



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

**CERÂMICA VERMELHA INCORPORADA COM RESÍDUO DE PEDRAS  
ORNAMENTAIS TRATADA TERMICAMENTE**

**PEDRO FERREIRA DA SILVA JUNIOR**

BELÉM-PA

2019



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

**CERÂMICA VERMELHA INCORPORADA COM RESÍDUO DE PEDRAS  
ORNAMENTAIS TRATADA TERMICAMENTE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto.

Coorientador: Prof. M Sc. Marco Antônio de Oliveira.

BELÉM-PA

2019

## FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo FICAT, mediante os dados fornecidos pelo autor.

S586c

SILVA JUNIOR, Pedro Ferreira. CERÂMICA VERMELHA INCORPORADA COM RESÍDUO DE PEDRAS ORNAMENTAIS TRATADA TERMICAMENTE / PEDRO FERREIRA DA SILVA JUNIOR. — 2019. 67 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto

Coorientador: Prof. Me. Marco Antônio de Oliveira

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Sustentabilidade. 2. Resíduo. 3. Granito. 4. Cerâmica Vermelha. I. Título.

CDD 620.11

**CERÂMICA VERMELHA INCORPORADA COM RESÍDUO DE PEDRAS  
ORNAMENTAIS TRATADA TERMICAMENTE**

**PEDRO FERREIRA DA SILVA JUNIOR**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do Grau de Mestre.

Data de aprovação: 08 / 10 / 2019.

Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto**

Universidade Federal do Pará-UFGPA

---

**Prof. Dr. Laercio Gouvêa Gomes**

Universidade Federal do Pará-UFGPA

---

**Prof<sup>a</sup>. Dra. Andrielli Moraes de Oliveira**

Universidade Federal do Goiás-UFG

## **DEDICATÓRIA**

Primeiramente a Deus, minha família, amigos e ao meu orientador pelo apoio e incentivo. A vitória desta conquista é dedicada com todo meu respeito unicamente, a vocês!

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ser tão presente em minha vida, me ensinando o caminho correto e me concedendo bênçãos sem medidas. Agradeço por ter me feito chegar até aqui, concluir mais esta conquista.

Agradeço ao Prof. Dr. Bernardo Borges Pompeu Neto, pela orientação, exemplo e compreensão no desenvolvimento do curso e da pesquisa. Obrigado por ter me ajudado na hora em que mais precisei!

Meu Coorientador, o Prof. M Sc. Marco Antônio de Oliveira, pelo apoio e sabedoria que foram um pilar essencial para que este trabalho fosse possível.

Ao diretor regional do SENAI Pará, Dário Antônio Bastos de Lemos, pela oportunidade e confiança atribuída para a realização dos ensaios físicos, químicos e mineralógicos nos Laboratórios de Cerâmica Vermelha (LACER) e pelo Instituto SENAI de Inovação (ISI).

Agradeço ao amigo Humberto José Macias, Coordenador do Laboratório de Cerâmica Vermelha (SENAI/LACER), pela paciência e pela ajuda indispensáveis durante todo o trabalho de laboratório. Sua generosidade e comprometimento em disponibilizar o seu tempo para me ajudar, foram essenciais para o êxito deste trabalho.

A meus pais, Maria Ignez e Pedro Ferreira, meu infinito agradecimento. Sempre acreditaram em minha capacidade nesta árdua vida de estudos e trabalho. Isso só me fortaleceu e me fez tentar, não ser o melhor, mas a fazer o melhor de mim. Obrigado pelo amor incondicional.

A minha irmã Carla Gisele pela parceria, carinho e força nos momentos mais difíceis.

Agradeço a minha esposa, Ariana Monteiro, pelo apoio infinito e por me proporcionar alegrias nos momentos de cansaço desta jornada.

Agradeço as minhas filhas, Amanda Monteiro e Brenda Monteiro, o sorriso de vocês cada dia me deu mais forças.

“Nenhuma Engenharia constrói caráter, mas com caráter se faz os melhores engenheiros.”

Jordan Lucas.

## RESUMO

Neste trabalho procurou-se avaliar a influência de adição do resíduo de pedras ornamentais (resíduo do granito) em massa argilosa, a fim de ser utilizada como uma matéria-prima alternativa na produção de telhas cerâmicas. As amostras de resíduo de granito e das argilas foram submetidas a ensaios de caracterização química, mineralógica e microestrutural. Amostras com teores de resíduo variando entre 10%, 15% e 20% foram produzidas e queimadas em forno industrial a uma temperatura de 950°C durante 12 horas. As características tecnológicas avaliadas foram: absorção de água, retração linear de queima e tensão de ruptura. Os resultados evidenciaram que com o aumento no teor de resíduo, os valores de absorção de água diminuíram entre 11,82% a 9,35%, porém o melhor resultado para a resistência mecânica ocorreu no teor de 15% de adição de resíduo do granito, demonstrando que é uma alternativa de sustentabilidade no setor da construção civil.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade. Resíduo. Granito. Cerâmica Vermelha.

## ABSTRACT

. In this work, we tried to evaluate the influence of adding ornamental stone residue (granite residue) in clayey mass, in order to be used as an alternative raw material in the production of ceramic tiles. The granite and clay residue samples were submitted to chemical, mineralogical and microstructural characterization tests. Samples with residue contents varying between 10%, 15% and 20% were produced and burned in an industrial oven at a temperature of 950°C for 12 hours. The evaluated technological characteristics were: water absorption, linear burning retraction and rupture stress. The results showed that with the increase in the residue content, the water absorption values decreased between 11.82% to 9.35%, however the best result for the mechanical resistance occurred in the content of 15% of granite residue addition, demonstrating that it is a sustainability alternative in the civil construction sector.

**Keywords:** Sustainability. Residue. Granite. Red Ceramics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Mapa dos direitos minerários de extração de argilas no Brasil (CGTIG/DNPM, 2014).....	23
Figura 2 Difratomogramas das amostras de massa cerâmica da região do Estado do Pará por (a) Miranda (2014) e (b) Racanelli <i>et al.</i> (2019).....	28
Figura 3- Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha.....	29
Figura 4 - Formas de armazenamento da matéria-prima no pátio da indústria .....	30
Figura 5 - Processo de homogeneização no misturador e no laminador .....	31
Figura 6 - Conformação da massa argilosa para tijolos (a) e telhas (b) na extrusora.....	32
Figura 7 - Processo de secagem natural (a) e artificial (b) das peças cerâmicas .....	33
Figura 8 - Processo de beneficiamento final do corte do granito .....	36
Figura 9 - Lama abrasiva proveniente do corte do granito.....	37
Figura 10 - Fluxograma esquemático do procedimento experimental. ....	39
Figura 11– Coleta das amostras de argilas no pátio de armazenamento da empresa. ....	40
Figura 12 – Pesagem da argila turfosa (a) e argila amarela (b). ....	41
Figura 13– Lama abrasiva proveniente do corte do granito seca (a) e destorroada (b). ....	42
Figura 14– Peça cerâmica com coração negro. ....	43
Figura 15- Extrusora a vácuo para prensagem dos corpos de prova .....	44
Figura 16 - Processo preparação dos corpos de provas. (Adaptado pelo autor do trabalho)....	46
Figura 17- Difrátograma de raios-X da argila turfosa. E = Esmectita; I = Illita; C = Caulinita; Q = Quartzo; An = Anatásio; R t= Rutilo; He = Hematita. ....	49
Figura 18 - Difrátograma de raios-X da argila amarela. E = Esmectita; I = Illita; C = Caulinita; Q = Quartzo; G = Goethita; An = Anatásio; R t= Rutilo; He = Hematita. ....	50
Figura 19 - Difrátograma de raios-X do Resíduo do Granito. M = Mica; ct = Cordierita ; mi = Microclínio; al = Albita; .....	51
Figura 20 - Curvas de ATG e DSC da massa cerâmica (argila turfosa).....	54
Figura 21 - Curvas de ATG e DSC da massa cerâmica (argila amarela) .....	54
Figura 22 - Curvas de ATG e DSC do resíduo do granito .....	55
Figura 23 - Micrografia obtida por MEV da região de fratura da massa argilosa pura queimada a 950°C .....	56
Figura 24 - MEV da massa argilosa com adição de 15% de resíduo do granito queimada a 950°C.....	56

Figura 25- Absorção de água das peças queimadas a 950°C em função da adição do resíduo do granito adicionado. ....	57
Figura 27– Retração Linear das peças queimadas a 950°C em função da adição do resíduo do granito adicionado. ....	58
Figura 28 - Ensaio de Ruptura a flexão em corpos de prova secos (a) e sinterizados a 950°C (b) .....	59
Figura 29 - TRF das peças queimadas a 950°C em função da adição do resíduo do granito adicionado.....	60

## LISTA DE FOTOS

Foto 1 - Pesagens da massa argilosa (a) e do resíduo do granito (b).....	45
Foto 2 - Etapa de mistura das massas argilosas com resíduo (c) e conformação da massa (d)	45
Foto 3- Prensagem da massa argilosa (e) e molde do corpo de prova na maromba (f).....	45
Foto 4- Processo de corte dos corpos de prova (g) e secagem em estufa (h). ....	46

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Produção de materiais cerâmicos no Brasil.....	22
Tabela 2- Análises químicas quantitativas obtidas por espectrometria de fluorescência de raios-X, em percentagem (%) de óxidos. ....	27
Tabela 3- Nomenclatura de identificação das amostras .....	40
Tabela 4 - Composição das massas cerâmicas .....	42
Tabela 5 - Análise Química das Argilas e do Resíduo.....	52
Tabela 6 - Resultados do teste estatístico da ANOVA relativo à absorção de água. ....	58
Tabela 7 - Resultados do teste estatístico da ANOVA relativo à retração linear. ....	59

## LISTA DE EQUAÇÕES

(1- Asorção de água).....	47
(2- Retração linear).....	48
(3- Tensão de roptura a flexão).....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM	Associação Brasileira da Cerâmica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRAMAT	Associação Brasileira da Indústria da Construção Civil
ANICER	Associação Nacional da Indústria Cerâmica
CBIC	Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil
CVPC	Cerâmica Vermelha para Construção
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISI	Instituto SENAI de Inovação
LACER	Laboratório de Ensaios Cerâmicos
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	19
1.1.	Objetivo Geral da Pesquisa.....	20
1.2.	Objetivos Específicos da Pesquisa .....	20
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	21
2.1.	Indústria da Cerâmica Vermelha no Brasil.....	21
2.2.	A indústria da cerâmica vermelha no Estado do Pará .....	23
2.3.	Materiais cerâmicos .....	24
2.4.	Propriedades dos materiais cerâmicos .....	25
2.5.	Matéria prima .....	26
2.5.1.	Argila e sua composição química .....	26
2.6.	Cerâmica vermelha .....	28
2.7.	Processo de fabricação da cerâmica vermelha .....	29
2.7.1.	Conformação da peça.....	31
2.7.2.	Secagem .....	33
2.7.3.	Queima.....	34
2.8.	Uso de resíduos de rochas ornamentais em cerâmica vermelha.....	34
2.9.	O processo de beneficiamento das rochas ornamentais.....	36
2.9.1.	Granito .....	38
3.	PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS .....	39

3.1. Coleta dos materiais .....	40
4. FABRICAÇÃO DAS PEÇAS CERÂMICAS: COMPOSIÇÃO E PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA.....	41
4.1. Preparação dos Corpos Provas .....	44
5. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO.....	46
5.1. Difração de Raios-X (DRX).....	46
5.2. Fluorescência de raios-X (FRX).....	47
5.3. Análise Termogravimétrica .....	47
5.4. Análise Morfológica .....	47
5.5. Absorção de Água .....	47
5.6. Retração Linear de Queima .....	48
5.7. Tensão de Ruptura à Flexão .....	48
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....	49
6.1. Caracterização dos materiais utilizados.....	49
6.1.1. Difração de raios-X.....	49
6.1.2. Análise Química .....	52
6.1.3. Comportamento térmico das massas argilosas .....	53
6.1.4. Caracterização morfológica .....	56
7. CARACTERIZAÇÃO DAS MASSAS ARGILOSAS ADICIONADA COM RESÍDUO DO GRANITO .....	57
7.1. Absorção de Água .....	57

7.2.	Retração Linear de Queima .....	58
7.3.	Tensão de Ruptura à Flexão .....	59
8.	CONCLUSÕES .....	61
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	63

## 1. INTRODUÇÃO

A Cerâmica Vermelha no Estado do Pará representada pelos principais insumos utilizados pelo setor da construção civil como matéria-prima na fabricação de blocos de vedação e estruturais, telhas, tijolos maciços, tubos e ladrilhos.

Dados da Associação Brasileira de Rochas Ornamentais apontam que o Brasil ocupa a quarta posição de países que mais produziram pedras naturais, tais como granito, mármore, gnaisse, ardósia, entre outras, sendo responsável por 7% da produção mundial do setor de rochas. As transações comerciais no ano de 2018 encerraram com um montante de US\$ 992,5 milhões em exportações. Estados Unidos, China e Itália, respectivamente, mantiveram a liderança. (ABRIROCHAS, 2018).

No processo de corte e beneficiamento de rochas ornamentais, em geral, são geradas enormes quantidades de resíduos abrasivos na forma de uma lama, que pode causar consequências negativas à segurança do meio ambiente e das pessoas que trabalham com esta atividade.

Embora a atividade de exploração e beneficiamento de rochas ornamentais cause considerável impacto ambiental, ela não pode ser interrompida, devido à sua relevante participação no mercado econômico (Raymundo *et al.* 2013). Bai, Zhang e Wang (2015, 2016) e Singh *et al.* (2016) afirmam que as rochas são um dos mais importantes materiais e matérias-primas utilizados na construção civil.

Estes resíduos são atrativos para o aproveitamento cerâmico por serem constituídos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{CaO}$ . Compostos estes constituintes das matérias-primas usadas na fabricação de produtos cerâmicos, acarretando assim, a diminuição do consumo de matérias-primas naturais, resultando em ganhos ambiental e econômico (PEDROTI, 2011).

A cerâmica vermelha atualmente é um dos setores da indústria cerâmica que vem utilizando como uma alternativa viável a incorporação de diversos resíduos como forma de minimizar os impactos ao meio ambiente, além do reaproveitamento como matéria-prima em substituição de outros materiais. O reaproveitamento de resíduos sólidos é considerado uma realidade cada vez mais praticada pelas empresas.

Essa incorporação, se feita de maneira criteriosa, permite dar um destino ambientalmente correto para o resíduo em estudo, já que as indústrias de fabricação e transformação de materiais produzem certa quantidade de resíduos que nem sempre conseguem ser reaproveitados ou têm seu destino final adequado. A proposta de ampliar a utilização do resíduo de pedras ornamentais nos aterros atende perfeitamente às demandas por uma sociedade mais sustentável.

### **1.1. Objetivo Geral da Pesquisa**

Esta pesquisa tem como objetivo geral avaliar a influência de uma fração em massa do pó residual de uma marmoraria (resíduo do corte do granito), adicionado na composição de uma massa argilosa (argila turfosa e argila amarela) do Município de Castanhal-PA, a fim de ser utilizada como uma matéria-prima alternativa na indústria de cerâmica vermelha.

### **1.2. Objetivos Específicos da Pesquisa**

- Realizar a caracterização química, morfológica e térmica do resíduo de pedras ornamentais, assim como da composição da massa argilosa (argila turfosa com argila amarela);
- Formular misturas de massas cerâmicas contendo adições de até 20% em peso de resíduo de rocha ornamental;
- Caracterização física e mecânica dos corpos de provas cerâmicos por meio dos ensaios de absorção de água, retração linear e tensão de ruptura.
- Avaliar a microestrutura das peças cerâmicas produzidas, tais como: espectroscopia por fluorescência de raios X, difração de raios-X, análise termogravimétrica (ATG) e microscopia eletrônica de varredura (MEV).

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Indústria da Cerâmica Vermelha no Brasil**

O setor cerâmico no Brasil constitui um dos maiores conglomerados industriais do gênero no mundo, tendo uma grande importância econômica para o Brasil, com uma participação no PIB brasileiro de quase 1,0%, além de apresentar características de capilaridade no cenário da economia nacional que o distingue de todos os outros setores, envolvendo micros, pequenas, médias e grandes empresas em todos os estados, no interior e nas regiões metropolitanas, e em boa parte dos municípios do país, envolvendo produtos derivados de minerais não metálicos para a construção civil, como elementos estruturais e para revestimento, louças domésticas, sanitárias e de decoração, assim como de uso específico, como isoladores elétricos, tijolos refratários, tubulações sanitárias, abrasivos, biocerâmica e isolantes térmicos. (EELA, 2012)

Parte importante desse setor, a indústria de cerâmica vermelha no Brasil, também denominada cerâmica estrutural, envolve a produção de elementos estruturais, de vedação e de acabamento para a construção civil (telhas, blocos estruturais e de vedação, tubos, lajotas e pisos) e responde por um faturamento de R\$ 18,0 bilhões/ano (US\$ 9 bilhões/ano), com uma participação de 6903 empresas, na maior parte micro e pequenas empresas de origem familiar, envolvendo a oferta de 293 mil empregos diretos (média de 42,4 empregados por empresa) e 1,25 milhões de empregos indiretos, constituindo um dos maiores parques de produção de cerâmica vermelha no mundo. (ANICER, 2018)

A cerâmica vermelha é uma importante atividade base da construção civil que produz tijolos maciços e furados, blocos de vedação/estruturais, telhas e pisos rústicos. Além disso, tem um importante papel social, pois segundo dados da Associação Nacional da Indústria Cerâmica (ANICER), estima-se que existam no país 7.431 empresas, responsáveis pela geração de 293 mil empregos diretos faturando anualmente 18 bilhões R\$ (Tabela 1).

Tabela 01 - Produção de materiais cerâmicos no Brasil.

	<b>Nº Empresas</b>	<b>%Aproximado</b>	<b>Prod./Mês (Nº</b>	<b>Consumo</b>
	<b>Aproximado</b>	<b>por Área</b>	<b>de Peças)</b>	<b>Ton/Mês</b>
Blocos/Tijolos	4346	63%	4.000.000.000	7.800.000
Telhas	2547	36%	1.300.000.000	2.500.000
Tubos	10	0,1%	325,5Km <sup>1</sup>	–

Fonte: ANICER, 2018

No Brasil existe uma fragmentação do setor cerâmico, que se distribui por todo país, muito pulverizada em micro e pequenas empresas. Em território nacional conta-se com mais de 12 mil olarias e cerâmicas, gerando aproximadamente 650 mil empregos diretos e 2 milhões de empregos indiretos, essas têm uma média de 50 operários por empresa, com uma produtividade de 13.000 peças/mês, enquanto que países europeus desenvolvidos a média é de 20 trabalhadores, com uma produtividade de 200.000 peças/mês. (KAWAGUTI, 2014).

O segmento de cerâmicas vermelhas apresenta uma estrutura empresarial diversificada, prevalecendo pequenos empreendimentos familiares (olarias) e fábricas de pequeno a médio porte, com deficiências de mecanização e gestão. É característica dessas indústrias o fornecimento de seus próprios recursos minerais (argilas comuns), sendo também empresas mineradoras com jazidas próprias. Apesar de demandar profissionais qualificados para atuar em áreas específicas (composição e modelamento das massas, gestão dos empreendimentos etc.), o setor de cerâmicas vermelhas é caracterizado pela desqualificação e o baixo nível de instrução formal da mão de obra (MME, 2018).

Outras fontes aqui utilizadas são Associação Brasileira da Cerâmica–ABCERAM; Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo-IPT; Associação Brasileira da Indústria da Construção Civil – ABRAMAT e Câmara Brasileira da Indústria da Construção Civil-CBIC.

---

<sup>1</sup> Produção apontada pela Associação Latino-Americana de Fabricantes de Tubos Cerâmicos (Acertubos), considerando o número de 10 empresas, responsáveis pela fabricação de 3.906km/ano.

## 2.2. A indústria da cerâmica vermelha no Estado do Pará

A Figura 1 mostra a pesquisa do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), em que o Estado do Pará no ano de 2014 concedeu em média 111 licenças de outorgas para exploração de argila para empresas do segmento. Contudo, ocorre também a possibilidade de outros empreendimentos operarem de maneira informal ou em desacordo com a legislação mineral e ambiental, colocando em risco tanto o controle e a recuperação ambiental das áreas mineradas, quanto o próprio abastecimento das cerâmicas.

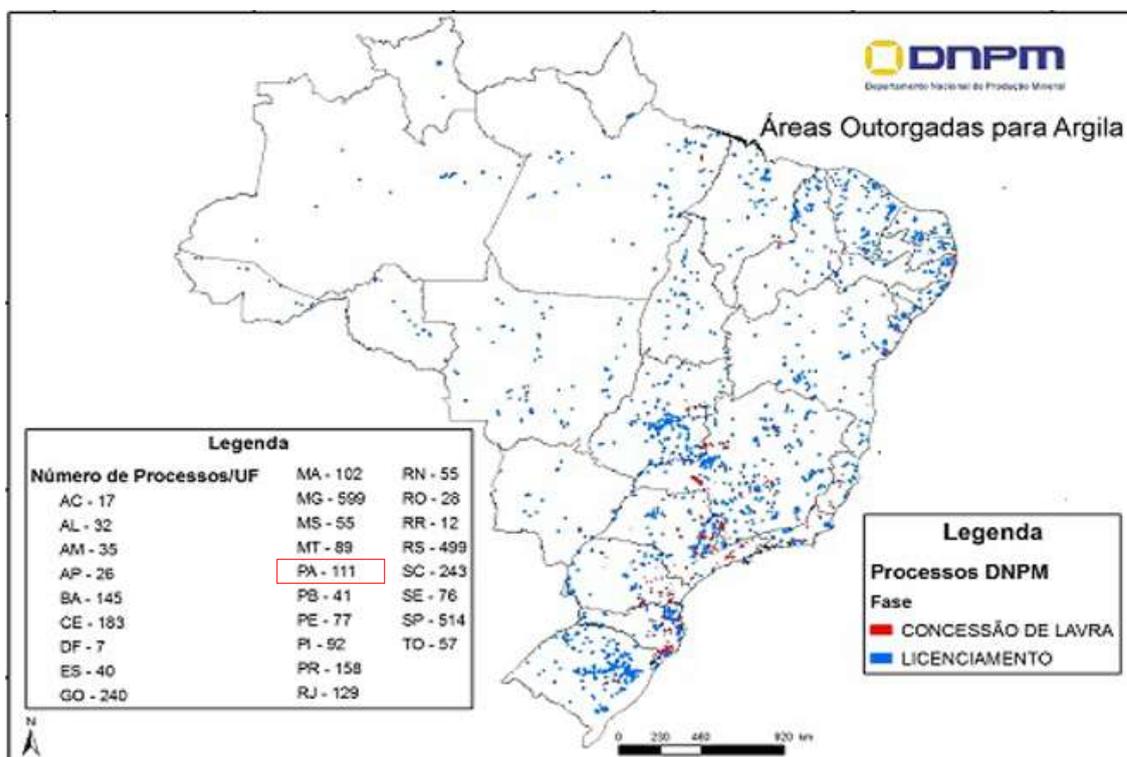


Figura 1- Mapa dos direitos minerários de extração de argilas no Brasil (CGTIG/DNPM, 2014).

Segundo Rocha. *et al.* 2013, a localização das Indústrias de cerâmica vermelha é determinada por dois elementos principais: a proximidade das jazidas e a proximidade dos mercados consumidores. Com aproximadamente 42 fábricas, o município de São Miguel do Guamá, localizado na região nordeste do Pará, a 144 km de Belém, é considerado o principal polo cerâmico da Região Norte do Brasil. É responsável por mais de 03 mil empregos diretos e fabricação mensal aproximada de 30 milhões de tijolos e 09 milhões de telhas. Tem participação em 92% na oferta da produção estadual. O volume de produção é absorvido dentro do estado do Pará e uma pequena parte é distribuída ao estado vizinho, Maranhão (MA).

### 2.3. Materiais cerâmicos

De acordo com Pedroti (2011), dá-se o nome de cerâmica à pedra artificial obtida por meio da moldagem, secagem e cozedura de argila ou mistura contendo argila. A grande diversidade de argilas encontradas na superfície da Terra permite que se obtenham produtos cerâmicos com as mais diversas características tecnológicas, compreendendo o seguinte:

- a) desde produtos rústicos, como tijolos e telhas, até produtos de fino acabamento, como os de porcelana;
- b) desde produtos permeáveis, como velas de filtros, até produtos impermeáveis, como as louças sanitárias e de grés cerâmico;
- c) desde produtos frágeis ao fogo até elementos refratários e resistentes a altas temperaturas;
- d) desde produtos usados como isoladores elétricos até os supercondutores, uma das maiores inovações tecnológicas deste final de século.

De acordo com a Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM, 2019), o setor cerâmico é dividido em subsetores em função de fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização, assim foi adotada a seguinte classificação:

- Cerâmica Vermelha: Compreende alguns materiais empregados na construção civil como telhas, tijolos, blocos, lajes, etc.
- Materiais de Revestimento/Placas Cerâmicas: São materiais utilizados como revestimentos de paredes, pisos entre outros. Podendo ser chamados de azulejo, pastilha, porcelanato, grés, lajota, etc.
- Cerâmica Branca: São materiais constituídos por um corpo branco e geralmente revestidos por uma camada vítrea transparente e incolor. Neste ramo podemos citar louças sanitárias e de mesa, isoladores elétricos de alta e baixa tensão e cerâmica artística.
- Materiais Refratários: Compreende diversos produtos que tem por finalidade suportar temperaturas elevadas. Geralmente também são materiais que suportam esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações. São classificados quanto à matéria-prima ou componentes químico: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnesianocromítico, cromítico-magnésiano, carbetos de silício, grafita,

carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

- **Isolantes Térmicos:** São materiais caracterizados por sua alta resistência térmica como refratários isolantes, isolantes não refratários (vermiculita expandida, sílica diatomácea, diatomito, silicato de cálcio, lã de vidro e lã de rocha), fibras ou lãs cerâmicas.

- **Fritas e Corantes:** São matérias-primas utilizadas no setor de acabamentos, as fritas com finalidade de aprimorar a estética, tornar a peça impermeável, aumentar a resistência mecânica e melhorar ou proporcionar outras características e os corantes para conferir colorações diversas e efeitos especiais nos corpos cerâmicos.

- **Abrasivos:** São materiais naturais ou sintéticos empregados para desgastar, polir ou limpar outros materiais. Entre os produtos conhecidos podemos citar o diamante, carbetto de silício e alumina.

- **Vidro, Cimento e Cal:** São três importantes segmentos cerâmicos e que, por suas particularidades, são muitas vezes considerados à parte da cerâmica.

- **Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada:** São os materiais utilizados nas áreas aeroespacial, eletrônica, nuclear e muitas outras. Neste setor os materiais utilizados são desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Como alguns exemplos, podemos citar: naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo, suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, *etc.*

## **2.4. Propriedades dos materiais cerâmicos**

As propriedades dos materiais cerâmicos variam bastante devido às diferenças de ligações químicas. Em geral, os materiais cerâmicos são duros e frágeis, com pouca tenacidade pouca ductilidade. São bons isolantes térmicos e elétricos, devido à ausência de elétrons de condução. Têm geralmente temperaturas de fusão relativamente altas e grande estabilidade química em muitos ambientes hostis, devido à estabilidade das suas fortes ligações químicas (SMITH, 2012).

Nos argilominerais e cristais não argilosos, as ligações químicas após queima, são iônicas com caráter covalente, envolve a troca de carga eletrônica entre pares de átomos. Assim, quando os cristais iônicos e covalentes são deformados por aplicação de uma

tensão, ocorre fratura frágil devido à separação de ligações de pares de elétrons, sem haver restauração. Esta fratura é provocada ao longo de planos cristalográficos ou de clivagem por: poros, diferenças de tamanhos de partículas, fendas, crescimento de trincas entre outros, considerados defeitos da estrutura. Conseqüentemente são materiais de pouca deformabilidade, visto que estes materiais não absorvem energia suficiente para que haja deformações consideráveis. Os materiais cerâmicos rompem em geral, quando sofrem deformação da ordem de 0,1%. (CALLISTER, 2012)

## **2.5. Matéria prima**

### **2.5.1. Argila e sua composição química**

Minerais de argila são silicatos de alumínio no estado cristalino pertencente ao grupo dos filossilicatos e constituem partículas de diâmetro  $< 0,002$  mm (dimensão de lote de Argila). Os silicatos possuem estrutura cuja geometria é denominada pelo arranjo tridimensional dos átomos de silício e oxigênio seguindo regras definidas determinadas pela natureza química e pela geometria de seus próprios átomos. (SABINO, 2016)

Segundo Caldas (2012), as argilas são os principais constituintes para a fabricação de peças cerâmicas, assim faz-se necessário o conhecimento de suas principais propriedades para obtenção de uma massa cerâmica adequada para o processo de produção. Dentre as quais se destacam:

- Plasticidade: propriedade adquirida por argilas quando misturadas a água, podendo ser moldada sem ruptura e sem variação de volume.
- Granulometria: característica importante das argilas por influenciar em suas propriedades. Os minerais que constituem as argilas apresentam tamanho de partícula inferior a  $2 \mu\text{m}$  (diâmetro esférico equivalente).
- Retração: a retração nas peças cerâmicas pode ocorrer em duas etapas, na etapa de secagem e queima. Durante a secagem a retração aumenta em virtude da aproximação das partículas sólidas devido à eliminação das águas higroscópica e de constituição. Durante a queima a retração depende dos minerais presentes na argila, por exemplo, uma argila rica em fundentes acarretará na retração da peça durante a queima, devido ao início da fusão e preenchimento dos vazios.

As argilas são sistemas complexos constituídos por substâncias orgânicas e inorgânicas que variam de acordo com a jazida e influenciam no processo de fabricação e nas características dos produtos cerâmicos. As argilas que possuem compostos higroscópicos, como a montmorilonita, e menor presença de silício são mais plásticas, pois retêm mais água durante a mistura e apresentam uma maior retração durante a secagem. Algumas das substâncias comumente encontradas nas argilas são  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ . Para corrigir as variações que a composição destas matérias-primas está sujeita deve-se realizar misturas de diferentes argilas, garantindo a homogeneidade para podermos fabricar produtos com características semelhantes. (PAIVA FILHO, 2004)

Miranda (2014) realizou o ensaio de composição química (Tabela 2) de uma massa cerâmica da região. Nota-se que há predomínio de óxidos de  $\text{SiO}_2$ (59,6%) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ (17,5%) os quais estão na sua maior parte combinados formando as estruturas do aluminossilicatos como a caulinita e mica muscovita, presentes nas argilas do Estado do Pará. Observa-se que a massa cerâmica apresenta teores elevados de óxidos corantes como  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , resultando numa cor de queima avermelhada.

Tabela 2- Análises químicas quantitativas obtidas por espectrometria de fluorescência de raios-X, em percentagem (%) de óxidos.

Constituintes (%)	FR - NAT(%)
$\text{SiO}_2$	59,58
$\text{Al}_2\text{O}_3$	17,55
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	14,37
$\text{K}_2\text{O}$	3,55
$\text{SO}_3$	2,48
$\text{TiO}_2$	1,99
$\text{Tm}_2\text{O}_3$	0,28
$\text{ZrO}_2$	0,11
$\text{V}_2\text{O}_5$	0,06
$\text{ZnO}$	0,03

Fonte: Miranda, 2014.

Através da técnica de difração de raios-X (Figura 2), os autores Miranda (2014) e Racanelli *et al* (2019) estão comprovando a predominância do mineral Caulinítico nas amostras da região do Estado do Pará. Também foram identificados os minerais Micáceos, Gibsita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), Goethita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) e Quartzo.

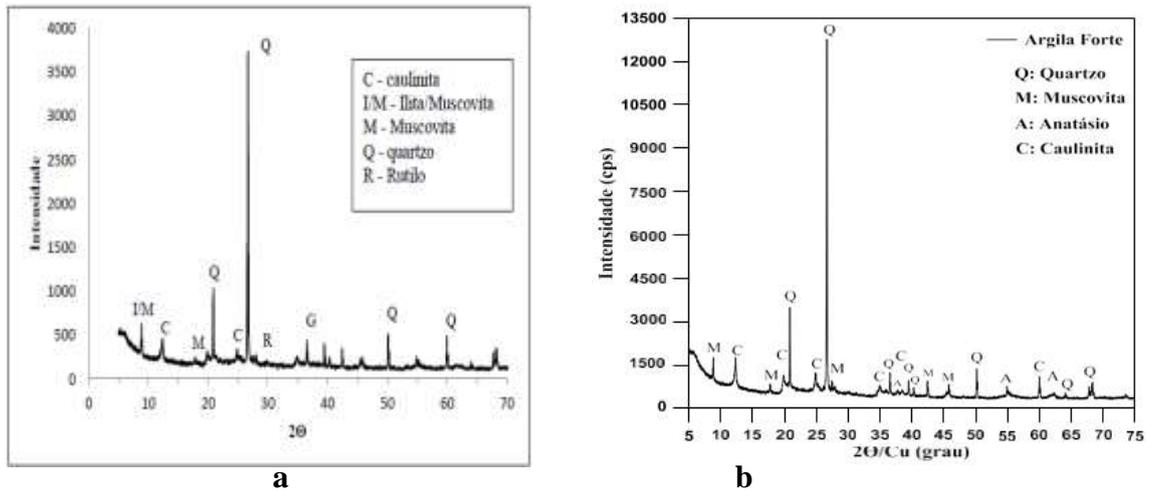


Figura 2- Difratomogramas das amostras de massa cerâmica da região do Estado do Pará por (a) Miranda (2014) e (b) Racanelli *et al.* (2019)

## 2.6. Cerâmica vermelha

Segundo Rocha *et al.* (2013), a Cerâmica Vermelha para Construção (CVPC) - representada pelos produtos, telhas, tijolos, blocos, tubos vazados e lajes – é um dos principais insumos utilizados pelo setor da construção civil no Brasil. Utilizadas para coberturas, as telhas cerâmicas são empregadas em todas as regiões do País, apresentando diferentes conformações e características técnicas.

Compreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno. As lajotas muitas vezes são enquadradas neste grupo, porém o mais correto é em Materiais de Revestimento. (ABCERAM, 2018).

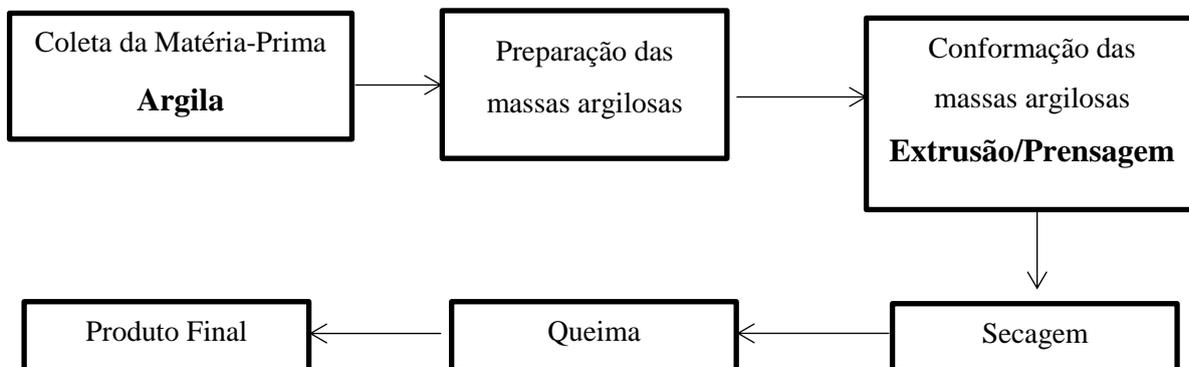
## 2.7. Processo de fabricação da cerâmica vermelha

Segundo Motta (2002), primeiramente é necessário que seja conhecida à propriedade final do produto que se deseja fabricar para que as massas cerâmicas sejam desenvolvidas visando atender as especificações solicitadas, principalmente, pelos mercados consumidores. As massas que compõem os corpos cerâmicos, também chamados de biscoito ou suporte, podem ser classificadas de acordo com as matérias-primas empregadas:

- Massa simples ou natural: são aquelas que se referem à utilização de uma só matéria-prima, e que dispensa as necessárias proporções entre os minerais, permitindo a fabricação da peça cerâmica desejada. Como exemplo, podem-se citar as massas para o fabrico de telhas, tijolos e revestimentos via-seca.
- Massa composta ou artificial: são aquelas compostas por uma mistura de diversas matérias-primas, cada uma com suas proporções devidamente estabelecidas em peso ou volume. Referem-se, por exemplo, as massas de louças sanitárias e de revestimentos via-úmida.

O processo industrial da cerâmica vermelha (Figura 3) envolve diversas fases de processamento, tais como coleta da argila, preparação, mistura, secagem e queima, até obtenção dos produtos finais, podendo cada etapa influenciar decisivamente na etapa seguinte. (BACCELLI JR., 2010)

Figura 3- Fluxograma do processo de fabricação de cerâmica vermelha



Fonte: BACCELLI JR., 2010 (Adaptado).

Conforme ABCERAM (2018), uma das etapas fundamentais do processo de fabricação de produtos cerâmicos é a dosagem das matérias-primas e dos aditivos, que deve seguir com rigor as formulações de massas, previamente estabelecidas. Os diferentes tipos de massas são preparados de acordo com a técnica a ser empregada para dar forma às peças. De modo geral, as massas podem ser classificadas em:

- Suspensão, também chamada barbotina, para obtenção de peças em moldes de gesso ou resinas porosas;
- Massas secas ou semi-secas, na forma granulada, para obtenção de peças por prensagem;
- Massas plásticas, para obtenção de peças por extrusão, seguida ou não de torneamento ou prensagem.

A dosagem das matérias primas, em geral, precede sua preparação, uma vez que a preparação da massa se inicia com a formação dos lotes no pátio da indústria (Figura 4). A dosagem pode ser feita através da medida de conchadas da retroescavadeira ou através de caixões alimentadores, controlando a abertura dos mesmos. Estes dois métodos consistem em dosagem por volume, sendo o segundo um pouco mais eficiente. Outro método mais eficaz é fazer a dosagem por massa através de caixões alimentadores com controle de peso. (BASTOS, 2003)

Figura 4 - Formas de armazenamento da matéria-prima no pátio da indústria



Fonte: Do autor (2019)

A mistura dosada é conduzida aos desintegradores, onde os grandes blocos de argila são desintegrados e as pedras, quando existentes, separadas por centrifugação. O material desagregado é então transportado para o misturador, onde inicia o processo de homogeneização (Figura 5) e, em seguida, a mistura é transferida para o laminador, que tem por objetivo diminuir a granulometria da massa, completar a homogeneização e cortar a massa em lâminas. (BASTOS, 2003)

Figura 5 - Processo de homogeneização no misturador e no laminador



Fonte: Do autor (2019)

### 2.7.1. Conformação da peça

Os métodos industriais utilizados para conformação de blocos e telhas são respectivamente a extrusão e a prensagem. Mesmo gerando produtos de menor valor, a extrusão é o método mais utilizado na indústria de cerâmica estrutural, devido ao seu menor custo. A prensagem é um método mais caro, que apenas é realizado em alguns tipos de telhas com maior valor agregado. (ARRUDA e MARIBONDO, 2007).

A massa plástica é colocada numa extrusora, também conhecida como maromba (Figura 6), onde é compactada e forçada por um pistão ou eixo helicoidal, através de bocal com determinado formato. Como resultado obtém-se uma coluna extrudada, com seção transversal com o formato e dimensões desejadas, em seguida, essa coluna é cortada obtendo-se desse modo peças como tijolos vazados, blocos, tubos e outros produtos de formato regular. (ABCERAM, 2018)

Figura 6 - Conformação da massa argilosa para tijolos (a) e telhas (b) na extrusora



Fonte: Do autor (2019)

A prensagem geralmente trabalha com teores de umidade variando entre 5 e 15%. A mistura granulada é colocada em um molde e em seguida compactada por um ou dois êmbolos, sob pressões da ordem de dezenas de Mpa. A prensagem limita-se, portanto, à fabricação de peças com pouca complexidade geométrica, tais como telhas, pisos, ladrilhos, refratários, e até mesmo pequenos isoladores elétricos. Um dos pontos críticos desse método são os gradientes de pressão que surgem no interior da peça durante a prensagem. Esses gradientes acarretam uma densidade não uniforme na peça compactada, podendo resultar em empenamentos ou trincas (SOUZA, 2003).

Na prensagem utiliza-se sempre que possível massa granuladas e com baixo teor de umidade. Diversos são os tipos de prensa utilizados, como fricção, hidráulica e hidráulico-mecânica, podendo ser de mono ou dupla ação e ainda ter dispositivos de vibração, vácuo e aquecimento. Para muitas aplicações são empregadas prensas isostática,

cujos sistemas diferem dos outros. A massa granulada com praticamente 0% de umidade é colocada num molde de borracha ou outro material polimérico, que é em seguida fechado hermeticamente e introduzido numa câmara contendo um fluido, que é comprimido e em consequência exercendo uma forte pressão, por igual, no molde. (ABCERAM, 2018)

### 2.7.2. Secagem

Após a moldagem as peças apresentam alta quantidade de água. Assim, para se evitar possíveis defeitos por causa da presença do líquido é feita a secagem do material. A água deve ser eliminada gradualmente até que se atinja um grau de umidade residual da ordem de 0,8 a 1,5%. A secagem geralmente é realizada a 170 °C e pode ser feita em secadores verticais e horizontais (OLIVEIRA; MAGANHA, 2006).

Existem basicamente dois tipos de secagem, a natural (Figura 7-a) onde as peças são deixadas ao ar livre ou em pátios cobertos, e a artificial (Figura 7-b) em que as peças são colocadas dentro de secadores, onde recebem ventilação forçada e ar quente para auxiliar a extração da umidade. A secagem natural é dependente das condições atmosféricas e, portanto, tem um tempo de ciclo muito variável, dificultando assim, os controles durante o processo de produção. As empresas que estão implementando um Sistema de Gestão da Qualidade estão procurando utilizar secadores artificiais. (BASTOS, 2003).

Figura 7 - Processo de secagem natural (a) e artificial (b) das peças cerâmicas



Fonte: Do autor (2019)

Após a etapa de formação, as peças em geral continuam a conter água, proveniente da preparação da massa. Para evitar tensões e, conseqüentemente, defeitos nas peças, é necessário eliminar essa água, de forma lenta e gradual, em secadores intermitentes ou contínuos, a temperaturas variáveis entre 50 °C e 150 °C. (ABCERAM, 2019)

### **2.7.3. Queima**

Segundo Presotto (2012), nessa operação, conhecida também por sinterização, os produtos adquirem suas propriedades finais. As peças, após secagem, são submetidas a um tratamento térmico a temperaturas elevadas, que para a maioria dos produtos situa-se entre 800 °C a 1700 °C, em fornos contínuos ou intermitentes que operam em três fases:

- aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada;
- patamar durante certo tempo na temperatura especificada;
- resfriamento até temperaturas inferiores a 200 °C.

Durante esse tratamento ocorre uma série de transformações em função dos componentes da massa, tais como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a soldagem dos grãos. Portanto, em função do tratamento térmico e das características das diferentes matérias-primas são obtidos produtos para as mais diversas aplicações. (ABCERAM, 2019)

## **2.8. Uso de resíduos de rochas ornamentais em cerâmica vermelha**

Melo *et al.* (2004), analisaram a utilização do resíduo proveniente do acabamento de mármore e granitos como matéria prima em cerâmica vermelha. Com 24% e 32% de resíduo incorporado, foram obtidos resultados satisfatórios à temperatura de 1150°C para fabricação de tubos cerâmicos, os quais são queimados nesta faixa de temperatura, obtendo bons resultados de absorção d'água apresentando valores respectivos de 0,99% e 1,40% e retração de 12% e 14%.

G.C Xavier *et al.* (2009), analisaram o processos de degradação acelerada em laboratório para estudo da durabilidade de peças cerâmicas vermelhas incorporadas com resíduo de granito. As misturas foram feitas adicionando-se 0%, 5% e 10% de rejeito, em peso, até homogeneização da massa argilosa para posterior obtenção de corpos de prova prismáticos. Os corpos de prova foram submetidos a secagem e queima a 500 °C, 700 °C e 900 °C. Os resultados mostram que certa quantidade de incorporação de resíduo tem influência considerável na evolução da degradação. Além disto, são notadas maiores resistências à degradação no material incorporado.

Pedroti (2011) analisou o desenvolvimento de massa cerâmica com o uso de resíduo de granito para obtenção de blocos cerâmicos prensados de encaixe de matriz argilosa. Seus resultados mostraram que o resíduo de granito pode ser usado na cerâmica, já que possui elementos químicos semelhantes aos encontrados nas argilas e atuam como bons fundentes. O estudo evidenciou que cerca de 16% de adição de resíduo de granito, o que é uma proporção muito satisfatória de aproveitamento e resultados encontrados.

El-Maghraby *et al.*(2011) avaliaram o uso de granito local na substituição do feldspato importado para produção de cerâmicas de revestimento brancas à base de argila caolinítica. O granito moído foi adicionado nas proporções de 20, 25, 30 e 35 % em massa. A sinterização foi a 1220 °C em um forno industrial com ciclo de queima de 50 minutos. Os autores afirmaram que a temperatura de máxima taxa de sinterização foi reduzida pela adição de granito e que, para teores crescentes de granito, obtiveram cerâmicas com maiores resistências mecânicas. Apesar do teor de óxido de ferro no granito, a alteração de cor nas amostras foi aceitável dentro do padrão de cerâmicas de revestimento brancas.

M. E. A. Carreiro *et al.* (2016), analisaram a utilização do resíduo de quartzo com 5, 10 e 15% em massa cerâmica, posteriormente, conformadas por prensagem uniaxial, e queimadas a 800, 900 e 1000 °C. Após queima dos corpos de prova, foram determinadas as propriedades físico-mecânicas: absorção de água, retração linear, porosidade aparente e resistência à flexão. Foi avaliada também a cor e fases mineralógicas formadas. Os resultados evidenciaram que, para a massa estudada, poderá ser adicionado até 15% do resíduo de quartzo.

## 2.9. O processo de beneficiamento das rochas ornamentais

Segundo Silveira, L.L.L. *et al.*(2014). O beneficiamento de rochas ornamentais visa basicamente a transformação dos blocos, extraídos na fase de lavra, em produtos finais ou semiacabados. Desta forma, podem se separar as fases de beneficiamento em primário, ou desdobramento, e secundário. O primeiro compreende a preparação e serragem dos blocos em chapas de espessura variável, usualmente dois ou três centímetros. No segundo processo, as chapas são submetidas a acabamento superficial, com ou sem resinagem, que pode ser um simples desbaste, polimento, escovado, flameado, assim como a produção de ladrilhos e outras peças.

Segundo Sousa (2007), o beneficiamento primário conhecido por desdobragem ou serragem, corresponde ao corte de blocos em peças com espessura variadas e próximas daquelas apresentadas pelos produtos finais, na forma de chapas, espessores (chapas grossas para arte funerária, monumentos e *etc.*) ou tiras. Representa o primeiro passo em relação à agregação de valor ao material proveniente das pedreiras.

A Figura 8 mostra o processo de acabamento final das chapas e outras peças que sofrem tratamento para realçar as características necessárias em função do uso previsto. É subdividida em três fases: o polimento, o corte e o acabamento final. Através do beneficiamento final que se obtém os produtos finais, como: rodapés, marcos de portas, ladrilhos e *etc.*

Figura 8 - Processo de beneficiamento final do corte do granito



Fonte: Do autor (2019)

De acordo com a ABNT (10004:2004) os resíduos sólidos são classificados quanto a sua periculosidade ao meio ambiente e saúde pública. Desta forma a lama abrasiva do corte do granito quando seca torna-se um resíduo sólido não biodegradável classificado como Resíduo Classe II B - Inerte.(Figura 9)

Figura 9 - Lama abrasiva proveniente do corte do granito



Fonte: Do autor (2019)

Pó de serraria (lama): é o pó proveniente da serragem dos blocos de rochas (após a extração), além do polimento e lustro das chapas. Este pó é o resíduo gerado em maior quantidade, chegando a atingir entre 30% a 40% em volume dos blocos serrados. (GOBBO, 2004).

Pó de marmoraria (lama): esta ocorre em forma de partículas finas formadas a partir do processo de recorte, polimento e lustro de peças, confeccionadas a partir das chapas geradas nas serrarias (Figura 10). Esta lama é produzida em 2% do total de volume processado. (GOBBO, 2004).

Estes resíduos são atrativos para o aproveitamento cerâmico por serem constituídos de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{CaO}$ . Compostos estes constituintes das matérias-primas usadas na fabricação de produtos cerâmicos, acarretando assim, a diminuição do consumo de matérias-primas naturais, resultando em ganhos ambiental e econômico (MOREIRA *et al.*, 2005).

### 2.9.1. Granito

O granito é uma rocha que apresenta grande quantidade de quartzo, feldspatos e mica. Nas etapas que antecedem a queima, estes minerais atuam como desplastificante, diminuindo a quantidade de água necessária para conformação e facilitando a secagem. Na queima o quartzo atua como inerte, podendo ainda apresentar uma parte dissolvida na fase líquida formada. Já os feldspatos e mica favorecem a formação de fase líquida e contribuem para a diminuição da porosidade das peças. (SOUTO *et al.*, 2001)

De acordo com Gonçalves, (2002) e Aguiar (2012); o granito em termos geológicos é uma rocha ígnea, uniforme, de textura granular, constituída predominantemente de minerais de quartzo, feldspato e mica. O quartzo é o mineral mais abundante existente na terra. Apresenta estrutura cristalina trigonal composta por tetraedros de sílica (dióxido de silício,  $\text{SiO}_2$ ), pertencendo ao grupo dos tectossilicatos. Pode apresentar cores de acordo com a sua variedade é muito resistente ao intemperismo, ele sobrevive à erosão em grãos que formam a maior parte das areias da praia e do deserto.

### 3. PROGRAMA EXPERIMENTAL: MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental exprime a metodologia adotada e descreve os procedimentos adotados na realização dos ensaios. Os procedimentos destes ensaios foram definidos, recorrendo a documentos normativos nacionais. A Figura 10 apresenta o fluxograma das etapas que foram desenvolvidas neste trabalho.

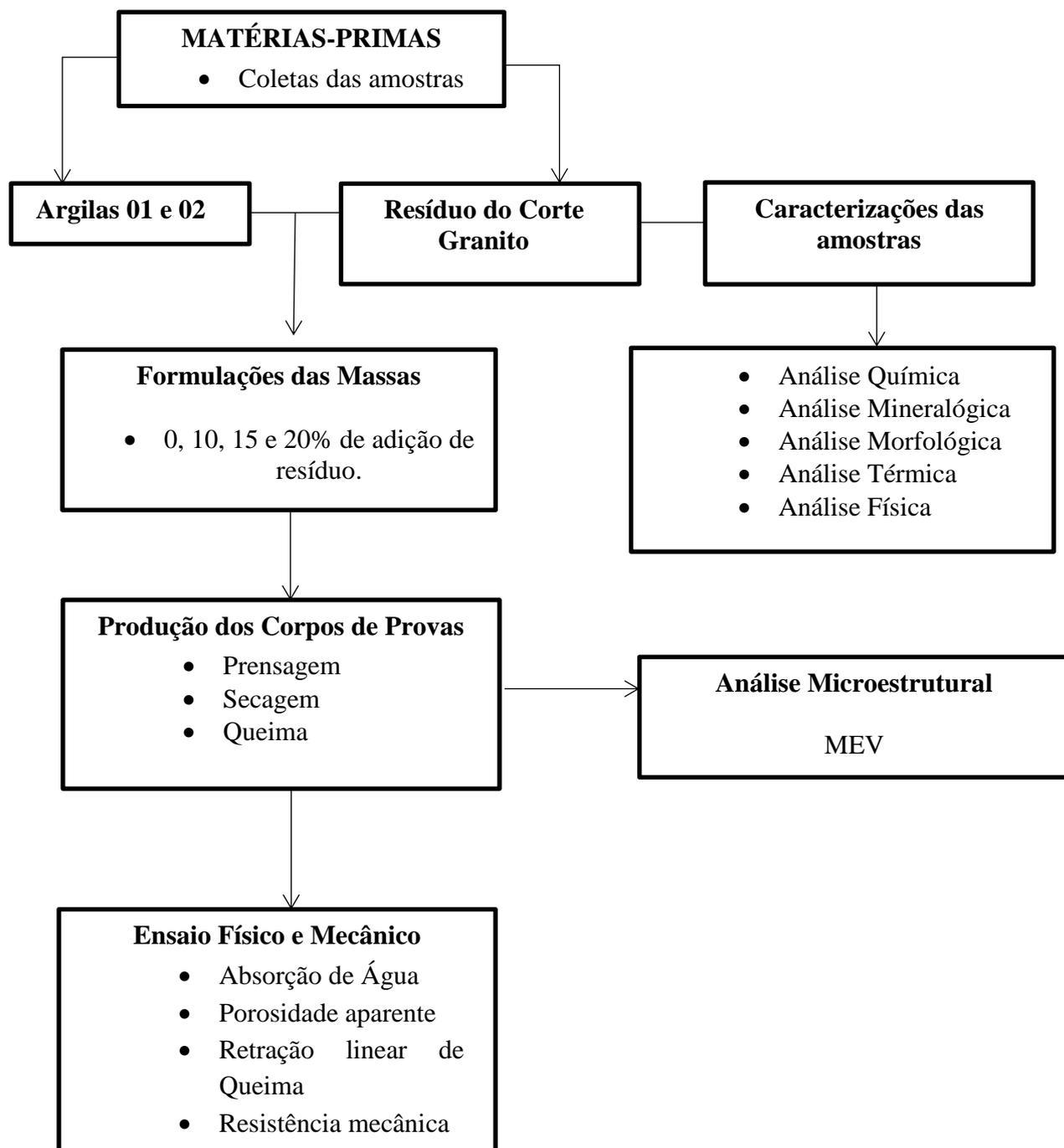


Figura 10 - Fluxograma esquemático do procedimento experimental.

### 3.1. Coleta dos materiais

Foram utilizadas como matéria-prima para o desenvolvimento deste trabalho duas argilas da empresa Cerâmica Tropical, Município de Castanhal-PA, denominadas de Argila 01 com presença de Turfas e Argila 02 de cor amarela. No processo produtivo se utiliza a mistura das argilas para produção de telhas e tijolos, porém tal dosagem é feita sem orientação e baseada no cotidiano da empresa analisada. O resíduo do granito denominado de (RG) foi cedido pela Empresa MAC - Mármore e Granito no Município de Ananindeua-PA, cuja nomenclatura de identificação das amostras está representada na Tabela 1.

Tabela 3- Nomenclatura de identificação das amostras

<b>Amostras</b>	<b>Nomenclatura</b>
Argila Turfosa	AG 01
Argila Amarela	AG 02
Resíduo do Granito	RG
Corpos de Prova	CP

A Figura 11 mostra que as amostras de argila naturais foram coletadas diretamente do pátio de armazenamento da empresa. Foram extraídas porções de aproximadamente 50 kg, acondicionadas em sacos plásticos, etiquetadas e encaminhadas aos laboratórios de caracterização e de cerâmica.

Figura 11– Coleta das amostras de argilas no pátio de armazenamento da empresa.



Fonte: Do autor (2019)

Tanto as amostras de argilas quanto do resíduo foram secas em estufa de laboratório a 105°C (ABNT 15310:2009) durante 24 horas e, posteriormente, foram desagregadas em moinho de rotor a martelo CT- 12061 até passagem completa em peneira de 200 mesh. (abertura de malha 075 mm).

#### 4. FABRICAÇÃO DAS PEÇAS CERÂMICAS: COMPOSIÇÃO E PREPARAÇÃO DE CORPOS DE PROVA

As peças cerâmicas foram preparadas utilizando-se dois tipos de argilas denominadas por (01) Argila com presença de turfa e (02) Argila amarela (Figura 12).

Figura 12 – Pesagem da argila turfosa (a) e argila amarela (b).



Fonte: Do autor (2019)

A amostra do resíduo foi coletada diretamente do processo de acabamento final das chapas de granito da empresa MAC - Mármore e Granito no Município de Ananindeua-PA. Foi extraída uma porção de aproximadamente 50 kg, acondicionada em um saco plástico, etiquetada e encaminhada aos laboratórios de caracterização e de cerâmica. O resíduo coletado foi submetido à secagem em estufa a 105°C por um período de 24 horas,

destorroado e homogeneizado para ser utilizado na composição do experimento. (Figura 13).

Figura 13– Lama abrasiva proveniente do corte do granito seca (a) e destorroada (b).



Fonte: Do autor (2019)

Dentre as informações obtidas no chão de fábrica da empresa de cerâmica, podem-se destacar algumas dificuldades que a mesma enfrenta, tais como: defasagem tecnológica, falta de conhecimento técnico para preparação da argila; ausência de critérios para dosagem de resíduos; falha no processo de extrusão, entre outros.

Os teores propostos para adição do resíduo em peso foram de 10%, 15% 20%, respectivamente, cujas proporções são dadas na Tabela 03.

Tabela 4 - Composição das massas cerâmicas

<b>Formulações</b>	<b>Massa Argilosa (%)</b>	<b>Resíduo (%)</b>
F0	100	0
F10	90	10
F15	85	15
F20	80	20

Fonte: Do autor (2019)

A empresa utiliza teores variados nas formulações da massa argilosa, predominando a argila turfosa em relação à argila amarela. As dosagens adotadas variavam em percentagens entre 60/40, 70/30 e 80/20 a um patamar de queima de até 950 °C. Foram feitos corpos de provas com as devidas formulações no laboratório com adição de resíduo em 10%, 15% e 20%, e logo se constatou que as formulações com percentagem de 60/40 e 70/30 apresentaram excesso de matéria orgânica (coração negro) no centro da peça após a queima no patamar de 950°C. (Figura 14).

Figura 14– Peça cerâmica com coração negro.



Fonte: Do autor (2019)

Segundo Damiani *et al*, (2001), a origem do coração negro está associada à presença de compostos de carbono (matéria orgânica) e óxidos de ferro nas argilas. Em produtos vitrificados ou de média porosidade (absorção de água menor que 10%), a formação do coração negro pode causar grandes inchamentos. O inchamento é uma consequência da liberação de CO e CO<sub>2</sub>, resultantes da redução dos óxidos de ferro e da sílica pelo carbono, a temperaturas relativamente elevadas, quando a permeabilidade da peça já foi bastante reduzida, dificultando a saída dos gases.

Em geral, a principal causa do coração negro é pela presença de matéria orgânica na matéria-prima contida na argila in natura ou por adição durante o processo de fabricação de combustíveis orgânicos, coque, carvão e outros. Porém, somente a presença de substâncias orgânicas na massa argilosa não forma o núcleo de redução. A ação conjunta dessas substâncias com componentes redutores, como argila muito fina e/ou com alta plasticidade e ciclo de queima muito rápido, intensificam a formação de coração negro (VÉLEZ, 2005; NUNES, 2016).

#### 4.1. Preparação dos Corpos Provas

Foram preparados 120 corpos de prova na extrusora a vácuo modelo CT-083, no laboratório de cerâmica vermelha do SENAI-PA, localizado o Município de São Miguel do Guamá. (Figura 15).

Figura 15- Extrusora a vácuo para prensagem dos corpos de prova



Fonte: Do autor (2019)

A descrição do Processo de preparação dos corpos de provas na extrusora está sintetizada na forma de um fluxograma em fotografias apresentado na Figura 16.

Foto 1 - Pesagens da massa argilosa (a) e do resíduo do granito (b)



Foto 2 - Etapa de mistura das massas argilosas com resíduo (c) e conformação da massa (d)



Foto 3- Prensagem da massa argilosa (e) e molde do corpo de prova na maromba (f)



Foto 4- Processo de corte dos corpos de prova (g) e secagem em estufa (h).

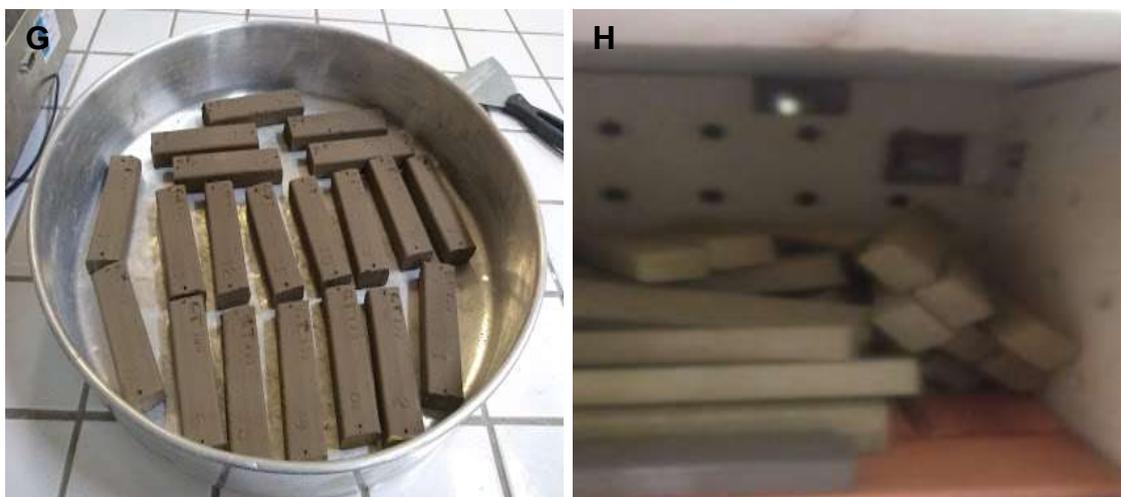


Figura 16 - Processo preparação dos corpos de provas. (Adaptado pelo autor do trabalho)

Após a etapa de secagem os corpos de prova na estufa, os mesmos foram queimados em forno de laboratório tipo Mufla da INTI, modelo FL 1300. Foi utilizada uma taxa de aquecimento constante de  $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ , com temperaturas de patamar de  $950^{\circ}\text{C}$  por 12 horas e resfriados por convecção natural.

## 5. TÉCNICAS DE AVALIAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO

### 5.1. Difração de Raios-X (DRX)

A análise mineralógica para identificação das fases cristalinas presentes foi realizada por meio da técnica de difração de raios-X (DRX) pelo Instituto SENAI de Inovação - ISI. A análise mineralógica foi realizada pelo método do pó, preparação, em equipamento de Difractometria de Raios-X, com tubo de cobre ( $K\alpha$   $1,54 \text{ \AA}$ ) de potência máxima de 2,2kw, modelo Emyrean, da PANalytical. As condições de análise foram 40kV e 40mA, foco linha, filtro  $K\beta$  de Ni, fenda soller de  $0,04\text{rad}$ , máscara de 10 mm, fenda divergente de  $1/4^{\circ}$  e antiespalhamento de  $1/2^{\circ}$ , detector PIXcel 3D, varredura de 4 a  $75^{\circ}2\theta$ , passo de  $0,02^{\circ}2\theta$ , goniômetro  $\theta$ - $\theta$ .

## 5.2. Fluorescência de raios-X (FRX)

A análise química foi realizada em amostra sob a forma de pastilha prensada (5g de amostra, 30% de aglutinante e 20 t), em Espectrômetro de Fluorescência de Raios-X por Energia Dispersiva (EDXRF) com tubo de ródio de potência máxima de 15W, modelo Epsilon 3XLE, fabricante PANalytical. A Perda ao Fogo (PF) foi realizada em forno mufla a 1000°C por 1 hora.

## 5.3. Análise Termogravimétrica

As análises térmicas das argilas e do resíduo foram realizadas em amostras pulverizadas em um Analisador Térmico Simultâneo, modelo STA 449 F3 Júpiter, fabricante Netzsch. Condições de análise da temperatura ambiente a 1000°C, taxa de aquecimento de 20°C/min., cadinho de platina, sensor Tipo S, em forno cilíndrico vertical de SiC e fluxo de N<sub>2</sub> (50mL/min).

## 5.4. Análise Morfológica

A Análise Morfológica das amostras foi realizada em grãos fragmentados, após metalização com ouro, com filamento de tungstênio e detector de elétrons secundários, em Microscópio Eletrônico de Varredura, modelo Vega 3LMU, fabricante Tescan.

## 5.5. Absorção de Água

O ensaio de absorção de água foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 15310:2009. Os corpos de prova foram pesados, colocados em recipiente com água destilada, mantidos em água fervente por 2 horas e resfriados submersos em água. Em seguida foi retirada a água superficial de cada peça, registrando-se a massa. A absorção de água (AA) foi calculada de acordo com a seguinte expressão:

$$AA(\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} 100 \quad (1)$$

Onde: P<sub>u</sub> e P<sub>s</sub> são as massas (g) das peças saturadas em água (úmidas) e secas, respectivamente.

## 5.6. Retração Linear de Queima

A retração linear (RL) das peças queimadas foi determinada através da seguinte expressão:

$$RLq(\%) = \frac{(L_s - L_q)}{L_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde:

- $L_s$  representam o comprimento do corpo de prova após conformação e secagem e  $L_q$  após a queima.

## 5.7. Tensão de Ruptura à Flexão

A tensão de ruptura à flexão foi realizada no equipamento EMIC universal 200 KN. A propriedade mecânica das peças cerâmicas foi determinada de acordo com a ABNT NBR 15310:2009 por meio do ensaio de tensão de ruptura à flexão em três pontos ( $\sigma$ ), pela seguinte expressão:

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

Onde:

- $\sigma$  é a tensão de ruptura à flexão, (MPa);
- $P$  é a carga aplicada no corpo de prova no momento da ruptura, (Newton);
- $L$  é a distância entre os cutelos de apoio, (mm);
- $b$  é a largura do corpo de prova, (mm); e
- $d$  é a espessura do corpo de prova, (mm).

## 6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 6.1. Caracterização dos materiais utilizados

#### 6.1.1. Difração de raios-X

As figuras 17 e 18 apresentam os difratogramas de raios-X das argilas estudadas. Nota-se que as argilas apresentam picos com predominância de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), podendo também observar picos de Esmectita, Caulinita, Ilita e Hematita como fases cristalinas. Esse resultado mostrou-se coerente com a análise química das argilas que apresentaram uma maior concentração dos óxidos de Al e Si, uma vez que esses argilominerais em sua composição apresentam basicamente os silicatos de alumínio.

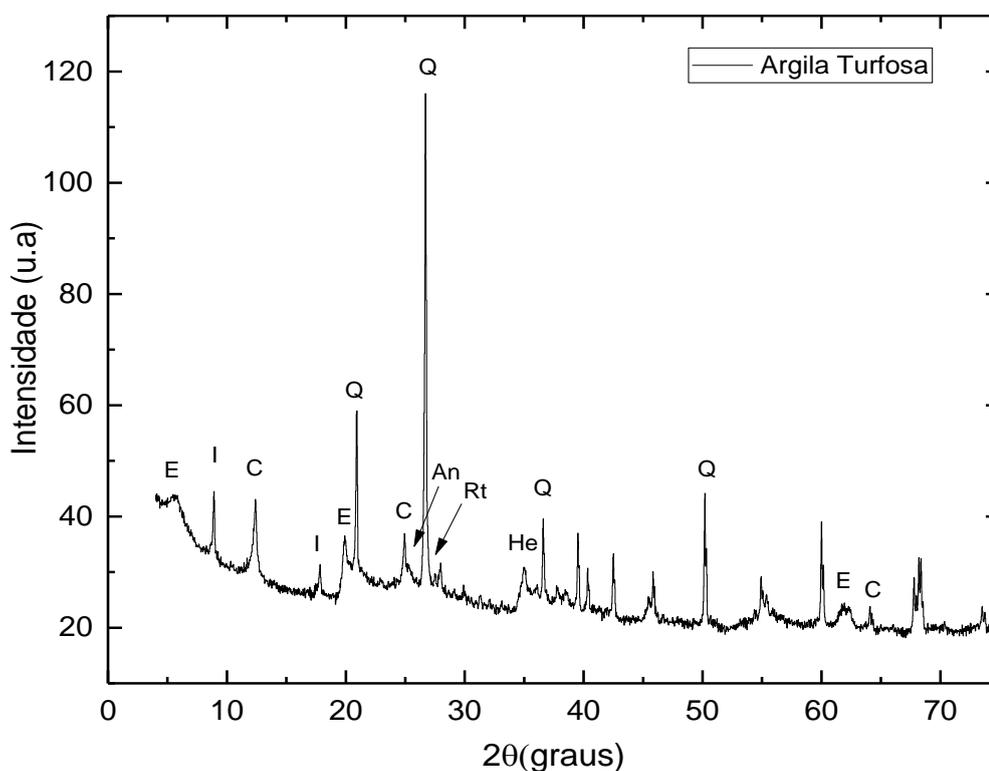


Figura 17- Difratograma de raios-X da argila turfosa. E = Esmectita; I = Ilita; C = Caulinita; Q = Quartzo; An = Anatásio; R t= Rutilo; He = Hematita.

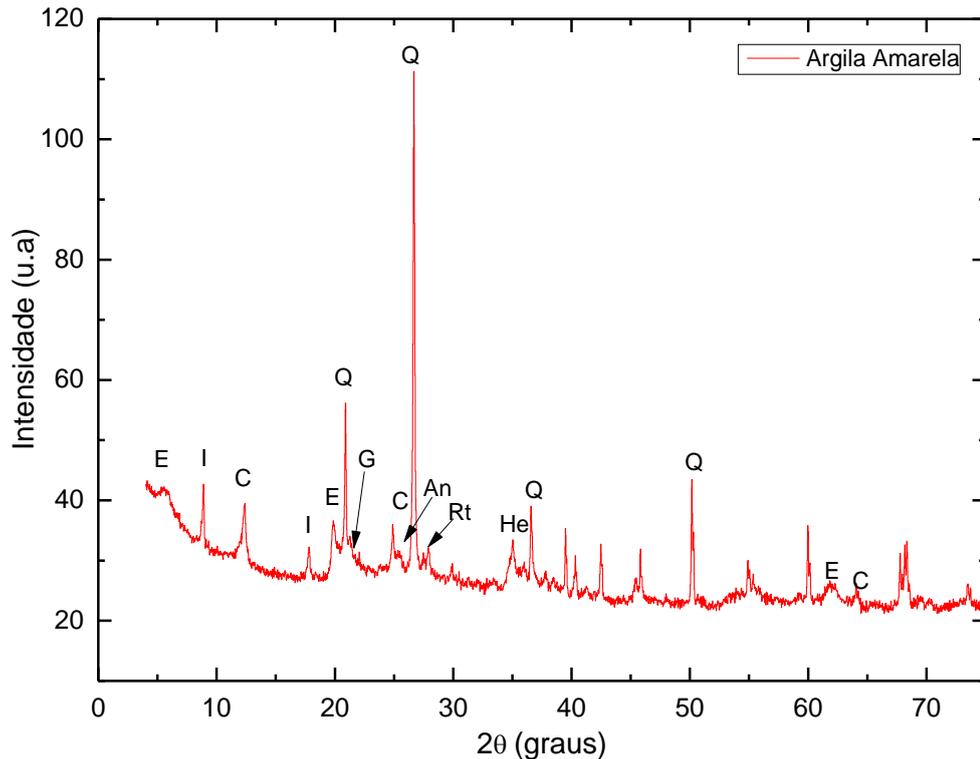


Figura 18 - Difratoograma de raios-X da argila amarela. E = Esmeectita; I = Illita; C = Caulinita; Q = Quartzo; G = Goethita; An = Anatásio; Rt = Rutilo; He = Hematita.

A sílica ou óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) está relacionada com os argilominerais, micas, feldspatos e quartzo. Este oferece resistência na fabricação de cerâmica vermelha, agindo como redutor de plasticidade e importante no controle da retração de queima. Uma argila que apresenta um alto teor de  $\text{SiO}_2$  e o teor apreciável de  $\text{MgO}$  e  $\text{CaO}$  provavelmente indica a presença do argilomineral montmorillonita (GRUN, 2007; MOTTA *et al.*, 2008, PRADO,2011).

O estudo realizado por Samudio Pérez *et al* (2010) e Ramos *et al* (2019), caracterizando as massas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha, mostrou argilas com características mineralógicas semelhante as argilas encontradas do município de Castanhal-PA, compostas basicamente por caulinita, quartzo e hidróxidos de ferro.

Macedo *et al* (2008), realizaram estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha no Estado da Paraíba e constataram que as amostras analisadas são constituídas basicamente por quartzo, caulinita, mica/illita e feldspatos.

A Figura 19 mostra o difratograma de raios-X do resíduo de pedras ornamentais evidenciaram características predominantes de granito, indicando a presença das seguintes fases cristalinas: quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), Cordierita ( $(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$ ), Mica ( $[\text{K}(\text{Mg},\text{Fe}^{++})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{O},\text{F})_2]$ ), Microclínio ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ) e Albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ). Os minerais Cordierita, Microclínio e Albita são do subgrupo dos feldspatos, sendo eles pertencentes aos seguintes tipos, respectivamente, potássico e plagioclásios.

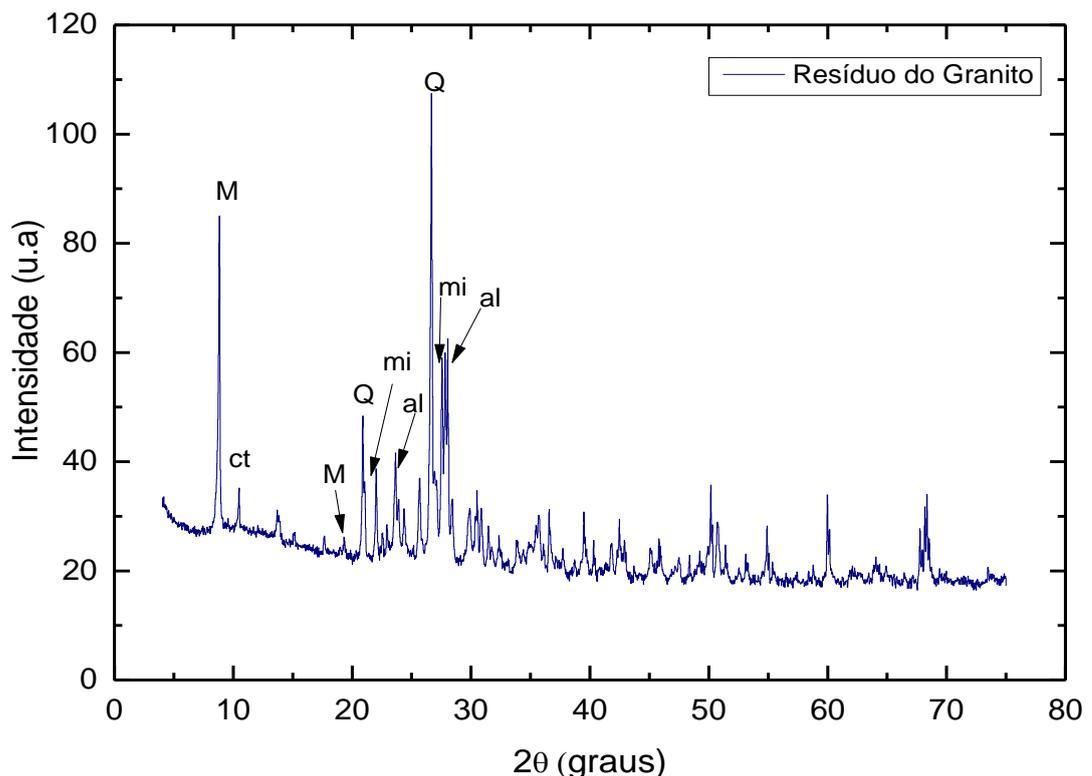


Figura 19 - Difratograma de raios-X do Resíduo do Granito. M = Mica; ct = Cordierita ; mi = Microclínio; al = Albita; .

Estudos realizados por Moreira *et al* (2003) e Alves *et al* (2015) reportam que as propriedades mineralógicas do granito são essencialmente por feldspatos, quartzo e mica como biotita e/ou muscovita (micas mais comuns). Os feldspatos compreendem principalmente um feldspato potássico (ortoclásio ou microclina) e um ou mais plagioclásios. Desta forma comprova-se pela análise que o resíduo é oriundo da rocha ornamental granítica.

### 6.1.2. Análise Química

A Tabela 04 apresenta a composição química das matérias-primas. Nota-se pela composição química que as argilas são tipicamente caulínicas constituídas pelo elevado teor de óxidos como  $\text{SiO}_2$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com percentagens aproximadas, comprovada anteriormente pela difração de raios-X. Nas argilas, a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) apresenta-se normalmente na forma de sílica livre (quartzo) ou presente nos minerais argilosos. A alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que é o segundo elemento mais abundante na composição das argilas encontra-se quase sempre formando parte da estrutura dos aluminossilicatos como a caulinita e minerais micáceos.

Tabela 5 - Análise Química das Argilas e do Resíduo

<b>Argila Turfosa (%)</b>												
Elemento	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	PF
Concentração	0,16	0,84	20,28	57,33	1,39	2,13	1,13	7,38	-	-	-	9,09
<b>Argila Amarela (%)</b>												
Elemento	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{SO}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	-	-	-	PF
Concentração	0,20	0,72	19,94	56,12	0,43	2,18	1,04	11,17	-	-	-	7,98
<b>Resíduo de Granito (%)</b>												
Elemento	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{MgO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{CaO}$	$\text{ZrO}_2$	PF
Concentração	2,39	1,038	14,999	63,27	0,376	5,704	1,242	6,779	0,101	3,77	0,12	0

Fonte: Do autor (2019)

Com relação ao resíduo do granito, observa-se também um elevado teor de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) com 63,27%, seguido pelo óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) com 14,99%. São óxidos fundentes relacionados à vitrificação do material.

O  $\text{SiO}_2$  é um componente essencial para a massa de cerâmica vermelha, visto que favorece a trabalhabilidade, diminui o tempo de secagem, assim como a retração de secagem/queima. No entanto o  $\text{SiO}_2$  aumenta o coeficiente de dilatação do corpo cerâmico e pode provocar baixa resistência mecânica dos corpos cerâmicos sinterizados (MILLOGO *et al.*, 2011).

Assim como nas duas argilas analisadas como no resíduo do granito, o óxido de ferro apresenta um percentual apreciável, sendo maior o percentual encontrado na argila amarela. Isto é um fator considerável, pois ele é responsável pela coloração vermelha que caracteriza o material cerâmico ao final do processo.

A porcentagem de baixos teores óxidos de sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) e potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ), que geralmente apresentam-se na forma de feldspatos, é fator preponderante para o processo de densificação da cerâmica vermelha e conferem resistência mecânica quando sinterizados entre 950 e 1000 °C (GUIMARÃES, 2017).

### **6.1.3. Comportamento térmico das massas argilosas**

A análise ATG foi realizada para determinar a perda ou ganho de massa das amostras (argila e resíduo) em função da temperatura, enquanto que a análise DSC foi realizada para determinar a temperatura de fusão e cristalização bem como a determinação da temperatura de transição vítrea das amostras.

As Figuras 20 e 21 apresentam os resultados da análise termogravimétrica (ATG) e calorimetria exploratória diferencial (DSC) das argilas. Os resultados mostram que tanto na argila turfosa quanto na argila amarela apresentaram perdas de massas totais aproximadas em 13,2% e 12,1%. Esta perda de massa está relacionada principalmente com a perda de água fisicamente adsorvida na superfície das partículas constituintes da massa argilosa (MAIA, 2012). A curva DSC das argilas representadas por picos nos intervalos de temperaturas de 268,3°C e 265,0°C ocorreram pequenas reações endotérmicas devido à eliminação de água de constituição de minerais da massa argilosa. Os picos endotérmicos de maior intensidade ocorreram na faixa de 500,2°C e 495,3°C, característico da perda de hidroxilas dos argilominerais do grupo da caulinita. Após esta faixa de temperatura, com a saída de água, a cristalinidade desaparece e começa a se formar a metacaulinita, que é amorfa e metaestável. (REIS *et al.* 2016)

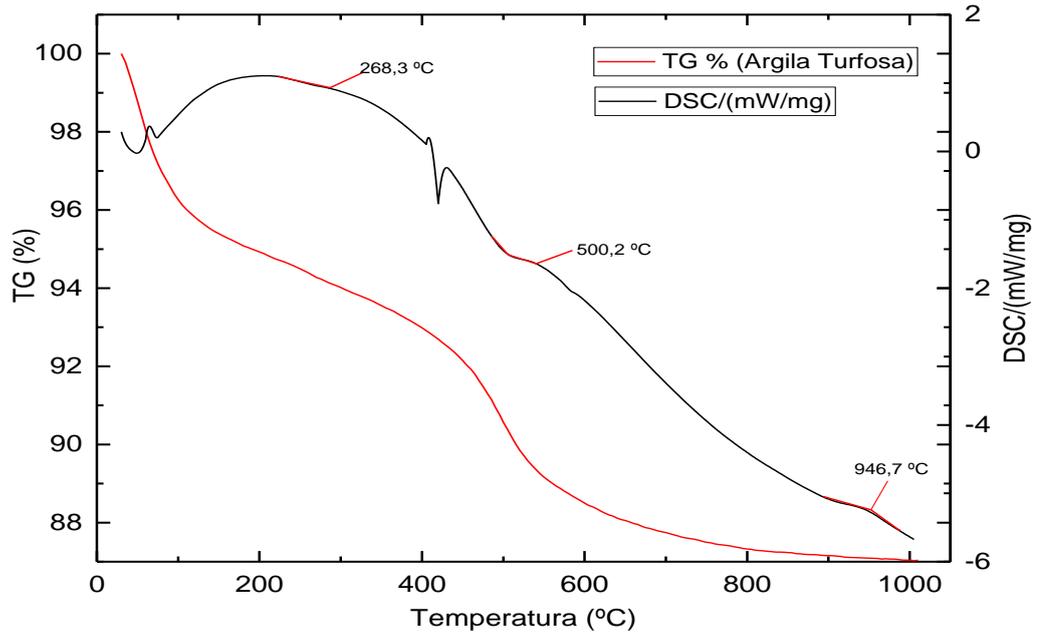


Figura 20 - Curvas de ATG e DSC da massa cerâmica (argila turfosa)

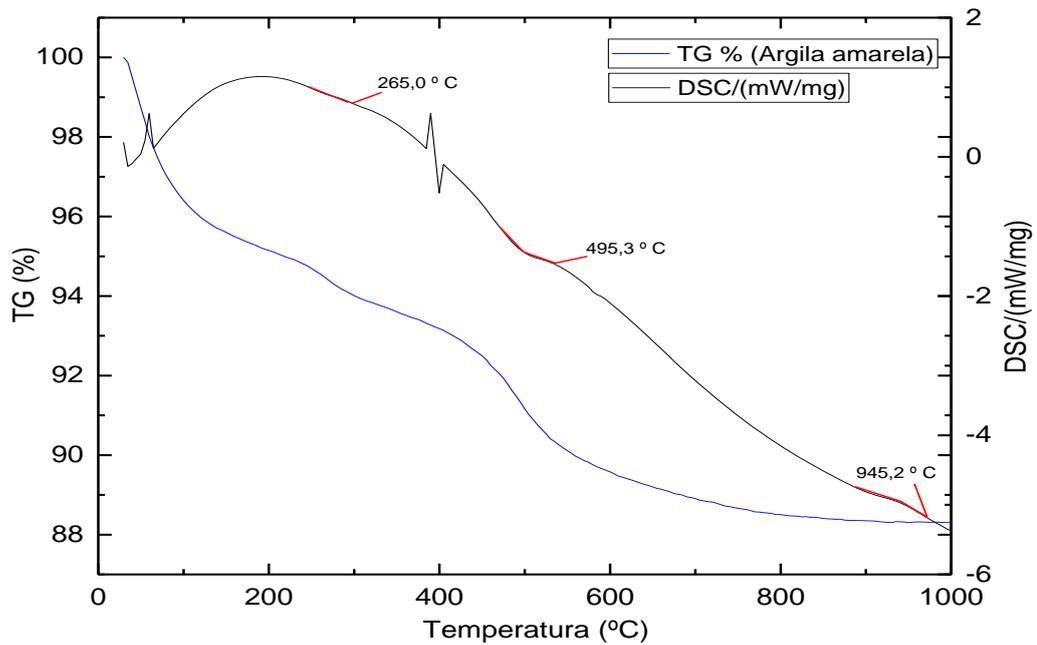


Figura 21 - Curvas de ATG e DSC da massa cerâmica (argila amarela)

Nota-se que a máxima taxa de sinterização em temperaturas foi aproximada em 946,7°C e 945,2°C para obtenção da vitrificação das argilas. Estes resultados sugerem que temperatura de queima mais apropriada para o processo de queima das argilas analisadas deverá ser até 950°C, onde não haverá mais perda de massa e predominará a sinterização do material.

A Figura 22 mostra o comportamento térmico (ATG) do resíduo do granito, que está em concordância com os resultados de difração de raios-X. A análise termogravimétrica mostra uma pequena perda de massa total de 0,34%. A perda de massa pode ser atribuída à eliminação de água na constituição de mineral micáceos, não havendo, portanto, perda significativa de matéria orgânica na sinterização.

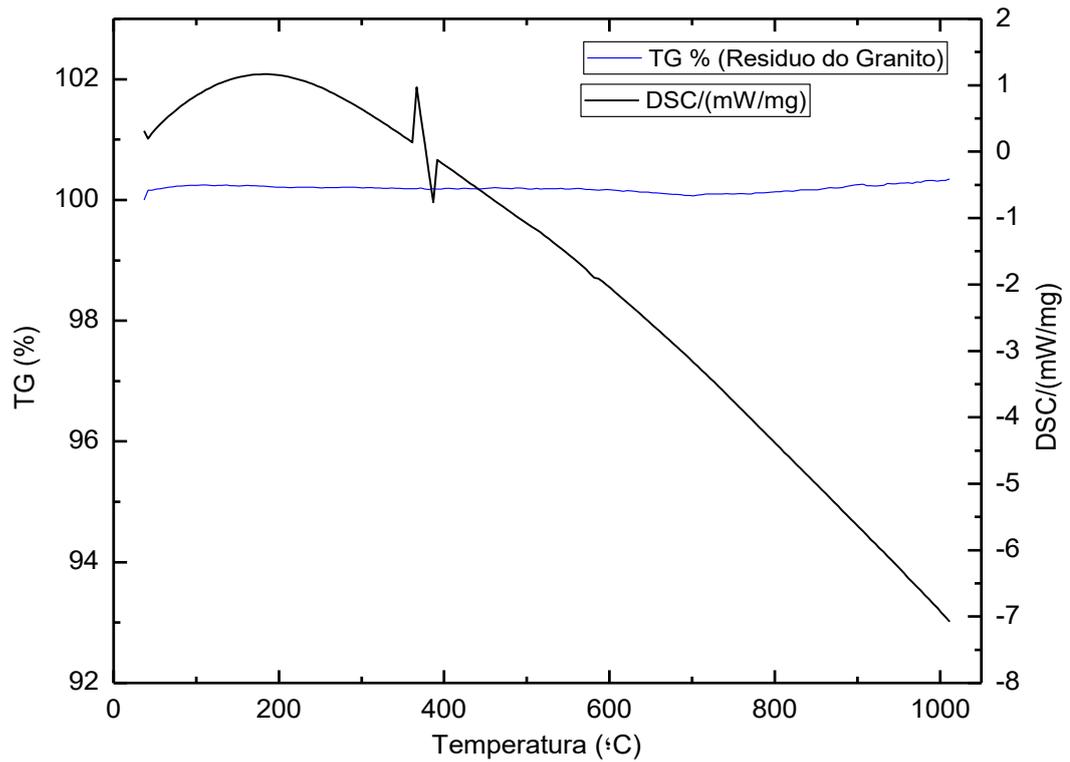


Figura 22 - Curvas de ATG e DSC do resíduo do granito

#### 6.1.4. Caracterização morfológica

Na Figura 23 é apresentada a seção de fratura da massa argilosa pura sinterizada a 950°C. É possível observar uma textura rugosa e microestrutura porosa, apresentando a presença de partículas finas e aglomeradas de perfil irregular (Figura 23a). Estas características microestruturais são típicas de cerâmica argilosa cauliníticas queimadas nesta faixa de temperatura.

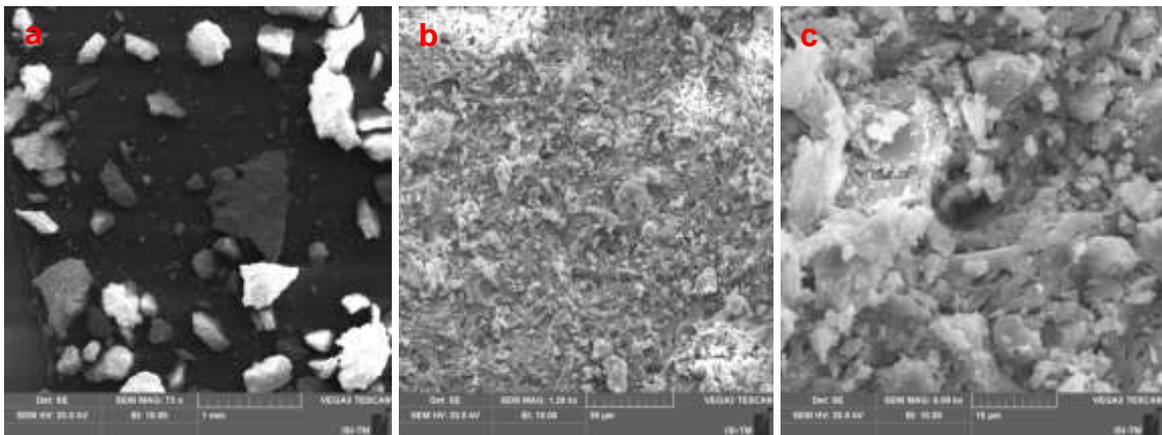


Figura 23 - Micrografia obtida por MEV da região de fratura da massa argilosa pura queimada a 950°C

A Figura 24 permitiu identificar na massa argilosa com adição de 15% em peso de resíduo do granito partículas de quartzo bem delineadas, com morfologia irregular e arestas angulosas, além de aglomerados porosos. Nota-se claramente que a estrutura da massa argilosa já está definitivamente bem densificada, onde ocorreu grande redução da porosidade (Figura 24b). Isto está possivelmente relacionada à ocorrência de uma maior quantidade de fase vítrea formada no material sinterizado.

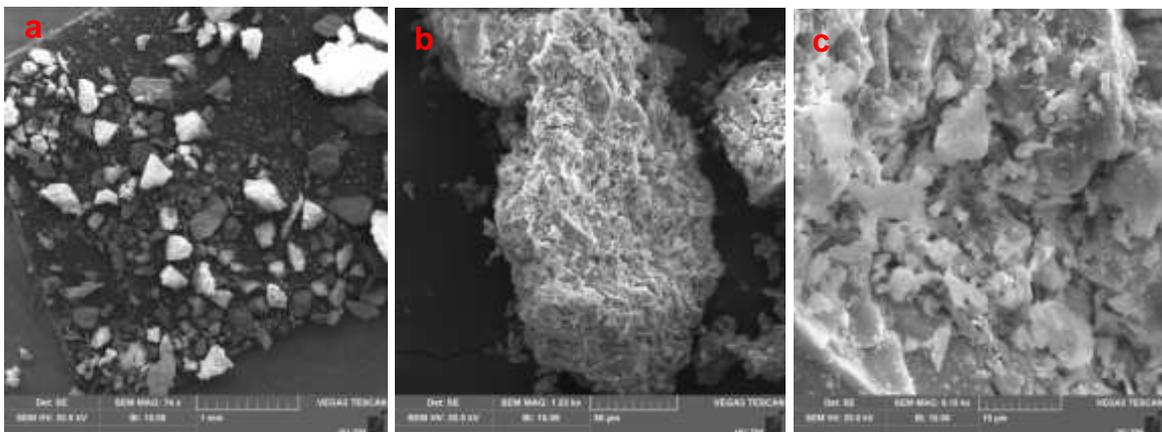


Figura 24 - MEV da massa argilosa com adição de 15% de resíduo do granito queimada a 950°C.

## 7. CARACTERIZAÇÃO DA MASSA ARGILOSAS ADICIONADA COM RESÍDUO DO GRANITO

### 7.1. Absorção de Água

A Figura 25 apresenta a absorção de água das composições das massas argilosas queimadas a 950°C, em função do teor de resíduo de granito adicionado. Foram utilizados doze corpos de provas para cada percentual de resíduo do granito adicionado. Os resultados médios evidenciaram que com o aumento do teor de resíduo na temperatura de queima de 950°C, os valores de absorção de água diminuem.

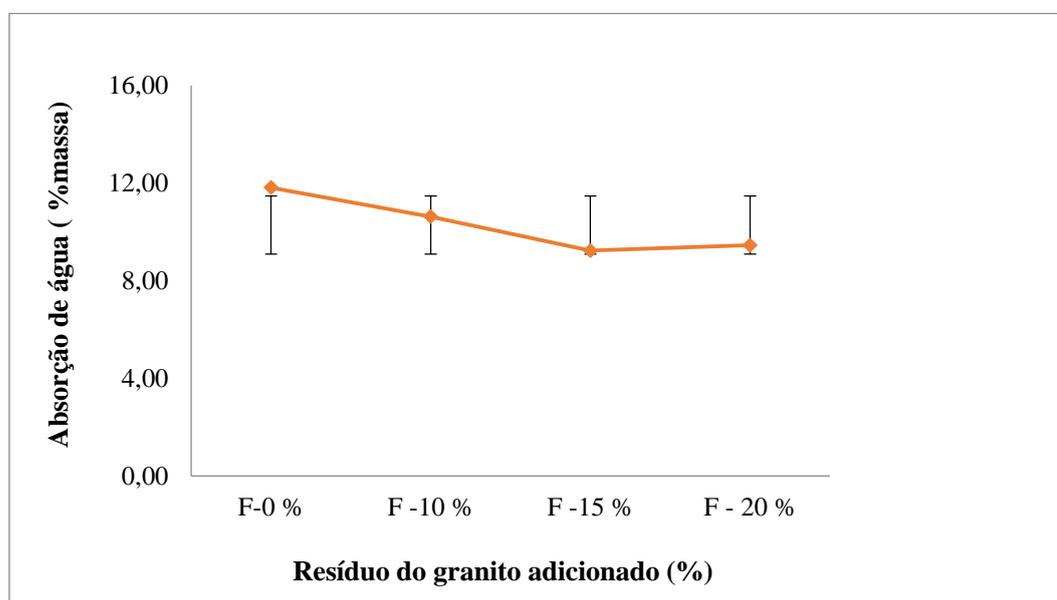


Figura 25- Absorção de água das peças queimadas a 950°C em função da adição do resíduo do granito adicionado.

A adição de até 20% de resíduo de granito contribuiu para manter da absorção de água da massa cerâmica em 9,45 %. Estudos apontam que este resultado pode ser atribuído à queima em temperaturas que resultam em um alto percentual de fase vítrea e uma baixa porosidade residual, promovida pela grande quantidade de material fundente (albita e microclínio) presente na matéria-prima. (CABRAL, 2009; FREIRES, 2011)

A NBR 15310/09 recomenda que o limite máximo admissível seja de 20% de absorção de água recomendado para telhas cerâmicas. Logo, as composições deste trabalho sem enquadram dentro da norma.

Com os resultados desta análise, aplicou-se uma análise de variância (ANOVA) para verificar a significância ou não significância entre os valores obtidos. A (Tabelas 5) mostra os resultados do teste estatístico da ANOVA relativo à Absorção de água das peças queimadas a 950°C em função da adição do resíduo do granito adicionado. Segundo o teste estatístico da ANOVA, o valor p igual a 0,001614 indica a significância do fator estudado, com isso pode-se dizer que quando  $p < 0,05$  (5%) o fator apresenta influência sobre a variável resposta com um nível de confiança de 95%.

Tabela 6 - Resultados do teste estatístico da ANOVA relativo à absorção de água.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Absorção de água	36,3273	3	12,1091	5,9986	0,001614	2,8165
Erro	36,3273	44	2,01865			
Total	125,1479	47				

Fonte: Do autor (2019)

## 7.2. Retração Linear de Queima

A Figura 26 mostra os valores de retração linear de queima da massa argilosa com adições de resíduo de granito. Observa-se que houve uma redução da retração linear queima de 2,94% e 2,39% em função da adição de resíduo em 15% e 20%. Isto indica que os corpos cerâmicos contendo resíduo apresentam melhor estabilidade dimensional.

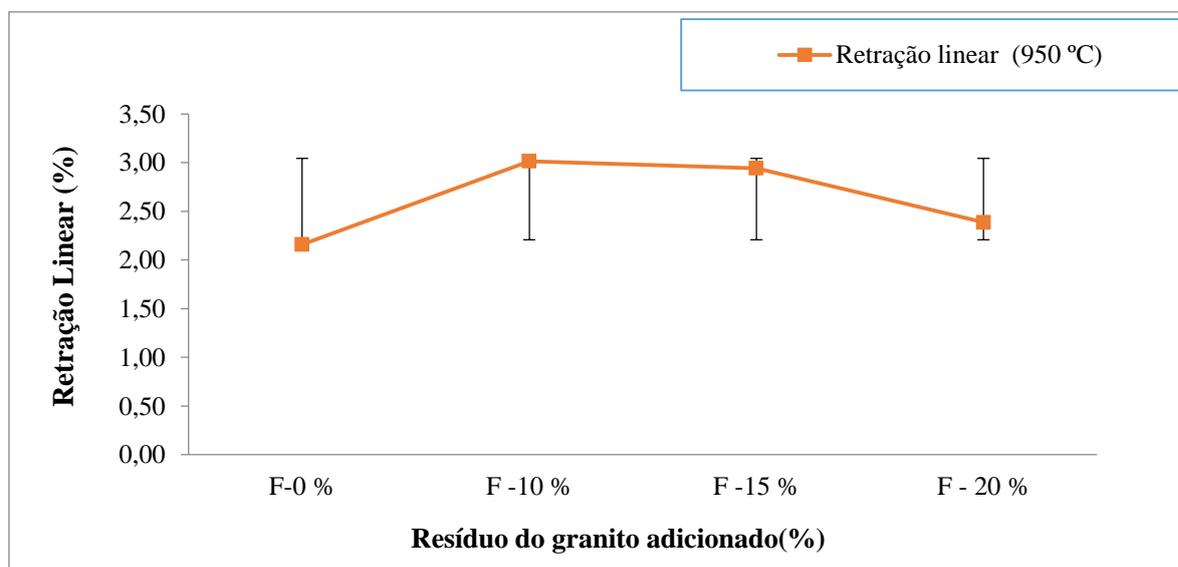


Figura 26– Retração Linear das peças queimadas a 950°C em função da adição do resíduo do granito adicionado.

A retração linear é uma propriedade que indica o grau de densificação da peça durante a queima e é importante para o controle dimensional do produto final (Moreira *et al.*, 2008; Taguchi *et al.*, 2014; Carreiro, 2016). Para a cerâmica vermelha é aceitável uma retração linear entre 1,5-3,0%,no entanto, valores abaixo de 1,5% são tidos como ideal (DONDI, 2006).

A Tabela 6 mostra que a retração linear com as formulações contendo resíduo de granito foi significativa na temperatura de sinterização proposta para este trabalho. Os resultados obtidos para a análise da variância (ANOVA) confirma a significância através de p igual a 0,08284.

Tabela 7 - Resultados do teste estatístico da ANOVA relativo à retração linear.

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	Valor-P	F crítico
Retração Linear	4,7152243	3	1,57174	2,43507	0,08284	2,90112
Erro	20,654735	32	0,64546			
Total	25,369959	35				

Fonte: Do autor (2019)

### 7.3. Tensão de Ruptura à Flexão

A Figura 27 (a) e (b) apresenta o ensaio de a tensão de ruptura à flexão em três pontos das massas cerâmicas secas e queimadas em função do resíduo adicionado.

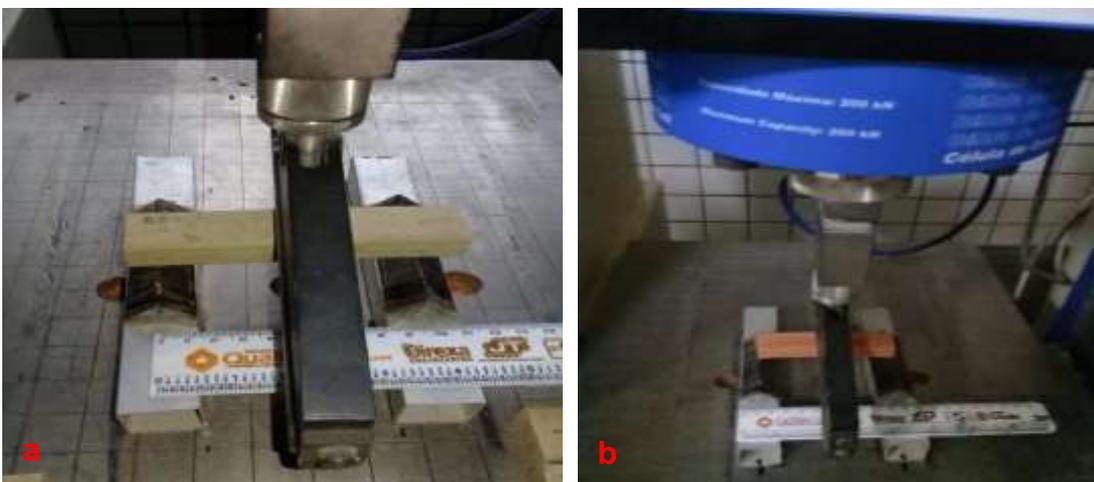


Figura 27 - Ensaio de Ruptura a flexão em corpos de prova secos (a) e sinterizados a 950°C (b)

Na Figura 28 é possível observar que a adição do resíduo proporcionou uma elevação significativa da resistência mecânica em até 39,7% com a composição em adição de 15% de resíduo de granito nas peças queimadas nas temperaturas de 950 °C. A NBR 15310/09 recomenda que as cargas de ruptura à flexão não devem ser inferiores a 100 Kgf (recomendado para telhas cerâmicas). Logo, as composições deste trabalho sem enquadraram dentro da norma. É possível perceber no estudo que o resíduo do granito influencia na resistência mecânica em adições de até 15%, acima desta quantidade a resistência mecânica tende a diminuir, acarretando defeitos nas peças devido à má formação da fase líquida no processo de sinterização.

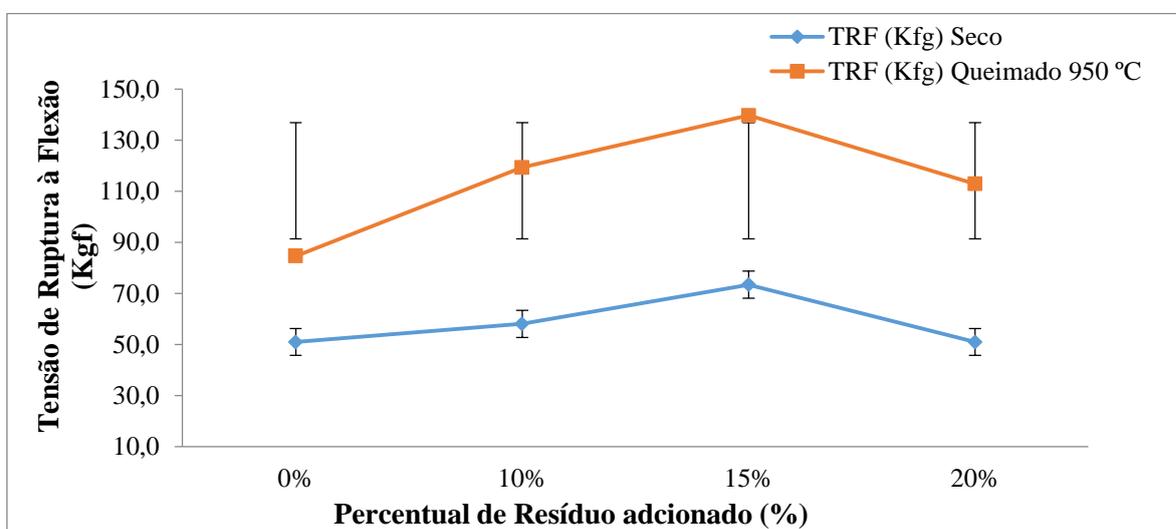


Figura 28 - TRF das peças queimadas a 950°C em função da adição do resíduo do granito adicionado.

Foram utilizados seis corpos de provas para cada percentual de resíduo do granito adicionado. De forma que os dados de resistência mecânica corroboram os resultados discutidos anteriormente como: absorção de água e a retração linear.

Segundo Manhães *et al.* (2009), isto se deve não somente por contribuir para formação de uma maior quantidade de fase vítrea, mas também pelo fato de enriquecer a massa argilosa com partículas de quartzo. A rigor o quartzo oriundo do resíduo não dissolvido na fase líquida viscosa durante o processo de queima certamente contribui para aumentar a dureza das peças de cerâmica vermelha. Quando massas contendo argilas e acessórios (mica, quartzo e feldspato) são submetidas a temperaturas de aproximadamente 1000°C, normalmente a microestrutura final contém cristais de mulita e grãos de quartzo dispersos na matriz vítrea. (CARREIRO, 2016)

## 8. CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se avaliar a influência de uma fração em massa do pó residual de uma marmoraria (resíduo do corte do granito), a fim de ser utilizado como uma matéria-prima alternativa na indústria de cerâmica vermelha região do Estado do Pará. O desenvolvimento de formulações para a fabricação de produtos cerâmicos, além de ter impacto positivo na condição ambiental das indústrias cerâmicas, por meio da utilização adequada das matérias-primas e reduzindo perdas no processo produtivo, proporciona o aumento da competitividade das mesmas, por meio da redução de custos. Isso possibilita a realização de estudos que permitam experimentar metodologias de formulação de massas cerâmicas que possam ser replicadas nas indústrias cerâmicas.

A caracterização do resíduo de granito e sua incorporação nas propriedades físicas e mecânicas das peças cerâmicas sinterizadas a 950°C chegou-se às seguintes conclusões:

Os resultados evidenciaram que com o aumento do teor de resíduo na temperatura de queima de 950 °C, os valores de absorção de água diminuíram entre 11,82% a 9,35%. Tal comportamento é devido à densificação do material por meio da formação de fase líquida que preenche os poros das peças. Logo, as formulações deste trabalho sem enquadram dentro da norma NBR 15310/09 que permite que absorção de água em peças cerâmicas seja de no máximo 20%.

O resíduo do granito mostrou-se eficaz como aditivo em altas temperaturas e de modo geral a incorporação promoveu a estabilidade dimensional. Houve uma redução da retração linear queima de 2,94% e 2,39% em função da adição de resíduo em 15% e 20%.

O presente trabalho mostrou que as propriedades do resíduo do granito, teve resultados mais relevantes, comparado ao de Reis *et al.* (2014), que demonstrou que aumento no teor de resíduo de granito diminuiu a absorção de água, porém o melhor resultado para a resistência mecânica ocorreu no teor de 10%. Borlini *et al.*, (2011) incorporou esse mesmo resíduo de granito em cerâmica argilosa. Os resultados indicaram que houve um aumento da resistência mecânica do material com a incorporação de 20% de resíduo de granito.

Foi formulada no presente trabalho uma massa cerâmica com de até 20% de resíduo de granito com o intuito de se esperar um aumento nas propriedades da cerâmica com essa formulação, devido a utilização do trabalho de Borlini *et al.*, (2011) ter utilizado o mesmo resíduo (Iberê Crema Bordeaux), e suas propriedades terem sido satisfatório. Era de se esperar uma diminuição na absorção de água e um aumento da resistência mecânica do material, devido o resíduo de granito poder atuar como fundente durante o estágio de queima.

A adição do resíduo proporcionou uma elevação significativa da resistência mecânica em até 139,7 kgf com a composição em adição de 15% de resíduo de granito nas peças queimadas nas temperaturas de 950 °C. A NBR 15310/09 recomenda que as cargas de ruptura à flexão não devem ser inferiores a 100 Kgf (recomendado para telhas cerâmicas), acima desta quantidade de resíduo a resistência mecânica tendeu a diminuir, acarretando defeitos nas peças devido à má formação da fase líquida no processo de sinterização.

Com base nos resultados obtidos, verificou-se que o resíduo do corte do granito adicionado em até 15% influenciou positivamente nas propriedades da cerâmica, tornando possível seu reaproveitamento na indústria de cerâmica vermelha, demonstrando que é uma alternativa sustentável no setor da construção civil.

## 9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABCERAM. Associação Brasileira de Cerâmica Acesso em nov/2018. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br>>.
- ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. “Balanço das exportações Brasileiras de rochas ornamentais” 2011.
- ABIROCHAS – Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais. “O setor brasileiro de rochas ornamentais” 2018.
- ABNT NBR 15310:2009 - Componentes cerâmicos – Telhas - Terminologia, requisitos e métodos de ensaio.
- AGUIAR, Mariane Costalonga. Utilização de Resíduo de Serragem de Rocha Ornamental com Tecnologia de Fio diamantado em Cerâmica Vermelha. Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense (2012).
- ALVES, J.O, JUNCA, Eduardo , ESPINOSA, D. C. R, TENÓRIO, J. A. S. Resíduo do Corte de Granito: Inovação Tecnológica para a Destinação Final. *Tecnol. Metal. Mater. Miner.*, São Paulo, v. 12, n. 2, p.123-128, abr./jun. 2015
- ANICER. Associação Nacional da Indústria Cerâmica. Disponível em:<<http://anicer.com.br>> Acesso em nov 2018
- ARRUDA, R. L. S.; MARIBONDO, R. do N. O processo produtivo e a qualidade do produto cerâmico estrutural. II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica João Pessoa - PB – 2007.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 10004, “Resíduos Sólidos”, Rio de Janeiro, RJ (2004). Ac. nov/2018).
- BACCELLI JÚNIOR, G. Avaliação do processo industrial da cerâmica vermelha na região do Seridó-RN, 2010. 201f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- BAI, S. W.; ZHANG, J. S.; WANG, Z. Selection of a sustainable technology for cutting granite block into slabs. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 2278-2291, 2016.
- BASTOS, Frederico Assis. Avaliação do Processo de Fabricação de Telhas e Blocos Cerâmicos Visando a Certificação Do Produto. Dissertação de mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- BORLINI, M.C., PAZETO, A.A., OLIVEIRA, J.R., VIEIRA, C.M.F., MONTEIRO, S.N. (2011). Revestimento cerâmico com argila e resíduo de rocha ornamental sem granalha.. In:

54° Congresso Brasileiro de Cerâmica, Foz do Iguaçu. Anais do 54° Congresso Brasileiro de Cerâmica, p.2508-2519.

CALDAS, Thais Cristina da Costa. Reciclagem de resíduo de vidro plano em cerâmica vermelha. Dissertação apresentado ao Centro de Ciência e Tecnologia, da Universidade Estadual do Norte Fluminense- Campos dos Goytacazes, 2012

CALLISTER, William D. Jr., John Wiley & Sons. Estruturas e Propriedades de Cerâmicas In: Materials Science and Engineering An Introduction. 7° Edição. LTC. 2008 center/learn-about-ceramics>. Acesso: nov 2018.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Mapa dos direitos minerários de extração de argilas no Brasil (Concessão de lavra e licenciamentos) Disponível em: <<https://www.inthemine.com.br/site/ceramica-vermelha-e-sustentabilidade/>>. Acesso em: Mar, 2019.

EELA - Programa de Eficiência Energética en Ladrilleras Artesanales de América Latina para Mitigar el Cambio Climático – EELA, MCTI-Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologias Especiais (FUNCATE). Estudo comparativo dos fornos tipo caipira x tipo abóboda. Projeto de eficiência energética nas pequenas indústrias de cerâmica vermelha do Brasil. Rio de Janeiro-Brasil, maio, 2012.

EL-MAGHRABY, H. F., EL-OMLA, M. M., BONDIOLI, F. & Naga, S. M. Granite as flux in stoneware tile manufacturing. J. Eur. Ceram. Soc. 31, 2057–2063 (2011).

G.C XAVIER ET AL (2009). Estudo da adição de resíduos da serragem do mármore à massa de conformação de cerâmica vermelha. – Anais do 45° Congresso Brasileiro de Cerâmica.

GOBBO, L. A.; MELLO, I. S. C.; QUEIRÓZ, F. C.; FRASCÁ, M. H. B. O. Aproveitamento de resíduos industriais. A cadeia produtiva de rochas ornamentais e para revestimento no Estado de São Paulo: diretrizes e ações para inovação e competitividade. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2004, p.129-152.

GONSALVES, J. P.; MOURA, Washington Almeida.; Dal, Molin, DENISE, C. C.. (2002) Avaliação da Influência da utilização do resíduo de corte de granito (RCG), como adição em propriedades mecânicas do concreto. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO MEIO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 2002, Rio Grande do Sul. Anais... Rio Grande do Sul: ANTAC, v.2, n.1, p.53-68

GRUN, E. Caracterização de argilas provenientes de Canelinha/SC e estudo de formulações de massas cerâmicas. 2007. 60f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.

- GUIMARÃES, Carlos Alberto de Oliveira. Avaliação do Ciclo de Queima nas Propriedades Tecnológicas de Cerâmica Vermelha. Dissertação apresentada ao Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro-RJ (2017).
- KAWAGUTI, W.M. 2014. Estudo do Comportamento Térmico de Fornos Intermitentes tipo "Paulistinha" Utilizados na Indústria de Cerâmica Vermelha. Dissertação (Mestrado). Florianópolis: UFSC, 2014.
- M. E. A. Carreiro, R. C. Santos, V. J. Silva, H. L. Lira, G. A. Neves, R. R. Menezes, L. N. L. Santana . Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural. *Cerâmica* 62 (2016)
- MACEDO, R.S.; MENEZES, R.R.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. Estudo de argilas usadas em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, 54, p.411-417, 2008.
- MAIA, Fernanda dos Santos. Avaliação de massas cerâmicas, processamento e propriedades dos produtos de cerâmica vermelha do pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. 2012.
- MILLOGO, Y.M.; SEYNOU, R.; OUEDRAOGO, K.; TRAORE, J., "Firing transformations and properties of tiles from a clay from Burkina Faso", *Appl. Clay Sci.* 51 p. 499, 2011.
- MIRANDA, Edgar de Souza. Argila Caulinita da Região Norte do Brasil: Caracterização e Aplicação como Adsorvente de Compostos Orgânicos (BTX) e Oxiânions de Cromo Hexavalente. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará (2014)
- MME – Ministério de Minas e Energia. 2018. Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não Metálicos. Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral, Ministério de Minas e Energia, Departamento de Transformação e Tecnologia Mineral, versão preliminar – atualizado 21/08/2018, 86p.
- MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduos de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, v.49, p. 262-267, 2003.
- MOREIRA, J.M.S., Manhães, J.P.V.T., Holanda, J.N.F. (2005). Reaproveitamento de resíduo de rocha ornamental proveniente do noroeste fluminense em cerâmica vermelha. *Cerâmica V.* 51, Nº 319. São Paulo – SP
- MOTTA, J. F. M. As matérias-primas cerâmicas. Parte II: Os minerais industriais e as massas da cerâmica tradicional. *Revista Cerâmica Industrial*, v. 7, n.1, p. 33-40, jan/fev, 2002.

MOTTA, J.F.M.; LUZ, A.B.; BALTAR, C.A.M.; BEZERRA, M.S.; CABRAL JÚNIOR, M.; COELHO, J.M. Argila plástica para cerâmica branca. In: Rochas e Minerais Industriais. Rio de Janeiro: Luz, A.B.; Lins, F.A.F, 2008. Cap. 34, p. 771-791.

OLIVEIRA, M. C.; MAGANHA, M. F. B. Guia técnico ambiental da indústria de cerâmicas branca e de revestimentos. São Paulo: CETESB, 2006. 90p.

PAIVA FILHO, E. C. C.; AGOSTINHO, R. L.; JÚNIOR, J. L. T. S.; BEZERRA, F. C.; AQUINO, P. L. S.; Cooperação internacional e desenvolvimento tecnológico: controle do processo de queima em fornos Hoffmann para cerâmica vermelha. COBENGE, Brasília, 2004.

PEDROTI, L. G. (2011). Desenvolvimento de massa cerâmica com o uso de resíduo de granito para obtenção de blocos cerâmicos prensados de encaixe de matriz argilosa. Tese de Doutorado em engenharia e ciências dos materiais– Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF Campos dos Goytacazes - RJ.

PRADO, Carolina Mangieri de Oliveira. Caracterização química e mineralógica das argilas utilizadas na produção de cerâmica vermelha no Estado de Sergipe. Dissertação (Mestrado em Química) – Núcleo de Pós-Graduação em Química, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa, Universidade Federal de Sergipe, 2011.

RACANELLI, L. A; BRITO, W.S.; CARDOSO, D. N.P, VIVEIROS,D. C. S, SOUZA ,J. A. S. Caracterização de dois tipos de argilas do município de São Miguel do Guamá utilizados para fabricação de telhas e blocos de vedação. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 5, n. 4, p. (2019).

RAYMUNDO, V. et al. Resíduos de serragem de mármore como corretivo da acidez de solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, n.1, p.47–53, 2013.

REIS, A.S, SAGRILLO, V.P.D, DIAZ ,F.R.V. Caracterização e Propriedades Cerâmicas de argilas usadas em Cerâmica Vermelha no Estado do Espírito Santo. 22º CBECiMat (2016).

ROCHA. et al. A produção industrial da cerâmica vermelha em São Miguel do Guamá e as recentes inovações adotadas pelo segmento em âmbito nacional. Revista de Arquitetura da IMED, v. 2, n.1, 2013, p. 01-09.

SABINO, Artemizia Rodrigues. Características físico-químicas das argilas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha no Município de Tabatinga-AM: um estudo de caso em indústrias do município. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos da Universidade Federal do Pará. 2016.

SAMUDIO PÉREZ, C.A.; PADUANI, C.; ARDISSON, J.D.; GOBBI, D.; THOMÉ, A. Caracterização de massas cerâmicas utilizadas na indústria de cerâmica vermelha em São Domingos do Sul – RS. *Cerâmica Industrial*, 15, p. 38-43, 2010.

SILVEIRA, L. L. L. Beneficiamento de Rochas Ornamentais (2014). Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI- RJ.

SINGH, S.; KHAN, S.; KHANDELWAL, R.; CHUGH, A.; NAGAR, R. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. *Journal of Cleaner Production*, v. 119, p. 86-98, 2016b.

SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V.; RANA, A.; TIWARI, A. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. *Journal of Cleaner Production*, v. 116, p. 223-235, 2016a.

SOUTO, K.M., NEVES. G.A., FERREIRA, H.C., SILVA, M.C. (2001) Anais do 45º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Florianópolis-SC, em CD ROW, 2001

SOUZA, J. V. Estudo e Desenvolvimento de Alternativas para o aproveitamento de Resíduo das Indústrias de Revestimentos Cerâmicos. São Paulo. 2003