- [72] NOVAIS, M. et al. Wood waste incorporation for lightweight porcelain stoneware tiles with tailored thermal conductivity. *Journal of Cleaner Production*, v.90, s.n., p.66-72. 2014.
- [73] CONTE, S. et al. Recycling of bottom ash from biomass combustion in porcelain stoneware tiles: Effects on technological properties, phase evolution and microstructure. *Journal of the European Ceramic Society*, v.42, n.12, p.5153-5163. 2022.
- [74] LIN, D.F. et al. Applying Mixture of Municipal Incinerator Bottom Ash and Sewage Sludge Ash for Ceramic Tile Manufacturing. *MDPI Materials*, v.14, n.14. 2021.
- [75] RIBEIRO, V.R. REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO: FORMULAÇÃO, PROPRIEDADES E MICROESTRUTURA. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense. Campos dos Goytacazes - RJ, p. 126. 2017.
- [76] PRZYBYSZ, A. EFEITO DE TiO_2 , K_2O e Na_2O NA FASE VÍTREA E NAS PROPRIEDADES DE PORCELANAS TRIAXIAIS. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência de Materiais) – Setor de Ciências Agrárias e de Tecnologia, Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa - PR, p. 122. 2011.
- [77] VIEIRA, C.M.F. et al. Formulação de Massa de Revestimento Cerâmico com Argilas Plásticas de Campos dos Goytacazes (RJ) e Taguá (SP). *Cerâmica Industrial*, v.6, n.6, p.43-49. 2001.
- [78] EVIC, N. et al. PREDICTION OF BIOMASS ASH MELTING BEHAVIOUR – CORRELATION BETWEEN THE DATA OBTAINED FROM THERMODYNAMIC EQUILIBRIUM CALCULATIONS AND SIMULTANEOUS THERMAL ANALYSIS (STA) In: *European Biomass Conference and Exhibition*, 20., 2012, Milão. p. 807-813.
- [79] GONÇALVES, J.N. USO DE RESÍDUOS DE QUEIMA DE CASCA DE CAFÉ E ARGILA DA REGIÃO SUL DA BAHIA NA OBTENÇÃO DE ISOLADOR ELÉTRICO CERÂMICO. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Ciências Exatas e da Terra. Natal – RN, p.149, 2015.
- [80] QUEIROZ, L.F.T. EFEITO DA QUANTIDADE DE AREIA QUARTZOSA NO PROCESSAMENTO, MICROESTRUTURA E PROPRIEDADES DA CERÂMICA VERMELHA PARA TELHAS. Tese (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais)

– Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes – RJ, 2009.

[81] CONCEIÇÃO, E.S. Influência da distribuição granulométrica no empacotamento de matérias-primas na formulação de porcelânicos. Tese (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo – SP, 2011.

[82] MELO, M.C.S.; SILVA, R.H.L. Avaliação da Absorção de Água de Porcelanas Triaxiais com Substituição Parcial de Feldspato por Quartzo In: SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO IFPE – CAMPUS CARUARU, 2., 2011, Caruaru. p. 1-5.

[83] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13818: Informação Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios, p.78. 1997.

[84] COSTA, N.M.D. UTILIZAÇÃO DA CINZA DE BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR PARA A PRODUÇÃO DE PISOS CERÂMICOS (PORCELANATO). Tese (Mestrado em Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira – SP, 2019.

[85] PARANHOS, R.J.S. APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DA CINZA DE CANA DE AÇÚCAR EM MASSAS CERÂMICAS. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – RN, 2010.

[86] TEIXEIRA, A.L. INFLUÊNCIA DOS TIPOS DE MATÉRIAS-PRIMAS E DAS CONDIÇÕES DE QUEIMA NA COR DO SUPORTE CERÂMICO In: Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT -Sul, 1., 2012, Araranguá. p.135-143.

[87] SANTOS, L.L.D. ADIÇÃO DE CINZA DA LENHA DE ALGAROBA (*Prosopis juliflora*) EM MASSA CERÂMICA PARA REVESTIMENTO. Tese (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – PB, 2014.

[88] International Organization for Standardization. (2018). Ceramic Tiles — Definitions, classification, characteristics and marking (ISO Standard No. 13006:2018).

[89] European Committee for Standardization. (1991). Ceramic floor and wall tiles - Definitions, classification, characteristics and marking (CEN – EN 87:1991).

[90] ELISANDRA, N.M.M. USO DA TÉCNICA DE PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA OTIMIZAÇÃO DE MASSA CERÂMICA COM A INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS DE CINZA DE CASCA DE AROZ, CINZA DE LENHA E LODO DE ETA. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 2010.

[91] LEE, J.W. et al. Effect of limestone addition on mechanical properties of ceramic tiles with fly ash. *Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology*, v.28, n.6, p.256-262. 2018.

[92] TRAUNER, E.J. Sludge Ash Bricks Fired to above and below Ash-Vitrifying Temperature. *Journal of Environmental Engineering*, v.119, n.3, p.506-519, 1993.

ANFACER – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS FABRICANTES DE CERÂMICA DE REVESTIMENTOS. Informações fornecidas ao IPT (inédito). 2017

REVISTA CENARIUM AMAZÔNIA. Poluição: flagrante de olaria de Iranduba expelindo fumaça. 2020. Disponível em: <<https://revistacenarium.com.br/foto/poluicao-flagrante-de-olaria-de-iranduba-expelindo-fumaca/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

NANOGRAFI. SiO₂ Nano poder: Properties & Applications. 2019. Disponível em: <<https://nanografi.com/blog/sio2-nano-powder-properties-applications/>>. Acesso em: 16 jun. 2023.

LIRA, H.L.; NEVES, G.A. Feldspatos: conceitos, estrutura cristalina, propriedades físicas, origem e ocorrências, aplicações, reservas e produção. *Revista Eletrônica de Materiais e Processos* v.8, n.3, p.110-117. 2013.

PUC – RIO, Departamento de Engenharia Civil. ARGILOMINERAIS PROPRIEDADES E APLICAÇÕES. 05 out. 2011. Apresentação do Power Point. Disponível em: <<https://ecivilufes.files.wordpress.com/2011/08/argilominerais-propriedades-e-aplicac3a7c3b5es.pdf>>. Acesso em 16 jun. 2023.

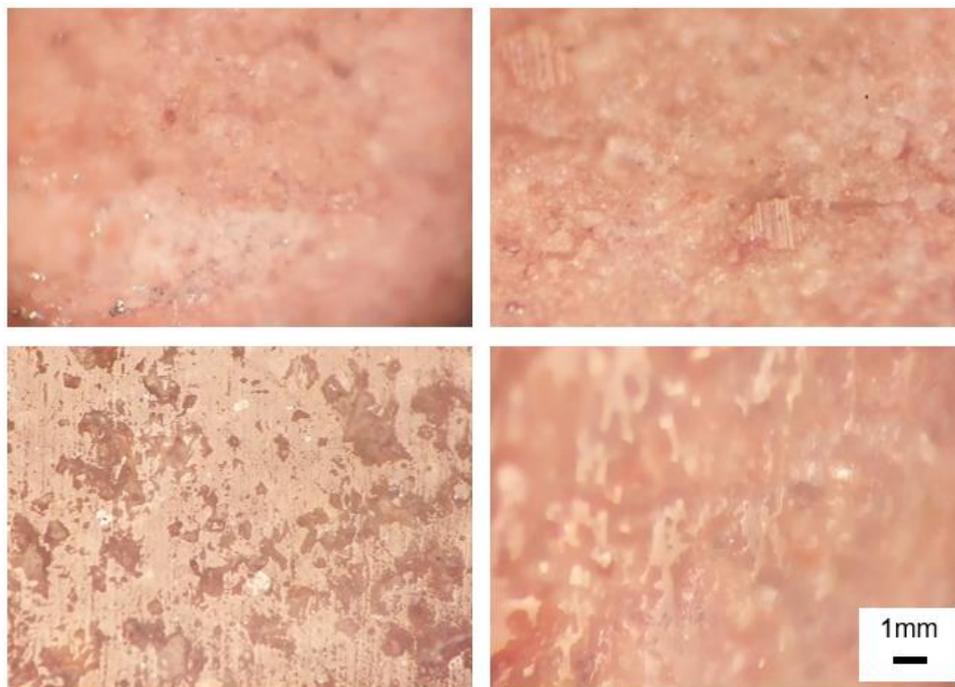
JUNIOR, M.C. et al. Estudo Estratégico da Cadeia Produtiva da Indústria Cerâmica no Estado de São Paulo: Parte II – Indústria de Revestimentos. *Cerâmica Industrial*, v.24, n.2, p.13-21. 2019.

HEIDER, Mathias. CERÂMICA VERMELHA E SUSTENTABILIDADE. 2014. Disponível em: <<https://www.inthemine.com.br/site/ceramica-vermelha-e-sustentabilidade/>>. Acesso em: 16 jun. 2023

LINARD, Z.U.S.A. et al. Percepções dos impactos ambientais da indústria de cerâmica no município de Crato estado do Ceará, Brasil. *Economía, sociedade y territorio*, v.14, n.48, 2015.

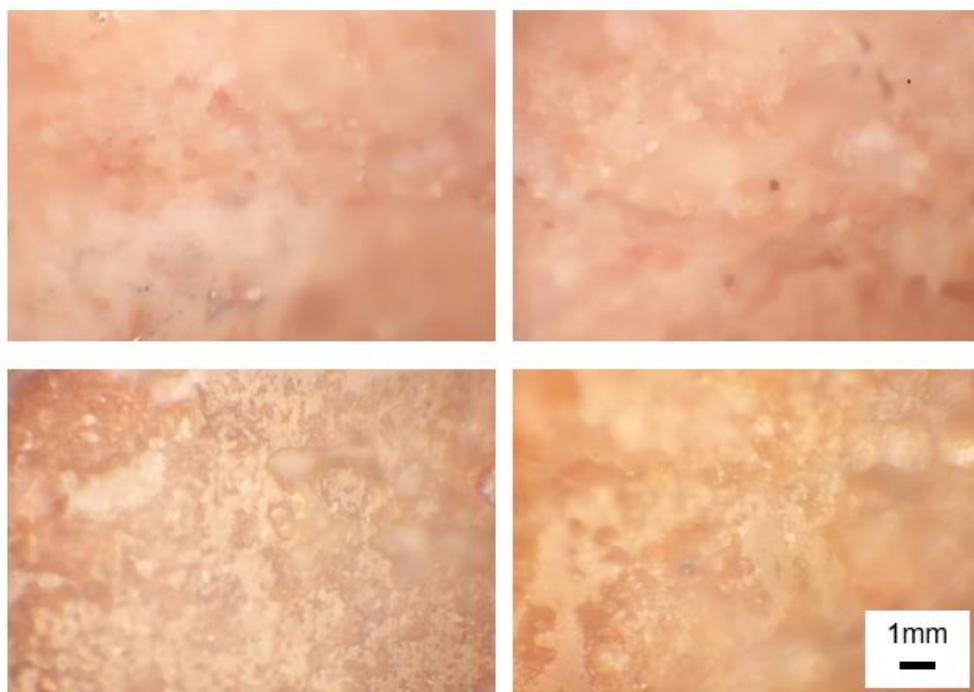
ANEXOS

Anexo 1 – Micrografias da amostra FI em ampliação 200x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1180 e 1150°C.



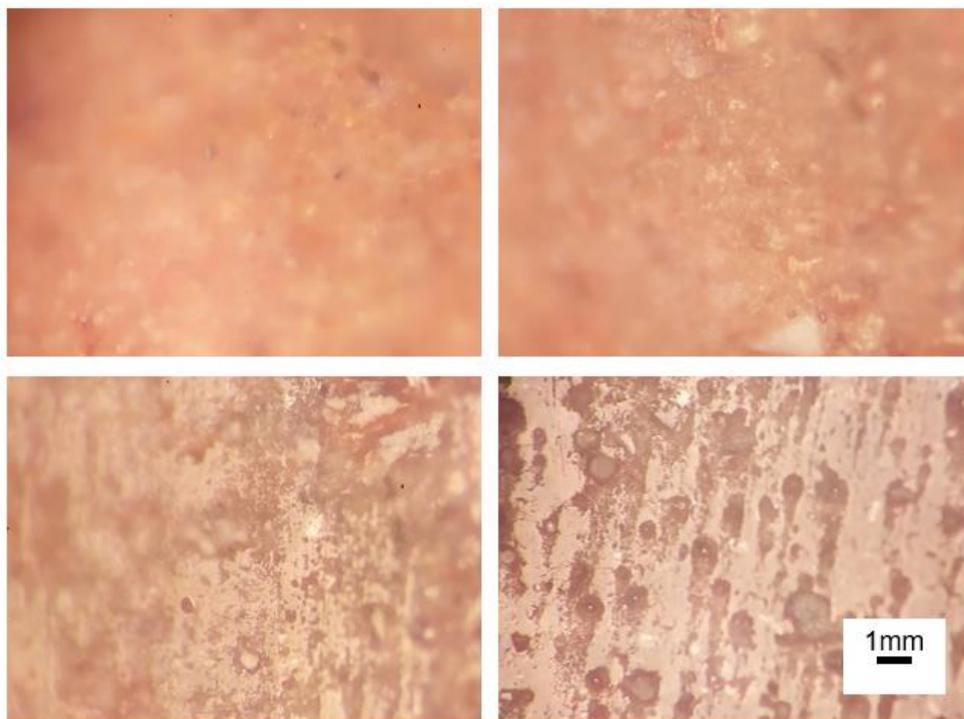
Fonte: Do autor.

Anexo 2 – Micrografias da amostra FI em ampliação 400x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



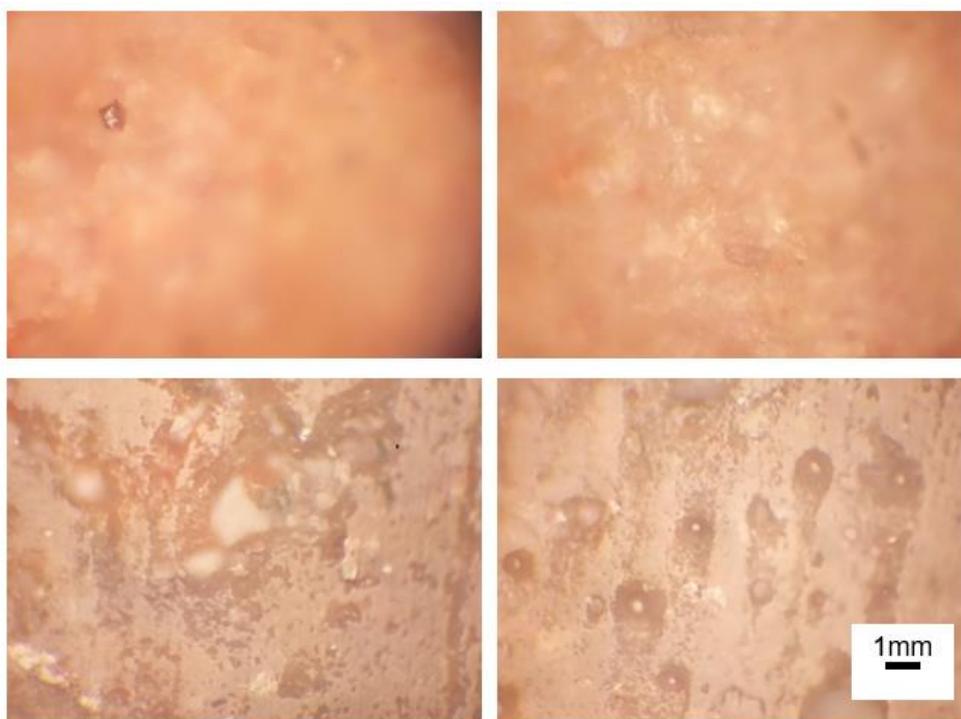
Fonte: Do autor.

Anexo 3 – Micrografias da amostra FII em ampliação 200x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



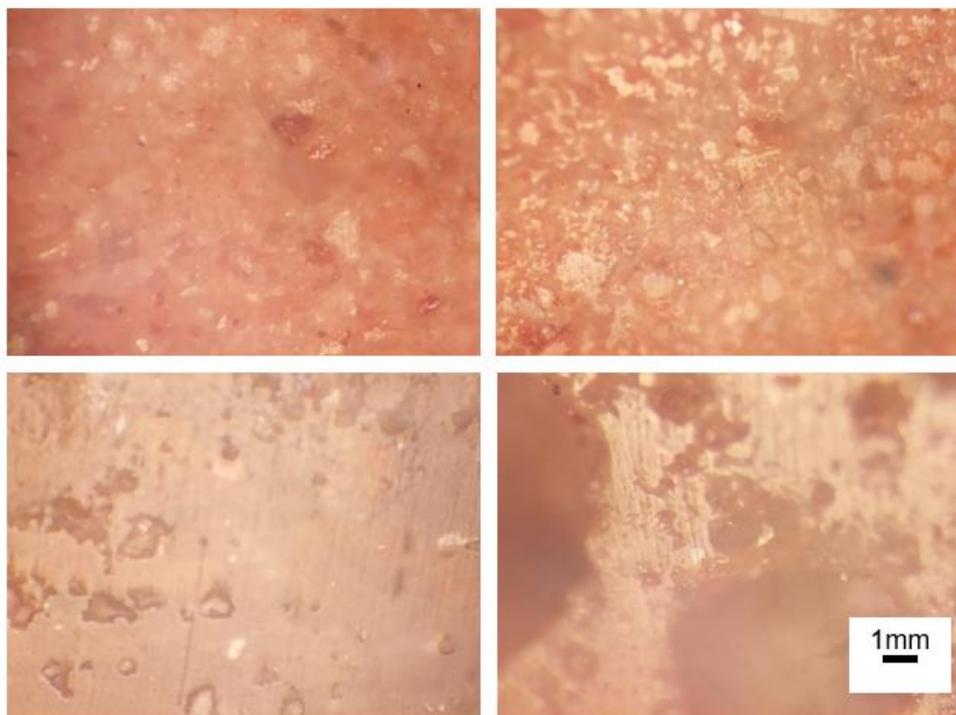
Fonte: Do autor.

Anexo 4 – Micrografias da amostra FII em ampliação 400x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



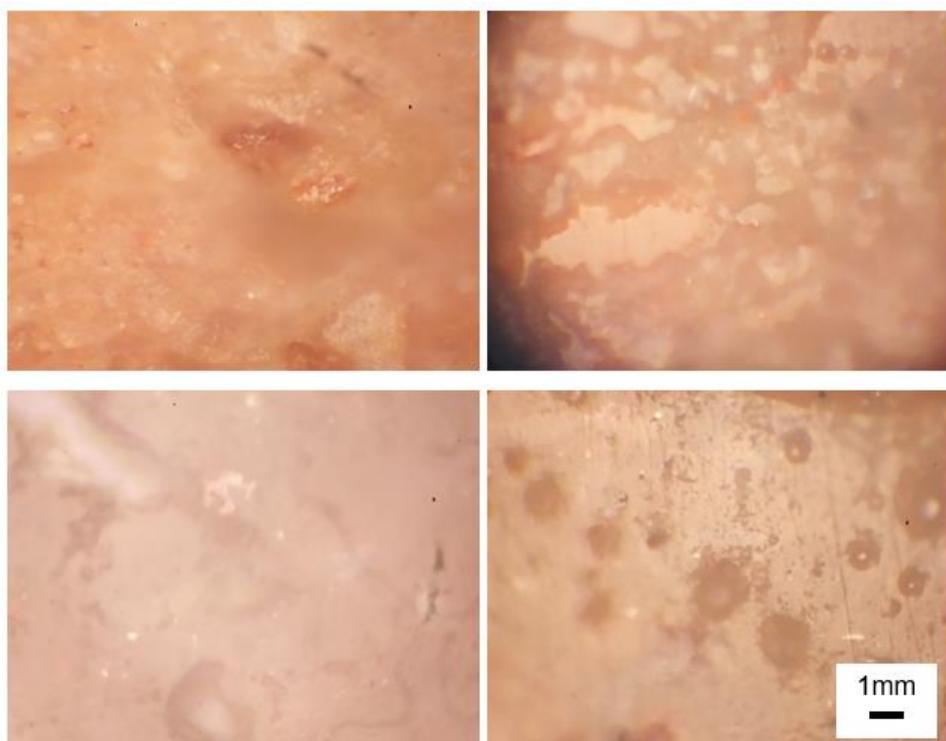
Fonte: Do autor.

Anexo 5 – Micrografias da amostra FIII em ampliação 200x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



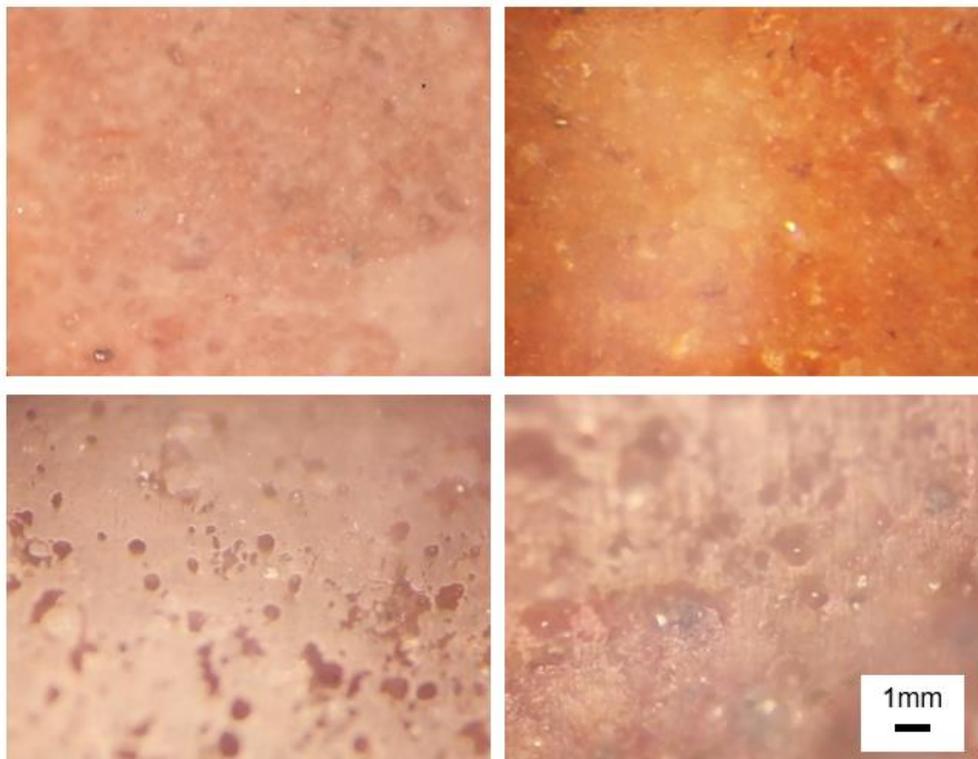
Fonte: Do autor.

Anexo 6 – Micrografias da amostra FIII em ampliação 400x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



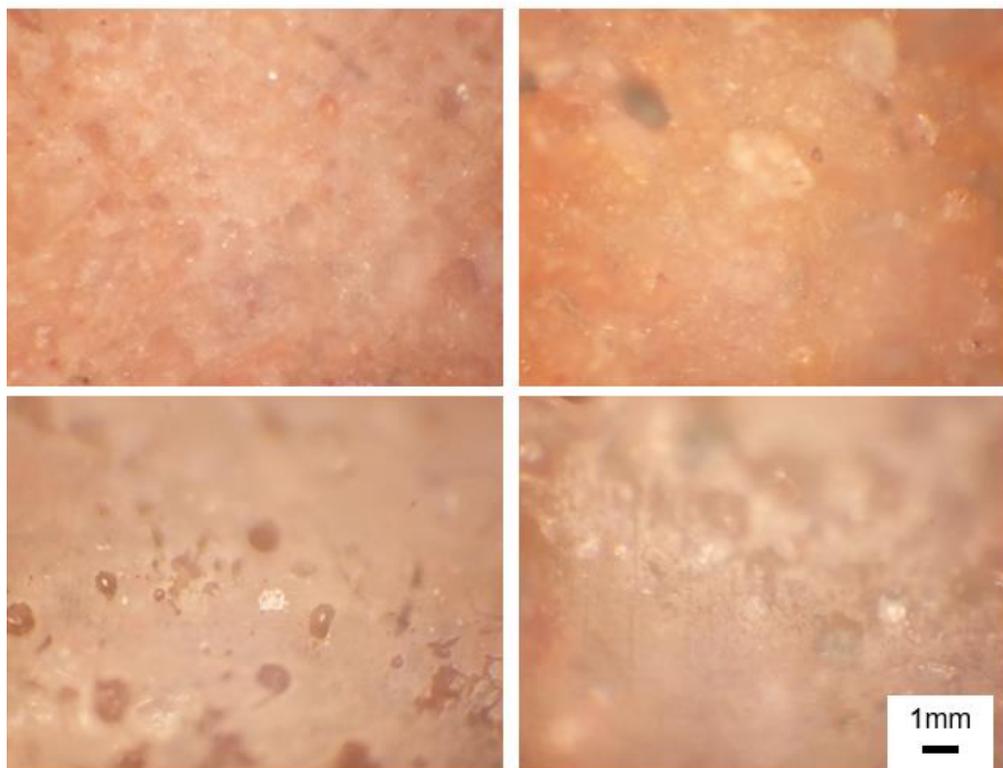
Fonte: Do autor.

Anexo 7 – Micrografias da amostra FIV em ampliação 200x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



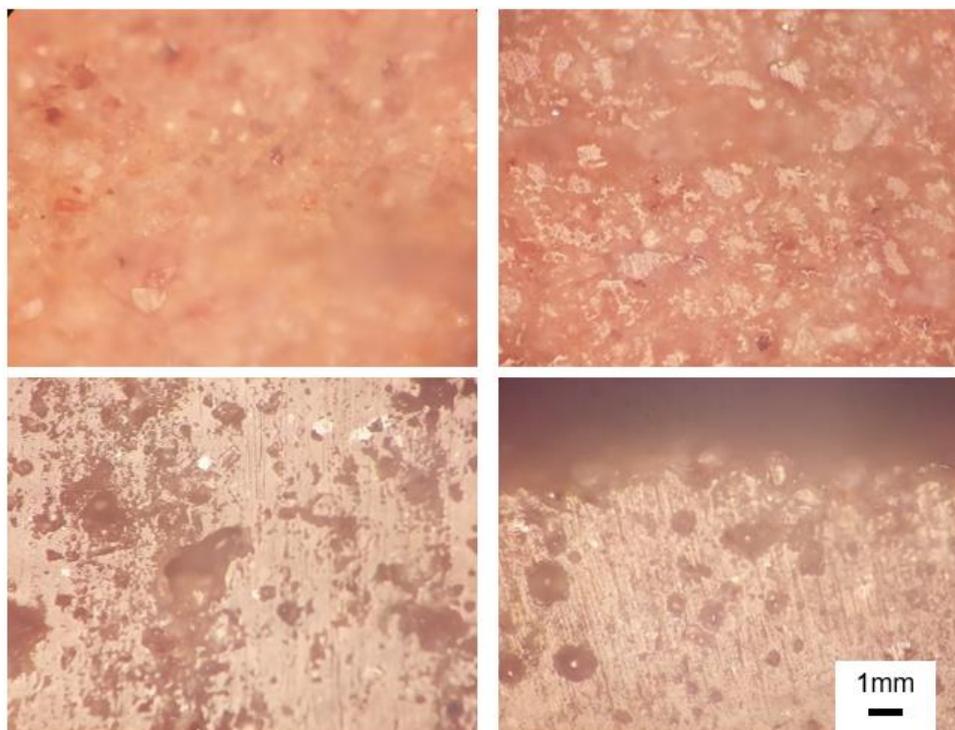
Fonte: Do autor.

Anexo 8 – Micrografias da amostra FIV em ampliação 400x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



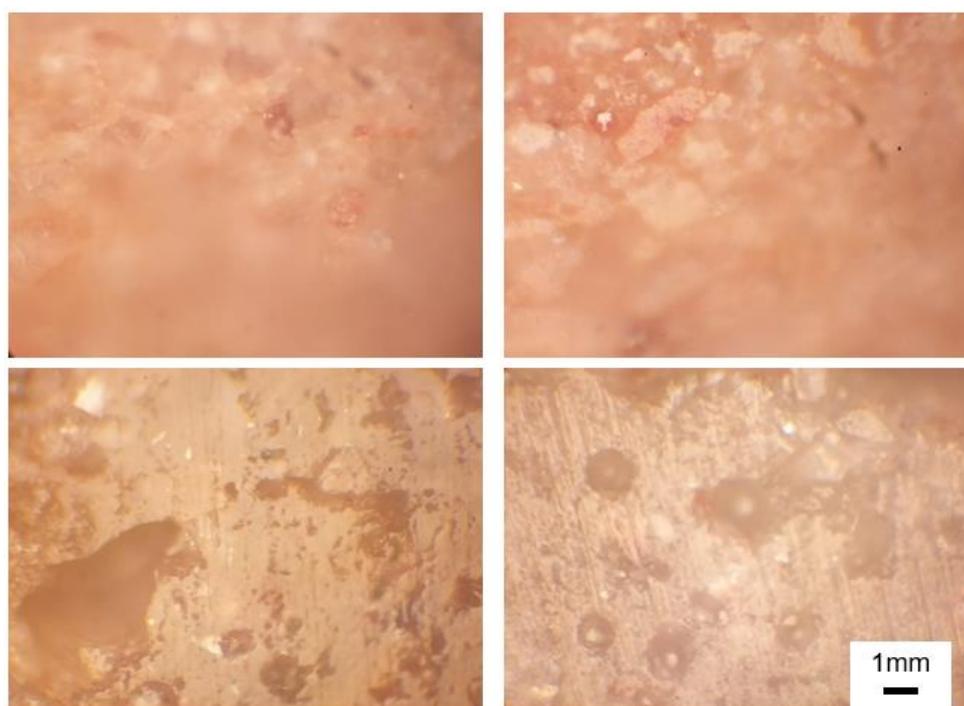
Fonte: Do autor.

Anexo 9 – Micrografias da amostra FV em ampliação 200x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



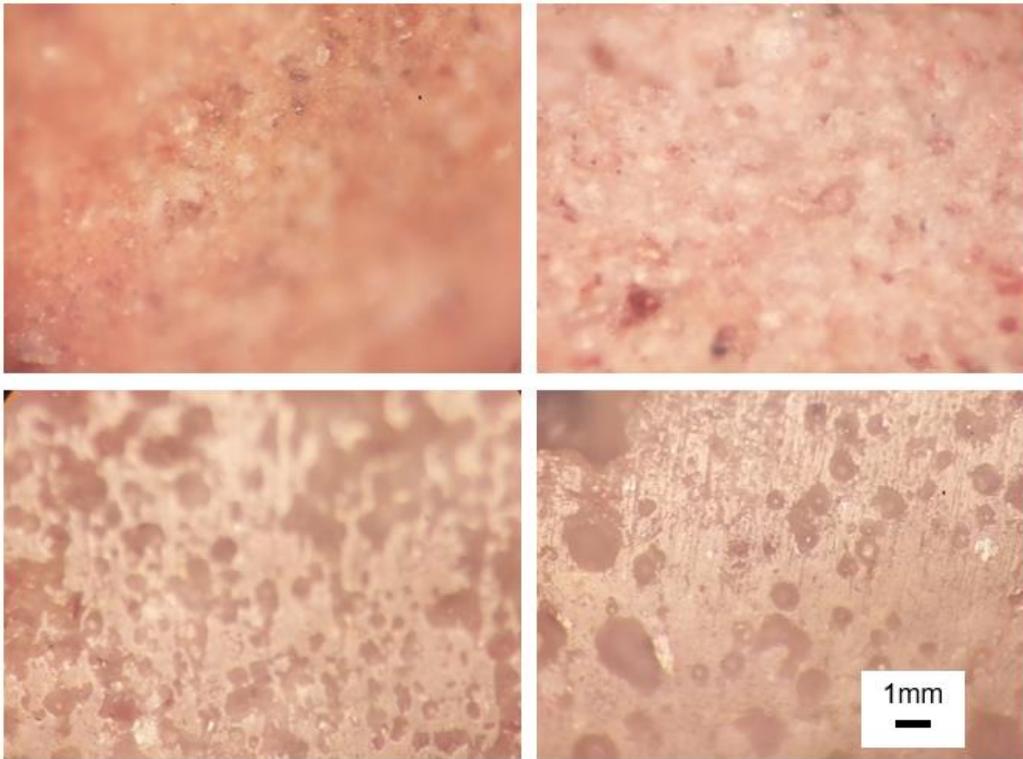
Fonte: Do autor.

Anexo 10 – Micrografias da amostra FV em ampliação 400x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



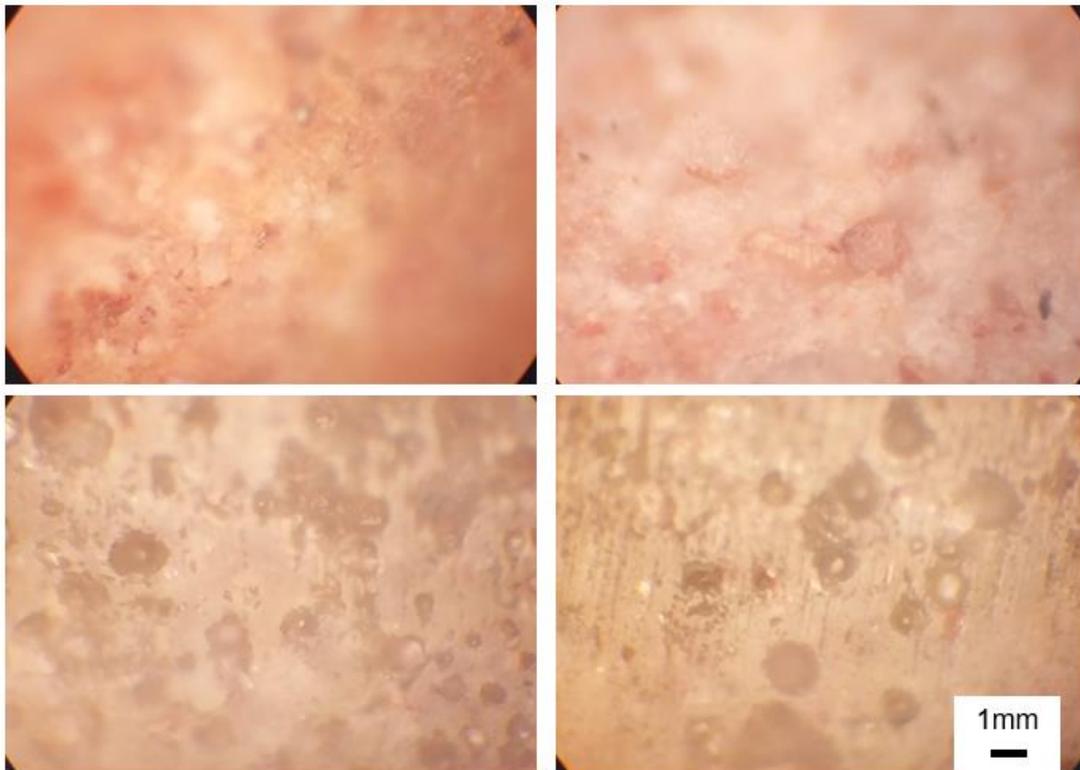
Fonte: Do autor.

Anexo 11 – Micrografias da amostra FVI em ampliação 200x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



Fonte: Do autor.

Anexo 12 – Micrografias da amostra FVI em ampliação 400x. Em sentido horário: 1090, 1120, 1150 e 1180°C.



Fonte: Do autor.

Anexo 13 – Quadro de especificações para placas cerâmicas do grupo B1a de acordo com a ABNT.

Características das placas cerâmicas para revestimento					
Quadro VI - Grupo de absorção B1a (prensado)			Abs ≤ 0,5%		
Características geométricas e visual	Unidades	Superfície S do produto cm ²			
		S ≤ 90	90 < S ≤ 190	190 < S ≤ 410	S > 410
Desvio de W em relação a N modulares	mm	2 - 5	2 - 5	2 - 5	2 - 5
Desvio de W em relação a N não modulares	mm	< 5	< 5	< 5	< 5
	%	± 2	± 2	± 2	± 2
Desvio de r ¹⁰ em relação a W	%	± 1,2	± 1,0	± 0,75	± 0,6
Desvio de r ¹⁰ em relação a R ²		± 0,75	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Espessura ¹⁰⁾ : Desvio de e em relação a e ₀		± 10,0	± 10,0	± 5	± 5
Retitude dos lados ³⁾		± 0,75	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Ortogonalidade ⁴⁾		± 1,0	± 0,6	± 0,6	± 0,6
Curvatura central		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Curvatura lateral		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Empeno		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Aspecto superficial ⁴⁾		≥ 95			
Diferença de tonalidade ⁴⁾		Por acordo			
Características físicas		Unidades	Limites		
Absorção de água	Média	%	Abs ≤ 0,5		
	Individual (máx.)	%	0,6		
Módulo de resistência à flexão ¹⁰⁾	Média	MPa	≥ 35		
	Individual (min.)	MPa	32		
Carga de ruptura	e ≥ 7,5 mm	N	≥ 1 300		
	e < 7,5 mm	N	≥ 700		
Resistência à abrasão profunda (não esmaltados)	mm ³	≤ 175			
Expansão por umidade ⁴⁾	mm/m	Por acordo ¹³⁾			
Dilatação térmica linear ⁴⁾	Por acordo				
Resistência ao choque térmico ⁴⁾	Por acordo				
Resistência ao gretamento ⁴⁾	Não gretar				
Coefficiente de atrito	A declarar				
Resistência à abrasão superficial (pisos esmaltados) ¹⁰⁾	A declarar				
Dureza Mohs ⁴⁾	Por acordo				
Resistência ao congelamento ⁴⁾	Por acordo				
Resistência ao impacto ⁴⁾	Por acordo				

Fonte: ABNT NBR 13818:1997

Anexo 14 - Quadro de especificações para placas cerâmicas do grupo B1b de acordo com a ABNT.

Características das placas cerâmicas para revestimento					
Quadro VII - Grupo de absorção B1b (prensado)		0,5% < Abs ≤ 3%			
Características geométricas e visual	Unidades	Superfície S do produto cm ²			
		S ≤ 90	90 < S ≤ 190	190 < S ≤ 410	S > 410
Desvio de W em relação a N modulares	mm	2 - 5	2 - 5	2 - 5	2 - 5
Desvio de W em relação a N não modulares	mm	5	5	5	5
	%	± 2	± 2	± 2	± 2
Desvio de r ¹¹ em relação a W	% rowspan="10">	± 1,2	± 1,0	± 0,75	± 0,6
Desvio de r ¹¹ em relação a R ¹¹		± 0,75	± 0,5	± 0,6	± 0,5
Espessura ¹⁰ : Desvio de e em relação a e ₀		± 10,0	± 10,0	± 5	± 5
Retitude dos lados ¹¹		± 0,75	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Ortogonalidade ¹¹		± 1,0	± 0,6	± 0,6	± 0,6
Curvatura central		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Curvatura lateral		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Empeno		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Aspecto superficial ¹¹		≥ 95			
Diferença de tonalidade ¹¹		Por acordo			
Características físicas		Unidades	Limites		
Absorção de água	Média	%	0,5 < Abs ≤ 3		
	Individual (máx.)	%	3,3		
Módulo de resistência à flexão ¹¹	Média	MPa	≥ 30		
	Individual (mín.)	MPa	27		
Carga de ruptura	e ≥ 7,5 mm	N	≥ 1 100		
	e < 7,5 mm	N	≥ 700		
Resistência à abrasão profunda (não esmaltados)	mm ³	≤ 175			
Expansão por umidade ¹⁰	mm/m	Por acordo ¹¹			
Dilatação térmica linear ¹⁰		Por acordo			
Resistência ao choque térmico ¹⁰		Por acordo			
Resistência ao gretamento ¹⁰		Não gretar			
Coeficiente de atrito		A declarar			
Resistência à abrasão superficial (pisos esmaltados) ¹⁰		A declarar			
Dureza Mohs ¹¹		Por acordo			
Resistência ao congelamento ¹⁰		Por acordo			
Resistência ao impacto ¹¹		Por acordo			

Fonte: ABNT NBR 13818:1997

Anexo 15 - Quadro de especificações para placas cerâmicas do grupo B11a de acordo com a ABNT.

Características das placas cerâmicas para revestimento					
Quadro VIII - Grupo de absorção B11a (prensado)		3% < Abs ≤ 6%			
Características geométricas e visual	Unidades	Superfície S de produto cm ²			
		S ≤ 90	90 < S ≤ 190	190 < S ≤ 410	S > 410
Desvio de W em relação a N modulares	mm	2 - 5	2 - 5	2 - 5	2 - 5
Desvio de W em relação a N não modulares	mm	5	5	5	5
	%	± 2	± 2	± 2	± 2
Desvio de r ¹ em relação a W	%	± 1,2	± 1,0	± 0,75	± 0,6
Desvio de r ¹ em relação a R ²		± 0,75	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Espessura ³⁾ : Desvio de e em relação a e ₀		± 10,0	± 10,0	± 5	± 5
Retitude dos lados ⁴⁾		± 0,75	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Ortogonalidade ⁵⁾		± 1,0	± 0,6	± 0,6	± 0,6
Curvatura central		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Curvatura lateral		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Empeno		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Aspecto superficial ⁶⁾	≥ 95				
Diferença de tonalidade ⁷⁾	Por acordo				
Características físicas		Unidades	Limites		
Absorção de água	Média	%	3 < Abs ≤ 6,0		
	Individual (máx.)	%	6,5		
Módulo de resistência à flexão ¹¹⁾	Média	MPa	≥ 22		
	Individual (mín.)	MPa	20		
Carga de ruptura	e ≥ 7,5 mm	N	≥ 1 000		
	e < 7,5 mm	N	≥ 600		
Resistência à abrasão profunda (não esmaltados)	mm ³	≤ 345			
Expansão por umidade ⁸⁾	mm/m	Por acordo ¹⁰⁾			
Dilatação térmica linear ⁹⁾	Por acordo				
Resistência ao choque térmico ⁹⁾	Por acordo				
Resistência ao gretamento ⁹⁾	Não gretar				
Coefficiente de atrito	A declarar				
Resistência à abrasão superficial (pisos esmaltados) ¹⁴⁾	A declarar				
Dureza Mohs ⁶⁾	Por acordo				
Resistência ao congelamento ¹³⁾	Por acordo				
Resistência ao impacto ¹²⁾	Por acordo				

Fonte: ABNT NBR 13818:1997

Anexo 16 - Quadro de especificações para placas cerâmicas do grupo B11b de acordo com a ABNT.

Características das placas cerâmicas para revestimento					
Quadro IX - Grupo de absorção B11b (pressado)			6% < Abs ≤ 10 %		
Características geométricas e visual	Unidades	Superfície S do produto cm ²			
		S ≤ 90	90 < S ≤ 190	190 < S ≤ 410	S > 410
Desvio de W em relação a N modulares	mm	2-5	2-5	2-5	2-5
Desvio de W em relação a N não modulares	mm	5	5	5	5
	%	±2	±2	±2	±2
Desvio de r ¹ em relação a W	%	± 1,2	± 1,0	± 0,75	± 0,6
Desvio de r ¹ em relação a R ²		± 0,75	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Espessura ³⁾ ; Desvio de e em relação a e ₀		± 10,0	± 10,0	± 5	± 5
Retitude dos lados ⁴⁾		± 0,75	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Ortogonalidade ⁵⁾		± 1,0	± 0,6	± 0,6	± 0,6
Curvatura central		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Curvatura lateral		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Empeno		± 1,0	± 0,5	± 0,5	± 0,5
Aspecto superficial ⁶⁾		≥ 95			
Diferença de tonalidade ⁷⁾		Por acordo			
Características físicas		Unidades	Limites		
Absorção de água	Média	%	6 < Abs ≤ 10		
	Individual (máx.)	%	11		
Módulo de resistência à flexão ¹¹⁾	Média	MPa	≥ 18		
	Individual (mín.)	MPa	16		
Carga de ruptura	e ≥ 7,5 mm	N	≥ 800		
	e < 7,5 mm	N	≥ 500		
Resistência à abrasão profunda (não esmaltados)	mm ²	≤ 540			
Expansão por umidade ⁸⁾	mm/m	Por acordo ¹²⁾			
Dilatação térmica linear ⁹⁾	Por acordo				
Resistência ao choque térmico ¹⁰⁾	Por acordo				
Resistência ao gretamento ¹³⁾	Não gretar				
Coefficiente de atrito	A declarar				
Resistência à abrasão superficial (pisos esmaltados) ¹⁴⁾	A declarar				
Dureza Mohs ¹⁵⁾	Por acordo				
Resistência ao congelamento ¹⁶⁾	Por acordo				
Resistência ao impacto ¹⁷⁾	Por acordo				

Fonte: ABNT NBR 13818:1997

Anexo 17 - Quadro de especificações para placas cerâmicas do grupo BIII de acordo com a ABNT.

Características das placas cerâmicas para revestimento					
Quadro X - Grupo de absorção BIII (prensado)		Abs > 10% ¹¹⁾			
Características geométricas e visual		Unidades	Limites		
			Sem espaçador	Com espaçador	
Desvio de W em relação a N modulares		mm	- 1,5 a - 5	- 1,5 a - 5	
Desvio de W em relação a N não modulares		mm	± 2	± 2	
Desvio de r ¹¹⁾ em relação a W	ℓ ≤ 12 cm	%	± 0,75 ²⁾	+ 0,6/- 0,3	
	ℓ > 12 cm		± 0,5 ²⁾		
Desvio de r ¹¹⁾ em relação a R ²⁾	ℓ ≤ 12 cm		± 0,5 ²⁾	± 0,25	
	ℓ > 12 cm		± 0,3 ²⁾		
Espessura ¹²⁾ : desvio de e em relação a e ₀				± 10,0	± 10,0
Ratidão dos lados ¹³⁾				± 0,3	± 0,3
Ortogonalidade ¹⁴⁾				± 0,5	± 0,3
Curvatura central				+ 0,5/- 0,3	+ 0,8/- 0,2 ¹⁵⁾
Curvatura lateral				+ 0,5/- 0,3	+ 0,8/- 0,2 ¹⁵⁾
Empeno				± 0,5	± 0,5 ≤ 250 cm ² ¹⁶⁾ ± 0,75 > 250 cm ² ¹⁶⁾
Aspecto superficial ¹⁷⁾			≥ 95		
Diferença de tonalidade ¹⁸⁾			Por acordo		
Características físicas		Unidades	Limites		
Absorção de água	Média	%	> 10		
	Individual (mín.)	%	9		
Módulo de resistência à flexão ¹⁹⁾	e ≥ 7,5 mm	MPa	≥ 15		
	e < 7,5 mm	MPa	≥ 12		
Carga de ruptura	e ≥ 7,5 mm	N	≥ 600		
	e < 7,5 mm	N	≥ 200		
Expansão por unidade ²⁰⁾		mm/m	Por acordo ¹⁴⁾		
Dilatação térmica linear ²¹⁾			Por acordo		
Resistência ao choque térmico ²²⁾			Por acordo		
Resistência ao gretamento ²³⁾			Não gretar		
Coeficiente de atrito			A declarar		
Resistência à abrasão superficial (pisos esmaltados) ²⁴⁾			A declarar		
Dureza Mohs ²⁵⁾			Por acordo		
Resistência ao congelamento ²⁶⁾			Por acordo		
Resistência ao impacto ²⁷⁾			Por acordo		

Fonte: ABNT NBR 13818:1997