

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ELMA DAYANE SILVA DE ALMEIDA

RESÍDUOS CERÂMICOS DA INDÚSTRIA DO POLO CERÂMICO DE IRANDUBA E
MANACAPURU COMO MATERIAL POZOLÂNICO E MITIGADOR DE REAÇÃO
ALCÁLIS-AGREGADO

MANAUS

2020

ELMA DAYANE SILVA DE ALMEIDA

**RESÍDUOS CERÂMICOS DA INDÚSTRIA DO POLO CERÂMICO DE IRANDUBA
E MANACAPURU COMO MATERIAL POZOLÂNICO E MITIGADOR DE
REAÇÃO ALCÁLIS-AGREGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

ORIENTADOR: PROF. DR. RAIMUNDO PEREIRA DE VASCONCELOS

MANAUS

2020

Ficha Catalográfica

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

A447r Almeida, Elma Dayane Silva de
Resíduos cerâmicos da indústria do polo cerâmico de Iranduba e Manacapuru como material pozolânico e mitigador de reação álcalis-agregado / Elma Dayane Silva de Almeida . 2020
70 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: Raimundo Pereira Vasconcelos
Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Amazonas.

1. resíduo cerâmico. 2. álcali-agregado. 3. pozolana. 4. mitigação.
I. Vasconcelos, Raimundo Pereira. II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

ELMA DAYANE SILVA DE ALMEIDA

**RESÍDUOS CERÂMICOS DA INDÚSTRIA DO POLO CERÂMICO DE IRANDUBA
E MANACAPURU COMO MATERIAL POZOLÂNICO E MITIGADOR DE
REAÇÃO ALCÁLIS-AGREGADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Data da apresentação:

Resultado:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Raimundo Pereira Vasconcelos, Presidente

Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo, Membro

Universidade do Estado do Amazonas - UFAM

Prof. Dr. Laerte Melo Barros, Membro

Instituto Federal de Educação do Amazonas - IFAM

DEDICATÓRIA

*À minha querida mãe
Alvina Almeida, pelo amor, fé e
valiosos ensinamentos desde a
infância e início da vida acadêmica.
Ao meu amado esposo Jean Ramos
por toda a paciência, carinho e
parceria nesta caminhada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que contribuíram com o desenvolvimento desta pesquisa. Em especial:

À minha mãe, pelo carinho. Ao meu marido, Jean Ramos, pelo incentivo, apoio e amor incondicional, pela paciência, por acreditar em mim e incentivar todos os dias meu crescimento pessoal e profissional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, pela orientação técnica no desenvolvimento desta pesquisa.

À Universidade Federal do Amazonas e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Às empresas Cerâmica Montemar Ltda., Cerâmica Amazônia Ltda., Mercês Material de Construção Ltda., Empresa Brasileira de Agregados Minerais, Cemex Manaus, por cederem respectivamente os resíduos cerâmicos, agregados, cimento aplicados nesta pesquisa.

Aos técnicos do Laboratório de Ensaios de Pavimentação e da UFAM, Sr. Zeca e Sr. Reinaldo, pela dedicação e auxílio durante a realização dos ensaios de caracterização de materiais.

Aos técnicos Sr. Glauco e Sr. Marcos do Laboratório de Geologia da UFAM pelo auxílio e disponibilização dos moinhos de discos e mandíbulas para moagem do material.

À Prof.^a Dr.^a Virgínia Mansanares Giacon pela disponibilização do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos e ao técnico Diogo Monteiro pela realização dos ensaios de Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e Termogravimetria.

Ao Mécio Melquiades do Laboratório de Materiais do Departamento de Física de UFAM pelo apoio e realização do ensaio de Difração de Raios-X.

À Geol. Ana Livia Zeitune de P.Silveira Tecnologia Laboratório da ABCP – Associação Brasileira Cimento Portland/ABCP São Paulo pela realização dos ensaios de petrografia, barras de argamassas e Chapelle nos agregados e resíduos cerâmicos.

Aos técnicos Larissa e Bruno do Laboratório de Análises Minerais - LAMIN do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) pelas análises de granulometria por difração à laser.

Ao Bruno do Laboratório de Microscopia Óptica e Eletrônica pelos ensaios de microscopia eletrônica de varredura nas amostras de resíduo cerâmico.

Ao engenheiro Domingos Sávio Coelho por disponibilizar a empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda. para a realização dos ensaios de compressão axial.

Aos meus queridos colegas do mestrado Eduarda, Raquel, Jociane, Adma, Elaine, Abel, Luane, Fernanda, por tornarem os dias mais felizes com conselhos, ajudas, risadas, almoços e incentivos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM pelo auxílio financeiro à pesquisa.

RESUMO

A presente pesquisa aborda a temática do uso de resíduos cerâmicos provenientes da indústria de tijolos cerâmicos da região metropolitana de Manaus, como material pozolânicos e agente mitigador para a reação álcali-agregado. As adições reativas são eficientes em inibir ou reduzir as reações expansivas resultantes da combinação dos álcalis do cimento com agregados potencialmente reativos. Afim de avaliar o uso de resíduos cerâmicos como adição pozolânica e redutor de reações expansivas em materiais cimentícios foram realizadas análises químicas, físicas e mineralógicas, deste modo, buscando-se determinar o seu índice de atividade pozolânica, bem como avaliar a possível ação mitigadora da reação álcali-agregado. A partir dos resultados obtidos com a moagem controlada e a caracterização química e estrutural, através das técnicas de Fluorescência de raios-x (FRX), Difração de raios-x (DRX), Termogravimetria (TG), Derivada Termogravimétrica (DTG), Análise Térmica Diferencial (DTA) e Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), além disso, avaliou-se o potencial pozolânico das adições por teor de hidróxido de cálcio fixado por Chapelle. Os resultados mostram que o RC atendeu aos requisitos químico-físicos para pozolana. Os ensaios de petrografia e de determinação da mitigação de barras de argamassa com o uso de 50% do resíduo cerâmico indicaram baixa reatividade. Sendo assim, conclui-se que o resíduo cerâmico apresenta potencial uso como aditivo mitigador das reações de expansão em materiais cimentícios e como pozolana.

Palavras-Chave: Resíduo cerâmico. Álcali-agregado. Pozolana. Mitigação.

ABSTRACT

This research addresses the issue of the use of ceramic waste from the ceramic brick industry in the metropolitan region of Manaus, as pozzolanic material and mitigating agent for the alkali-aggregate reaction. Reactive additions are efficient in inhibiting or reducing expansive reactions resulting from the combination of cement alkalis with potentially reactive aggregates. In order to evaluate the use of ceramic waste as a pozzolanic addition and reducing expansive reactions in cementitious materials, chemical, physical and mineralogical analyzes were carried out, thus seeking to determine its pozzolanic activity index, as well as to evaluate the possible mitigating action of alkali-aggregate reaction. From the results obtained with controlled grinding and chemical and structural characterization, using the techniques of X-ray fluorescence (FRX), X-ray diffraction (DRX), Thermogravimetry (TG), Thermogravimetric derivative (DTG), Analysis Differential Thermal (DTA) and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), in addition, the pozzolanic potential of additions by Chapelle's fixed calcium hydroxide content was evaluated. The results show that the RC met the physical-chemical requirements for pozzolana. The petrography and mitigation determination tests for mortar bars using 50% of the ceramic residue indicated low reactivity. Thus, it is concluded that the ceramic residue has potential use as a mitigating additive for the expansion reactions in cementitious materials and as a pozzolan.

Keywords: Ceramic residue. Alkali-aggregate. Pozzolana. Mitigation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma do processo produtivo	6
Figura 2- Estocagem em galpão coberto	7
Figura 3 - Corte dos tijolos cerâmicos.....	7
Figura 4 - Secagem e queima de tijolos.....	9
Figura 5 - Expedição e Estocagem	9
Figura 6 - Fatores condicionantes do fenômeno da RAA deletéria.....	11
Figura 7 - Reação álcali-sílica: evolução da expansão média das barras de argamassa com 100% de cimento comparado com substituição de 10% do cimento por adições minerais	18
Figura 8 - Etapas de trabalho utilizadas na pesquisa	20
Figura 9 - Localização do ponto de coleta das amostras	21
Figura 10 - Processos de beneficiamento dos tijolos cerâmicos (primeira etapa): a) Quebra manual dos tijolos; b) Moagem dos tijolos cerâmicos; c) Moinho de mandíbulas tijolos cerâmicos	22
Figura 11- Processos de beneficiamento dos tijolos cerâmicos (segunda etapa): a) Tijolos após moinho de mandíbulas; b) Equipamento para moagem - Moinho de disco; c) Resíduo cerâmico após 90 segundos no moinho de disco.....	22
Figura 12 - Processos de beneficiamento dos resíduos cerâmicos: a) Material seco; b) Resíduo após a moagem; c) Peneiramento manual	22
Figura 13- Técnicas utilizados na caracterização dos materiais da pesquisa	23
Figura 14- Equipamento de Espectrometria de Fluorescência de raios-x	23
Figura 15- Equipamento de granulometria a laser.	25
Figura 16- Equipamento de microscopia por varredura	26
Figura 17- a) Homogeneização manual dos materiais cimentantes secos; b) Misturador mecânico utilizado	26
Figura 18- a) Elaboração das pastas ; b) Pastas acomodadas em sacos plásticos.	27
Figura 19 - Granulometria a laser do cimento	32
Figura 20- Difratoograma do cimento CPI S-40 feito com de difração de difração entre o feixe incidente de raios-x e seu prolongamento de (2θ) e anodo de cobre.....	33
Figura 21 - Difratometria de raios-x: Cerâmica Montemar.....	36
Figura 22 - Difratometria de raios -x: Cerâmica Amazônia.....	36

Figura 23 - Análise térmica das pastas: Montemar e Amazônia	37
Figura 24 - Espectroscopia material calcinado e natural: Montemar	38
Figura 25 - Espectroscopia material calcinado e natural: Amazônia	39
Figura 26 - apresenta as curvas granulométricas dos três materiais utilizados	40
Figura 27 - Micrografia do resíduo cerâmico processo de primeira moagem: a) com 10 μm ; b) com 10 μm	41
Figura 28 - Micrografia do resíduo cerâmico segunda moagem: a) com 5 μm ; b) com 5 μm	41
Figura 29 - Gráfico da evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do cimento	28
Tabela 2 - Composição química do cimento CPI-S 40	30
Tabela 3 - Composição química do cimento CPI-S 40	31
Tabela 4 - Referências utilizadas na identificação de fases cristalinas do cimento	34
Tabela 5 - Composição química do resíduo cerâmico: Montemar.....	34
Tabela 6 - Composição química do resíduo cerâmico: Amazônia	35
Tabela 7 - Principais picos dos espectros de FTIR.....	38
Tabela 8 - Características granulométricas para os materiais utilizados na pesquisa	40
Tabela 9 - Composição dos materiais.....	44
Tabela 10 - Resultados dos ensaios de Chapelle	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Síntese das características petrográfica da amostra: Mercês.....	42
Quadro 2 - Síntese das características petrográfica da amostra: EBAM.....	42
Quadro 3 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina.....	44

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM – American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana para Testes e Materiais)

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ANICER – Associação de Nacional da Indústria Cerâmica Al- Alumínio

Al₂O₃ – Óxido de alumínio ou alumina

C₃S – Silicato Tricálcico

Ca(OH)₂ – Hidróxido de cálcio

CaCO₃ – Carbonato de cálcio

C-A-H – Aluminato de cálcio hidratado

CaO – Óxido de cálcio

C-A-S-H – Sílico aluminato de cálcio hidratado

CO₂ – Dióxido de carbono

C-S-H – Silicato de cálcio hidratado

DRX – Difração de raios-x

DTA – Análise térmica diferencial

DTG – Derivada termogravimétrica

Fe – Ferro

Fe₂O₃ – Óxido de ferro

FRX – Fluorescência de raios-x

FTIR – Espectroscopia de infravermelho por Transformada de Fourier

GL – Granulometria a laser

H – Hidrogênio

H₂O – Molécula de água

IAP – Índice de Atividade Pozolânica

K₂O – Óxido de Potássio

Km – Quilômetro

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MCS – Material cimentício suplementar

Mg – Magnésio

MgO – Óxido de Magnésio

Mk – Metacaulim

Na₂O – Óxido de sódio

O – Oxigênio

OH – Hidroxila

P₂O₅ – Óxido de fósforo

Si – Silício

SiO₂ – Óxido de silício ou sílica

RC – Resíduo de tijolos cerâmicos

TG – Termogravimetria

Ti – Titânio

TiO₂ – Óxido de titânio ou anatásio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Geral	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Estrutura da dissertação	2
2. RESÍDUO CERAMICO	3
2.1 Resíduo cerâmico – Processo produtivo do Polo Oleiro	3
2.2 Polo Oleiro – Irlanduba e Manacapuru	3
2.3 Processo de fabricação da indústria cerâmica	5
2.3.1 Etapas dos processos produtivo nas indústrias de cerâmica vermelha	6
2.3.2 Preparação da massa cerâmica	8
2.3.3 Sazonamento.....	8
2.3.4 Mistura.....	8
2.3.5 Homogeneização	8
2.3.6 Conformação	8
2.3.7 Tratamento térmico.....	8
2.3.8 Acabamento	9
2.3.9 Expedição	10
2.3.10 Perda no Processo Produtivo	10
2.4 Reação álcalis-agregado	10
2.5 Tipos de Reação Álcali-Agregado	13
2.5.1 Reação álcali-agregado (RAA).....	13
2.5.2 Reação álcali-carbonato (RAC).....	13
2.5.3 Reação álcali-sílica (RAS).....	13
2.6 Agregados	13
2.7 Teor de álcalis	14

2.8	Umidade	15
2.9	Argilas Calcinadas	15
2.10	Ação das pozolanas	16
2.11	Interações entre a Pozolana e o Cimento Portland	19
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	20
3.1	Seleção e beneficiamento dos materiais utilizados	20
3.1.1	Cimento Portland.....	20
3.1.2	Agregado graúdo	20
3.1.3	Resíduo Cerâmico	20
3.2	Caracterização dos materiais utilizados	23
3.3	Espectrometria de fluorescência de raios-X	23
3.4	Espectroscopia por transformada de Fourier	24
3.5	Difração de raios-X	24
3.6	Análises térmicas	24
3.7	Granulometria a laser	24
3.8	Superfície específica	25
3.9	Microscopia eletrônica de varredura	25
3.10	Índice de atividade pozolânica - IAP	26
3.11	Elaboração das pastas	27
3.12	Análise petrográfica	27
3.13	Ensaio de expansão em barras de argamassa	27
3.14	Ensaio de atividade pozolânica de Chapelle	28

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Caracterização dos materiais	29
4.1.1 Cimento	29
4.1.2 Difração de raios-X	32
4.1.3 Espectrometria de fluorescência de raio X – RC.....	34
4.1.4 Difração de raio-X.....	35
4.1.5 Análises térmicas das pastas.....	36
4.1.6 Espectroscopia por transformada de Fourier	37
4.1.7 Granulometria a laser.....	39
4.1.8 MEV - Microscopia eletrônica por varredura.....	40
4.1.9 Análise Petrográfica	41
4.1.10 Ensaio de expansão em barras de argamassa.....	43
4.1.11 Ensaio de atividade pozolânica de Chapelle	46
5. CONCLUSÃO	47
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	48
7. REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

Para obter benefícios técnicos e econômicos, a indústria do cimento há décadas utiliza adições minerais em substituição parcial ao clínquer no cimento Portland. Além de vantagens associadas à diminuição de custos e a melhoria de determinadas propriedades cimentícias, as adições minerais propiciam uma maior sustentabilidade na cadeia produtiva do cimento, pois possibilitam a reciclagem de subprodutos e resíduos industriais, a redução de emissões perigosas lançadas na atmosfera e dos gastos de energia durante a sua fabricação, e por vezes, a minimização do consumo de recursos naturais não renováveis (GARCIA *et al.*, 2014)

As adições minerais compreendem substâncias silicosas, finamente cominuídas, que uma vez inseridas ao cimento e ao concreto reagem química e com os produtos da hidratação do clínquer ou do cimento (efeito químico) e/ou preenchem os vazios (efeito físico), modificando a microestrutura do material. O efeito químico é decorrente da capacidade de reação da adição mineral com o hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 , gerado durante a hidratação do cimento, para formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. A reação entre a adição mineral e o Ca(OH)_2 é denominada reação pozolânica.

Quanto às alterações físicas, vários efeitos podem ser gerados pelas adições minerais nos materiais à base de cimento: efeito microfíler, produto do aumento da densidade da mistura pelo preenchimento de espaços vazios pelas partículas das adições, cujo diâmetro médio deve ser semelhante ou menor que o diâmetro médio das partículas de cimento; refinamento da estrutura de poros, ocasionado pelas partículas das adições que podem agir como pontos de nucleação para os produtos de hidratação; e alteração da microestrutura da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que fica retido sob os agregados (Isaia, 2010).

Uma das adições minerais mais comuns e que vem ganhando espaço no mercado brasileiro é a argila calcinada. Para sua produção, tem sido empregada substâncias minerais argilosas de composição caulínica. As argilas do grupo da caulinita sofrem transformações químicas, em especial, a desidroxilação e amorfismo dos constituintes argilosos entre 500 °C e 800 °C, faixa de temperatura que lhes conferem quando devidamente cominuídas, reatividade química basicamente de caráter pozolânico. A partir de 900 °C inicia-se a formação de fases cristalinas estáveis, inibindo de forma crescente a sua reatividade.

Neste contexto, o presente estudo refere-se ao potencial uso do resíduo cerâmico (RC) obtidos em indústrias cerâmicas do Polo de Iranduba e Manacapuru, como adição.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

Avaliar o potencial uso dos resíduos de tijolos cerâmicos de duas olarias localizadas no Polo Cerâmico de Iranduba e Manacapuru como material pozolânico e aditivo mineral para a mitigação da reação álcali-agregado em misturas com cimento Portland.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar química, mineralógica e estruturalmente o resíduo cerâmico calcinado;
- Avaliar o potencial reativo do agregado graúdo empregado;
- Produzir argamassas com a substituição parcial do cimento Portland por 50% de resíduo cerâmico moído;
- Analisar a mitigação da reação álcali-agregado e o índice de pozolanicidade nas argamassas produzidas.

1.2 Estrutura da dissertação

O trabalho encontra-se ordenado da seguinte forma:

Capítulo 1: São exibidas a introdução, objetivos da pesquisa e a estrutura da dissertação com a descrição dos capítulos.

Capítulo 2: Expõe o referencial teórico desta dissertação, aborda o resíduo cerâmico desde a matéria-prima até a transformação, principais técnicas de caracterização.

Capítulo 3: Neste capítulo é tratado de forma especificada os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da pesquisa.

Capítulo 4: Aponta o artigo produzido com dados obtidos na pesquisa.

Capítulo 5: São mostradas as conclusões pontuais e hipóteses do autor, de forma a agregar o que fora debatido nos capítulos anteriores.

Capítulo 6: São apresentadas as sugestões para trabalhos futuros.

2. RESÍDUO CERAMICO

2.1 Resíduo cerâmico – Processo produtivo do Polo Oleiro

A indústria da cerâmica vermelha é um segmento formado por 6.903 empresas, em sua maioria de pequeno porte, pulverizadas por todo país, localizadas próximos aos mercados consumidores em suas regiões. De acordo com dados e informações do setor, esse é o segmento responsável por mais de 90% das alvenarias e coberturas construídas do Brasil, geradora de um faturamento anual de R\$18 bilhões e responsável por 293 mil empregos diretos (ANICER, 2015).

Sendo o setor de cerâmica vermelha um subsegmento altamente influenciado pela indústria da construção civil, representando 4,8% da mesma, foi observado um acelerado processo de industrialização com a grande produção após o final da década de 1960, tendo como motivo a implementação de programas habitacionais no Brasil que fez com esse setor saísse de um perfil essencialmente artesanal para uma produção industrial em grande escala.

2.2 Polo Oleiro – Iranduba e Manacapuru

Iranduba, cidade pertencente ao estado do Amazonas, está situada a 22 km da capital e integra a região Metropolitana de Manaus. Possui o maior polo produtor de materiais cerâmicos da região, sendo responsável por 75% de toda a produção cerâmica vermelha do estado do Amazonas, em termos quantitativos produz em média 35.000 toneladas de tijolo por mês. De acordo com dados obtidos junto a ACERAM (Associação dos Ceramistas do Amazonas), existem 34 olarias cadastradas para a produção do tijolo furado, produto mais consumido na indústria da construção civil na região (PICANÇO, 2012).

Conforme dados atualizados em 2018 coletados nas olarias, em visita técnica, a primeira olaria situada na cidade de Iranduba A produção de tijolos cerâmicos de oito furos em uma das olarias pesquisadas chega a 620 milheiros por mês, segundo o proprietário.

Segundo Mello (2017) a fabricação da cerâmica tem perda razoável de material, cujo descarte como entulho era inevitável, devido às dificuldades de reutilização no processo industrial. O mesmo ocorria com o material descartado após o consumo. Nas etapas de manuseio e transferência das peças secas para os fornos e estoque e por último expedição, algumas peças são quebradas e os índices de quebra é muito alto, O percentual de quebras varia de item para outro. Enquanto o tijolo tem um índice de total de 2,28% e a lajota de 2,01% que são índices de aceitáveis, a telha de 8,17 que é um índice alto. Ele reflete maiores cuidados necessários para manusear este produto de design alongado que o torna mais frágil quando comparado com outros itens.

A geração de resíduos somente na produção de tijolo chega próximo de 1 milhão de unidades por mês, considerando a estimativa de produção de 10 milhões de tijolos por mês (ACERAM, 2018). Cada tijolo pesa 3,0 kg, assim 3.000 toneladas deste resíduo cerâmico são geradas, por mês, somente na produção de tijolos do município de Iranduba. De modo que à reutilização dos resíduos, nos foi esclarecido que algumas olarias trituram e reutilizam o material no próprio processo produtivo, ao passo que outras doam o material para ser aplicado na conservação das estradas rurais e, afinal, algumas empresas comercializam ainda no pátio da fábrica o resíduo gerado a partir da produção de tijolo por R\$10,00 um metro cúbico ou R\$ 5,00, caso seja resíduo da produção de telhas cerâmicas.

Com a instalação da Zona Franca de Manaus, a expansão econômica proveniente da criação de incentivos fiscais a partir de 1967, provocou novamente a expansão desse setor e um crescente número de empresas cerâmicas surgiram no período de 1965 a 1975 por força do elevado crescimento urbano e populacional da capital do Estado.

Na década de 70 o setor oleiro cerâmico estava concentrado na região de Manaus. Segundo Damião *et al.* 1972, naquela época, apenas duas olarias encontravam-se instaladas no atual município de Iranduba. O setor produzia tijolos de dois, quatro e oito furos, tijolos maciços, combogó (elementos vazados), telha dos tipos “canal” e “Marselha”, tubos cerâmicos de variadas polegadas de diâmetro e conexões, porém, com a entrada de chapas de amianto, tubos plásticos e artefatos importados reduziram drasticamente a diversidade do setor, restringindo a quase que unicamente, na produção de tijolos de oito furos para a construção civil. Somente a partir da última década ressurgiu a indústria de telhas e tijolos maciços.

A partir dos anos 80 iniciou a migração das principais olarias existentes em Manaus, forçada pela expansão urbana para a região de Cacau-Pirêra (margem direita do rio Negro), hoje distrito de Iranduba, local onde já estavam instaladas algumas indústrias cerâmicas, porém, ainda permaneceram em Manaus apenas algumas olarias de pequeno porte.

Muitos outros fatores vieram contribuir para o deslocamento desse setor industrial: a) existência de extensos depósitos de matéria-prima argilosa os quais vêm sendo explorados desde o final do século XIX; b) manutenção de proximidade com o centro consumidor de Manaus; c) existência de incentivos fiscais para as vendas destinadas à Zona Franca de Manaus e instalação de empresas no interior; d) elevada oferta de mão-de-obra não-especializada e barata; e) existência de incentivos financeiros através de financiamentos públicos de baixo custo; f) expansão da malha urbana de Manaus e conseqüente valorização

dos seus imóveis, além do maior rigor do controle ambiental na capital. Novos polos oleiro-cerâmicos foram criados a partir de então, cuja expansão aconteceu na sede de Iranduba e margens do rio Ariaú, adentrando ainda o município de Manacapuru (D'ANTONA *et al.*, 2007).

A produção destes polos está estreitamente vinculada à demanda da capital Manaus e que concentra quase a metade da população e mais de 90% da renda do Amazonas.

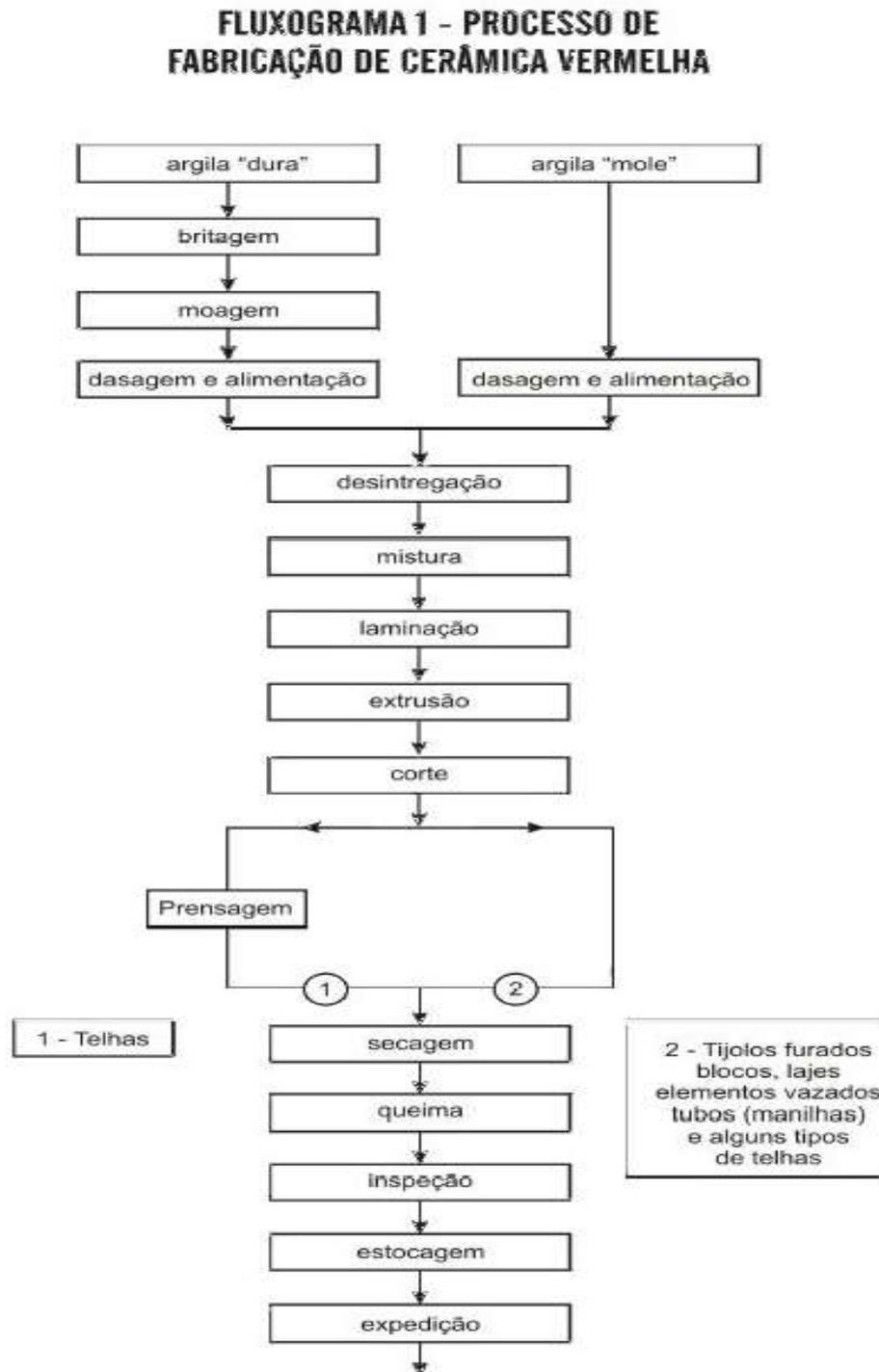
Segundo Pinheiro (2015) é evidente que a demanda por produtos cerâmicos tem relação direta com o quantitativo populacional, uma vez que boa parte dos produtos cerâmico-oleiros é empregada em construções de unidades habitacionais e prédios industriais e comerciais. Com o considerável aumento demográfico da capital do Amazonas em fins do século XIX e durante todo o século XX, a procura por materiais cerâmicos aumentou expressivamente. Nos últimos quinze anos, a cidade tem vivido uma expansão contínua no ramo da construção civil, principalmente no que diz respeito às edificações verticais. Atualmente, a produção cerâmico-oleira de Iranduba e de Manacapuru é responsável por cerca de 95% do abastecimento da capital do Amazonas. Esta produção, segundo informação do Sindicato das Indústrias de Olarias do Estado do Amazonas – SINDCER/AM (2012), chega a 12 milhões de peças por mês.

De acordo com Paiva *et al.* (2007), o maior consumidor é Manaus, que absorve quase 95% dessa produção, sendo que, devido ao processo fabril rudimentar e manual, há uma perda média de 4 % de produtos queimados, gerando, de acordo com Seye *et al.* (2003), o equivalente a 9600 toneladas por ano de resíduo cerâmico, o qual é depositado indevidamente, de acordo com De Souza Campelo *et al.* (2006), em pátios das olarias ou em locais inadequados, como leitos de rios, gerando problemas ambientais.

2.3 Processo de fabricação da indústria cerâmica

O processo de fabricação de produtos cerâmicos empregado pelas indústrias do setor é apresentado no fluxograma da Figura 1.

Figura 1- Fluxograma do processo produtivo



Fonte: ABCERAM

2.3.1 Etapas dos processos produtivo nas indústrias de cerâmica vermelha

- Extração da matéria-prima: Envolve as fases de pesquisa geológica e avaliação do depósito, lavra (extração de argila) e transporte até o pátio da indústria cerâmica.

- Preparação da massa cerâmica: Compreende o sazonalamento (maturação das argilas de modo em separado por um período mínimo de três meses a céu aberto), mistura de argilas e estocagem em galpão coberto (quantidade suficiente para o consumo quinzenal), conforme observado na Figura 2. No caso de matéria-prima constituída por argila dura (rocha sedimentar tipo “tagua”) faz-se necessário a moagem ou britagem desse material antes da mistura com um outro tipo de argila mole (não é o caso desta região).

- Conformação: Consta de extrusão e corte, observado na Figura 3.

- Tratamento térmico: Consiste das fases de secagem e de queima.

- Acabamento: Resume-se as fases de tratamento especial (impermeabilizantes ou corantes no caso das telhas), seleção ou inspeção de qualidade (cerâmica estrutural em geral), eliminação de rebarbas e pintura (artesanatos).

- Estocagem e Expedição: Armazenagem temporária e escoamento da produção ao mercado.

Figura 2- Estocagem em galpão coberto



Figura 3 - Corte dos tijolos cerâmicos



Fonte: Autor (2020).

2.3.2 Preparação da massa cerâmica

A finalidade é a obtenção de homogeneidade granulométrica e na composição mineralógica.

2.3.3 Sazonamento

É a fase de descanso ou maturação da matéria-prima e que consiste em estocar a argila a céu aberto quando ocorre o processo de aeração e cura do material. A exposição ao tempo ajuda na lixiviação de sais solúveis e auxilia na homogeneização e distribuição da umidade na massa argilosa. A estocagem de matéria-prima volta-se ao período de cheia dos rios quando os barreiros se tornam alagados ou ainda no mínimo para a época da estação mais chuvosa (período dezembro-abril) no caso de barreiros situados em locais relativamente mais altos.

2.3.4 Mistura

A mistura é a combinação de dois ou mais tipos argilosos a fim de que o produto final apresente qualidade pós-queima. As argilas da mistura podem ser oriundas do mesmo barreiro ou de diferentes áreas, sendo que ensaios tecnológicos são necessários ao auxílio na seleção dos melhores tipos à combinação.

2.3.5 Homogeneização

A homogeneização é feita manualmente nas olarias. A homogeneização é feita manualmente nas olarias com pouquíssima tecnologia, ou através de misturadores, de modo a se obter uma massa argilosa com maior uniformidade granulométrica e no teor de umidade. Envolve desde a alimentação, desintegração (desfazer os torrões de argila), laminação, umidificação até a entrada da massa na extrusora.

2.3.6 Conformação

A conformação envolve três processos: extrusão, prensagem e torneamento. A extrusão consiste em compactar a massa argilosa em uma câmara simples (maromba simples) ou de alta pressão, equipada com sistema de “desaeração” (maromba a vácuo), contra um molde (boquilha) de formato do bloco cerâmico desejado.

2.3.7 Tratamento térmico

O tratamento térmico envolve dois processos: secagem e queima. O processo de secagem se constitui pela eliminação da maior parte da água, pós-conformação, dos produtos cerâmicos, através do ar aquecido ou aeração natural. A secagem objetiva reduzir a umidade de extrusão dos produtos cerâmicos, que normalmente oscila entre 20 a 30% chegando até 5% a 8%. A secagem por ar aquecido é realizada por 44% das empresas cerâmicas da região.

Manacapuru – Iranduba e nas demais regiões, não é praticada. A secagem natural é praticada por 56% das empresas cerâmicas da região Manacapuru – Iranduba e totalidade das demais regiões. Neste processo de secagem natural o arranjo e a disposição dos lotes, os locais de secagem são os mais diversos, dando margem a criatividade. É durante a fase da queima que os produtos cerâmicos, submetidos ao tratamento térmico, sofrem transformações físico-químicas, as quais alteram suas propriedades mecânicas e lhes conferem as características inerentes a todo produto cerâmico (FIGURA 4).

Figura 4 - Secagem e queima de tijolos



Fonte: Autor (2020).

2.3.8 Acabamento

Envolve dois principais procedimentos: inspeção e estocagem. A inspeção é realizada na saída do forno, onde o material quebrado, trincado, lascado, queimado em excesso é rejeitado. Em todas as regiões é feita a inspeção. A estocagem é feita em área de cobertura ou não, permanecendo aí até sua expedição (FIGURA 5).

Figura 5 - Expedição e Estocagem



Fonte: Autor (2020).

2.3.9 Expedição

A expedição (transporte) é efetuada por meio de caminhões que se deslocam por vias rodoviárias e hidroviárias (balsas). As empresas cerâmicas utilizam veículo próprio ou terceirizado. Na região Manacapuru – Iranduba apenas as empresas de porte médio e grande dispõem de sistema de entrega dos produtos acabados. Trafegam, em média, com 10 milhões de tijolos. Alguns caminhões do tipo carretam também são empregados. O mau condicionamento e empilhamento do produto cerâmico por ocasião do transporte, o manuseio no carregamento e descarregamento causa defeito (lascas e fraturas).

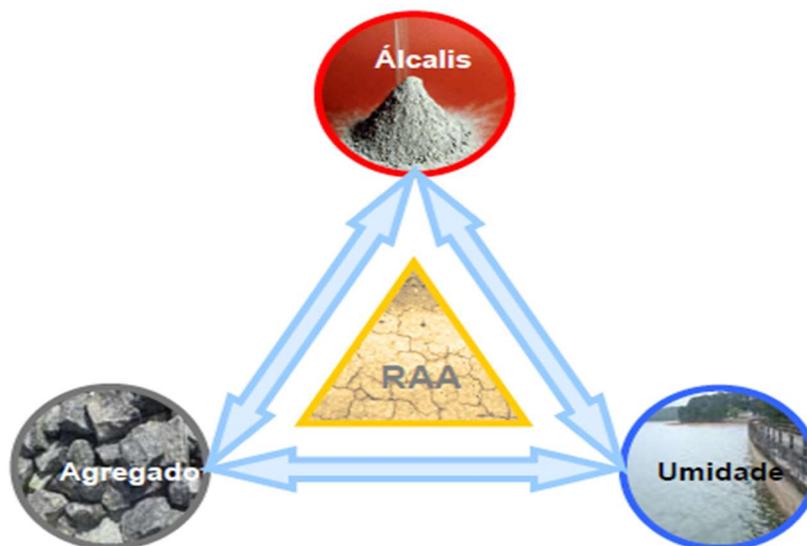
2.3.10 Perda no Processo Produtivo

As perdas variam em função do nível de tecnologia empregado. Quanto maior investimento em tecnologia (equipamentos modernos e mão de obra qualificada) menor são as perdas no processo produtivo. Dessa forma as micros e pequenas empresas são as que apresentam as maiores perdas. As microempresas por utilizarem um sistema deficiente de transporte interno e fornos rudimentares como do tipo Caieira apresentam perdas elevadas. Nas pequenas empresas as perdas ocorrem mais no processo térmico em decorrência da deficiente preparação da massa cerâmica. Estimou-se por ocasião das visitas de campo uma perda da ordem de: até 30% nas microempresas; de 5 a 10% nas pequenas e nas demais em torno de 5% (D'ANTONA, 2007).

2.4 Reação álcalis-agregado

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é um termo geral utilizado para descrever vários tipos de reações químicas que podem ocorrer internamente no concreto envolvendo alguns componentes mineralógicos presentes em rochas e agregados reativos usados em concreto e álcalis da solução dos poros. Com o resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, na sua maioria, são capazes de expandir e causar tensões internas, fissuração e deslocamentos, podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto e afetar, por conseguinte a sua durabilidade. Ou seja, para que a reação deletéria ocorra, é necessário a presença de umidade (ISAIA, 2011). Portanto, são três os fatores condicionantes desse fenômeno que, atuando conjuntamente, o caracterizam como deletério: as fases mineralógicas do agregado consideradas como reativas, os hidróxidos alcalinos e a umidade (FIGURA 6).

Figura 6 - Fatores condicionantes do fenômeno da RAA deletéria



Fonte: Couto (2008).

Os álcalis envolvidos no processo químico da reação álcali-agregado são derivados do sódio e potássio. Devem possuir a capacidade de se solubilizar para a reação. Podem vir de tanto de fontes internas, como do cimento, principalmente, mas também dos demais materiais constituintes do concreto, como agregados, adições minerais, aditivos, água de mistura, ou mesmo de outras fontes externas ao concreto, como águas alcalinas industriais ou marinhas que podem migrar para o interior de concreto.

O primeiro estudo publicado no Brasil sobre reação álcali-agregado foi desenvolvido por Gitahy (1963), quando se investigavam os agregados disponíveis para a construção da Barragem de Jupuíá. Após ensaios laboratoriais, foi verificada a presença de materiais reativos. Em vista da impossibilidade de utilização de outros tipos de agregados, foram adotadas medidas preventivas tanto por meio da limitação de teor de álcalis do cimento, como no emprego de até 35% de pozolana em substituição ao cimento (ISAIA, 2011).

Segundo Hasparyk (2005), a reação álcalis-agregado (RAA) que ocorre de forma lenta na matriz à base de cimento Portland. Embora tenha sido descoberta há mais de 70 anos, ainda não foi encontrada uma maneira eficiente de controlar suas expansões quando instaladas. Existem apenas medidas preventivas, ou mitigadoras, que devem ser tomadas,

com a finalidade de evitar ou reduzir os efeitos da reação química.

Dentre as medidas preventivas, aponta-se o controle do teor de álcalis, ou seja, evitar o uso de cimentos com alto teor de sódio e potássio ao empregar agregados reativos (ASTM C-150, 2018). No entanto, sabe-se por Tiecher (2006) que apenas controlar ou limitar o teor de álcalis não garante a mitigação ou o desencadeamento da RAA.

Considerando o contexto geológico, sabendo-se que materiais deformados ou vítreos com condição mineralógica amorfa ocasionam a RAA, medidas mitigadoras podem ser providenciadas. O uso de adições minerais é uma forma de tentar mitigar a RAA, cujo principal benefício se dá pelo desenvolvimento de reações pozolânicas, que consomem hidróxido de cálcio para formar silicato de cálcio hidratado adicional. No entanto, mesmo havendo a reação pozolânica, existem pozolanas que não inibem a RAA, levando a crer que seus benefícios possam estar associados a outros fatores, como as suas características químicas e físicas, além dos teores de substituição de cada material (SILVEIRA, 2007; ZERBINO *et al.*, 2015).

De acordo com Chappex e Scrivener (2012), os materiais pozolânicos ricos em alumina silicatos apresentam potencial mitigador e bom desempenho frente às reações expansivas da RAA, se comparados aos materiais compostos basicamente por sílica. Em seus estudos a principal razão para isso é a diminuição da alcalinidade da solução de poros da pasta de cimento, que por sua vez é atribuída à alteração na composição do C-S-H.

Chappex e Scrivener (2012), estudam o efeito da incorporação de alumínio e silício em C-S-H na composição da solução de poros em pastas de cimento contendo SCMs. Embora o C-S-H nos sistemas de metacaulim tenha claramente um teor mais alto de alumina, a capacidade de "fixação" dos álcalis parece ser semelhante à do C-S-H nos sistemas de quartzo de sílica ativa. Evidenciando o efeito da alumina na absorção alcalina de C-S-H sintetizado, confirmando assim a constatação de que a alumina em C-S-H não altera drasticamente a alcalinidade da solução porosa em pastas misturadas reais. E se seu artigo mostra a eficácia de SCMs contendo alumina na redução da expansão devido à reação de sílica alcalina depende de algum outro mecanismo.

Tendo em vista o efeito positivo associado aos materiais ricos em sílica e alumina, propôs-se avaliar três materiais com diferentes teores de alumina, o resíduo de cerâmica vermelha, o metacaulim e a cinza volante.

2.5 Tipos de Reação Álcali-Agregado

A RAA é classificada de três formas: reação álcali-sílica, reação álcali-silicato e reação álcali-carbonato. Porém muitos especialistas têm restringido a abordagem da RAA a apenas dois tipos; reação álcali-sílica e reação álcali-silicato pode ser considerada um tipo específico de reação álcali-sílica. Na verdade, os processos e as consequências são bem semelhantes: o que difere são as fases presentes nos agregados para cada classificação e o tempo de desenvolvimento da reação.

2.5.1 Reação álcali-agregado (RAA)

Reação química que ocorre em argamassas ou concretos envolvendo os íons hidroxila (OH⁻) associados com os componentes alcalinos sódio e potássio, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, que, com certas fases minerais que podem estar presentes em agregados graúdos ou miúdos, que em determinadas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa (NBR 15577-1, 2018).

2.5.2 Reação álcali-carbonato (RAC)

Reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland ou outras fontes, e em agregados calcários dolo míticos argilosos, acompanhada de desdolomitização, que sob certas condições, pode causar expansão deletéria do concreto ou argamassa. A reação dos agregados carbonáticos que resulta somente em desdolomização, sem expansão deléteria, não é chamada de reação álcali- carbonato (NBR 15577-1, 2018).

2.5.3 Reação álcali-sílica (RAS)

Reação entre hidróxidos alcalinos, provenientes do cimento Portland com fontes de rochas silicosas ou minerais silicosos, como opolas e cherts, quartzo microcristalinos, quartzo deformado, vidro vulcânico, vidro reciclados, e outras, presentes em alguns agregados, que gera, como produto da reação, gel álcali-sílica, que pode causar expansão anormal na fissuração do concreto em serviço (NBR 15577-1, 2018).

2.6 Agregados

De acordo com (SABBAG, 2003) existem vários fatores ocasionadores da RAA devido ao agregado usado na mistura. Destacam-se:

- a) os constituintes mineralógicos: tipo, histórico tectônico e de alteração;
- b) relativos à rocha: estrutura, tamanho dos grãos, porosidade, permeabilidade, área específica e composição.

Sanchez *et al.* (2014) estudaram a influência da variação da granulometria do agregado sobre a RAS e percebeu que, para agregados de menor granulometria, a expansão

se apresentou de forma linear e mais rápida do que para agregados maiores, onde a curva de expansão se apresentou com formato curvo e mais lento. Porém, em ambos os casos, o desenvolvimento da RAS foi mais rápido quanto maior foi a resistência característica do concreto e o conteúdo de álcalis.

Segundo Gameleira (2019) agregados de maior granulometria tendem a reter maiores concentrações de OH e íons alcalinos em seu interior. Isso tem como consequência a formação do gel expansivo de dentro para fora, ao invés da superfície, onde é maior a concentração de cálcio proveniente do cimento (SAOUMA *et al.*, 2015). O que explica a severa fissuração dos agregados e o fim prematuro da reação em agregados de granulometria mais fina.

Um agregado será mais reativo, quanto mais desorganizada e instável for sua estrutura. Outro fator que aumenta o poder da reação dos agregados são as alterações em rocha, que causam distorções resultantes de deformações tectônicas (SABBAG, 2003).

Conforme a NBR ABNT: NBR 15577-1 (2018) agregado reativo ou deletério que reage quimicamente com a solução alcalina contida nos poros do concreto ou aquele proveniente de fontes externas e que resulta em manifestações patológicas devidas à reação álcali-agregado.

A norma dá indicativos percentuais das fases mais comuns que podem causar a RAA, além do contido na norma, outros minerais podem causar a RAA, como os envolvidos na reação álcali-silicato. Os mais mencionados são pertencentes ao grupo de filos silicatos, como vermiculita, a ilita e a montmorilonita. Também são destacados os feldspatos alcalinos alguns minerais presentes nos folhetos argilosos. Como resultado da deformação da rocha, temos a característica de estiramento e deformação do quartzo resultante de processos de deformação principalmente do cisalhamento sucedido na rocha (ISAIA, 2011).

2.7 Teor de álcalis

Segundo a ASTM C150 (2018) sugere que quando do uso de agregados reativos ou potencialmente reativos, o teor máximo de álcalis do cimento seja de 0,6%.

Segundo a ABNT NBR 15577-1 determina que os álcalis sais de sódio e/ou potássio, provenientes de qualquer fonte interna ou externa ao concreto, que quando em contato com a água são solubilizáveis imediatamente ou ao longo do tempo.

Ao combinar um cimento com elevado teor de álcalis e um agregado inerte, Heymsfield *et al.* (2016) observaram que ao longo do tempo, devido ao teor de álcalis, algumas reações expansivas começaram a se formar com os minerais do agregado, até então,

considerados inócuos. Desta forma, os autores citam que a apenas a limitação de 0,6 de Na_2O que não garante a não ocorrência da RAA e medidas adicionais devem ser previstas. Os autores verificaram ainda, através da análise de solução dos poros do concreto, que os álcalis solúveis diminuem à medida que a deterioração ocorre no concreto. Isso é explicado pela insolubilidade dos mesmos quando adsorvidos em produtos da reação e pela lixiviação de álcalis no concreto, devido à formação das fissuras.

2.8 Umidade

As condições ambientais e externas, como a umidade e a temperatura, são importantes, pois interferem diretamente na velocidade e intensidade da reação álcali-agregado. A umidade ou água presente no meio desempenha duas funções: uma na qual promove um meio propício para o desencadeamento da reação, facilitando a ionização e migração dos íons espécies reativas, e outra na qual age diretamente já no produto formado, adsorvendo-a e produzindo, por conseguinte, expansões. Internamente como visto, a água é potencializadora da reação. Assim, a água de amassamento passa a ser um fator influente, em função da umidade residual existente na solução dos poros do concreto. Mesmo sem aporte do externo de água o concreto pode alimentar a reação e também as expansões da RAA. Segundo a ABNT: NBR 15577-1 (2018), informa que estruturas maciças, mesmo em ambientes secos, podem propiciar umidade suficiente para o desenvolvimento da reação.

Sabe-se que, em ambientes com umidade relativa acima de 80%, ocorre um aumento um aumento na magnitude da reação. Por isso, as estruturas localizadas em ambientes úmidos, tais como barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas, estão mais sujeitas a esse tipo de deterioração (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

A umidade relativa interna do concreto necessária para o desenvolvimento de e manutenção da RAA está acima de 80% a 85%. Porém, se o concreto já possuir gel da RAA (tendo esse perdido água) estiver carbonatado, mesmo na presença de água adicional, segundo Fournier & Berubé (2000) e Poole (1992), é improvável que ocorra expansão.

2.9 Argilas Calcinadas

As argilas calcinadas são uma alternativa de material pozolânico para serem usadas como materiais cimentícios suplementares existem a necessidade de ícia conhecer melhor a atividade pozolânica dos materiais alternativos que sejam menos dispendiosas e mais sustentáveis para a produção de uma matriz cimentícia. As argilas são materiais que passam por essas comprovações quanto ao potencial de reatividade. Em seus componentes elementares estão a sílica e alumina que após sofrerem ativação térmica controlada e serem

finalmente dividida são estimulados a reagir com o hidróxido de cálcio na presença de água para formar compostos com propriedades de cimento, meio direto de atestar o seu potencial pozolânico devido à reação entre CH e pozolana (MARQUES, 2017).

Segundo (MARQUES, 2017) estas argilas são ativadas termicamente em 500°C e 900°C causando a dexidroxilação de minerais argilosos para obter fases de alumino silicatos amorfo, evitando a formação de precursor de mulita que são fases cristalizadas. As fases amorfas que reagem com hidróxido de cálcio na presença de água produzindo C-S-H e hidratos de alumina produtos que densificam a matriz e elevam a resistência.

2.10 Ação das pozolanas

Segundo Metha (2008), a utilização de adições minerais tem influência benéfica sobre a durabilidade do concreto, devido aos efeitos físicos associados com o tamanho das partículas, que são sílicas geralmente mais finas que as do cimento Portland, e pelas reações pozolânicas e cimentícias.

De acordo com a ASTM C 618/97 e a ABNT NBR 12653, pozolana é um material que por si só, possui pouca ou nenhuma atividade cimentícia, porém, quando finamente dividida e na presença de água, reage com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades cimentantes, cuja reação chamada de pozolânica.

As pozolanas podem tanto ter origem de materiais naturais (tufos vulcânicos, terras diatomáceas, argilas calcinadas)–quanto de subprodutos e resíduos industriais (cinza volante, sílica ativa e cinza de casca de arroz). Podem ser utilizadas como substituição de parte do cimento ou como adição em percentuais variáveis em relação à massa de cimento (FRAGA, 2017).

Segundo Vieira (2005), em todo planeta tem se intensificado, através de pesquisa, o uso de argilas calcinadas visando à obtenção e o beneficiamento de pozolana de baixo custo, a partir de subprodutos industriais como substitutos parciais do cimento Portland em argamassas e concretos. Essas substituições implicam em benefícios para o meio ambiente, haja vista que o próprio cimento Portland quando lançado na atmosfera, por si só é gerador de CO₂ na natureza. A metacaulinita, as cinzas da casca de arroz e os resíduos cerâmicos moídos são exemplos de materiais estudados com esse propósito.

Segundo Neville (2014), para uma avaliação da atividade pozolânica com cimento, a ASTM C 311-07 prescreve a determinação do índice de desempenho com cimento Portland. Ele é estabelecido pela determinação da resistência de uma argamassa com um teor especificado de substituição do cimento por pozolana. O resultado do ensaio é influenciado

pelo cimento utilizado, especialmente pela finura e pelo teor de álcalis.

Neville (2014) cita ainda que, a pozolanicidade dos cimentos pozolânicos, ou seja, dos cimentos que contém entre 11 e 55% de pozolana e sílica ativa, é verificada conforme recomendações da BS EN 196-5 (2005). O ensaio compara a quantidade de hidróxido de cálcio presente na fase líquida em contato com o cimento pozolânico hidratado com a quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ capaz de saturar um meio de mesma alcalinidade.

Melo Filho (2012) cita que uma das principais finalidades dessas adições minerais é promover reações pozolânicas, as quais consomem o hidróxido de cálcio (CH) formando o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), e atua como filler aumentando a densificação da matriz. O consumo do hidróxido de cálcio gerando composto hidratado aumenta a resistência mecânica da matriz em longo prazo e durabilidade, devido à transformação em produtos mais resistentes e refinamento dos poros.

A adição de materiais pozolânicos, além de reagirem a expansão causada pela reação álcali-agregado, aprimora outras propriedades do concreto, com a permeabilidade, a resistência ao calor, a difusividade, e o tamanho da zona de transição, devido à presença de partículas sólidas menores.

Segundo Ramachandran (1998), a eficácia com que as misturas de pozolanas naturais, cinza volante, cinza de arroz, escória de alto forno e sílica ativa previnem os efeitos da reação álcali-agregado, vai depender da composição química das misturas, da quantidade adicionada, do tipo de agregado e do tipo de álcalis no cimento (sódio, potássio ou lítio).

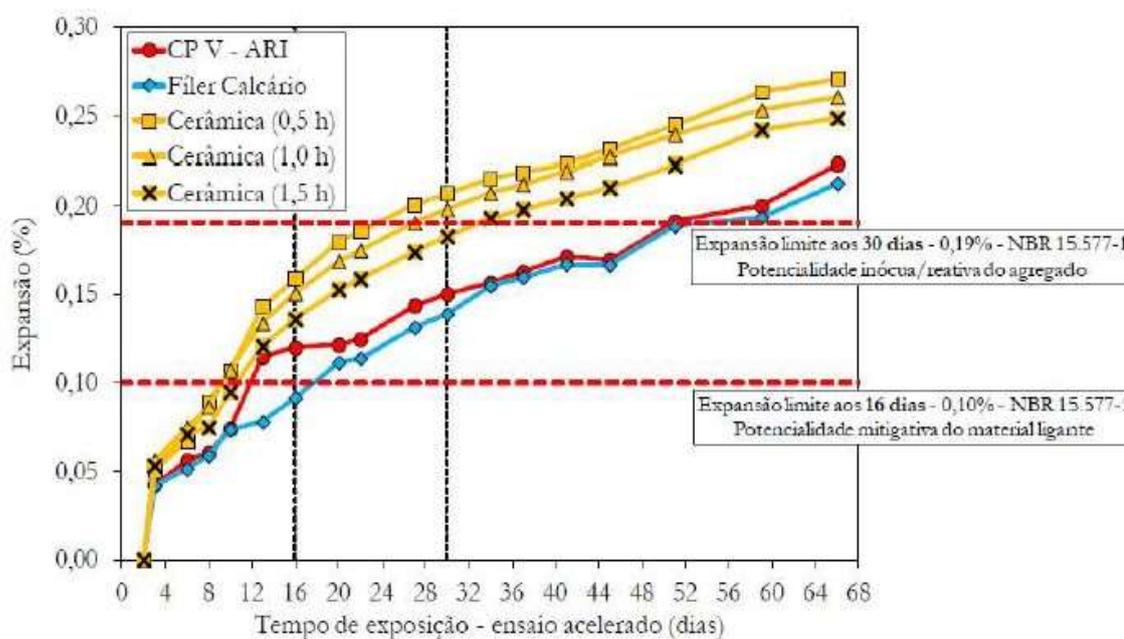
Segundo Diamond (1997), as adições pozolânicas agem por meio de um mecanismo de reação de superfície, que reduz não só a concentração de álcalis, mas também a concentração de íons hidroxila (OH^-), isto é, o pH da solução da água dos poros.

Trindade (2015) avaliou em seu trabalho o potencial reativo frente à reação álcali-sílica, da sílica ativa e de dois tipos de cinzas de casca de arroz, uma comercial e outra residual. Adotou-se teores de 5 a 50% como substituição parcial ao cimento Portland padrão. Um dos ensaios que o autor utilizou foi o método acelerado em barras de argamassa, segundo a ABNT NBR 15577-4: 2008. Os resultados obtidos apontaram que ambas as cinzas de casca de arroz foram reativas frente às reações álcali-sílica. Porém, com o teor de 50%, ambas se mostraram inócua à reação. Já a sílica ativa foi considerada inócua em todos os teores avaliados.

Medeiros et al. (2016) estudaram a influência da substituição parcial (15%) do CP V – ARI por filer calcário e resíduo de cerâmica vermelha (RCV) (com diferentes tempos de

moagem) na mitigação da expansão das argamassas devido às reações álcali-sílica ao longo de 66 dias. A Figura 7 apresenta os gráficos da expansão de barras de argamassa produzidas com esses materiais.

Figura 7 - Reação álcali-sílica: evolução da expansão média das barras de argamassa com 100% de cimento comparado com substituição de 10% do cimento por adições minerais



Fonte: Medeiros et al. (2016).

De acordo com os resultados da Figura 7, Medeiros *et al.* (2016) concluíram que o cimento CPV – ARI, utilizado como padrão, resultou em um sistema com expansão superior ao limite recomendado pela ABNT NBR 15.577 – 1. A utilização do filer calcário na composição das argamassas aparentemente atribuiu potencial de mitigação a esta adição, embora, estatisticamente, o resultado possa ser considerado idêntico ao valor limite de 0,10%.

Os efeitos físicos do filer calcário interferem na microestrutura da matriz hidratada, o que propiciou redução da expansão da argamassa. O RCV, independentemente da finura, além de não mitigar a reação álcali-sílica, propiciou a expansão da argamassa a valores superiores ao observado na referência. O maior tempo de moagem do resíduo de cerâmica vermelha tendeu a reduzir a expansão da argamassa (MEDEIROS *et al.*, 2016).

A análise geral, ao longo de 66 dias, mostra que o comportamento expansivo da argamassa com filer calcário tende a se equiparar à série de referência após 20 dias, mantendo esta tendência ao longo do período estudado. Já a série contendo RCV, nas diferentes finuras, tende a manter maior expansão em comparação à série de referência para

as idades avaliadas (MEDEIROS *et al.*, 2016).

De fato, a maior expansão ocorre sempre na amostra de resíduo de cerâmica vermelha com menor tempo de moagem. Cabe salientar que a utilização de RCV, nos tempos de moagem de 0,5 e 1,0 hora, atribuiu potencialidade reativa às respectivas argamassas, pois estas superaram o valor limite de expansão de 0,19% aos 30 dias (MEDEIROS *et al.*, 2016).

A argamassa contendo o resíduo moído por 1,5 horas apresentou expansão próxima ao limite normativo para a referida idade, o que atribui a esta adição mineral incerteza sobre a sua adequabilidade para a mitigação da reação álcali-sílica (MEDEIROS *et al.*, 2016).

Finalmente (MEDEIROS *et al.*, 2016) concluíram que o resíduo de cerâmica vermelha potencializa a expansão da argamassa quando da presença de álcalis na solução aquosa dos poros da matriz hidratada.

2.11 Interações entre a Pozolana e o Cimento Portland

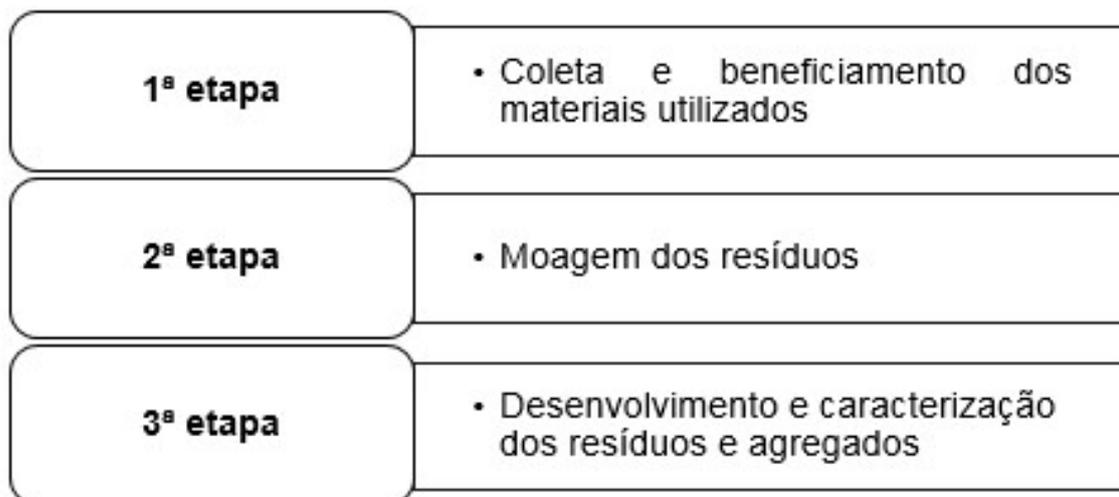
Segundo Belchior (2017) a norma brasileira NBR 12653 (2014), anexo “A” - Influência dos materiais pozolânicos nas propriedades dos compósitos concreto, argamassa e pasta, explica que os mesmos reagem com Ca(OH)_2 proveniente da hidratação do cimento Portland, formando silicato de cálcio hidratado (C-S-H) adicional. Sua adição aos 33 concretos, argamassas e pastas, em relação a uma referência, sem uso desses materiais e em igualdade de condições, via de regra, concorre para o aumento da resistência à compressão e à flexão, a idades avançadas, apesar de uma diminuição nas primeiras idades; redução da porosidade e permeabilidade; aumento da resistência a sulfatos; aumento da resistência à difusibilidade de íons cloreto; mitigação da reação álcali-agregado; redução da ocorrência de eflorescências; aumento da resistividade elétrica. A mesma norma estabelece que as propriedades no estado fresco e endurecido dos materiais já citados, conferido pelos materiais pozolânicos, quando comparadas às propriedades desses produtos sem a sua presença, dependem do tipo e desempenho do material utilizado, do teor adicionado em relação à massa de cimento Portland, do proporcionamento dos materiais (traço), incluindo os aditivos, do tipo de preparo, lançamento, adensamento, condições de cura e outros

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados no desenvolvimento da referida pesquisa. Além da descrição de detalhes técnicos não contemplados nos artigos dos próximos capítulos deste estudo.

Desta forma, o planejamento dos métodos utilizados foi subdividido em três etapas sequenciais apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Etapas de trabalho utilizadas na pesquisa



Fonte: Autor (2020).

3.1 Seleção e beneficiamento dos materiais utilizados

3.1.1 Cimento Portland

No estudo foi utilizado o cimento *Portland* do tipo comum, CPI S- 40 da marca Cemex, comercializado na cidade de Manaus. A escolha desse tipo de cimento deve-se as finalidades da pesquisa, a utilização de adições pozolânicas na matriz cimentícia, que de acordo ABNT NBR 16697: 2018- Cimento *Portland*: Requisitos, este pode conter tais adições e/ou materiais carbonáticos em sua composição na faixa de 6 a 10%.

3.1.2 Agregado graúdo

Os agregados graúdos utilizados foram coletados e doados em dois fornecedores: EBAM - Indústria Brasileira de Agregados Minerais, e Mercês Materiais de Construção, localizadas no município de Presidente Figueiredo, no estado do Amazonas. Com as seguintes coordenadas:

- ✓ EBAM – situada na coordenada: 1°50'19.85"S/60°07'03.67"O
- ✓ Mercês – situada na coordenada: 1°18'28.44"S/60°23'25.91"W

3.1.3 Resíduo Cerâmico

As matérias-primas alternativas empregadas neste estudo foram os resíduos

cerâmicos de tijolos, coletadas nas empresas do polo oleiro: Cerâmica Montemar e Cerâmica Amazônia localizadas no município de Manacapuru, Amazonas (FIGURA 9). Além disso, foram coletadas ainda amostras das argilas empregadas no processo de fabricação dos tijolos.

A localização de cada empresa é definida pelas seguintes coordenadas:

- ✓ Montemar: 3°08'19.63"S/60°21'41.23"O
- ✓ Amazônia: 3°08'05.38"S/60°22'43.68"O

Figura 9 - Localização do ponto de coleta das amostras



Fonte: Google Maps.

O esquema apresentado na Figura 10 estabelece o procedimento utilizado na moagem do resíduo cerâmico de tijolos. As amostras foram quebradas de forma manual para desagregação. Após este processo, os resíduos tijolos cerâmicos passaram pelo britador de mandíbulas, ASTECMA, mod.breaker-Fix-50, sendo estes procedimentos denominados de primeira etapa, e em seguida no moinho de panela CONTENCO, em 01 ciclo de 90 segundos. (FIGURA 10), denominada de segunda etapa.

Assim, foi utilizado o peneiramento por via seca na peneira de 200 μ m, para remoção parcial da matéria orgânica e demais impurezas presentes com o objetivo de separar as frações das demais (FIGURA 11 e 12)

Figura 10 - Processos de beneficiamento dos tijolos cerâmicos (primeira etapa): a) Quebra manual dos tijolos; b) Moagem dos tijolos cerâmicos; c) Moinho de mandíbulas tijolos cerâmicos

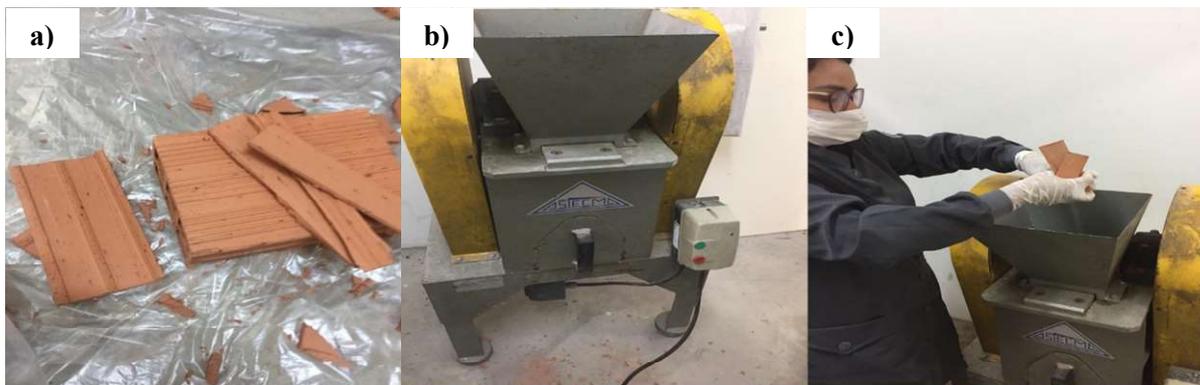
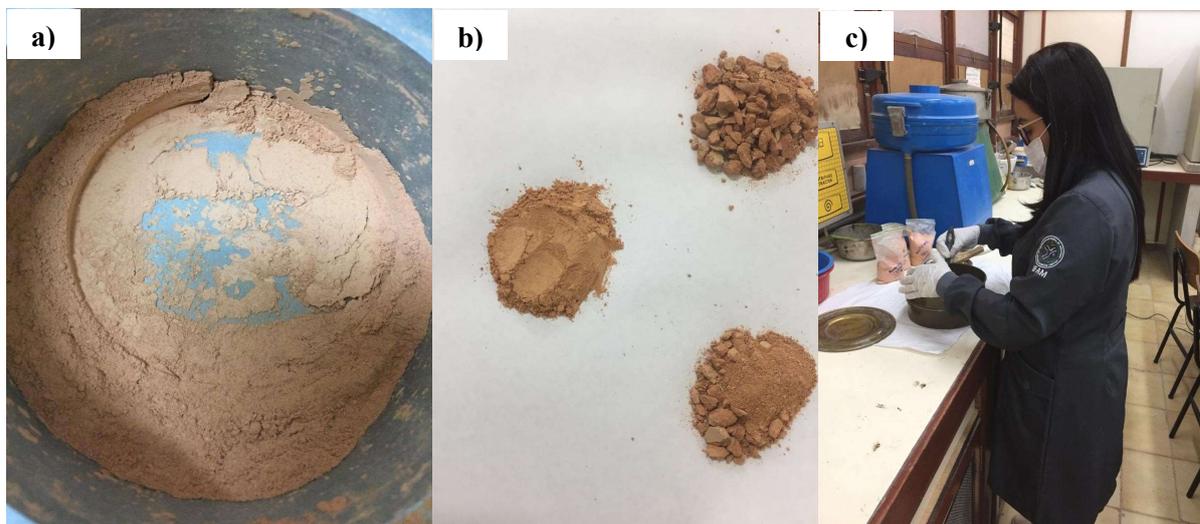


Figura 11- Processos de beneficiamento dos tijolos cerâmicos (segunda etapa): a) Tijolos após moinho de mandíbulas; b) Equipamento para moagem - Moinho de disco; c) Resíduo cerâmico após 90 segundos no moinho de disco



Figura 12 - Processos de beneficiamento dos resíduos cerâmicos: a) Material seco; b) Resíduo após a moagem; c) Peneiramento manual

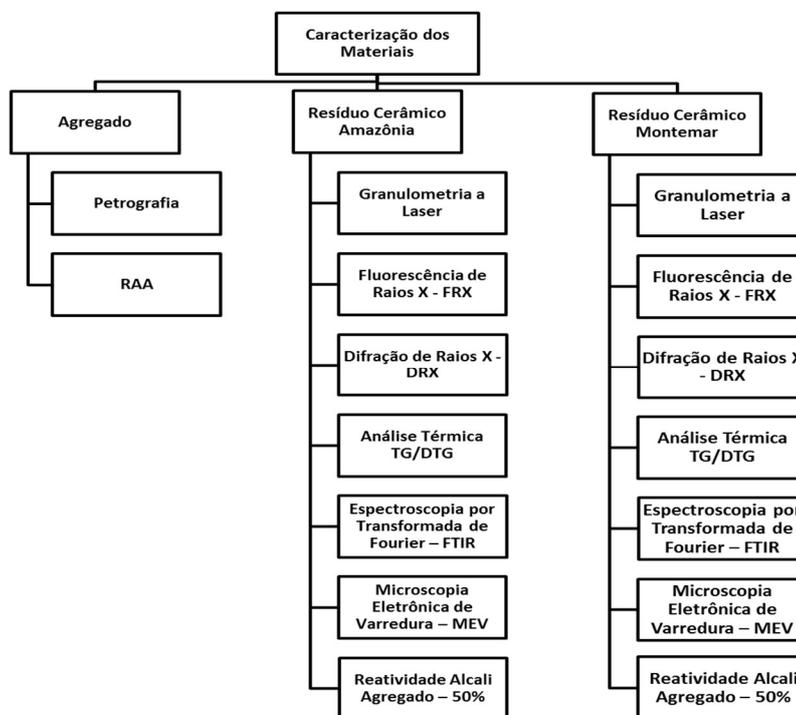


Fonte: Autor (2020).

3.2 Caracterização dos materiais utilizados

O fluxograma apresentado abaixo mostra as técnicas utilizadas na caracterização dos materiais utilizados (FIGURA 13).

Figura 13- Técnicas utilizados na caracterização dos materiais da pesquisa



Fonte: Autor (2020)

3.3 Espectrometria de fluorescência de raios-X

A definição da composição química dos materiais empregados na pesquisa foi realizada no Laboratório de Ensaio Físico-Químicos na Faculdade de Tecnologia da Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Para tanto, foi utilizada a técnica de fluorescência de raios-x por energia dispersiva (FRX) com o auxílio do equipamento da marca Panalytical modelo Epsilon 3 XL, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e atmosfera de gás Hélio (FIGURA 14).

Figura 14- Equipamento de Espectrometria de Fluorescência de raios-x



Fonte: Autor (2020).

3.4 Espectroscopia por transformada de Fourier

O ensaio de espectroscopia no infravermelho foi realizado em um espectrofotômetro FTIR Shimadzu modelo IRAffinity-1S com acessório ATR8000 acoplado. O espectro foi obtido por reflexão total atenuada horizontal com prisma de ZnSe com 64 varreduras. Para o estudo de micropartículas das amostras foram empregadas na cavidade do feixe infravermelho do acessório e executou-se a leitura no software LabSolutions IR. A faixa de varredura foi de 400 a 4000 cm^{-1} . Com o auxílio do banco de dados contendo os espectros padrão de substâncias (biblioteca) do software LabSolution Manager. O ensaio foi realizado no Laboratório de Química da Universidade do Estado do Amazonas – UEA.

3.5 Difração de raios-X

A determinação mineralógica das amostras foi realizada por meio da técnica de difração de raios-x (DRX). As medidas foram conseguidas em difratômetro Panalytical Empyrean, com tubo de Cu- $K\alpha$ (1,5418 Å), pertencente ao Laboratório de Materiais (LabMat) da UFAM. O equipamento operou com corrente de 40 mA, potência de 40 kV e a aquisição dos dados ocorreu na faixa angular de 10° a 40° (2θ), a uma velocidade do goniômetro de 0,02°/passo.

Para reconhecimento das fases minerais presentes nas amostras analisadas foi aplicado o software X'pert High Score Plus, da Panalytical.

3.6 Análises térmicas

Os parâmetros de TGA/DTG/DSC foram feitos em equipamento SDT Q600 marca TA Instruments, do Laboratório de Ensaio Físico-Químicos da UFAM. Aproximadamente 10 mg de cada unidade foram escaneados em um cadinho aberto de alumina de 90 microlitros sob uma atmosfera de gás N 5.0 com fluxo máximo de 30 ml/min, a uma taxa de aquecimento constante de 10 °C/min até a temperatura de 900 °C. O critério tangencial foi aplicado para determinar a perda de massa referente a água durante o período de desidroxilação com a utilização do software TA Universal Analysis. Foram elaboradas quatro pastas com a relação entre água e aglomerante de 0,4, sendo uma apenas com cimento (matriz – referência) e as demais com substituição parcial do cimento por resíduo cerâmico nos teores de 35% e 50%, respectivamente.

3.7 Granulometria a laser

A classificação granulométrica dos materiais em pó foi obtida por difração a laser com uso do granulômetro Malvern Mastersize 2000, do Laboratório de Análises Minerais da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais do Amazonas (CPRM), simultaneamente com

este equipamento foi utilizado o módulo Hydro 2000MU para amostras aquosas. Possui capacidade para medir partículas entre 0,02 a 2000 μm e a faixa de obscuração ideal situa-se entre 10 a 20%.

Para fins de evitar a aglomeração de partículas, o resíduo cerâmico foi dispersado em água enquanto o cimento foi dispersado em álcool etílico. Além disso, antes do início dos ensaios as amostras foram agitadas em banho de ultrassom durante 5 minutos como demonstra a Figura 15.

Figura 15- Equipamento de granulometria a laser.



Fonte: Autor (2020).

3.8 Superfície específica

A superfície específica dos materiais em pó foi obtida pelo critério de permeabilidade ao ar, por meio do permeabilímetro de Blaine. Conforme com os métodos descritos na ABNT NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine) de 2015. O ensaio foi realizado no laboratório de materiais da empresa de Mizu Cimentos Manaus.

3.9 Microscopia eletrônica de varredura

As imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foram adquiridas com a utilização do equipamento modelo Vega3 SEM®, da Tescan, à uma tensão de aceleração de 15 kV . A depender do tipo de material e preparo da amostra pode chegar a 400 mil vezes o equipamento possui como acessório o EDS que permite, respectivamente, obter a composição e a determinação de textura cristalográfica como indicado na Figura 16. Do qual é de propriedade do Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica (LTMOE) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

Figura 16- Equipamento de microscopia por varredura



Fonte: Autor (2020).

3.10 Índice de atividade pozolânica - IAP

As amostras para o ensaio de índice de atividade pozolânica foram produzidas no Laboratório de Materiais da empresa Konkrex, como mostra a Figura 17. De acordo com ABNT NBR Materiais pozolânicos — Determinação do índice de desempenho com cimento Portland aos 28 dias de 2014.

Figura 17- a) Homogeneização manual dos materiais cimentantes secos; b) Misturador mecânico utilizado



Fonte: Autor (2020).

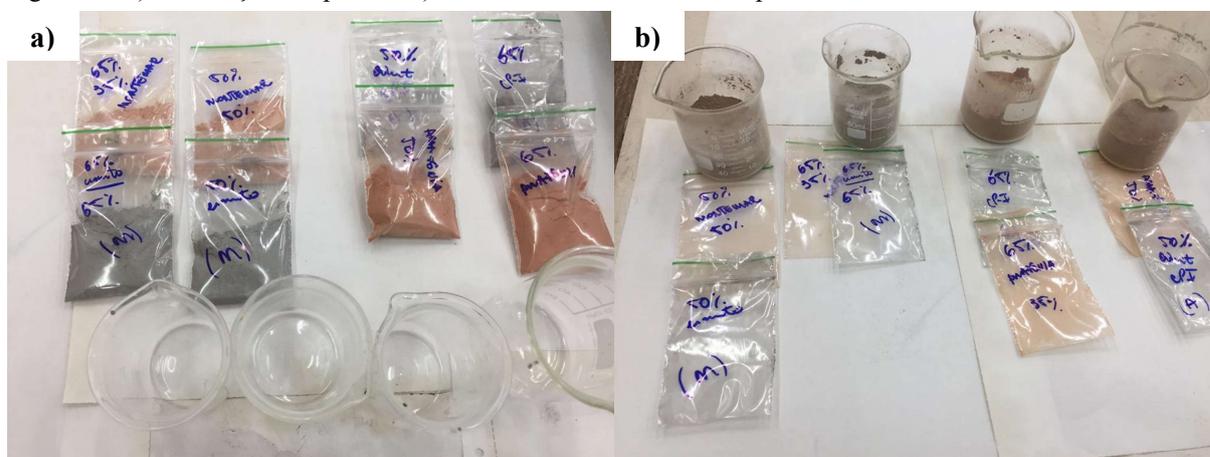
As pastas obtidas foram moldadas em corpos-de-prova cilíndricos com 5 cm de diâmetro e por 10 cm e altura respectivamente.

3.11 Elaboração das pastas

As pastas foram produzidas com relação água/material cimentício de 0,40 sendo o material cimentício misturado ao RCV. Os teores de substituição parcial estudados foram de 0%, 35% e 50% respectivamente. A relação água/material cimentício foi selecionada para o alcance de uma pasta abundantemente viscosa sem a necessidade de utilização de aditivos superplastificantes que poderiam afetar no resultado da análise térmica.

As pastas foram elaboradas manualmente, homogêneas e combinadas à água durante 2 minutos Figura 18. Em seguida foram acomodadas em sacos plásticos fechados e mantidos até a idade de ensaios.

Figura 18- a) Elaboração das pastas ; b) Pastas acomodadas em sacos plásticos.



Fonte: Autor (2020).

3.12 Análise petrográfica

As amostras de agregados graúdos foram enviadas para análise ao laboratório de materiais da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland com o objetivo de avaliar sua qualidade como agregados para concreto do ponto de vista mineralógico, no que se refere a sua potencialidade à reação álcali-agregado (RAA) conforme ABNT NBR 15577- Agregados - Reatividade álcali-agregados. Parte 3: Análise petrográfica, de 2018. Para a verificação da potencialidade reativa.

3.13 Ensaio de expansão em barras de argamassa

As amostras de resíduos cerâmicos de tijolos e agregados foram enviadas análise ao laboratório de materiais da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland para avaliar a eficiência de cimentos com adições de materiais pozzolânicos ou escórias de alto-forno em inibir a expansão de agregados potencialmente reativos conforme ABNT NBR 15577- Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, de 2018.

No caso da avaliação da mitigação da reação álcali-agregado pelo método acelerado NBR 15577-5, foi testada a mistura: (Brita + cimento + 50% de resíduo), conforme Tabela 1.

Identificação dos Ensaio	Brita Mercês	Brita EBAM	Teores (g) Cimento padrão	Resíduo – Amazônia	Resíduo – Montemar
901 – 50%	990,0	-	220,0	220,0	-
902 – 50%	-	990,0	220,0	-	220,0

Tabela 1 - Composição do cimento

Fonte: ABCP

3.14 Ensaio de atividade pozolânica de Chapelle

As amostras de resíduos cerâmicos de tijolos foram enviadas análise ao laboratório de materiais da ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland conforme ABNT NBR 15895 - Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio, de 2018. O método Chapelle modificado permite uma avaliação química quantitativa da atividade pozolânica potencial de um determinado material, através da determinação do teor de óxido de cálcio fixado.

O método Chapelle modificado permite uma avaliação química quantitativa da atividade pozolânica potencial de um determinado material, através da determinação do teor de óxido de cálcio fixado.

O método consiste em manter sob agitação a 90°C durante 16 h uma solução com 2,000 g de óxido de cálcio, 1,000 g de material pozolânico e 250,0 g de água. Após resfriamento, acrescenta-se solução de sacarose e agita-se por mais 15 min.

Após filtragem de aproximadamente 100 mL, retira-se uma alíquota de 50 mL e titula-se com HCl 0,1 N°, usando solução de fenolftaleína. Calcula-se a quantidade de CaO fixada pelo material pozolânico. O resultado é expresso em mg de Ca(OH)₂ fixado por g de material pozolânico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Cimento

Barbosa (2019) afirma que o cimento Portland CPI-S 40 foi utilizado como referência por ser composto basicamente por clínquer e gipsita (no mínimo 95%) e o restante, cerca de 5%, de adições, conforme preconiza a ABNT NBR 5732. Além disso, tem-se que o teor de óxido de silício (SiO_2) considerado no ensaio de espectrometria de fluorescência e demonstrado por difração de raio-X, identifica o cimento entendido como sendo um cimento pozolânico. As propriedades químicas (TABELA 2) e físicas (TABELA 3) respondem às especificações da NBR 16697 (2018).

Higuchi (2018) cita que a referida norma não faz especificações sobre o teor de MgO. É, porém, válido ressaltar que seu teor é limitado em 4 a 5%. Teores excessivos desse óxido podem causar expansão destrutiva do concreto endurecido através da reação lenta com a água (TAYLOR, 1997). O cimento analisado possui o teor de MgO de 0,33% inferior ao limite permitido. O teor de álcalis também é um critério importante a ser considerado, uma vez que reagem com a sílica dos agregados e RC causando expansões. A norma americana ASTM C 150 recomenda limitar o teor de álcalis em 0,6 de NaO eq. Sendo assim o teor de álcalis do cimento CP I-S 40 está dentro do limite permitido.

Os cimentos Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) há uma dosagem diferenciada de calcário e argila na produção do clínquer, bem como sua moagem é mais fina, de modo que o cimento em reação com a água adquire elevada resistência, com velocidade muito maior quando comparado a outro tipo de cimento. É largamente utilizado em produção industrial de artefatos, na qual se exige desforma rápida, concreto protendido pré e pós-tensionado, pisos industriais e argamassa armada. Devido ao alto calor de hidratação não é indicado para concreto massa. A ausência de pozolana não o torna indicado para concreto com agregados reativos (AVELINO, 2011).

Tabela 2 - Composição química do cimento CPI-S 40

Óxido	CPI-S 40	Parâmetros da NBR 1667(2018) (%)
CaO	74,79	-
SiO ₂	12,18	-
Fe ₂ O ₃	4,77	-
SO ₃	3,69	≤ 4,5
Al ₂ O ₃	2,52	-
P ₂ O ₅	0,50	-
K ₂ O	0,49	-
MgO	0,33	≤ 6,5
TI	0,12	-
Mn	0,14	-
Material carbonático (CaCO ₃)	133,55	-
Equivalente alcalino	19,47	-
Teor de álcalis	0,32	-

Fonte: Autor (2020)

O cimento ensaiado apontou características físicas com os parâmetros dentro dos requisitos da NBR 16697 com exceção da resistência à compressão aos 28 dias.

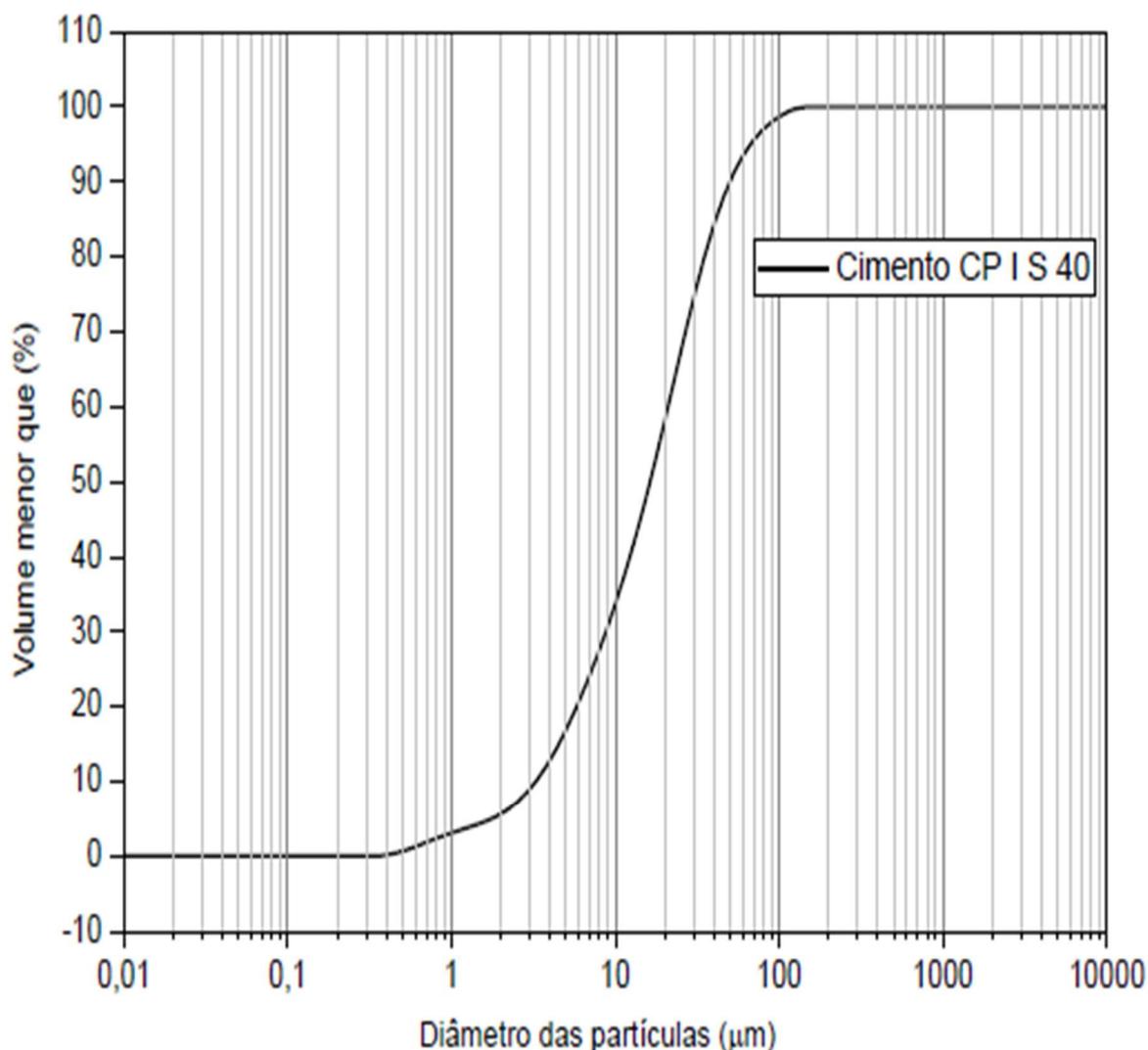
Tabela 3 – Análise física do cimento CPI-S 40

Parâmetro	CPI S-40	Parâmetros da NBR 16697(2018) (%)
Tempo de início de pega (min)	≥ 125	≥ 60
Fim de Pega (min)		-
Expansibilidade a quente (mm)	≤ 215	≤ 600
	0,34	≤ 600
		≤ 5
Finura na peneira 75µm (%)		≤ 10
Perda ao fogo (%)	0,86	≤ 6,5
Tamanho de partículas D10 (µm)	3,12	-
Tamanho de partículas D50 (µm)	16,00	-
Tamanho de partículas D90 (µm)	54,24	-
Resistência à compressão (Mpa) – 3 dias	21,5	≥15,0
Resistência à compressão (Mpa) – 7 dias	30,3	≥25,0
Resistência à compressão (Mpa) – 28 dias	40	≥40

Fonte: Autor (2020)

A Figura 19 apresenta a classificação das partículas do cimento utilizado.

Figura 19 - Granulometria a laser do cimento

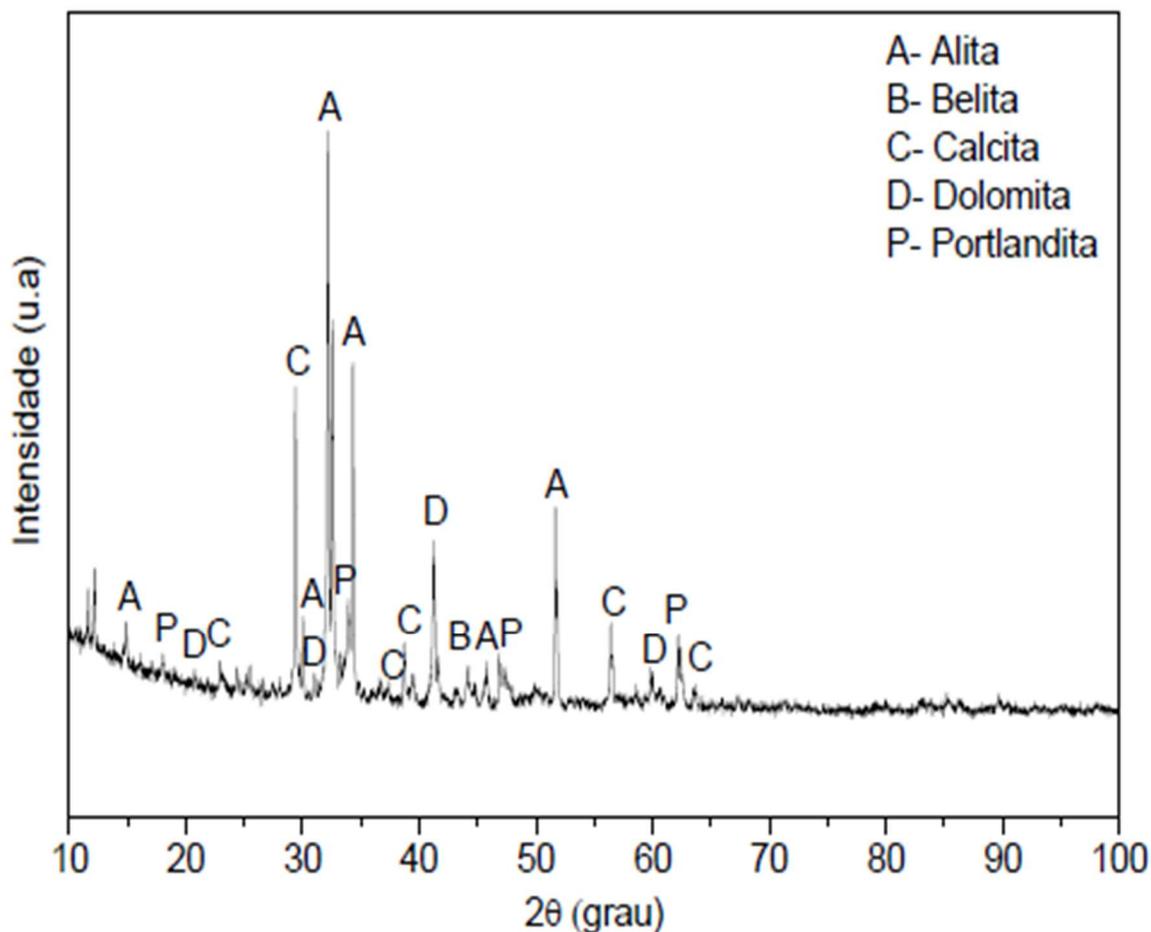


Fonte: Autor (2020).

4.1.2 Difração de raios-X

A caracterização da estrutura cristalina para o cimento Portland CPI S-40 foi obtida por difração de raios-x apresentado na Figura 20 mostra os principais componentes mineralógicos. Pode-se constatar a presença de alita (Ca_3SiO_5), belita (Ca_2SiO_4), a calcita (CaCO_3) oriundo do filler calcário que constitui o cimento, além da dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) e da portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A Portlandita é o nome mineralógico do hidróxido de cálcio cristalino. A sua estrutura em cristais hexagonais é encontrada na pasta e nos poros do cimento Portland hidratado.

Figura 20- Difratoograma do cimento CPI S-40 feito com de difração de difração entre o feixe incidente de raios-x e seu prolongamento de (2θ) e anodo de cobre



Fonte: Autor (2020).

Alita é o constituinte mais importante de todo o cimento Portland normal clínquer, dos quais constitui 50-70%. É silicato tricálcico (Ca_3SiO_5) modificado na composição e estrutura cristalina por substituições iônicas, isto reage relativamente rapidamente com água em idades de até 28 dias, é de longe o mais importante. Belita constitui 15-30% dos clínqueres normais de cimento Portland. Isto é silicato dicálcico (Ca_2SiO_4) modificado por substituições iônicas e normalmente presente ou amplamente polimorfo. Ele reage lentamente com a água, contribuindo substancialmente ao aumento adicional de força que ocorre em idades posteriores (Taylor, 1997) (TABELA 4).

Tabela 4 - Referências utilizadas na identificação de fases cristalinas do cimento

Fases	Fórmula química	Referência
Alita	Ca_3SiO_5	Taylor (1997)
Belita	Ca_2SiO_4	Taylor (1997)
Calcita	CaCO_3	Taylor(1997)
Dolomita	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	Taylor (1997)
Portlandita	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Taylor (1997)

Fonte: Autor (2020).

A conclusão do ensaio de caracterização do cimento aplicado foi relacionada ao obtido em estudos de Cavalcante (2017).

4.1.3 Espectrometria de fluorescência de raio X – RC

O resultado da análise química dos resíduos cerâmicos (TABELA 5 e 6) é apresentado em termos de percentuais de óxidos presentes nas amostras. Pode-se observar através das tabelas que as amostras possuem predominância de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3). Além disso observam-se teores elevados de ferro nas amostras (Fe_2O_3), responsável pela cor vermelha dos resíduos.

Tabela 5 - Composição química do resíduo cerâmico: Montemar

Compostos	Montemar
SiO_2	69,76
Al_2O_3	20,79
Fe_2O_3	5,55
TiO_2	0,958
P_2O_5	0,058
CaO	0,28
K_2O	1,03
MgO	0,49
Outros	0,1
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$	96,1

Fonte: Autor (2020).

Tabela 6 - Composição química do resíduo cerâmico: Amazônia

Compostos	Amazônia
SiO ₂	69,76
Al ₂ O ₃	19,39
Fe ₂ O ₃	7,18
TiO ₂	0,958
P ₂ O ₅	0,062
CaO	0,00
K ₂ O	1,63
MgO	0,54
Outros	0,1
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	96,33

Fonte: Autor (2020).

A NBR 12653 (2014) e a ASTM C618 (2014) que preconizam os requisitos para materiais pozolânicos estabelecem que a soma dos elementos SiO₂, Al₂O₃ e FeO₃ seja de no mínimo 70% para adequação como pozolanas. Dessa forma, as amostras apresentam percentuais desses óxidos de cerca de 96,26% e 96,11%, respectivamente para os resíduos cerâmicos das empresas Amazônia e Montemar. Na comparação entre as duas amostras observa-se que há pouca diferença entre as porcentagens dos referidos óxidos.

Cavalcante (2017) afirma que a presença de sílica e alumina são um indicativo de potencial pozolânico. Além disso, a presença destes compostos é característica dos argilominerais presentes nos resíduos, houve a substituição de cimento com ênfase no teor de 40% onde a pozolana se mostrou completamente eficaz, ou seja, demonstrando 100% de consumo da portlandita.

4.1.4 Difração de raio-X

As caracterizações mineralógicas dos resíduos cerâmicos são apresentadas nas Figuras 21 e 22 (material natural e resíduo cerâmico). É possível observar os principais minerais presentes como o quartzo, a caulinita, a gibsita e a hematita que apresentam composição química corresponde aos óxidos encontrados nas amostras como a sílica, alumina e óxido de ferro.

Pode-se observar nos difratogramas dos picos de quartzo nas amostras calcinadas, fato que pode evidenciar que o material continua com a estrutura cristalina, portanto não amorfa. A permanência dos picos de quartzo na difração de raios-x dos resíduos cerâmicos está

relacionada às temperaturas de queima praticadas nas cerâmicas, que apesar de promoverem a desidroxilação da caulinita, não foram suficientes para a desestruturação do conteúdo micáceo. Com isso o material deixa dúvidas quanto a sua característica como material pozolânico.

Figura 21 - Difratometria de raios-x: Cerâmica Montemar

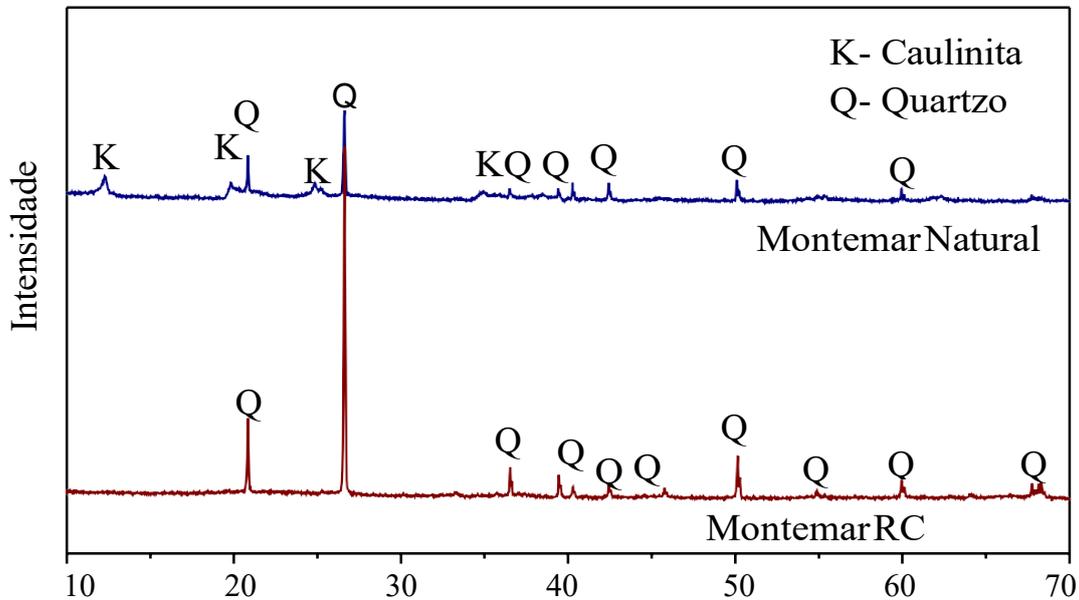
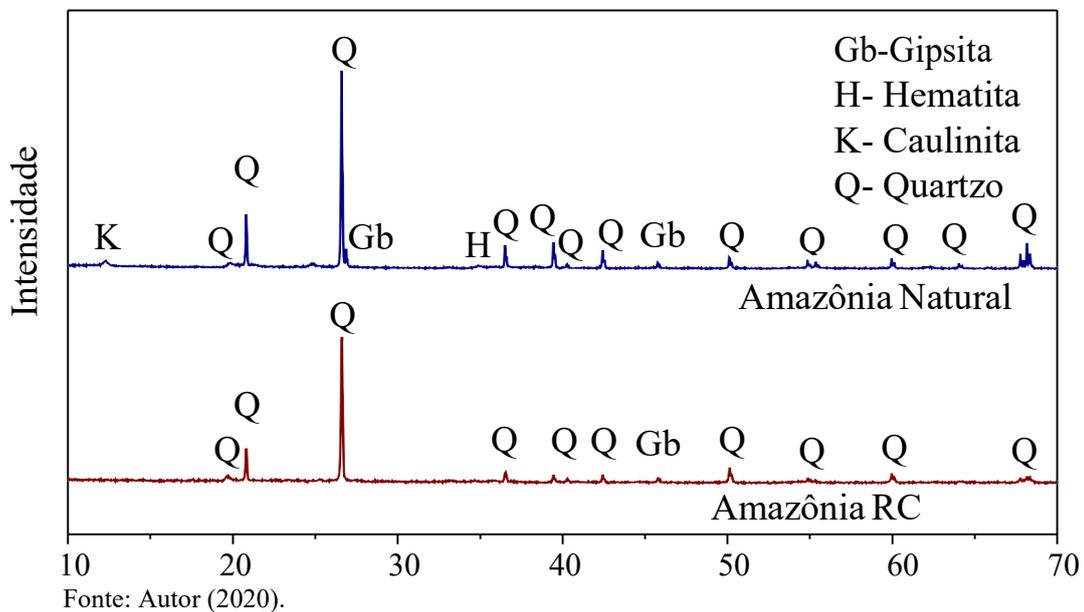


Figura 22 - Difratometria de raios-x: Cerâmica Amazônia



Fonte: Autor (2020).

4.1.5 Análises térmicas das pastas

Foi avaliada através de análise de TG e DTG a influência da utilização do resíduo da indústria cerâmica na quantidade de produtos hidratados em pastas de cimento Portland.

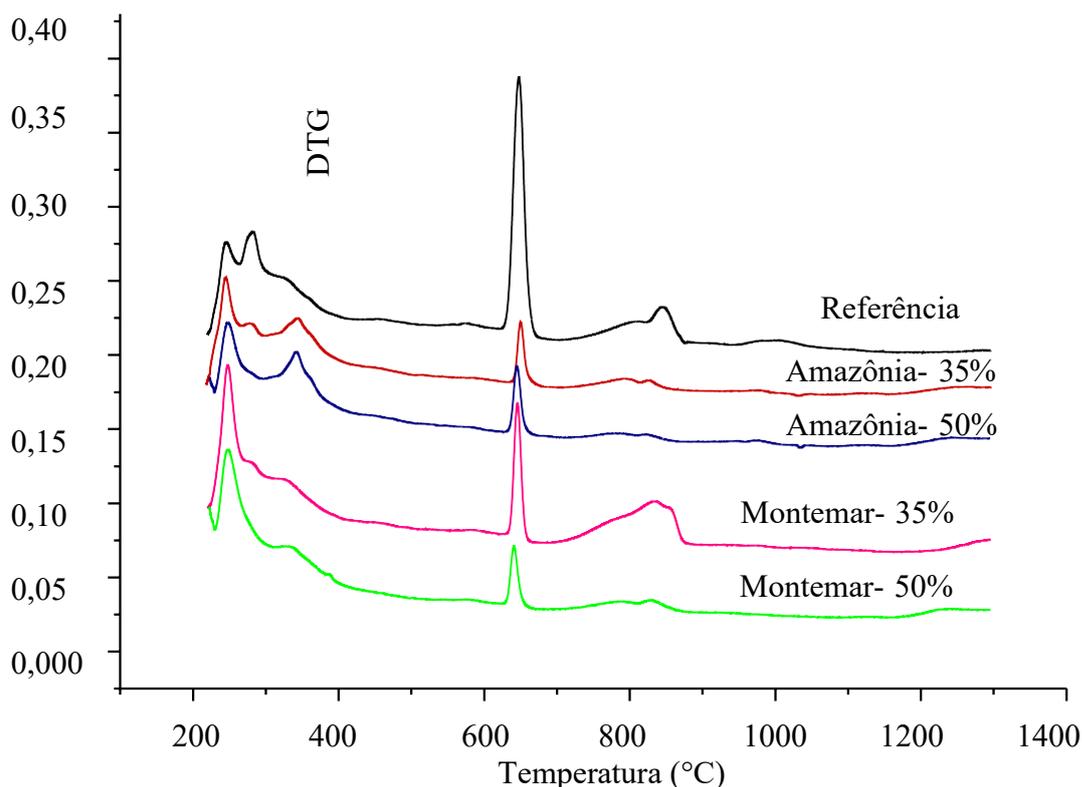
Segundo estudo de Oliveira (2017) para análise térmica de pastas cimentícias com substituição parcial de cimento por resíduos cerâmicos, as curvas termogravimétricas

apresentam três estágios de degradação. O primeiro pico encontrado entre 50 °C e 200 °C corresponde a decomposição da etringita e silicato de cálcio hidratado, no segundo entre 400°C e 500 °C ocorre o processo de desidroxilação do hidróxido de cálcio e entre 600° e 700°C, a carbonatação do carbonato de cálcio. As curvas obtidas no presente trabalho apresentaram formas semelhantes as obtidas pelo referido autor (FIGURA 23).

O teor ideal de substituição é aquele para o qual há a maior taxa de consumo de hidróxido de sódio, pois este reage com os materiais silico-aluminosos das pozolanas, formando o silicato de cálcio hidratado, responsável pela resistência à compressão do concreto.

Da Figura 23, pode-se observar que para todas as substituições de resíduo cerâmico houve um consumo do hidróxido de cálcio, porém, ainda há picos que identificam a presença deste nas pastas, portanto, tais substituições não promoveram o consumo total deste produto da hidratação do cimento. Sendo as substituições de 50% mais eficientes nesse aspecto.

Figura 23 - Análise térmica das pastas: Montemar e Amazônia



Fonte: Autor (2020).

4.1.6 Espectroscopia por transformada de Fourier

Não houve diferenças significativas entre as bandas demonstrando que as amostras analisadas apresentam a mesma identidade espectroscópica (FIGURA 24 e 25). Os principais picos e espectros correspondentes aos grupos funcionais estão listados na Tabela 7.

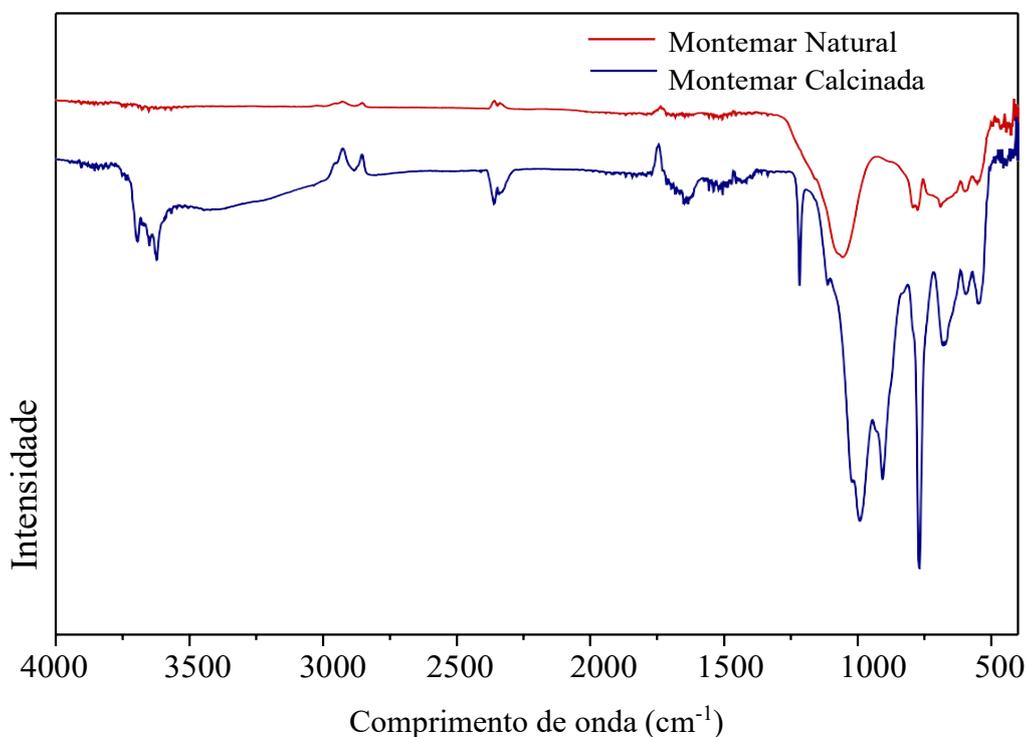
Tabela 7 - Principais picos dos espectros de FTIR

Comprimento de Onda (cm ⁻¹)	Grupo Funcional	Vibração
3697,3651,3621	Caulinita; Montmorilonita: Ilita	Estiramento (Al-OH)
3439	Molécula de Água; Amida	Estiramento amplo (-OH); Estiramento(-NH); Estiramento (-OH).
1170-950	Carboidratos; Silicatos Alumínio dos Minerais	de (C-OH);(-COH) e estiramento (C-O-C);

Fonte: Autor (2020).

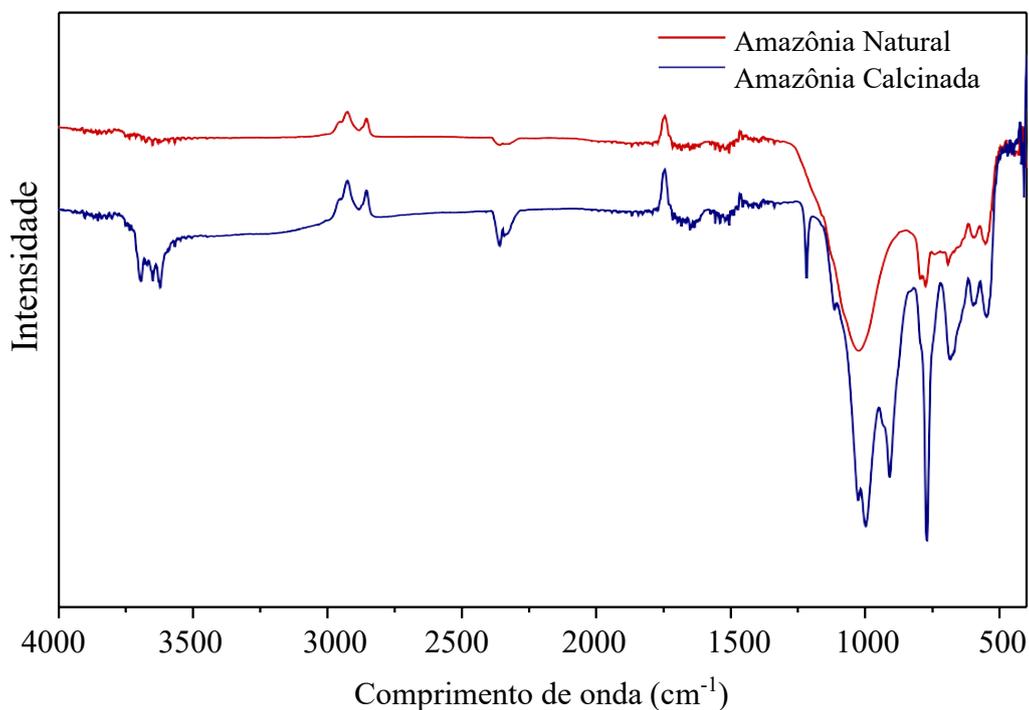
A presença de caulinita pode ser explicada por ser um argilo mineral presente em solos de regiões de clima quente e tropical úmido, sendo detectada pela desordem de sua cristalinidade. A caulinita que é o mineral amplamente encontrado nos solos da região Amazônica apresenta a fórmula $Al_4Si_4O_{10}(OH)_8$.

Figura 24 - Espectroscopia material calcinado e natural: Montemar



Fonte: Autor (2020).

Figura 25 - Espectroscopia material calcinado e natural: Amazônia

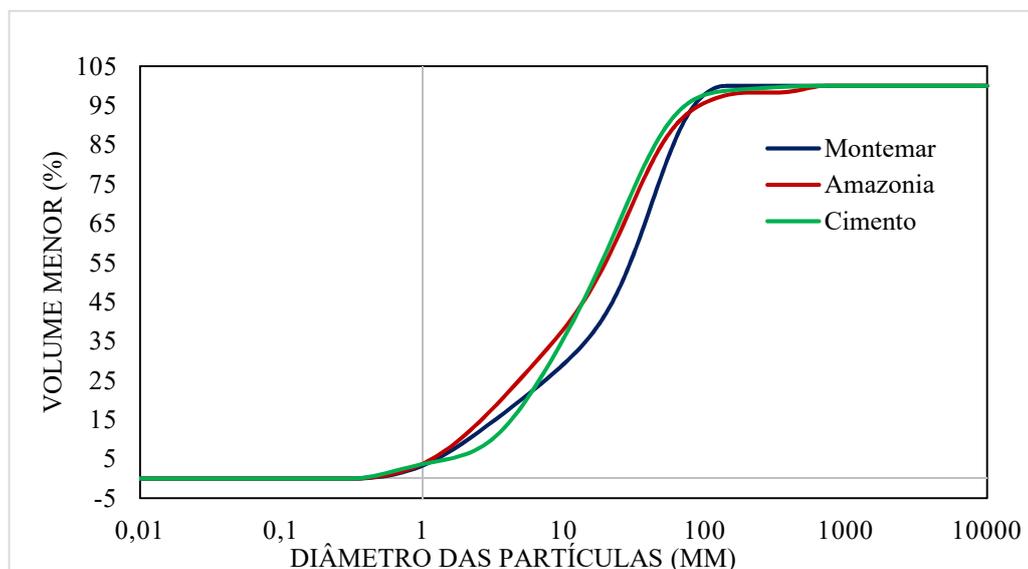


Fonte: Autor (2020).

4.1.7 Granulometria a laser

Na Figura 26 observa-se 3 curvas granulométricas dos resíduos cerâmicos das olarias Montemar, Amazônia e do cimento Portland, nota-se que as curvas das olarias são semelhantes, porém Montemar apresenta grãos maiores. Fato que pode ser confirmado através da comparação entre os valores de D10, D50 e D90 dos dois resíduos que estão na Tabela 8. O aumento desses índices em relação ao resíduo da olaria Amazônia foram de, respectivamente, 11,08%, 55,14% e 14,59%.

Figura 26 - apresenta as curvas granulométricas dos três materiais utilizados



Fonte: Autor (2020).

Além disso, a Tabela 8 também apresenta os valores da faixa de obscuração do equipamento utilizado para cada material, bem como os valores de resíduo.

Tabela 8 - Características granulométricas para os materiais utilizados na pesquisa

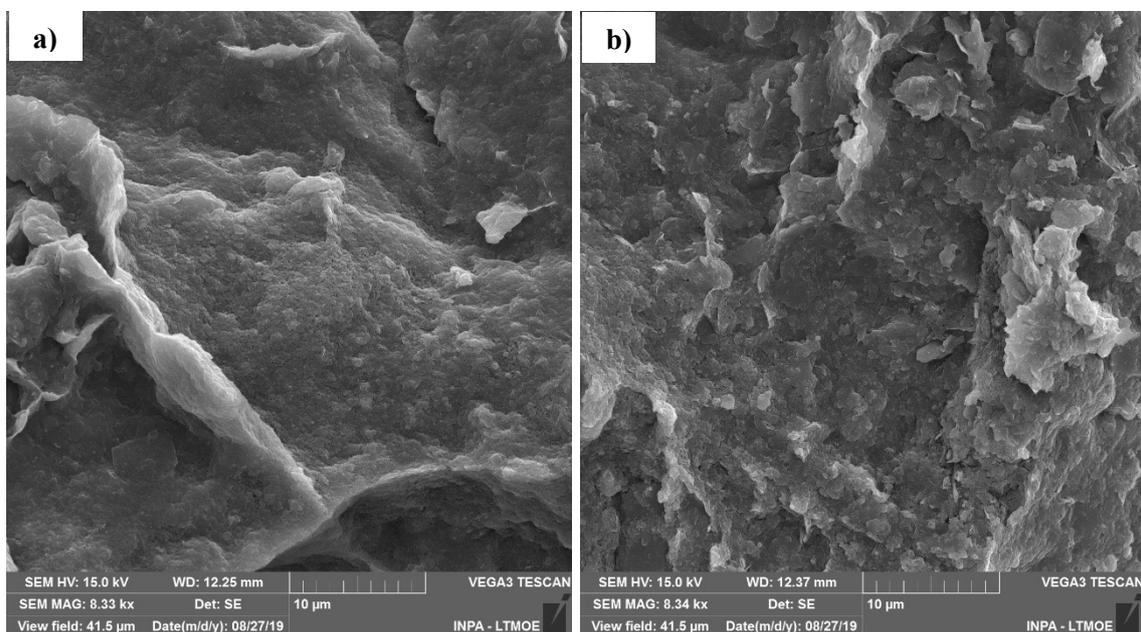
Materiais	Obscuração (%)	Resíduo (%)	D90 (µm)	D50 (µm)	D10 (µm)
Amazônia	16,05	0,86	62,26	16,72	1,85
Montemar	21,62	0,66	69,16	25,94	2,12
CPI S-40	29,69	0,488	54,22	15,99	3,12

Fonte: Autor (2020).

4.1.8 MEV - Microscopia eletrônica por varredura

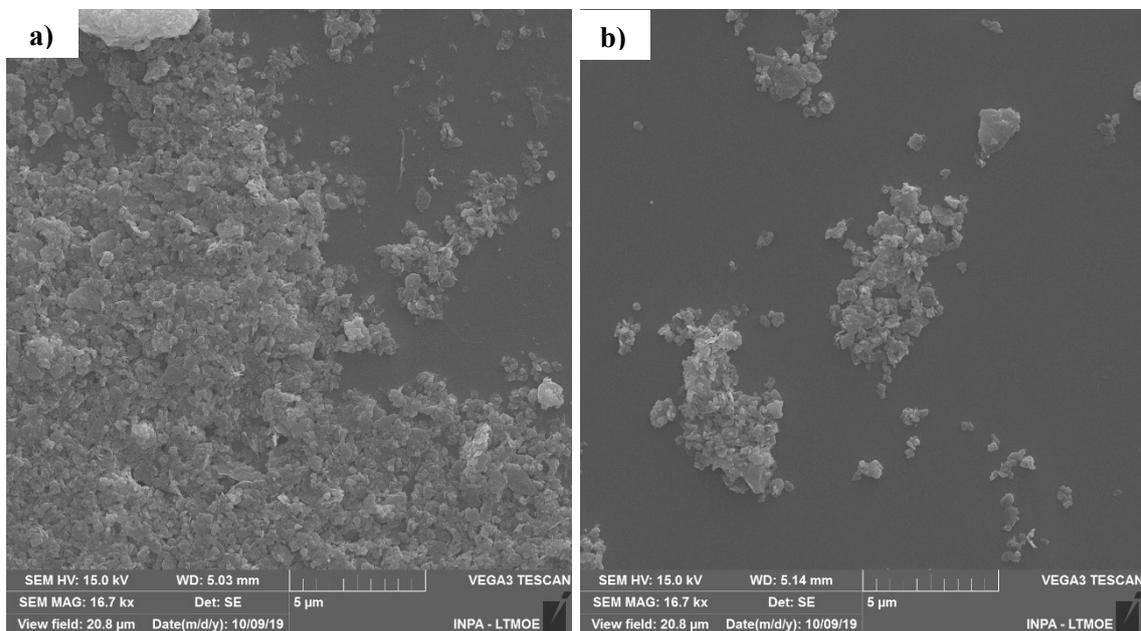
A morfologia dos resíduos cerâmicos pode ser observada por meio de micrografias (FIGURA 28 e 29). Após o processo de moagem da primeira etapa os resíduos cerâmicos e apresentavam partículas irregulares, com característica lamelar (FIGURA 27), que após serem submetidos a moagem da segunda etapa passaram a mostrar uma forma mais arredondada, bem como um maior número de partículas mais finas, ou seja, uma granulometria mais reduzida do que aquela obtida na moagem da primeira etapa (FIGURA 28). A forma mais arredonda é benéfica para o empacotamento de partículas, proporcionando desta forma um melhor preenchimento dos espaços vazios entre os grãos do cimento, o que resulta em uma matriz cimentícia mais compacta.

Figura 27 - Micrografia do resíduo cerâmico processo de primeira moagem: a) com 10 μm ; b) com 10 μm



Fonte: Autor (2020).

Figura 28 - Micrografia do resíduo cerâmico segunda moagem: a) com 5 μm ; b) com 5 μm



Fonte: Autor (2020).

4.1.9 Análise Petrográfica

A análise petrográfica foi feita primeiramente ao microscópio estereoscópico e, posteriormente, complementada por observação de lâminas delgadas ao microscópio óptico de luz transmitida. Os Quadros 1 e 2 apresentam as principais características dos agregados

Quadro 1 - Síntese das características petrográfica da amostra: Mercês

Mineralogia	Principal	Quartzo, feldspatos (plagioclásio e microclínio) e biotita
	Subordinada	Sericita, clorita, titanita e opacos
	Reativa/ deletéria	Quartzo com extinção ondulante (25°): <5%; e quartzo microcristalino: <5%
Cor	Cinza a rósea com pontos claros e escuros	
Estrutura	Maciça	
Textura	Granular	
Granulação	Inequigranular – Média a fina	
Deformação do agregado	Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante de 25°) e quartzo recristalizados	
Feldspatos (texturas potencialmente reativas)	Mirmequitas e pertitas: 2%	
Quartzo deformado (< extinção ondulante)	<5%	
Quartzo microgranular (%)	<5%	
Microfissuração	Fraco	
Tipo	Brita	
Grau de alteração	Rocha pouco alterada a sã	
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente	
Tipo de rocha	Ígnea	
Classificação petrográfica	Biotita Granito	
Reatividade potencial	Potencialmente inócua	

Fonte: ABCP.

Quadro 2 - Síntese das características petrográfica da amostra: EBAM

Mineralogia	Principal	Quartzo, feldspatos (plagioclásio e microclínio), biotita e anfibólio
	Subordinada	Sericita, clorita, titanita e opacos
	Reativa/ deletéria	Quartzo com extinção ondulante (não foi possível medir o ângulo): >5%; e quartzo microcristalino: >5%
Cor	Cinza com pontos claros e escuros	
Estrutura	Maciça	
Textura	Granular	
Granulação	Inequigranular – Grossa a média	
Deformação do agregado	Quartzo deformado e material cataclasado (material mais fino bordejando os cristais mais desenvolvidos)	
Feldspatos (texturas potencialmente reativas)	Mirmequitas e pertitas: 5%	
Quartzo deformado (< extinção ondulante)	<5%	
Quartzo microgranular (%)	<5%	
Microfissuração	Fraco	
Tipo	Brita	
Grau de alteração	Rocha pouco alterada a alterada	
Propriedades físico-mecânicas	Rocha muito coerente	
Tipo de rocha	Ígnea	
Classificação petrográfica	Biotita Anfibólio Granito Micropertítico Cataclasado	
Reatividade potencial	Potencialmente reativa	

Fonte: ABCP.

A amostra de rocha (Mercês) foi considerada potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto, segundo a análise petrográfica.

Diferentemente, a amostra (Ebam) foi considerada potencialmente reativa, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto, segundo a análise petrográfica.

A reatividade dessa amostra de rocha refere-se à ocorrência de quartzo microcristalina e quartzo deformado, além das texturas pertíficas e mirmequíticas. Esses minerais deletérios ocorrem de forma significativa, numa frequência maior que 5% na amostra.

No entanto, deve-se considerar que o grau de reatividade de só poderá ser avaliado através de ensaios específicos de desempenho.

Neste sentido, sugere-se a realização de ensaios de reatividade álcali-agregado tais como a NBR 15577-4, a partir do qual e levando-se em consideração as condições de exposição da estrutura de concreto, seu tipo e nível de responsabilidade e o teor de álcalis do concreto poderão ser tomadas as medidas preventivas necessárias para evita a ocorrência de manifestações patológica devida à reação álcali-agregado.

4.1.10 Ensaio de expansão em barras de argamassa

A determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado prescrito pela ABNT NBR 15577-5, indicado para avaliar a eficiência de cimentos com adições de materiais pozolânicos ou escórias em alto forno em inibir a expansão de agregados como potencialmente reativos.

A composição dos materiais utilizado para a preparação de três barras de argamassa de (25 x 25 x 285) mm. As amostras de agregado foram previamente britadas e pulverizadas, utilizando-se um britador de mandíbulas e, seguida peneirada até obtenção da distribuição granulométrica, conforme Tabela 9.

Tabela 9 - Composição dos materiais

Material	Abertura nominal das peneiras (mm)	Massa (g)
Agregado	4,8 – 2,4	99,0
	2,4 – 1,2	247,5
	1,2 – 0,6	247,5
	0,6 – 0,3	247,5
	0,3 – 0,15	148,5
Cimento	-	440,0
Água destilada (a/c=0,47)	-	206,8

Fonte: Autor (2020).

O Quadro 3 apresenta os resultados dos ensaios realizados, destacando-se os valores aos 28 dias de cura de NaOH 1 N a 80°C. A Figura 29 ilustra a evolução das expansões médias das barras de argamassa com o tempo de cura.

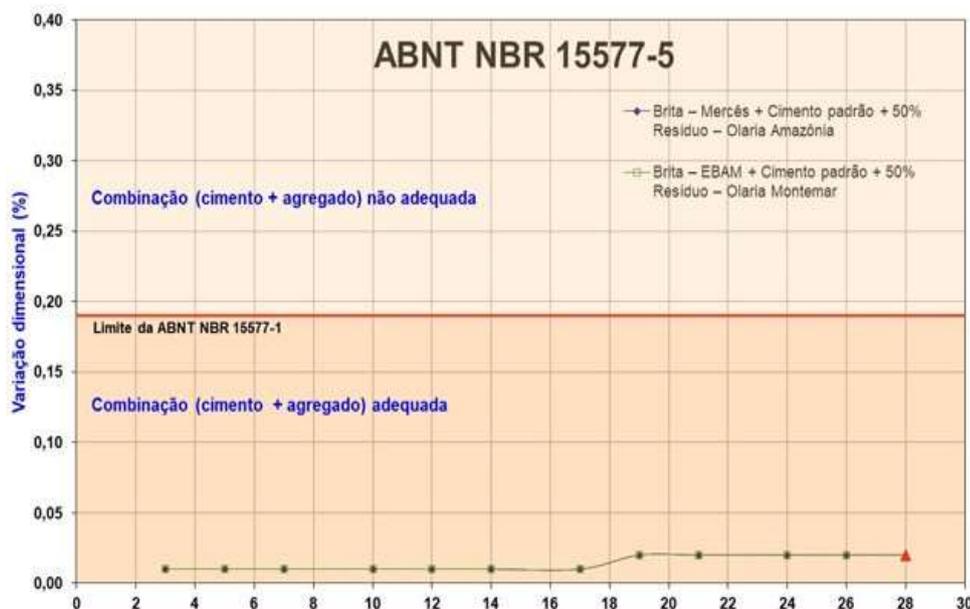
Quadro 3 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina

Idade de Cura agressiva (dias) ^(*)	Brita – Mercês + Cimento padrão + 50% Resíduo – Olaria Amazônia	Brita – EBAM + Cimento padrão + 50% Resíduo – Olaria Montemar
1	-	-
2	-	-
3	0,01	0,01
4	-	-
5	0,01	0,01
6	-	-
7	0,01	0,01
8	-	-
9	-	-
10	0,01	0,01
11	-	-
12	0,01	0,01
13	-	-
14	0,01	0,01
15	-	-
16	-	-
17	0,01	0,01
18	-	-
19	0,02	0,02
20	-	-
21	0,02	0,02
22	-	-
23	-	-
24	0,02	0,02
25	-	-
26	0,02	0,02
27	-	-
28	0,02	0,02

Fonte: ABCP.

As amostras de agregado foram analisadas com o cimento padrão (fornecido pela ABCP adicionado 50% de resíduo das olarias).

Figura 29 - Gráfico da evolução da expansão com o tempo de cura em solução alcalina



Fonte ABCP.

Com relação à avaliação da mitigação da reação álcali-agregado pelo método acelerado estabelece que a comprovação da mitigação da reação é obtida quando a expansão for menor que 0,19% aos 30 dias (28 dias de cura em solução alcalina). Para valores de expansão iguais ou superiores a 0,19% são necessários novos ensaios de forma a atender ao limite estabelecido, podendo-se optar por trocar o cimento empregado ou incorporar ou aumentar os teores de materiais inibidores da reação álcali-agregado (pozolanas, escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim) ou ainda substituir o agregado.

As amostras de brita (Mercês e EBAM) quando combinadas com o cimento padrão (50% de Resíduo – Olaria Amazônia e Resíduo – Olaria Montemar), apresentaram valor de expansão inferior a 0,19% aos 28 dias de cura em solução alcalina, indicando que as combinações especificamente ensaiadas são adequadas, conforme Figura 30.

Isso não permite fazer considerações a respeito das características de reatividade dos agregados, nem da potencial inibição do cimento, mas permite afirmar que as combinações especificamente ensaiadas apresentam características favoráveis ao emprego em obras de Construção Civil, com baixos riscos de manifestações patológicas referentes à reação álcali-agregado.

4.1.11 Ensaio de atividade pozolânica de Chapelle

A Tabela 10 apresenta os resultados obtidos na amostra de argila após calcinação a 750 °C durante 2 horas.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de Chapelle

Identificação da amostra	Mg de Ca(OH)₂/g de amostra
Olaria Amazônia	440,97
Olaria Montemar	586,78

Fonte: Autor (2020)

Com relação à atividade pozolânica Chapelle, o material é considerado pozolânico quando apresentar um índice de consumo mínimo de 330 mg de CaO/g de amostra (436 mg de Ca(OH)₂/g de amostra). Deste modo, dos valores apresentados na Tabela 10 é possível afirmar que ambos os resíduos apresentam atividade pozolânica, sendo a amostra coletada na Olaria Montemar a que apresenta maior índice de atividade, cerca de 30% superior ao apresentado pelo resíduo coletado na Olaria Amazônia.

5. CONCLUSÃO

Os resíduos cerâmicos moídos a partir de amostras coletadas em duas indústrias do polo de cerâmico da região metropolitana de Manaus apresentaram resultados que indicam que este material apresenta características de pozolânicos, principalmente quando se observa aqueles obtidos no ensaio de Chappelle, no qual a amostra relativa ao resíduo coletado na Olaria Montemar foi a que apresentou o maior índice de atividade, sendo este cerca de 30% superior ao apresentado pela amostra coletada na Olaria Amazônia.

As duas amostras de agregados graúdos da região de Presidente Figueiredo - AM, após a análise petrográfica apresentaram as seguintes características: EBAM material considerado potencialmente reativa, Mercês foi considerada potencialmente inócuo. Esses agregados foram utilizados nos ensaios de barras de argamassas.

Os ensaios de barras de argamassas combinadas com os agregados e (EBAM e Mercês com 50% de resíduos das olarias) após 28 em cura com solução alcalina apresentaram valor de expansão menores que 0,19%, estabelecendo que as combinações são adequadas, porém não foi possível fazer considerações a respeito da reatividade dos agregados e nem da inibição do cimento.

Os resultados da caracterização química e física apontam uma alternativa relevante para o aproveitamento dos resíduos cerâmicos coletados nas duas indústrias do polo oleiro de Manacapuru. Deste modo o presente estudo, apresenta uma possibilidade de aproveitamento dos resíduos cerâmicos descartados na incorporação em produtos à base de cimento Portland.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Analisar a influência da variabilidade do tamanho das partículas do resíduo cerâmico na mitigação da reação álcali-agregado;
- Analisar resíduos cerâmicos coletados em indústrias do polo cerâmico e que empreguem argilas de características diferentes das avaliadas no presente trabalho no processo de fabricação de tijolos;
- Estudar resíduos cerâmicos oriundos da fabricação de telhas quanto as suas características pozolônicas e mitigação da reação álcalis-agregado.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2008.

_____. NBR 7389-2: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto. Parte 2: Agregado graúdo, Rio de Janeiro, 2009.

_____. NBR 15895: Materiais pozolânicos - Método de Chapelle Modificado, Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12653: Materiais pozolânicos - Requisitos, Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR. 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método Blaine). Rio de Janeiro, 2015.

_____. NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos, Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte1: Guia para a avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados de concreto, Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-2: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-6: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 6: Determinação da mitigação da expansão em prismas de concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. NBR 15577-7: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

ANICER – (Associação Nacional da Indústria Cerâmica) - Dados do Setor. Site Institucional. Rio de Janeiro, sd. Disponível em: <http://www.anicer.com.br/>. Acesso em: 2019.

AVELINO, V. K. G. R. Estudo do comportamento no estado fresco e endurecido do concreto com incorporação de resíduo de corte de botão. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

BARBOSA, E. P. Estudo da produção e caracterização de metacaulinita para utilização como material cimentício. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade

Federal do Amazonas, 2019.

BELCHIOR, W. M. Avaliação das propriedades físicas e mecânicas de microconcretos com substituição parcial do cimento por resíduos cerâmicos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, 2017.

CAVALCANTE, D. G.; et al. Influence of the levels of replacement of portland cement by metakaolin and silica extracted from rice husk ash in the physical and mechanical characteristics of cement pastes. **Cement and Concrete Composites**, v. 94, p. 296-306, 2017.

CHAPPEX, T.; SCRIVENER, K. Alkali fixation of C–S–H in blended cement pastes and its relation to alkali silica reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 8, p. 1049-1054, 2012.

D'ANTONA, R. J. G.; REIS, N. J.; MAIA, M. A. M.; ROSA, S. F.; NAVA, D. B. Projeto Materiais de Construção na área Manacapuru-Iranduba-Manaus-Careiro (Domínio Baixo Solimões). 2007.

DE SOUZA CAMPELO, N.; RODRIGUES DE MORAIS, M.; ARAGÃO, A. F.; CABRAL, E. M.; DE, E.; REBELO, P.; PINHEIRO, S. C.; PAIVA, O. A. Estudo da Utilização de Resíduo Cerâmico Queimado (" Chamote ") Oriundo do Pólo Oleiro dos Municípios de Iranduba e Manacapuru -AM, como Aditivo na Fabricação de Telhas. **Cerâmica Industrial**, v. 11, n. 1, 2006.

DIAMOND, S. Alkali silica reactions—some paradoxes. **Cement and Concrete Composites**, v. 19, n. 5-6, p. 391-401, 1997.

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M-A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 27, n. 2, p. 167-191, 2000.

FRAGA, Y. S. B.; et al. Efeitos de adições minerais para mitigação de reações álcali-agregado no concreto: estado da arte. **Engineering Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1-13, 2017.

GAMELEIRA, C. M. T. M. Reduções das propriedades mecânicas do concreto devido à RAA na simulação de blocos sobre quatro estacas, 2019.

GARCIA, E.; CABRAL, M.; QUARCIONI, V. Â.; CHOTOLI, F. F. Resíduo de Cerâmica Vermelha (RCV): Uma Alternativa como Material Pozolânico. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 4, p. 31–38, 2014.

GITAHY, H. S. O problema dos agregados para os concretos da barragem de Jupia. **IPT-Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de Sao Paulo**, 1963.

HASPARYK, N. P. Investigação De Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado E Caracterização Avançada Do Gel Exsudado. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

HEYMSFIELD, Ernie et al. Alkali–Silica Reaction Identification and Remediation at Northwest Arkansas Regional Airport. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 30, n. 4, p. 04015063, 2016.

HIGUCHI, A. M. D. Estudo do desempenho do resíduo de vidro moído como material cimentício suplementar para aplicação em concreto autoadensável de alto desempenho. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, 2018.

ISAIA, Geraldo Cechella (Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciências e engenharia de materiais**. Ibracon, 2010.

MARQUES, C. D. S. Estudo comparativo do potencial pozolanico de adições argilo-minerais disponíveis no Amazonas e Porto Velho, utilizando as técnicas de termogravimetria, difração de raios-x e teste de cal saturada. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, 2017.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de et al. Resíduo de cerâmica vermelha e filler calcário em compósito de cimento Portland: efeito no ataque por sulfatos e na reação álcali-silica. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 2, p. 282-300, 2016

MELO FILHO, João de Almeida. Durabilidade química e térmica e comportamento mecânico de compósitos de alto desempenho reforçados com fibras de sisal. **Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2012.

MELO SOUZA, José Roberto. A Reciclagem de Resíduos de Cerâmica para a utilização no Processo de Argamassa. **Universidade Federal do Pará**, 2017.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do Concreto -5ª Edição**. Bookman Editora, 2015.

OLIVEIRA, M. S. Desenvolvimento e caracterização de telhas cimentícias reforçadas com tecido de fibras vegetais da Amazônia. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Amazonas, 2017.

PAIVA, M. R. P.; HORBE, A. M. C.; MOTTA, M. B.; HORBE, M. A. Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari AM. **Acta Amazonica**, v. 37, p. 81-90, 2007.

RAMACHANDRAN, V. S. Alkali-aggregate expansion inhibiting admixtures. **Cement and Concrete Composites**, v. 20, n. 2-3, p. 149-161, 1998.

SABBAG, A. F. Verificação da existência de reação álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

SAOUMA, Victor E. et al. A mathematical model for the kinetics of the alkali-silica chemical reaction. **Cement and Concrete Research**, v. 68, p. 184-195, 2015.

SANCHEZ, L. F. M.; MULTON, S.; SELLIER, A.; CYR, M.; FOURNIER, B; JOLIN, M. Comparative study of a chemo-mechanical modeling for álcali sílica reation (ASR) with experimental evidences. **Construction and Building Materials**, v. 72, p. 301-315, 2014.

SEYE, O.; CORTEZ, L. A. B.; GÓMEZ, E. O.; BRAUNBECK, O. Queima direta de gramínea Projeto Integrado de Biomassa-PIB. In: **Proceedings of the 3. Encontro de Energia no Meio Rural**, 2000.

STANDARD, britânico. Métodos de teste de cimento—. **Determinação de tempos de configuração e solidez, BS EN**, 2005.

STORER, R. A. et al. Annual book of ASTM standards. American Society for Testing and Materials, Philadelphia, v. 6, 1997.

TAYLOR, H. F. W. Portland cement and its major constituent phases. **Thomas Telford Services Ltd.: London, UK**, p. 77, 1997.

TIECHER, F.; DAL MOLIN, D. C. C. Método de ensaio da ASTM C 1260: Avaliação das idades prescritas para o estabelecimento da potencialidade reativa dos agregados. **RAA 2006–II Simpósio sobre reação álcali-agregado em estruturas de concreto**, 2006.

TRINDADE, G. H. Influência da incorporação de cinza da casca do arroz e sílica ativa no cimento Portland frente à reação álcali-sílica: desenvolvimento de uma nova proposta de método para avaliação da RAS em materiais suplementares ao cimento Portland. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2015.