



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CHAMOTE NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS E MICROESTRUTURAIS DO ADOQUIM**

JOÃO PAULO DOS SANTOS SILVA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares

TERESINA

2020

JOÃO PAULO DOS SANTOS SILVA

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CHAMOTE NAS PROPRIEDADES
TECNOLÓGICAS E MICROESTRUTURAIS DO ADOQUIM**

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

Área de concentração: Processamento e Caracterização de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares

TERESINA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva, João Paulo dos Santos

S586i Influência da adição de chamote nas propriedades tecnológicas e
microestruturais do adoquim / João Paulo dos Santos Silva. - 2020.
96 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Federal do
Piauí, Campus Teresina Central, 2020.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares.

1. Cerâmica vermelha. 2. Adoquim. 3. Chamote. 4. Propriedades
tecnológicas. I. Título.

CDD - 620.1

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ - IFPI
CAMPUS TERESINA CENTRAL / DIRETORIA DE PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MATERIAIS / PPG-EM
Praça da Liberdade, 1597 - Centro - Teresina - PI CEP. 64.000-040
Fone: (86) 3131 – 9468, endereço eletrônico: <http://ppgem.ifpi.edu.br/home>

JOÃO PAULO DOS SANTOS SILVA

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE CHAMOTE NAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS
E MICROESTRUTURAIS DO ADOQUIM

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

Aprovada em: 12/03/2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Roberto Arruda Lima Soares
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Orientador

Prof. Dr. Érico Rodrigues Gomes
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí - IFPI
Avaliador Interno

Prof^a. Dr^a. Artemária Coêlho de Andrade
Universidade Estadual do Piauí - UESPI
Avaliadora Externa

A toda minha família, em especial minha
mãe, Maria Joselia, por sempre me apoiar
ao longo da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me concedido o dom da vida.

A toda minha família, especialmente minha mãe, Maria Joselia, por sempre acreditar em mim e me dar força. Aos meus irmãos pela parceria e companheirismo ao longo da vida.

À minha companheira, Josélia, por sempre estar ao meu lado nos momentos de estudo e pelo apoio na elaboração deste trabalho.

Ao meu professor orientador, Dr. Roberto Arruda, pela amizade, contribuições e ensinamentos para a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI) pela oportunidade de realização do Mestrado.

Aos docentes do PPGEM por todo o conhecimento repassado ao longo do curso.

Ao André por ter auxiliado na elaboração de alguns ensaios que compõem o trabalho. Ao Rui pela amizade, ensinamentos e ajuda na confecção dos corpos de prova e na realização de alguns ensaios.

À empresa Telhas Mafrense, em especial ao Alexandre, pelo fornecimento das matérias-primas.

À Universidade Federal do Piauí (UFPI) por ter possibilitado a realização do ensaio de resistência à compressão.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro para a produção deste trabalho.

Aos colegas e amigos do PPGEM pelas trocas de experiências e conhecimentos durante o curso.

Aos demais amigos e colegas que conheci ao longo da vida, que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

“Deus não escolhe os capacitados, capacita os escolhidos. Fazer ou não fazer algo só depende de nossa vontade e perseverança.”

Albert Einstein

RESUMO

A utilização de chamote em produtos cerâmicos é relevante, pois o aproveitamento desse resíduo pode minimizar o impacto ambiental, além de gerar redução nos custos com as matérias-primas, por ser um material utilizado no próprio processo produtivo. Este estudo tem como objetivo analisar a influência da adição de chamote nas propriedades tecnológicas e microestruturais do adoquim. As matérias-primas foram adquiridas em uma indústria de cerâmica vermelha situada na região de Teresina e foram caracterizadas por fluorescência de raios X, difração de raios X, análise racional, análise térmica, microscopia óptica, granulometria, plasticidade e análise residual. Foram realizadas formulações com percentuais de 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% de chamote. Os corpos de prova foram preparados por prensagem uniaxial com dimensões de aproximadamente 80 mm x 10 mm x 10 mm e queimados nas temperaturas de 950 °C, 1050 °C e 1150 °C. As propriedades tecnológicas analisadas foram retração linear de secagem e de queima, perda ao fogo, absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, resistência à compressão uniaxial e resistência à abrasão. Foram comparadas as propriedades tecnológicas entre os corpos de prova produzidos em laboratório e os adoquins coletados e produzidos em uma indústria situada na região de Teresina. Foram examinadas, também, a macroestrutura e a microestrutura das amostras ensaiadas. Em seguida, foi verificado se os corpos de prova atendem às especificações técnicas exigidas pelas normas que tratam sobre o uso do adoquim em locais que possuem circulação de pedestres e tráfego veicular leve ou em regiões de tráfego veicular pesado, calçadas comerciais e aplicações industriais. A adição de chamote melhorou as propriedades tecnológicas de retração linear de secagem e de queima e de perda ao fogo. Nas demais propriedades, a adição desse resíduo não ocasionou prejuízo relevante. A macroestrutura e a microestrutura também não foram influenciadas de forma significativa pela adição de chamote na massa cerâmica. Desse modo, conforme os resultados obtidos, concluiu-se que é viável a utilização de chamote na produção do adoquim, pois, apesar da adição desse resíduo, foram obtidas excelentes propriedades tecnológicas nos corpos de prova, especialmente a partir da temperatura de 1050 °C.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha. Adoquim. Chamote. Propriedades tecnológicas.

ABSTRACT

The use of chamotte in ceramic products is relevant, because the use of this residue can minimize the environmental impact, in addition to reducing costs with raw materials, as it is a material used in the production process itself. This study aims to analyze the influence of the addition of chamotte on the technological and microstructural properties of the paving brick. The raw materials were acquired in a red ceramic industry located in the Teresina region and were characterized by X-ray fluorescence, X-ray diffraction, rational analysis, thermal analysis, optical microscopy, granulometry, plasticity and residual analysis. Formulations were carried out with percentages of 0%, 2,5%, 5%, 10% and 20% of chamotte. The specimens were prepared by uniaxial pressing with dimensions of approximately 80 mm x 10 mm x 10 mm and burned at temperatures of 950 °C, 1050 °C and 1150 °C. The technological properties analyzed were linear drying and burning retraction, loss to fire, water absorption, apparent porosity, apparent specific mass, uniaxial compression resistance and abrasion resistance. The technological properties were compared between the specimens produced in the laboratory and the paving bricks collected and produced in an industry located in the Teresina region. The macrostructure and microstructure of the samples tested were also examined. Then, it was verified whether the specimens meet the technical specifications required by the rules that deal with the use of paving brick in places with pedestrian circulation and light vehicle traffic or in regions with heavy vehicle traffic, commercial sidewalks and industrial applications. The addition of chamotte improved the technological properties of linear drying and firing shrinkage and loss to fire. In the other properties, the addition of this residue did not cause relevant loss. The macrostructure and microstructure were also not significantly influenced by the addition of chamotte to the ceramic mass. Thus, according to the results obtained, it was concluded that the use of chamotte is feasible in the production of paving brick, because, despite the addition of this residue, excellent technological properties were obtained in the specimens, especially from the temperature of 1050 °C.

Keywords: Red ceramic. Paving brick. Chamotte. Technological properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais regiões que fabricam cerâmica vermelha no estado do Piauí .	24
Figura 2 – Esquema de um forno tipo abóboda	25
Figura 3 – Lenha utilizada na fabricação de produtos cerâmicos.....	26
Figura 4 – Estrutura típica de um pavimento intertravado	30
Figura 5 – Peças de concreto utilizadas em pavimentos intertravados.....	33
Figura 6 – Adoquim utilizado no tráfego de veículos.....	34
Figura 7 – Adoquins com suas variedades de cores.....	34
Figura 8 – Peças complementares e adoquins	35
Figura 9 – Resíduos de blocos cerâmicos	39
Figura 10 – Fluxograma do procedimento experimental	43
Figura 11 – Massa argilosa da indústria cerâmica	44
Figura 12 – Resíduos de blocos e telhas cerâmicos	45
Figura 13 – Equipamento utilizado na análise química	45
Figura 14 – Equipamento utilizado na análise mineralógica	46
Figura 15 – Equipamento utilizado na análise térmica	47
Figura 16 – Agitador de peneiras	48
Figura 17 – Aparelho de Casagrande	49
Figura 18 – Triturador.....	50
Figura 19 – Moinho de bolas.....	51
Figura 20 – Balança utilizada na pesagem das matérias-primas	52
Figura 21 – Matriz de conformação metálica.....	52
Figura 22 – Prensa hidráulica.....	53
Figura 23 – Corpos de prova.....	53
Figura 24 – Estufa.....	54
Figura 25 – Forno mufla	54
Figura 26 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova	58
Figura 27 – Adoquins coletados em uma indústria cerâmica situada na região de Teresina	59
Figura 28 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão dos adoquins.....	60
Figura 29 – Equipamento utilizado na microscopia óptica	61

Figura 30 – Análise mineralógica da massa argilosa	64
Figura 31 – Análise mineralógica do chamote.....	65
Figura 32 – Curva termogravimétrica e derivada da curva termogravimétrica da massa argilosa.....	66
Figura 33 – Curva termogravimétrica e derivada da curva termogravimétrica do chamote	67
Figura 34 – Curva granulométrica das matérias-primas.....	68
Figura 35 – Retração linear de secagem dos corpos de prova	70
Figura 36 – Retração linear de queima dos corpos de prova	71
Figura 37 – Perda ao fogo dos corpos de prova	72
Figura 38 – Absorção de água dos corpos de prova.....	74
Figura 39 – Porosidade aparente dos corpos de prova.....	75
Figura 40 – Massa específica aparente dos corpos de prova	76
Figura 41 – Resistência à compressão dos corpos de prova	77
Figura 42 – Índice de abrasão dos corpos de prova	78
Figura 43 – Corpos de prova queimados a 950 °C	79
Figura 44 – Corpos de prova queimados a 1050 °C	80
Figura 45 – Corpos de prova queimados a 1150 °C	80
Figura 46 – Imagens do microscópio óptico das formulações A0 (a) e A20 (b) na temperatura de 950 °C	81
Figura 47 – Imagens do microscópio óptico das formulações A0 (a) e A20 (b) na temperatura de 1050 °C	82
Figura 48 – Imagens do microscópio óptico das formulações A0 (a) e A20 (b) na temperatura de 1150 °C	82
Figura 49 – Análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 950 °C	83
Figura 50 – Análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 1050 °C	84
Figura 51 – Análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 1150 °C	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resistência característica à compressão de peças de concreto	31
Tabela 2 – Especificações técnicas do adoquim conforme as normas ASTM C902 (2015) e ASTM C1272 (2017)	36
Tabela 3 – Resistência à abrasão do adoquim de acordo com a norma ASTM C902 (2015)	37
Tabela 4 – Especificações técnicas do adoquim conforme as normas ICONTEC NTC 3829 (2004) e ICONTEC NTC 5282 (2004)	37
Tabela 5 – Especificações técnicas dos adoquins conforme a norma AENOR UNE-EN 1344 (2015)	38
Tabela 6 – Formulações cerâmicas com diferentes teores de chamote	51
Tabela 7 – Composição química das matérias-primas (% em peso)	63
Tabela 8 – Concentração das fases cristalinas das matérias-primas	66
Tabela 9 – Distribuição granulométrica das matérias-primas	68
Tabela 10 – Índice de plasticidade	69
Tabela 11 – Resíduo retido na peneira nº 325 da ABNT	70
Tabela 12 – Retração linear de secagem a 110 °C	70
Tabela 13 – Retração linear de queima	71
Tabela 14 – Perda ao fogo	72
Tabela 15 – Absorção de água	73
Tabela 16 – Porosidade aparente	74
Tabela 17 – Massa específica aparente	76
Tabela 18 – Resistência à compressão	77
Tabela 19 – Índice de abrasão	78
Tabela 20 – Propriedades tecnológicas dos adoquins	79
Tabela 21 – Verificação das propriedades tecnológicas em relação às normas técnicas ASTM C902 (2015) e ICONTEC NTC 3829 (2004)	86
Tabela 22 – Verificação das propriedades tecnológicas em relação às normas técnicas ASTM C1272 (2017) e ICONTEC NTC 5282 (2004)	86

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Absorção de água
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AENOR	<i>Asociación Española de Normalización y Certificación</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AT	Análise térmica
DRX	Difração de raios X
DTGA	Derivada da análise termogravimétrica
FRX	Fluorescência de raios X
ICONTEC	<i>Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación</i>
IFPI	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
IA	Índice de abrasão
IP	Índice de plasticidade
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade
MEA	Massa específica aparente
MO	Microscopia óptica
NBR	Norma Brasileira
NTC	Norma Técnica Colombiana
PA	Porosidade aparente
PF	Perda ao fogo
PPGEM	Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais
RA	Resistência à abrasão
RC	Resistência à compressão
RL	Retração linear
RLQ	Retração linear de queima
RLS	Retração linear de secagem
TGA	Análise termogravimétrica
UFPI	Universidade Federal do Piauí
UNE	<i>Una Norma Española</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	17
1.1.1	Geral	17
1.1.2	Específicos.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA	17
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	19
2.1	INDÚSTRIA CERÂMICA	19
2.2	SETOR CERÂMICO DO PIAUÍ	23
2.3	MATÉRIAS-PRIMAS	26
2.4	PAVIMENTOS INTERTRAVADOS.....	30
2.5	ADOQUIM	33
2.6	ADIÇÃO DE CHAMOTE EM FORMULAÇÕES DE MASSA CERÂMICA...	38
3	METODOLOGIA	43
3.1	MATERIAIS	44
3.2	MÉTODOS	45
3.2.1	Caracterização das matérias-primas	45
3.2.1.1	Análise química	45
3.2.1.2	Análise mineralógica	46
3.2.1.3	Análise racional	46
3.2.1.4	Análise térmica	47
3.2.1.5	Análise granulométrica	48
3.2.1.6	Análise de plasticidade	48
3.2.1.7	Análise residual	49
3.2.2	Preparação das massas cerâmicas	50
3.2.3	Preparação dos corpos de prova.....	52
3.2.4	Secagem dos corpos de prova.....	54
3.2.5	Queima dos corpos de prova	54
3.2.6	Caracterização dos corpos de prova queimados	55
3.2.6.1	Retração linear	55
3.2.6.2	Perda ao fogo	55
3.2.6.3	Absorção de água	56
3.2.6.4	Porosidade aparente	56
3.2.6.5	Massa específica aparente	57
3.2.6.6	Resistência à compressão.....	57
3.2.6.7	Resistência à abrasão	58
3.2.7	Análise comparativa.....	59
3.2.8	Análise macroestrutural.....	60
3.2.9	Análise microestrutural.....	61
3.2.9.1	Microscopia óptica.....	61
3.2.9.2	Difração de raios X	61
3.2.10	Verificação quanto ao recomendado pelas normas	62

4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1.1	Análise química	63
4.1.2	Análise mineralógica.....	63
4.1.3	Análise racional	65
4.1.4	Análise térmica	66
4.1.5	Análise granulométrica	67
4.1.6	Análise de plasticidade	69
4.1.7	Análise residual	69
4.2	CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA QUEIMADOS	70
4.2.1	Retração linear.....	70
4.2.2	Perda ao fogo.....	72
4.2.3	Absorção de água	73
4.2.4	Porosidade aparente	74
4.2.5	Massa específica aparente	75
4.2.6	Resistência à compressão.....	76
4.2.7	Resistência à abrasão	77
4.3	ANÁLISE COMPARATIVA	78
4.4	ANÁLISE MACROESTRUTURAL	79
4.5	ANÁLISE MICROESTRUTURAL.....	81
4.5.1	Microscopia óptica	81
4.5.2	Difração de raios X	83
4.6	VERIFICAÇÃO QUANTO AO PRECONIZADO PELAS NORMAS	85
5	CONCLUSÃO	88
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
	REFERÊNCIAS	91

1 INTRODUÇÃO

Os materiais cerâmicos estão presentes em diversas civilizações há milhares de anos, sendo um dos primeiros materiais usados pelo homem. Dentre as atividades em que se produziam esses materiais, havia o artesanato na fabricação de potes e jarros e posteriormente como implementos na construção. A história do tijolo ou bloco pode ser contada como simultânea à evolução do homem, ocorrendo desde o adobe até a fabricação de blocos queimados com boa rigidez, como verifica-se no cenário atual de elevada evolução fabril (ZACCARON *et al.*, 2018).

Conforme Cabral Junior *et al.* (2019a), a indústria cerâmica brasileira fabrica em larga escala, produtos de cerâmica vermelha, revestimentos cerâmicos, cerâmica branca, entre outros. A indústria de cerâmica vermelha caracteriza-se pela coloração de seus produtos, como blocos, telhas, lajotas, etc. Já a indústria de revestimentos cerâmicos é responsável pela fabricação de produtos cerâmicos com a forma de placas utilizadas no recobrimento de paredes e pisos, por exemplo, como o porcelanato, o grês, o semigrês, entre outros. Por sua vez, a cerâmica branca compreende materiais constituídos por um corpo branco ou claro, como louças sanitárias e de mesa.

Com essa diversidade de produtos, há um elevado consumo desses derivados de cerâmica e a utilização de processos produtivos tradicionais ocasionam uma concorrência elevada entre as empresas fabricantes. Como medida para atenuar esse quadro, diversas empresas passaram a investir em novas tecnologias, qualificação da mão de obra e melhoria no produto final, de forma a obterem destaque nesse mercado que possui elevada competitividade (CABRAL JUNIOR; AZEVEDO, 2017).

A matéria-prima básica utilizada na fabricação de produtos cerâmicos é a argila, mas também podem ser utilizados juntamente com a argila diversos outros tipos de materiais, como o feldspato, o caulim e o quartzo, além de resíduos, como o chamote. Essas adições podem melhorar as propriedades tecnológicas dos produtos, assim como gerar redução de custos e minimização da degradação ao meio ambiente (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Dessa forma, há a necessidade de se buscar a fabricação de produtos inovadores que apresentem qualidade satisfatória. Com isso, uma alternativa inovadora para empresas que produzem telhas e blocos cerâmicos é desenvolver o adoquim, pois este produto também possui como matéria-prima básica, a argila, que é abundante nas diversas regiões do país, além de apresentar diversas formas de

aplicação, desde tráfego de pedestres até tráfego de veículos pesados (CANDIDO *et al.*, 2013).

O adoquim ou piso intertravado cerâmico, é um produto cerâmico inovador, cujas características principais são o aspecto rudimentar e a coloração natural. O adoquim apresenta fácil manuseio, com seu formato geométrico desenvolvido, de forma a facilitar a execução e também para se obter uma adequada distribuição de cargas oriundas dos vários tipos de tráfego. Esse produto apresenta também longa vida útil, alta resistência mecânica e facilidade de reparo (CARVALHO *et al.*, 2019).

De acordo com Candido *et al.* (2013), o piso intertravado cerâmico possibilita a pavimentação de estradas dos mais diversos tipos de tráfego, como calçadas, pátios, vias de tráfego de veículos leves e pesados, entre outros. Esse produto é fabricado a partir da mistura de alguns tipos de argila que proporcionam coloração natural e plasticidade desejada à peça.

Segundo Zaccaron *et al.* (2014), a fabricação de produtos cerâmicos, normalmente, ocasiona problemas ambientais, como a geração de resíduos após a queima. Com isso, é necessário o gerenciamento adequado de resíduos pós-queima de cerâmica, que é um procedimento, na maioria das vezes, desconhecido pelo ceramista. Nos dias atuais, ainda existe pequena preocupação com o que esse rejeito pode acarretar ao meio ambiente, mas alguns estudos mostram a possibilidade de agregar valor a esse material que, até então, serve basicamente para terraplanagem e, em muitos casos, é apenas descartado a céu aberto.

O descarte desses resíduos da indústria cerâmica de forma inadequada é uma fonte de agressão ambiental e de desperdício de matéria-prima. Esses materiais apresentam resistência elevada a agentes biológicos e às intempéries, ocasionando, assim, sérios problemas à comunidade em geral quando descartados de forma inadequada. Com isso, tanto os aspectos econômicos quanto a poluição ambiental gerada são justificativas para pesquisas que promovam a reciclagem desses materiais (SILVA *et al.*, 2017a).

Desse modo, é importante para a indústria cerâmica, além de desenvolver produtos inovadores, buscar materiais alternativos que possam ser incorporados e utilizados juntamente com a matéria-prima básica. Dentre esses materiais, pode ser utilizado o chamote, que é um resíduo cerâmico descartado após a etapa de queima e submetido a um tritramento em triturador ou em moinho de bolas. Esse resíduo pode ser utilizado no próprio processo produtivo como um material não plástico,

minimizando custos com material argiloso e diminuindo, assim, sua disposição de forma não controlada no meio ambiente (ZACCARON *et al.*, 2016).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Geral

- Analisar a influência da adição de chamote nas propriedades tecnológicas e microestruturais do adoquim.

1.1.2 Específicos

- Caracterizar as matérias-primas;
- Determinar as propriedades tecnológicas das amostras com as diferentes proporções de chamote de acordo com a variação nas temperaturas de queima;
- Comparar as propriedades tecnológicas entre os corpos de prova produzidos em laboratório e os adoquins coletados e produzidos em uma indústria situada na região de Teresina;
- Examinar a macroestrutura e a microestrutura das amostras ensaiadas;
- Verificar as propriedades tecnológicas das amostras quanto ao preconizado pelas normas técnicas vigentes.

1.2 JUSTIFICATIVA

O adoquim é um produto inovador, que apresenta características interessantes, como a elevada resistência à compressão, a facilidade de manuseio e de aplicação, além de um pequeno custo de fabricação e de manutenção. Esse produto também possui um elevado potencial estético, devido à variedade de formatos e de dimensões e às diversas colorações, em que é dispensado o uso de corantes.

No processo de fabricação do adoquim, além da utilização da matéria-prima básica, que é a argila, também podem ser adicionados outros materiais, como fundentes ou resíduos. A adição de resíduos, como o chamote, no adoquim é importante, pois esse rejeito é um material que, na maioria das vezes, possui pouca ou nenhuma utilização.

Desse modo, o aproveitamento do chamote possibilita uma redução significativa no impacto ambiental, por haver a reutilização de um material que ocasionou perdas durante ou após o processo de fabricação de produtos cerâmicos, e, na maior parte das vezes, esse resíduo é simplesmente descartado no pátio das

indústrias cerâmicas. Além disso, a utilização desse resíduo no processo de fabricação possibilita a redução na extração de outras matérias-primas, como a argila.

A partir do incremento do chamote, que é um material alternativo, na massa dos pisos intertravados cerâmicos, durante o processo de fabricação, podem haver melhorias ou pelo menos manutenção em níveis adequados das propriedades tecnológicas e microestruturais desse produto. Com isso, é importante analisar a influência desse resíduo na massa cerâmica e verificar se as propriedades tecnológicas atendem às normas técnicas vigentes.

Atualmente, já existem indústrias cerâmicas no Piauí e no Brasil, que vêm buscando a adição de resíduos, como o chamote, na massa argilosa para a fabricação de seus produtos, dentre eles o adoquim. Dessa forma, este estudo também tem o intuito de auxiliar os fabricantes de produtos cerâmicos, que têm interesse na utilização desse resíduo nos seus produtos, sobre a potencial utilização do adoquim com e sem a adição de chamote na composição da massa cerâmica.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 INDÚSTRIA CERÂMICA

A cerâmica vermelha ou estrutural apresenta uma técnica de fabricação bastante conhecida, na qual iniciou-se a produção de tijolos e telhas há aproximadamente sete mil anos atrás, sendo assim um domínio milenar. No Brasil, as primeiras indústrias de cerâmica vermelha tiveram origem no século XVI nos estados da Bahia e Pernambuco e foram espalhando-se até os dias atuais, por todos os estados, nas suas mais variadas formas e técnicas de fabricação (NANDI *et al.*, 2015).

Atualmente, a maior concentração de indústrias de cerâmica vermelha está na Região Sul do Brasil, seguida pela Região Sudeste e os principais estados produtores são: São Paulo, Rio Grande do Sul e Paraná, respectivamente, e que juntos representam em torno de 40% da produção brasileira. Esse setor acompanha a evolução da economia brasileira e do setor de construção, sendo incentivado por grandes obras e por programas de governo voltados para casas populares (RODRIGUES *et al.*, 2017).

A indústria de cerâmica vermelha se caracteriza pela coloração avermelhada de seus produtos, como blocos, telhas e elementos vazados. Além dela, há também a indústria de revestimentos cerâmicos, de cerâmica branca, etc. A indústria de revestimentos cerâmicos abrange a fabricação de produtos cerâmicos no formato de placas. Esses produtos são utilizados na construção civil para o revestimento de paredes e pisos, por exemplo, e são empregados em ambientes internos e externos, com denominações comerciais como porcelanato, grês, entre outros. Por sua vez, a cerâmica branca compreende materiais formados por um corpo branco e, geralmente, recobertos por uma camada vítrea incolor e transparente, como louças sanitárias e de mesa e cerâmicas artísticas (decorativas) (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2019a).

Segundo Nandi *et al.* (2015), os últimos quarenta anos representaram o período em que houve maior desenvolvimento tecnológico na indústria cerâmica. Contudo, a maioria das indústrias cerâmicas brasileiras continuam sendo de pequeno porte e em sua maioria há a manutenção de características operacionais praticamente artesanais e com pouco desenvolvimento tecnológico. Dentre estas empresas encontram-se ainda as que fizeram grandes investimentos na planta de fabricação, mas não investiram na qualificação da mão de obra e na aplicação de matérias-primas de qualidade, apresentando, com isso, problemas operacionais semelhantes aos das indústrias mais artesanais.

Apesar das recentes melhorias, o controle de qualidade continua sendo visto e aplicado de maneira isolada em indústrias de médio e grande porte, não havendo na maioria das empresas de pequeno porte, padronização e controle dos processos produtivos. Desse modo, as perspectivas de avanço para o setor cerâmico se tornam prejudicadas (BRAGA; SANTOS; SALES, 2016).

Nesse cenário, a melhoria da indústria cerâmica pode ser realizada com a implementação de tecnologias limpas nos processos produtivos, com o intuito de melhorar a qualidade dos produtos e a produtividade, além de ampliar a competitividade no mercado. Dentre essas tecnologias limpas, destaca-se a substituição de combustíveis fósseis por biomassa no processo de queima dos produtos e implementação de eficiência energética para reduzir o consumo de energia elétrica (SILVA; MÉXAS; QUELHAS, 2017).

Outra forma de melhoria na indústria cerâmica ocorre com a diversificação da produção por meio da fabricação de produtos com alto valor agregado, como telhas, blocos estruturais e *pavers* cerâmicos. Este último é um pavimento cerâmico, cujo processo de fabricação e posterior utilização ainda está se espalhando no Brasil (CARVALHO *et al.*, 2019).

Apesar dos recentes avanços da indústria cerâmica brasileira, como melhoria dos processos industriais, maior controle e padronização dos produtos, e melhor capacitação técnica e gerencial, um entrave importante que persiste nas empresas desse setor são as perdas ao longo do processo produtivo, ocasionados muitas vezes por defeitos nas peças. Quando os defeitos acontecem antes da etapa de queima, os produtos extrudados ou prensados (secos ou úmidos) podem ser reprocessados. Contudo, o mesmo não acontece com as peças defeituosas queimadas, pois ainda não há até o momento nenhuma forma de reaproveitamento em larga escala, onde esses materiais (resíduos cerâmicos), quase sempre, são descartados junto aos empreendimentos cerâmicos (CABRAL JUNIOR; AZEVEDO, 2017).

Além das perdas econômicas, a acumulação de resíduos resulta em passivos ambientais de dimensões consideráveis nas indústrias cerâmicas, ocasionando também proliferação de insetos nocivos devido ao acúmulo de materiais, na maior parte dos casos, dispostos de forma desordenada. Além disso, observa-se que, mesmo em indústrias cerâmicas mais sofisticadas, as perdas ocorrem, ainda que em taxas menores (CABRAL JUNIOR; AZEVEDO, 2017).

De forma geral, o processo produtivo de uma cerâmica vermelha inicia-se quando a argila chega e é estocada na indústria e de acordo com a necessidade, ela é abastecida no caixão dosador e desintegrada. Logo após, por meio de esteiras, a argila chega até o misturador, em que a água é dosada na quantidade adequada para que a peça alcance a resistência pretendida. A partir disso, a massa é levada para laminação e depois para a extrusora ou prensa, que é o momento em que se realiza a conformação da peça. Ao sair pela boquilha da extrusora, por exemplo, o carrinho cortador corta a massa no tamanho padrão. Após essa etapa, a peça segue para a secagem e em seguida para queima no forno (CORRÊA; VASCONCELOS, 2015).

De acordo com Cabral Junior *et al.* (2019b), a indústria brasileira de revestimentos cerâmicos utiliza dois processos produtivos diversos, via seca e via úmida, na fabricação dos produtos. Na via seca utiliza-se a massa básica, composta por argilas de queima vermelha, fragmentadas em moinhos de martelo, levemente umidificadas e conduzidas ao processo produtivo, composto por prensagem a seco, secagem, decoração e queima. Na via úmida, por sua vez, as argilas são de base normalmente de cor clara, com massa formada pela mistura de matérias-primas minerais, como as argilas, o feldspato, o caulim, o quartzo, entre outros. A mistura é moída e homogeneizada em moinhos de bolas, em meio aquoso, seca e granulada em atomizador e, em seguida, é conformada por prensagem a seco, para haver, logo após, as etapas de decoração e queima.

Em relação à indústria de cerâmica branca, as plantas industriais de maior porte são compostas basicamente de três elementos: unidade de beneficiamento das matérias-primas minerais e composição da massa; setor de fundição (conformação das peças); e sinterização efetuada em fornos de queima contínua. Já as pequenas indústrias utilizam fornos intermitentes, produzindo pequena variedade de peças. As principais matérias-primas utilizadas nessa indústria são a argila, o caulim e os fundentes. As argilas utilizadas são plásticas e cauliníticas de queima clara, conhecidas como do tipo *ball clay*, que são argilas que possuem alta plasticidade e baixo teor de Fe_2O_3 e de sais solúveis (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2019c).

Na indústria de cerâmica vermelha, a formulação da massa cerâmica, composta basicamente por argila, é realizada normalmente de forma empírica pelo ceramista, na qual é feita, de forma geral, a mistura de uma argila “gorda”, que possui alta plasticidade, granulometria fina e composição básica de argilominerais, com uma argila “magra”, com elevada presença de quartzo e que possui baixa plasticidade.

Com essa mistura, busca-se o controle da retração linear das peças durante o processo de secagem e queima (CABRAL JUNIOR *et al.*, 2019a).

Atualmente, com a redução das jazidas de argilas consideradas de boa qualidade, o uso de outros materiais com pequenas frações de argilominerais, especialmente caulinita, ou com grandes frações de mica ou de illita tem se tornado uma regra, junto com a necessidade de melhorar o desempenho mecânico de blocos, de telhas, de revestimentos e de outros produtos. Essa tendência exige que haja o aprofundamento de pesquisas sobre tecnologia cerâmica com o intuito de se ter os subsídios necessários para a fabricação de peças com melhores propriedades, utilizando matérias-primas que apresentam menor qualidade. Desse modo, a etapa de processamento tem função fundamental para que sejam produzidas peças de melhor qualidade (SANTOS *et al.*, 2017).

O processo de fabricação de produtos cerâmicos estruturais inclui também uma etapa de conformação, seguida normalmente por etapas de secagem e queima. É na etapa de conformação que as principais características geométricas do produto cerâmico são definidas. Nas diversas técnicas de processamento, o produto é conformado a partir de uma formulação constituída por uma ou mais matérias-primas cerâmicas e um fluido. A principal função do fluido, também denominado de veículo, é conferir trabalhabilidade à mistura. Na grande maioria dos casos, esse veículo é a água (FINKLER *et al.*, 2018).

Dentre as técnicas de conformação, a extrusão é bastante utilizada e tem a vantagem de ser utilizada tanto para a conformação plástica de produtos de seção constante, como também para facilitar a mistura e a homogeneização de massas, para que se submeta a outro processo posterior. Já a prensagem caracteriza-se pela colocação da massa cerâmica no interior de uma matriz rígida, na qual ocorre a compactação dessa massa por meio da aplicação de uma força de pressão (FREITAS *et al.*, 2009).

De acordo com Corrêa e Vasconcelos (2015), outro fator muito importante no processo produtivo de uma indústria cerâmica é o procedimento de secagem. Muitas empresas de pequeno porte não investem em uma adequada estufa de secagem, sendo na maioria das vezes a secagem do produto cerâmico realizada ao ar livre, o que ocasiona aumento no tempo de produção, pois esse método é mais lento. Já as empresas de médio e grande porte, em sua maioria, utilizam estufas de secagem, nos quais os produtos são secos mais rapidamente, sem afetar a sua qualidade.

Uma vez que os produtos cerâmicos estejam secos, eles são encaminhados para a sinterização nos fornos. Esse processo ocorre em fornos específicos, nos quais a queima pode ser realizada de forma contínua, em que o fogo é mantido aceso sem interrupção, ou intermitente, quando as peças são depositadas em câmaras específicas, também denominadas de salas de queima, nas quais se inicia o aquecimento do forno, seguido da sinterização até o resfriamento (SILVA *et al.*, 2014).

Em muitos casos devido à falta de tecnologia e de inovação na maioria das empresas do setor cerâmico, os fornos apresentam alto consumo e baixo rendimento. Esse fato causa prejuízos aos empresários que, nos últimos anos, têm buscado formas de obtenção de um produto de melhor qualidade e com custo reduzido. Além disso, os estouros e as trincas que ocorrem nos produtos cerâmicos estão, muitas vezes, ligados ao comportamento do forno que por falta de conhecimento técnico deste equipamento, ocasionam diversas perdas ao ceramista (NANDI *et al.*, 2015).

Além disso, há uma grande possibilidade de as peças cerâmicas apresentarem discrepâncias na geometria devido ao processo de queima, pois durante a circulação do calor, as peças da parte superior do forno atingem a temperatura de cozimento mais rapidamente e permanecem na fase de fusão por mais tempo. Com isso, ocorre o fenômeno de desuniformidade, intitulado pelos produtores de mão de queima. Esse fenômeno ocorre quando há variações dimensionais expressivas nas peças, de forma que o forno se divide em 3 faixas verticais, sendo essas faixas denominadas de mão de cima, mão do meio e mão de baixo. As peças de cada faixa devem ser estocadas e vendidas conjuntamente para que elas não apresentem grandes dispersões em sua geometria dentro de seus lotes (GARCIA SOBRINHO; DIAS, 2018).

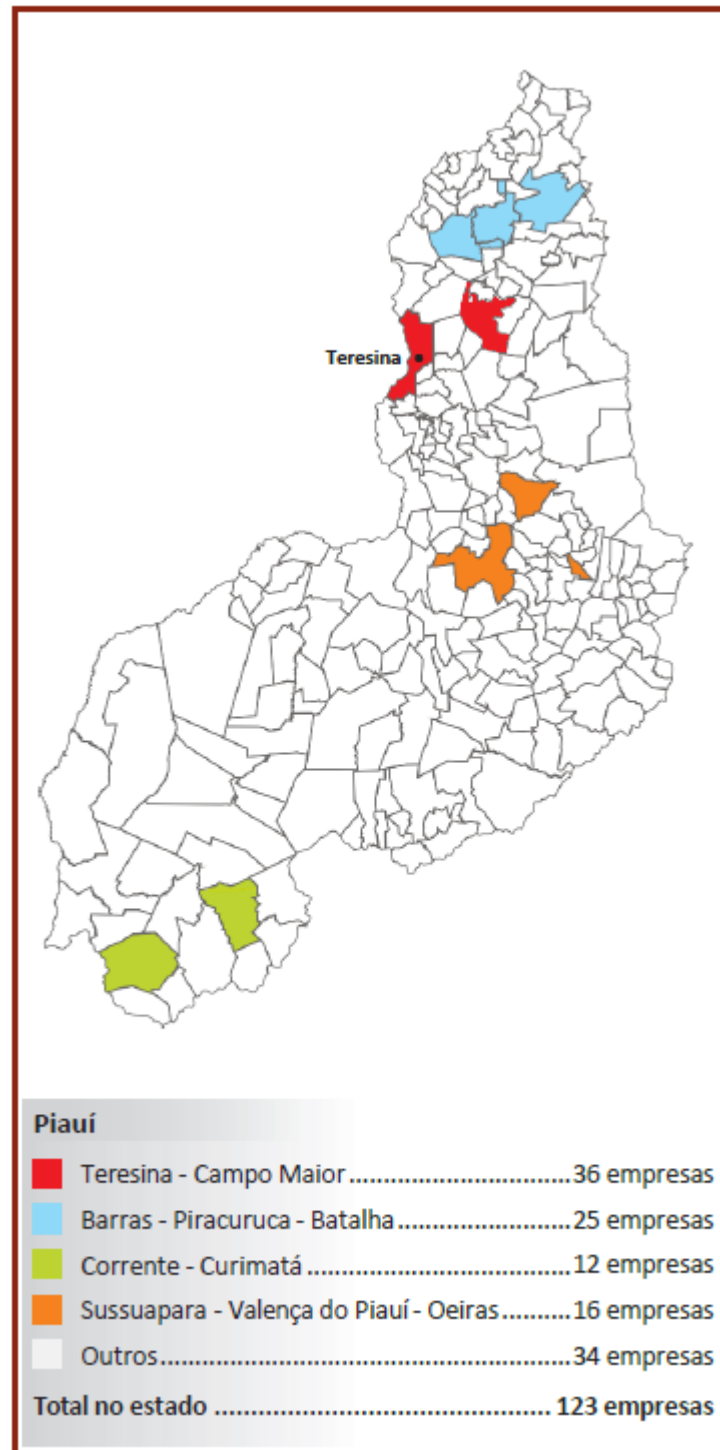
2.2 SETOR CERÂMICO DO PIAUÍ

O panorama atual das indústrias cerâmicas no Piauí é de grande destaque, principalmente quando se trata da produção de cerâmica vermelha. Isso ocorre devido à grande disponibilidade de matérias-primas adequadas, que podem ser encontradas em quase todo o estado, além do menor custo de instalação que esse ramo exige para fabricar produtos desse tipo, que são facilmente absorvidos pelo mercado local (TEIXEIRA, A.; SOARES; TEIXEIRA, P., 2018).

No Piauí, as indústrias cerâmicas estão espalhadas por quase todo o estado, com um total de 123 empresas. Os principais polos de produção estão divididos em Teresina – Campo Maior, Barras – Piracuruca – Batalha, Corrente – Curimatá e

Sussuapara – Valença do Piauí – Oeiras, entre outros. A maioria das indústrias continuam situadas na região de Teresina – Campo Maior, por ser o principal mercado consumidor dos produtos cerâmicos. A Figura 1 mostra as principais regiões fabricantes de cerâmica vermelha no estado do Piauí (RODRIGUES *et al.*, 2017).

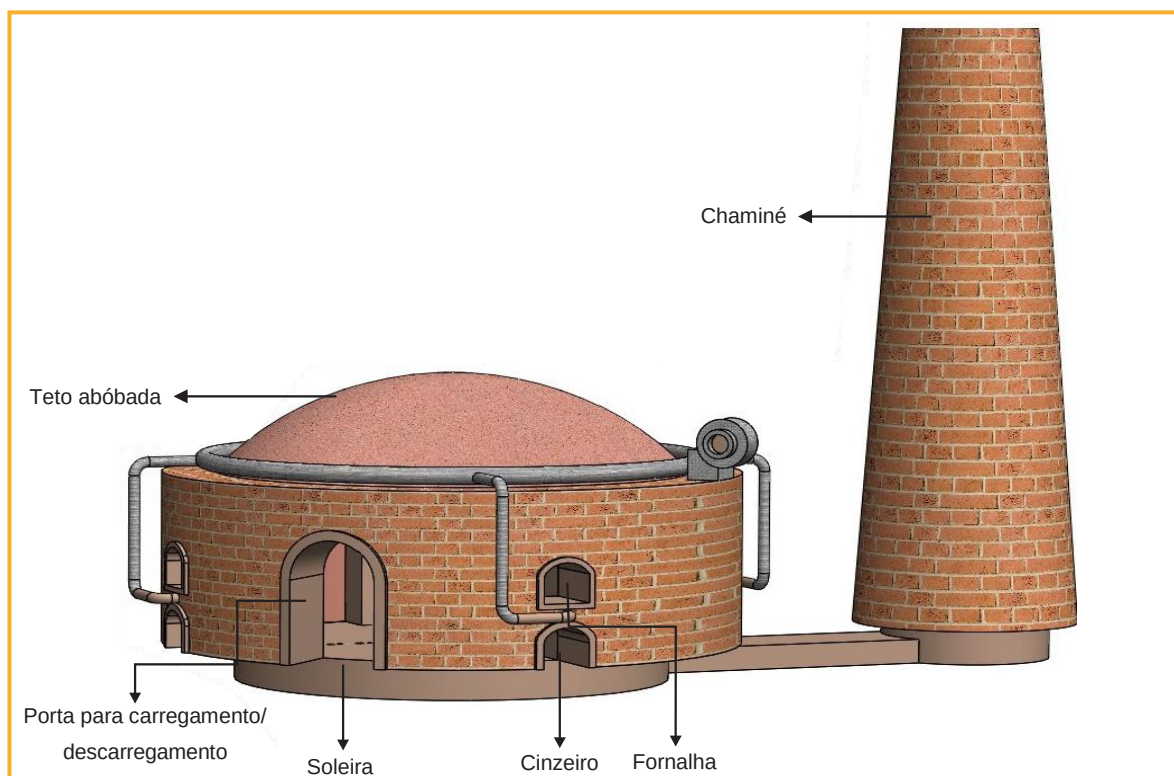
Figura 1 – Principais regiões que fabricam cerâmica vermelha no estado do Piauí



Fonte: adaptada de Rodrigues *et al.* (2017).

O tipo de forno mais empregado nas indústrias piauienses, apesar do baixo desempenho térmico que apresentam, é o tipo abóbada, que representa em torno de 80% do parque produtivo. Os fornos do tipo Hoffman constituem uma parcela de 11% e a parcela restante é formada por fornos de tipos diversos, como Federico, Paulistinha e Campanha. A Figura 2 apresenta o esquema de um forno tipo abóboda (HENRIQUES JUNIOR; SCHWOB; RODRIGUES, 2015; RODRIGUES *et al.*, 2017).

Figura 2 – Esquema de um forno tipo abóboda



Fonte: adaptada de Henriques Junior, Schwob e Rodrigues (2015).

Grande parte das indústrias cerâmicas do Piauí, principalmente, as de médio e de grande porte, estão buscando por meio do processo de fabricação, cada vez mais a melhoria da qualidade do produto final. Isso está sendo realizado por intermédio de um melhor conhecimento das matérias-primas que essas indústrias utilizam e uma maior preocupação com a qualificação da mão de obra, além da inserção de novas tecnologias no processo produtivo (RÊGO; SOARES, 2015).

Nas indústrias de cerâmica vermelha, especialmente as de menor porte, os principais insumos energéticos utilizados são de origem vegetal (lenha). Assim, o processo de produção pode apresentar impactos ambientais que devem ser analisados de forma a reduzi-los ao máximo. A Figura 3 exhibe a lenha que é utilizada

na fabricação de produtos cerâmicos em uma indústria situada na região de Teresina (ALMEIDA; SOARES; MOURA, 2014).

Figura 3 – Lenha utilizada na fabricação de produtos cerâmicos



Fonte: dados da pesquisa (2019).

2.3 MATÉRIAS-PRIMAS

A matéria-prima básica dos diversos produtos cerâmicos é a argila, que é um material natural que, ao ser umedecido em água, obtém um certo nível de plasticidade. Do ponto de vista químico, as argilas são formadas basicamente por silicatos hidratados de alumínio, ferro e magnésio, contendo, ainda, normalmente, certo teor de elementos alcalinos e alcalinos-terrosos (SANTOS, 1989).

A argila é um material muito abundante na natureza e, assim, pode ser utilizada em larga escala pelas indústrias cerâmicas. Esse material apresenta granulometria fina, inferior a 0,002 mm, e possui diferentes graus de plasticidade (ABNT NBR 6592, 1995).

Nas jazidas são realizadas as coletas dos diversos tipos de argilas, que em sua grande maioria possuem impurezas como matéria orgânica e outros minerais. Essas impurezas, ao estarem presentes na massa cerâmica, podem melhorar ou, até

mesmo, prejudicar a qualidade dos produtos cerâmicos e a eficiência do processo produtivo que é realizado nas indústrias (SOARES *et al.*, 2010).

As argilas são materiais que apresentam baixo custo, o que atrai a atenção das indústrias. Contudo, o reduzido custo das argilas precisa estar associado à qualidade mínima do material que, geralmente, é dificultada pelas variações mineralógicas que esse material apresenta. Isso pode ocasionar problemas, como menor produção, geração de resíduos, extração inadequada da matéria-prima e impactos ambientais. Com isso, para minimizar esses efeitos indesejáveis é necessário um conhecimento adequado sobre as características das matérias-primas e suas combinações (BRITO *et al.*, 2015).

Em relação aos componentes químicos, conforme o tipo de argila, há a presença de diversos óxidos, como o dióxido de silício (SiO_2), o óxido de alumínio (Al_2O_3), o óxido férrico (Fe_2O_3), o óxido de potássio (K_2O), o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO), o dióxido de titânio (TiO_2), entre outros (CASTRO *et al.*, 2015). O SiO_2 é o óxido de maior predominância na argila, devido à presença de quartzo, seguido do Al_2O_3 . Esses dois óxidos formam, durante a queima, a fase vítrea e novas fases cristalinas. O Fe_2O_3 é o óxido responsável pela cor vermelha da peça cerâmica, o K_2O é o fundente responsável pela redução da temperatura de sinterização e os demais óxidos são importantes para a melhoria das propriedades físicas e auxiliam nas transformações de fase do produto cerâmico (SOARES *et al.*, 2014a).

As argilas, conforme o tipo, apresentam diversas fases cristalinas em sua composição. Entre essas fases cristalinas há a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) que auxilia na formação da estrutura do produto cerâmico, o quartzo (SiO_2), que minimiza a retração da peça cerâmica, a moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) e o ortoclásio (KAlSi_3O_8), que são fundentes que promovem uma maior formação de fase líquida durante a queima devido à presença do potássio em suas estruturas (SOARES *et al.*, 2010).

As características mineralógicas e microestruturais das argilas são afetadas ao serem submetidas ao processo de queima, pois há a formação de novas transformações de fases cristalinas, como a transformação do quartzo α em β e o surgimento de espinélio e de mulita, por exemplo. Essas transformações de fase, geralmente, auxiliam nas propriedades do produto cerâmico, como a redução de

absorção de água e o aumento da resistência mecânica (SANTOS, 1989; SILVA *et al.*, 2018).

De acordo com Caputo (2015), quando maior for o índice de plasticidade (IP) das argilas, maior será o seu nível de compressibilidade. Os solos, com um IP variando entre 1 e 7, são classificados como fracamente plásticos. Em um intervalo de 7 a 15, os solos são considerados medianamente plásticos e para um IP superior a 15, são altamente plásticos.

O teor de umidade presente na massa argilosa afeta diretamente a plasticidade que é influenciada também pelas características da argila como a composição química e mineralógica e a granulometria. Uma elevada plasticidade diz respeito a uma maior força de coesão entre as partículas de argila por conta de uma maior capacidade de retenção de água na sua superfície (BRAGA; SANTOS; SALES, 2016).

O feldspato, presente nos produtos cerâmicos, é uma matéria-prima que ocorre nos principais tipos de rocha, especialmente nas ígneas, o que dificulta a quantificação de suas reservas. Essas matérias-primas abrangem os silicatos de alumínio combinados com sódio, potássio, cálcio e, ocasionalmente, bário. Os principais minerais encontrados no feldspato são o ortoclásio (KAlSi_3O_8), a albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e a anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) (LIRA; NEVES, 2013).

De acordo com o estudo realizado por Castro *et al.* (2015), a análise mineralógica do feldspato apresentou a fase cristalina ortoclásio (KAlSi_3O_8), em maior concentração, que torna o feldspato um ótimo fundente a ser utilizado na massa cerâmica. Nessa análise, houve também a presença da fase cristalina quartzo (SiO_2), que é um mineral acessório presente no feldspato.

O feldspato é bastante utilizado na indústria cerâmica, especialmente na produção de pisos e revestimentos. Esse material atua no produto cerâmico agindo como um fundente e reduz, com isso, a temperatura de formação de fase líquida durante o processo de queima. Essa fase líquida preenche os vazios da peça e gera, após o resfriamento e formação de vítrea, redução na porosidade e ganho de resistência mecânica. Essas vantagens fazem com que o feldspato esteja presente em grandes quantidades na massa de produtos cerâmicos, especialmente em revestimentos cerâmicos (HOFFMANN; SANTOS; MORELLI, 2012; LIRA; NEVES, 2013).

O caulim é outro material muito utilizado na fabricação de produtos cerâmicos. Ele é usado na fabricação de esmaltes, engobes, além de massas para porcelanato

ou massas para louça de mesa e sanitários. Além disso, o caulim é constituído basicamente de caulinita, apresentando cor branca, devido ao pequeno teor de ferro, além de ter baixa proporção de contaminação de outros minerais (BISCARO *et al.*, 2012).

Segundo o estudo realizado por Castro *et al.* (2015), o caulim apresentou como componentes químicos SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O e Fe_2O_3 , com predominância de SiO_2 e como fases cristalinas o quartzo (SiO_2), a moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), que atua como um fundente em temperaturas mais altas, o ortoclásio (KAlSi_3O_8) e a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$). A presença dessas três últimas fases se deve ao processo de formação da caulinita, por intemperismo ou por ação hidrotermal da transformação do feldspato em caulinita, em que o feldspato passa por uma forma intermediária que é a mica moscovita.

Na massa cerâmica, ao ser aplicado, o caulim apresenta queima de cor predominantemente branca, é refratário e possui plasticidade média a baixa, sendo utilizado, assim, normalmente, em conjunto com argilas plásticas (ARAÚJO *et al.*, 2012). A caulinita presente no caulim auxilia no processo de conformação da massa cerâmica, na medida em que melhora a trabalhabilidade das misturas (SILVA *et al.*, 2018).

O quartzo é um material que também pode ser adicionado na massa cerâmica com a função de reduzir a plasticidade e auxiliar na retração de secagem e queima. Esse material assegura a estabilidade dimensional da peça durante a queima, pois somente uma parte se separa para formar fase líquida e depois fase vítrea após o resfriamento da peça, com a outra parte compondo a estrutura final da peça cerâmica (OLIVEIRA, 2016).

Outro material também incorporado em formulações cerâmicas é o calcário. Esta matéria-prima é amplamente utilizada na indústria de revestimentos cerâmicos, em que é realizada uma redução efetiva das suas partículas por meio do processo de moagem. O calcário possui as finalidades de ajuste do processo de produção, no que se refere à compactação, secagem e queima do produto, além de auxiliar no aumento da resistência mecânica e na melhoria da estabilidade dimensional da peça (SOARES *et al.*, 2014b).

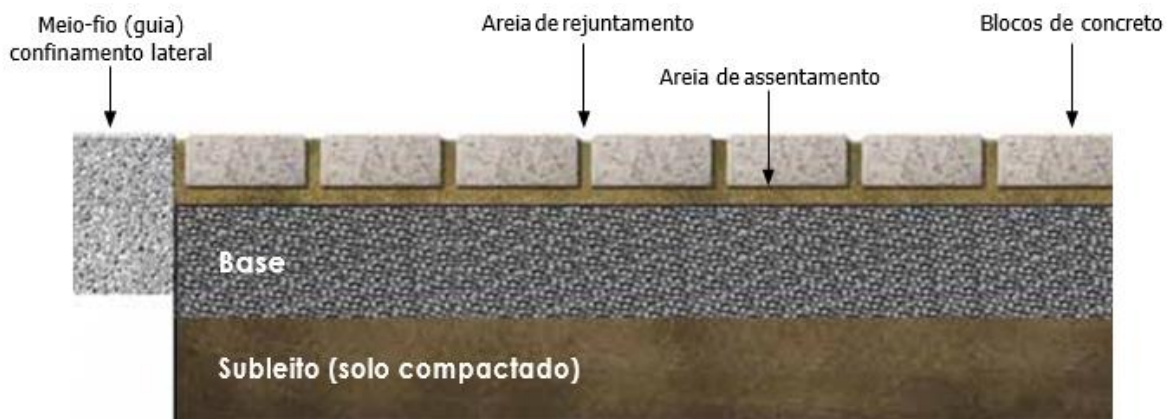
No que se refere à análise química de um calcário coletado em uma jazida de argila utilizada na fabricação de cerâmica vermelha, conforme o estudo realizado por Soares *et al.* (2014b), houve a predominância do óxido de cálcio (CaO), além da

presença em menores proporções de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO , K_2O e TiO_2 . Na análise mineralógica desse calcário, identificou-se a fase cristalina calcita (CaCO_3), em maior proporção, que atua como um fundente na massa cerâmica. Além dela, foi detectada a presença de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), de moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) e de quartzo (SiO_2).

2.4 PAVIMENTOS INTERTRAVADOS

O pavimento intertravado é um pavimento flexível em que a estrutura é formada por uma camada de base, ou base e sub-base, sob uma camada de revestimento formada por peças de concreto justapostas ou, no caso do adoquim, por peças intertravadas de cerâmica. As peças utilizadas nesse tipo de pavimento podem ser preenchidas por material de rejuntamento e a contenção auxilia no intertravamento do sistema. A Figura 4 apresenta a estrutura típica de um pavimento intertravado com a utilização de blocos de concreto (ABNT NBR 9781, 2013; ABCP, 2010).

Figura 4 – Estrutura típica de um pavimento intertravado



Fonte: adaptada de ABCP (2010).

Esse tipo de pavimento tem como principal característica, o fato de as peças serem simplesmente assentadas e confinadas sobre uma camada de areia, que serve como regularização da base e atua na distribuição das cargas e no acomodamento das peças. O conceito básico desse pavimento é o intertravamento, em que há transmissão de parte da carga de uma peça para outra por meio do atrito lateral entre elas. Outra característica importante é a permeabilidade, pois ele facilita a passagem de parte da água da chuva para o solo através das juntas, assim como, a elevada resistência à compressão, que torna o pavimento intertravado durável ao longo da sua vida útil (HENGL *et al.*, 2018). A Tabela 1 mostra a resistência característica à compressão de peças de concreto aos 28 dias (ABNT NBR 9781, 2013).

Tabela 1 – Resistência característica à compressão de peças de concreto

Solicitação	Resistência característica à compressão aos 28 dias (MPa)
Tráfego de pedestres, veículos leves e veículos comerciais de linha	≥ 35
Tráfego de veículos especiais e solicitações capazes de produzir efeitos de abrasão acentuados	≥ 50

Fonte: adaptada de ABNT NBR 9781 (2013).

De acordo com a ABNT NBR 15953 (2011), o intertravamento consiste na capacidade das peças de concreto de resistirem às diversas formas de deslocamento, dos tipos vertical, horizontal, de rotação ou giração, em relação às peças limítrofes. O intertravamento vertical é aquele em que pavimento resiste a esforços de cisalhamento, o horizontal é destinado a resistir a esforços de aceleração e de frenagem de peças, o rotacional tem a função de resistir a esforços perpendiculares excêntricos aos eixos das peças e o giracional é aquele que deve resistir a esforços pontuais no eixo das peças.

As peças de concreto utilizadas em pavimentos intertravados podem ser fabricadas em diferentes formatos. Estes formatos dividem-se em quatro tipos: tipo I, que são peças de concreto com formato próximo ao retangular, relação comprimento/largura igual a dois e assentadas em fileiras ou em espinha de peixe; tipo II, formado por peças com formato único, diferente do retangular e assentadas somente em fileiras; tipo III, constituído por peças com formatos geométricos característicos, como trapézios e hexágonos e peso superior a 4 kg; e tipo IV, que compreende as peças de concreto de diversos tamanhos, ou uma única peça com juntas falsas, que podem ser aplicadas com um ou mais padrões de assentamento (ABNT NBR 9781, 2013).

A pavimentação com piso intertravado está experimentando um aumento da sua utilização em áreas urbanas devido ao seu aspecto ecológico e econômico em comparação com os pavimentos asfálticos comuns. Mesmo em áreas urbanas com alto volume de tráfego, esse tipo de pavimentação representa uma alternativa de construção de pavimentos no futuro. No entanto, estão ocorrendo, atualmente, danos inesperados no pavimento intertravado recém-construído. A razão para isso são, muitas vezes, conceitos e padrões de design que ainda são imaturos e estão fortemente baseados nos conceitos de pavimentos asfálticos, sem levar em

consideração as características especiais relativas a este tipo de pavimento (HENGL *et al.*, 2018).

Além dessas características específicas, em meio ao atual padrão de consumo dos recursos naturais, inúmeras pesquisas vêm buscando analisar o comportamento de pisos intertravados de concreto quando há a adição de diferentes resíduos na sua composição. Esses resíduos, minerais, cerâmicos, borracha de pneus, entre outros, substituem parte dos agregados ou do cimento presentes na mistura (LOPES; BACARJI, 2014).

Segundo Fernandes e Mendonça (2020), a utilização de resíduos tem se mostrado uma alternativa viável na diminuição do impacto causado pelo elevado consumo de matérias-primas, como o cimento que é utilizado na fabricação de piso intertravado de concreto. Desse modo, dentre os diversos resíduos com potencial utilização na fabricação de piso intertravado, há as sobras de serragem do mármore, que são resíduos sem nenhuma utilização, geralmente depositado no pátio das empresas. A adição desse resíduo, apesar de ter causado a redução da resistência à compressão e o aumento da absorção de água do piso intertravado, manteve esses parâmetros dentro do exigido pelas normas técnicas.

De acordo com o estudo realizado por Carvalho *et al.* (2018), os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), como os resíduos de corpos de prova de concreto descartados após ensaio mecânico à compressão, também podem ser utilizados em pisos intertravados de concreto como agregados reciclados. A adição desses resíduos ocasionou apenas uma pequena redução na resistência à compressão dos corpos de prova, em que todos os corpos de prova com essa adição apresentaram resistência aos 28 dias acima da especificada pela norma ABNT NBR 9781 (2013), que é de 35 MPa, para pavimentos destinados ao tráfego de pedestres, veículo leves e veículos comerciais de linha.

Outro resíduo com potencial de utilização no piso intertravado de concreto é a borracha de pneus. A substituição de agregado natural por borracha de pneus provoca redução na resistência à compressão do piso intertravado. Contudo, caso essa adição ocorra em proporções adequadas, a borracha melhora algumas propriedades desse piso, como o aumento da flexibilidade, o que torna a adição desse resíduo, uma alternativa ambientalmente adequada, pois reduz a utilização de matérias-primas naturais e possibilita a diminuição do seu acúmulo em locais inadequados, assim como ocorre, em grande parte, com os demais tipos de resíduos (SILVA *et al.*, 2017b).

A fabricação de piso intertravado de concreto apresenta elevado custo econômico e impacto ambiental. Apesar disso, esse produto possui inúmeras vantagens como elevada durabilidade, baixa necessidade de manutenção ao longo de sua vida útil e estética agradável ao consumidor. Desse modo, deve-se buscar a redução do teor de cimento presente na mistura, mantendo essas vantagens enquanto se reduz o alto custo econômico e o impacto ambiental de fabricação desse produto (LIMBACHIYA; GANJIAN; CLAISSE, 2016).

As últimas tecnologias desenvolvidas vêm mostrando que os blocos utilizados para pavimentação têm excelentes propriedades de engenharia, custo cada vez mais acessível e ciclo de vida duradouro. Eles são fáceis de construir e manter, e tem uma aparência estética muito boa em comparação com os pavimentos convencionais, como o asfalto. Além disso, as peças utilizadas nesse pavimento podem ser facilmente substituídas, minimizando assim o desperdício de materiais e tempo para construção. Esta última vantagem torna esses tipos de pavimentos mais sustentáveis em comparação aos pavimentos convencionais. A Figura 5 mostra exemplos de peças de concreto utilizadas em pavimentos intertravados (MURUGAN; NATARAJAN; CHEN, 2016; ABCP, 2010).

Figura 5 – Peças de concreto utilizadas em pavimentos intertravados



Fonte: ABCP (2010).

2.5 ADOQUIM

O piso intertravado de cerâmica já é bastante utilizado no exterior, mas ainda é raro no Brasil, onde também se utiliza o nome de adoquim. Esse produto é processado com o uso de diferentes tipos de argila, cujas reservas são de grande porte e distribuem-se por praticamente todas as regiões do país. O adoquim pode conter ou não aditivos e deve ser queimado em altas temperaturas para a obtenção de melhores propriedades técnicas. A Figura 6 ilustra o adoquim sendo utilizado no tráfego de veículos em uma avenida na Espanha (CANDIDO *et al.*, 2013; MALPESA, 2015).

Figura 6 – Adoquim utilizado no tráfego de veículos



Fonte: adaptada de MALPESA (2015).

O pavimento intertravado de cerâmica em comparação ao confeccionado com concreto possui vantagens, como apresentar maior conforto térmico e dispensar o uso de corantes, pois esses produtos cerâmicos apresentam um aspecto rústico bastante valorizado no mercado, além de diversas colorações naturais que podem variar de vermelha a cinza. As cores variam conforme o tipo de argila utilizada na composição da massa para a fabricação dos produtos. A Figura 7 mostra os adoquins com suas diversidades de cores (CANDIDO *et al.*, 2013).

Figura 7 – Adoquins com suas variedades de cores



Fonte: adaptada de MALPESA (2015).

Segundo Ferreira *et al.* (2019), com o avanço do setor cerâmico no Brasil e também no Piauí, principalmente na região de Teresina, é cada vez maior o interesse pelo desenvolvimento de novos produtos cerâmicos. Dentre esses produtos, o adoquim apresenta-se como um produto inovador, que pode ser utilizado em larga escala, além de possuir inúmeros tipos de aplicações. O adoquim também possibilita, durante seu processo de fabricação, que sejam adicionados na massa cerâmica, resíduos e outros materiais alternativos, como o chamote, provenientes da própria indústria cerâmica ou de outras indústrias que venham a fornecer esses resíduos ou materiais.

Para a aplicação do adoquim na pavimentação também podem ser utilizados alguns tipos de peças complementares para garantir uma melhor utilização do produto, como mais facilidade no encaixe e também para proporcionar a infiltração de água de forma mais eficiente. Essas peças são fabricadas com o mesmo material e com as mesmas características do adoquim, diferindo em relação a ele apenas no formato e nas dimensões. A Figura 8 apresenta algumas peças complementares utilizadas juntamente com os adoquins que foram coletados em uma indústria cerâmica na região de Teresina.

Figura 8 – Peças complementares e adoquins



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Em relação à legislação técnica, o Brasil ainda não possui normas técnicas que tratam especificamente do piso intertravado cerâmico ou adoquim. Dessa forma,

enquanto essas normas não forem criadas, é necessário o uso da legislação vigente de outros países que já possuem normas que tratam sobre o assunto. Dentre esses países, há os Estados Unidos, a Colômbia e a Espanha, cujas normas foram elaboradas pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), pelo *Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación* (ICONTEC) e pela *Asociación Española de Normalización y Certificación* (AENOR), respectivamente.

As normas ASTM C902 (2015) e ICONTEC NTC 3829 (2004) estabelecem requisitos para a utilização de adoquins cerâmicos em locais que possuem circulação de pedestres e tráfego veicular leve. Por sua vez, a ASTM C1272 (2017) e a ICONTEC NTC 5282 (2004) estabelecem padrões para a utilização de adoquins cerâmicos em regiões de tráfego veicular pesado, calçadas comerciais e aplicações industriais.

No que se refere às normas americanas ASTM C902 (2015) e ASTM C1272 (2017), a classe SX indica que o pavimento está sujeito ao congelamento, a MX indica pavimento destinado ao uso externo, onde a resistência ao congelamento não é um fator e a NX indica pavimento não destinado ao uso externo, mas que pode ser utilizado para uso interno quando protegido de congelamento. As classificações tipos R e F se referem a pavimentos rígidos e flexíveis, respectivamente. A Tabela 2 mostra as especificações do adoquim conforme essas normas americanas.

Tabela 2 – Especificações técnicas do adoquim conforme as normas ASTM C902 (2015) e ASTM C1272 (2017)

Norma		Especificações técnicas (média para 05 unidades)			
ASTM		RC (MPa)	AA (%)	IA	VA (cm ³ /cm ²)
C902	Classe SX	55,2	8	-	-
C902	Classe MX	20,7	14	-	-
C902	Classe NX	20,7	Sem limite	-	-
C1272	Tipo R	55,2	6	0,11	1,7
C1272	Tipo F	69	6	0,11	1,7

Fonte: adaptada de ASTM C902 (2015) e ASTM C1272 (2017).

Dados: RC – resistência à compressão; AA – absorção de água; IA – índice de abrasão; VA – perda de volume por abrasão.

A norma ASTM C902 (2015) também apresenta as especificações técnicas relativas ao tipo de abrasão que o piso intertravado cerâmico está sujeito. A classificação tipo I é relativa a piso sujeito à alta abrasão, a tipo II se refere a piso sujeito à abrasão intermediária e a tipo III faz referência a piso sujeito à baixa abrasão.

A Tabela 3 apresenta a resistência à abrasão do adoquim de acordo com a norma ASTM C902 (2015).

Tabela 3 – Resistência à abrasão
do adoquim de acordo com a
norma ASTM C902 (2015)

Norma		Especificações técnicas	
ASTM		IA	VA (cm ³ /cm ²)
C902	Tipo I	0,11	1,7
C902	Tipo II	0,25	2,7
C902	Tipo III	0,50	4,0

Fonte: adaptada de ASTM C902 (2015).

Dados: IA – índice de abrasão; VA – perda de volume por abrasão.

As normas colombianas ICONTEC NTC 3829 (2004) e ICONTEC NTC 5282 (2004) também apresentam as especificações técnicas mínimas referentes ao adoquim. As classificações tipo I, tipo II e tipo III estão relacionadas a piso sujeito à alta abrasão, à abrasão intermediária e à baixa abrasão, respectivamente. Além disso, a classificação tipo R também é relativa a pavimentos rígidos e a tipo F também se refere a pavimentos flexíveis. A Tabela 4 exibe as especificações do adoquim conforme essas normas colombianas.

Tabela 4 – Especificações técnicas do adoquim conforme
as normas ICONTEC NTC 3829 (2004) e ICONTEC NTC
5282 (2004)

Norma		Especificações técnicas (média para 05 unidades)			
NTC		RC (MPa)	AA (%)	IA	VA (cm ³ /cm ²)
3829	Tipo I	55,2	8	0,11	1,7
3829	Tipo II	38	14	0,25	2,7
3829	Tipo III	20,7	Sem limite	0,50	4,0
5282	Tipo R	55	6	0,11	1,7
5282	Tipo F	69	6	0,11	1,7

Fonte: adaptada de ICONTEC NTC 3829 (2004) e ICONTEC NTC 5282 (2004).

Dados: RC – resistência à compressão; AA – absorção de água; IA – índice de abrasão; VA – perda de volume por abrasão.

A norma espanhola AENOR UNE-EN 1344 (2015), por sua vez, trata sobre as especificações e os métodos de ensaio dos adoquins para uso em pavimentação flexível e em pavimentação rígida. A pavimentação flexível se destina ao tráfego de

pedestres e de veículos, enquanto a pavimentação rígida é normalmente destinada ao tráfego de pedestres. A Tabela 5 apresenta as especificações técnicas dos adoquins extrudado e prensado de acordo com a referida norma.

Tabela 5 – Especificações técnicas dos adoquins conforme a norma AENOR UNE-EN 1344 (2015)

Propriedades	Adoquim extrudado	Adoquim prensado
Resistência a gelo/degelo	Resistente	Resistente
Carga de ruptura transversal	Valor médio ≥ 80 N/mm	Valor médio ≥ 30 N/mm
Resistência à abrasão	Valor médio ≤ 450 mm ³	Valor médio ≤ 450 mm ³
Resistência ao deslizamento	≥ 45	≥ 45
Resistência aos ácidos	$\leq 7\%$	$\leq 7\%$
Tolerância dimensional	$\leq 0,5 \sqrt{d}$ mm	$\leq 0,5 \sqrt{d}$ mm

Fonte: adaptada de AENOR UNE-EN 1344 (2015).

2.6 ADIÇÃO DE CHAMOTE EM FORMULAÇÕES DE MASSA CERÂMICA

A ABNT NBR 10004 (2004) define resíduos sólidos como todo resíduo que se encontra nos estados sólido e semissólido e que sejam resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Além disso, segundo essa norma, os resíduos são classificados em resíduos classe I – perigosos e resíduos classe II – não perigosos. Os resíduos não perigosos são classificados ainda em resíduos classe II A – não inertes e resíduos classe II B – inertes.

Muitas empresas estão buscando minimizar a quantidade de resíduos industriais devido a diversos motivos, como a falta de área de disposição desses resíduos, a contaminação do meio ambiente e a necessidade de preservar as fontes não renováveis desses recursos naturais. Desse modo, a reutilização de resíduos pelas empresas é uma alternativa eficiente para a minimização desses problemas (COTA *et al.*, 2018).

Em meio a isso, diversos pesquisadores buscam esforços para desenvolver diferentes tipos de produtos, como blocos ou telhas, por exemplo, com a adição de um ou mais tipos de resíduos. Assim, o processo de fabricação de produtos cerâmicos buscou, nas duas últimas décadas, utilizar materiais residuais com o objetivo de reduzir as matérias-primas utilizadas no processo de fabricação (AL-FAKIH *et al.*, 2019).

A enorme quantidade de resíduos gerados pelas indústrias, em uma era de crescentes preocupações ambientais, tem estimulado um elevado interesse na reutilização desses resíduos. A utilização de melhores técnicas de gestão e de materiais residuais como recursos alternativos a serem usados na fabricação dos produtos resulta na melhoria dos níveis sustentáveis de produção por haver redução na exploração dos recursos naturais (COLETTI *et al.*, 2018).

O setor de cerâmica vermelha possui um potencial elevado para a incorporação de resíduos, pois há um enorme volume de produção e um grande consumo de matérias-primas. Além disso, os produtos de cerâmica vermelha possuem boa tolerância quanto à alteração das condições de processamento e às variações na composição das suas matérias-primas. Com isso, se torna viável a adição de quantidades razoáveis de resíduos ou outros materiais na composição de massas cerâmicas (NANDI *et al.*, 2014).

Dessa forma, na fabricação de produtos cerâmicos, além da argila, são adicionados muitas vezes outros tipos de materiais, como fundentes e resíduos. Dentre os resíduos oriundos das atividades industriais, há o chamote, que são resíduos triturados de produtos cerâmicos que foram descartados por possuírem defeitos e apresentam, com isso, pouca ou nenhuma utilização. A Figura 9 mostra resíduos de blocos cerâmicos que podem ser triturados ou moídos para a produção de chamote (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Figura 9 – Resíduos de blocos cerâmicos



Fonte: dados da pesquisa (2019).

O gerenciamento correto desses resíduos, é um procedimento que permanece desconhecido pelo ceramista, apesar de alguns estudos mostrarem a possibilidade de agregar valor a esse material que, quando utilizado, vem servindo como material alternativo para terraplanagem. Atualmente, não existe nenhuma preocupação em relação ao que esse rejeito pode ocasionar ao meio ambiente, pois a maioria dele é simplesmente descartado a céu aberto (ZACCARON *et al.*, 2016).

O chamote classifica-se como resíduo classe II B, sendo, assim, considerado inerte, pois é um resíduo que ao ser submetido a um contato de forma dinâmica e estática com água destilada e desionizada à temperatura ambiente, não apresenta nenhum de seus constituintes com solubilização em concentrações acima dos padrões de potabilidade de água, exceto aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Assim, o chamote pode ser utilizado como reaproveitamento de resíduo em massas cerâmicas (ABNT NBR 10004, 2004; ABNT NBR 10006, 2004).

Com a incorporação do chamote à massa cerâmica original podem haver possíveis ganhos nos produtos cerâmicos, como a otimização do processo de secagem, melhoria da qualidade dos produtos e diminuição de perdas, com uma provável economia. Além disso, uma forma de avaliar diretamente a economicidade dessa adição é por meio da estimativa do custo de produção do chamote. Desse modo, o ganho econômico decorrerá da comparação entre o preço da argila a ser substituída e o custo de beneficiamento dos resíduos (CABRAL JUNIOR; AZEVEDO, 2017).

O custo de beneficiamento do chamote deve ser inferior ao preço da argila, para que a incorporação desse resíduo seja economicamente viável, caso contrário, a economia na fabricação dependerá da efetivação dos ganhos de produtividade ao longo do processamento cerâmico, que, por sua vez, dependerá das condições operacionais de cada indústria cerâmica. Em algumas indústrias, essa economia já é observada, pois o resíduo é triturado juntamente com a massa argilosa, gerando um custo relativamente pequeno no seu beneficiamento (CABRAL JUNIOR; AZEVEDO, 2017).

O uso do chamote na produção de cerâmica vermelha ou estrutural apresenta-se como uma alternativa viável, pois esse resíduo possibilita a melhoria de algumas propriedades técnicas dos produtos cerâmicos, além de proporcionar redução nos danos causados ao meio ambiente. Essa redução ocorre na medida em que é dada

uma destinação correta ao resíduo que havia sido descartado de forma inadequada no meio ambiente (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

O chamote é um dos resíduos industriais que pode ser incorporado à argila após trituração para fabricação de produtos cerâmicos. A utilização do chamote pode ter reflexos positivos em todo o processo produtivo. Esse material normalmente possui granulometria mais grosseira que a argila, o que favorece um aumento da permeabilidade da peça verde, além de facilitar a eliminação da água de conformação (CANDIDO *et al.*, 2013).

Durante o processo de queima, o chamote se comporta como material inerte até a temperatura na qual foi obtido. Entretanto, quando é queimado acima de sua temperatura de processamento inicial, as reações e as transformações de sinterização que ocorrem, podem auxiliar na elevação ou pelo menos manutenção da resistência mecânica da peça (CANDIDO *et al.*, 2013).

Segundo Oliveira *et al.* (2016), em relação, à composição química do chamote, ela é normalmente semelhante à composição química de uma massa argilosa, pois o chamote é oriundo da queima de uma massa também argilosa. O chamote, assim como a argila, apresenta óxidos, como o dióxido de silício (SiO_2), que é óxido predominante, o óxido de alumínio (Al_2O_3), o óxido férrico (Fe_2O_3), o óxido de potássio (K_2O), o óxido de cálcio (CaO), o óxido de magnésio (MgO), o dióxido de titânio (TiO_2), entre outros. A diferença básica da composição química entre esses constituintes da massa cerâmica, ocorre devido ao processo de queima em que já havia passado o chamote.

No que se refere aos minerais encontrados no chamote por meio da técnica de difração de raios X, algumas concentrações diferem das encontradas em uma massa argilosa, como o surgimento da fase cristalina hematita (Fe_2O_3), por conta das transformações desses minerais presentes no chamote, causadas pela sinterização do material. Essas concentrações variam também conforme o tipo de massa que foi utilizada para formar o chamote, como a massa de blocos e telhas, por exemplo (OLIVEIRA *et al.*, 2016).

Em relação às propriedades tecnológicas de um produto cerâmico, a retração linear de secagem é importante para a dimensão final de um produto cerâmico. À medida que se aumenta o teor de chamote na massa cerâmica, diminui-se a retração linear de secagem. Isso ocorre pelo fato do chamote reagir como material inerte, além de possuir pouca perda de água, o que dificulta a redução do tamanho inicial da peça.

Conforme há a perda de água por secagem, esse resíduo praticamente mantém seu tamanho inicial e diminui, com isso, a deformação da peça cerâmica após a saída da água (ZACCARON *et al.*, 2014).

No que se refere à retração linear de queima, a tendência do chamote, por ser um material inerte é não retrair até alcançar a temperatura em que ele foi obtido. Em temperaturas superiores, esse resíduo apresenta uma retração mais significativa, ficando próxima da retração da argila, podendo manter inalterada ou provocar a redução da retração linear de queima da peça cerâmica (CASTRO; SOARES; NASCIMENTO, 2012).

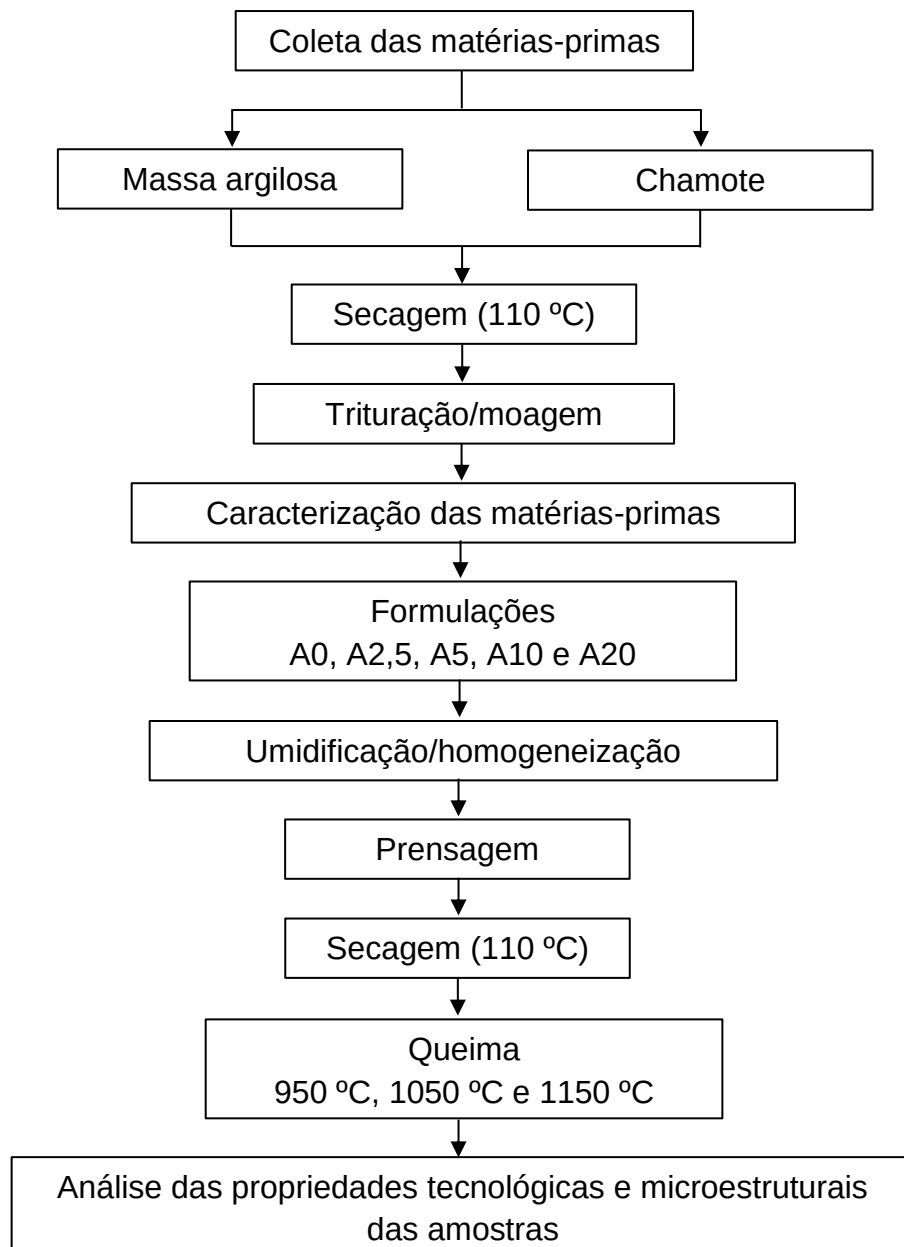
O aumento do percentual de chamote à massa básica ocasiona também uma redução na perda ao fogo. Isso ocorre, pois o chamote é um material que já perdeu grande parte da matéria orgânica no primeiro processo de queima, ou seja, antes desse resíduo ser triturado ou moído para ser adicionado à massa cerâmica (ZACCARON *et al.*, 2014).

Conforme há um aumento no teor de chamote da massa básica, aumenta-se a absorção de água e reduz-se a resistência mecânica do produto. Isso ocorre devido a uma menor sinterização, causada pela granulometria mais grosseira do chamote, que reduz a cinética de sinterização, além de tornar o produto mais poroso e propício a uma maior absorção de água e uma menor resistência mecânica (CASTRO; SOARES; NASCIMENTO, 2012).

3 METODOLOGIA

Os ensaios de caracterização das matérias-primas, assim como a preparação das massas cerâmicas, preparação, secagem e queima dos corpos de prova, ensaios de caracterização dos corpos de prova queimados e análises macroestrutural e microestrutural foram realizados nos laboratórios do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Materiais (PPGEM) do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí (IFPI), exceto o ensaio de resistência à compressão que foi realizado na Universidade Federal do Piauí (UFPI). A Figura 10 apresenta de forma resumida o fluxograma do procedimento experimental que foi utilizado no trabalho.

Figura 10 – Fluxograma do procedimento experimental



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.1 MATERIAIS

As matérias-primas utilizadas na realização do trabalho foram a massa argilosa pronta e o chamote, formado após a trituração e a moagem dos resíduos cerâmicos. A massa argilosa foi empregada na fabricação dos corpos de prova juntamente com a adição de chamote, de forma a se aferir qual a influência de cada porcentagem de chamote nas características e nas propriedades da mistura. Essas matérias-primas foram coletadas em uma indústria cerâmica situada na região de Teresina, capital do Piauí.

As quantidades coletadas foram aproximadamente 100 kg de massa argilosa e 50 kg de chamote, que foram acondicionados em sacos de polipropileno e armazenados no laboratório de materiais cerâmicos do PPGEM do IFPI. Após o armazenamento, foram realizadas as análises e os ensaios das matérias-primas e dos corpos de prova secos e queimados. A Figura 11 ilustra a massa argilosa pronta coletada nessa indústria cerâmica.

Figura 11 – Massa argilosa da indústria cerâmica



Fonte: dados da pesquisa (2019).

A massa argilosa coletada é composta por duas argilas de várzea e três argilas de morro, que são argilas utilizadas na fabricação de diversos tipos de produtos, como blocos e telhas. Em relação ao chamote, foram utilizados resíduos cerâmicos provenientes de blocos e telhas, cujos resíduos estavam com pouca ou nenhuma utilização. A Figura 12 mostra resíduos de blocos e telhas cerâmicos que foram coletados próximo ao local de fabricação desses produtos.

Figura 12 – Resíduos de blocos e telhas cerâmicos



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Caracterização das matérias-primas

3.2.1.1 Análise química

A análise dos componentes químicos presentes nas matérias-primas, argila e chamote, foi realizada por meio de uma análise quantitativa em espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) em equipamento modelo Epsilon 3 XL da Panalytical. As matérias-primas foram moídas e peneiradas até granulometria inferior à peneira de nº 200 (0,075 mm) e colocadas no porta-amostra sobre um filme de prolene. A Figura 13 mostra o equipamento utilizado na análise química.

Figura 13 – Equipamento utilizado na análise química



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.1.2 Análise mineralógica

A análise dos minerais presentes nas matérias-primas assim como na massa cerâmica sinterizada foi realizada por difração de raios X (DRX). Além disso, o equipamento utilizado nessa análise foi o XRD-6000 da Shimadzu com tubo de Co ($\lambda = 1,78901 \text{ \AA}$). A tensão que foi utilizada é de 40 kV e a corrente foi de 45 mA, com varredura de 6° a 90° para 2θ , com velocidade de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ/\text{passo}$. Foram utilizadas amostras em pó, com as matérias-primas moídas e peneiradas até granulometria inferior à peneira de nº 200 (0,075 mm) para identificação das fases cristalinas presentes. A Figura 14 ilustra o equipamento utilizado na realização da análise mineralógica.

Figura 14 – Equipamento utilizado na análise mineralógica



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.1.3 Análise racional

A partir dos resultados obtidos por meio da fluorescência de raios X e da difração de raios X, foi realizada a análise racional da massa argilosa e do chamote.

Essa análise foi feita com base no programa computacional de análise racional de argilominerais “QuantFases 1.1” desenvolvido no IFPI, no qual permite-se quantificar cada parcela das fases cristalinas encontradas no difratograma de raios X (SILVA, 2015).

3.2.1.4 Análise térmica

Na análise térmica (AT) das matérias-primas, em que é avaliada a perda ou o ganho da massa em função da temperatura e/ou do tempo e os eventos térmicos ocorridos durante a queima, foi utilizado o Analisador Termogravimétrico TGA-51H, da marca Shimadzu. Na análise, foram utilizadas massas em torno de 15 mg, com granulometria inferior à peneira de nº 200, sob um fluxo de ar sintético de 50 mL/min.

A taxa de aquecimento utilizada na análise foi de 10 °C/min entre as temperaturas de 21 °C e 1150 °C. Os resultados e a obtenção das curvas da análise termogravimétrica (TGA) e da derivada da análise termogravimétrica (DTGA), foram obtidos por meio do programa de computador denominado TA-60 WS, para análises térmicas da Shimadzu. A Figura 15 apresenta o equipamento utilizado na análise térmica.

Figura 15 – Equipamento utilizado na análise térmica



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.1.5 Análise granulométrica

A análise granulométrica das matérias-primas ocorreu por meio do método de peneiramento de acordo com a norma ABNT NBR 7181 (2016), que trata sobre esse tipo de análise. O peneiramento das amostras de massa argilosa e de chamote foi realizado por seis peneiras, desde uma peneira mais grossa (peneira com abertura de 0,180 mm – nº 80) até uma peneira mais fina (peneira com abertura de 0,045 mm – nº 325). A Figura 16 ilustra o agitador de peneiras da marca Lucadema utilizado para realizar o peneiramento das matérias-primas.

Figura 16 – Agitador de peneiras



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.1.6 Análise de plasticidade

Para a análise da plasticidade das formulações das massas cerâmicas foram determinados o limite de liquidez (LL) e o limite de plasticidade (LP). O limite de liquidez corresponde à máxima quantidade de água que a massa argilosa ou a massa cerâmica podem conter para ainda serem moldáveis. A Figura 17 apresenta o

aparelho de Casagrande utilizado para a determinação do limite de liquidez das formulações.

Figura 17 – Aparelho de Casagrande



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Por sua vez, o limite de plasticidade indica a menor quantidade de água que a massa argilosa ou a massa cerâmica devem conter para serem conformadas em uma extrusora ou uma prensa. Com esses dois limites, foi encontrado o índice de plasticidade (IP) conforme a Equação (1) (ABNT NBR 6459, 2016; ABNT NBR 7180, 2016).

$$IP = LL - LP \quad (1)$$

Onde:

IP: índice de plasticidade;

LL: limite de liquidez;

LP: limite de plasticidade.

3.2.1.7 Análise residual

A análise residual da massa argilosa foi realizada para se determinar o percentual de resíduo presente. Nesse ensaio, coletou-se 100 g da massa argilosa e colocou-se essa massa para secar em estufa na temperatura de 110 °C durante 24h. Em seguida, a amostra foi colocada em um defloculador com água e amônia onde ficou em repouso durante um período de 24h.

Após essa etapa, a amostra de massa argilosa foi lavada na peneira da ABNT nº 325 (0,045 mm) e o resíduo, que ficou retido nessa peneira, foi seco em estufa durante um período de 24h. Em seguida, o resíduo foi pesado e, posteriormente, foi verificada a natureza das partículas de impurezas presentes através de identificação visual.

3.2.2 Preparação das massas cerâmicas

Os resíduos cerâmicos coletados na indústria de cerâmica vermelha foram inicialmente colocados em um triturador da marca Trapp que desagregou e tornou a granulometria desses resíduos menos grosseira, formando, com isso, o chamote. A Figura 18 apresenta o equipamento utilizado na trituração dos resíduos cerâmicos.

Figura 18 – Triturador



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Após a etapa de trituração, as amostras da massa argilosa e do chamote foram submetidas à secagem em estufa à temperatura de 110 °C durante um período de 24h. Em seguida, as matérias-primas foram moídas separadamente em moinho de bolas da marca Solab para reduzir e realizar a desagregação das partículas. A Figura 19 mostra o moinho de bolas utilizado para desagregar as partículas das matérias-primas.

Figura 19 – Moinho de bolas



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Após a desagregação das matérias-primas, elas foram peneiradas em peneira da ABNT nº 80 (0,180 mm). Com as matérias-primas preparadas foram realizadas as etapas de formulação dos corpos de prova, secagem, queima e caracterização. As formulações das massas cerâmicas foram feitas com os teores de 0%, 2,5%, 5%, 10% e 20% em peso de chamote, conforme apresentado na Tabela 6. Os teores A0, A2,5, A5, A10 e A20 referem-se às formulações utilizadas para a confecção das amostras.

Tabela 6 – Formulações cerâmicas com diferentes teores de chamote

Formulações das massas cerâmicas	Concentração em peso (%)	
	Massa argilosa	Chamote
A0	100	0
A2,5	97,5	2,5
A5	95	5
A10	90	10
A20	80	20

Fonte: dados da pesquisa (2019).

As matérias-primas foram inicialmente pesadas com o auxílio de uma balança digital que apresenta precisão de duas casas decimais. Logo após, prosseguiu-se com as misturas das formulações das massas cerâmicas. As misturas e as homogeneizações foram realizadas de forma manual, na qual em cada formulação foi adicionada água em uma quantidade de aproximadamente 10% da massa cerâmica. A Figura 20 mostra a balança digital utilizada na pesagem das matérias-primas.

Figura 20 – Balança utilizada na pesagem das matérias-primas



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Após o lançamento da água e a respectiva mistura manual de cada formulação, as amostras foram armazenadas nos mesmos recipientes utilizados na mistura (masseiras) e vedados com saco plástico por um período de 24h para melhor homogeneização e uma distribuição de água mais adequada entre as partículas da massa, de forma a se evitar perda significativa de umidade da mistura.

3.2.3 Preparação dos corpos de prova

Nessa etapa, inicialmente, as matérias-primas de cada formulação foram colocadas em uma matriz de conformação metálica que apresenta dimensões aproximadamente iguais a 80 mm x 10 mm x 10 mm (comprimento, largura e espessura, respectivamente). A Figura 21 ilustra a matriz de conformação metálica utilizada na preparação dos corpos de prova.

Figura 21 – Matriz de conformação metálica



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Em seguida, foi realizada a moldagem dos corpos de prova de todas as formulações por meio de prensagem uniaxial com intensidade de 35 MPa por meio de uma prensa hidráulica modelo RP0002, da marca Ribeiro. A Figura 22 apresenta a prensa hidráulica utilizada na conformação dos corpos de prova.

Figura 22 – Prensa hidráulica



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Para cada formulação foram confeccionados 23 corpos de prova. Com isso, houve a confecção de um total de 115 corpos de prova. A Figura 23 apresenta parte dos corpos de prova que foram confeccionados por meio de prensagem uniaxial.

Figura 23 – Corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.4 Secagem dos corpos de prova

A secagem dos corpos de prova foi realizada em estufa a uma temperatura de 110 °C, durante um intervalo de tempo de 24h. Após a retirada da estufa, os corpos de prova foram medidos e pesados. A Figura 24 mostra a estufa utilizada na secagem dos corpos de prova.

Figura 24 – Estufa



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.5 Queima dos corpos de prova

Após a etapa de secagem, os corpos de prova foram queimados em forno mufla QUIMIS, nas temperaturas de 950 °C, 1050 °C e 1150 °C. A queima ocorreu por meio de uma taxa de aquecimento constante de 3 °C/min, nos quais os corpos de prova foram mantidos na temperatura patamar durante um período de 60min. A Figura 25 ilustra o forno mufla utilizado na queima dos corpos de prova.

Figura 25 – Forno mufla



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Após o desligamento do forno, o resfriamento dos corpos de prova ocorreu de forma natural, até alcançarem a temperatura ambiente. Para cada temperatura de queima foram analisados 25 corpos de prova, dos quais foram 5 corpos de prova de cada formulação. Dessa forma, haverá um total de 75 corpos de prova analisados após a queima.

3.2.6 Caracterização dos corpos de prova queimados

3.2.6.1 Retração linear

No ensaio de retração linear (RL) os corpos de prova, após a secagem e a queima, foram medidos com o auxílio de um paquímetro digital e a partir dos valores de seus comprimentos, foi realizado o cálculo da retração linear de secagem (RLS) por meio da Equação (2) e o cálculo da retração linear de queima (RLQ) por meio da Equação (3) (ZACCARON *et al.*, 2014).

$$RLS (\%) = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

RLS: retração linear de secagem;

C_i: comprimento inicial do corpo de prova após a conformação (cm);

C_f: comprimento final do corpo de prova após secagem à temperatura de 110 °C (cm).

$$RLQ (\%) = \frac{(C_s - C_q)}{C_q} \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

RLQ: retração linear de queima;

C_s: comprimento inicial do corpo de prova na temperatura de 110 °C (cm);

C_q: comprimento final do corpo de prova após a queima (cm).

3.2.6.2 Perda ao fogo

Na realização do ensaio de perda ao fogo (PF) os corpos de prova foram pesados após secagem a 110 °C e, posteriormente, foi realizada a queima nas temperaturas de 950 °C, 1050 °C e 1150 °C. Após o resfriamento, os corpos de prova

foram pesados novamente, para que sejam verificadas as massas de cada um após a queima. O resultado foi obtido aplicando-se a fórmula presente na Equação (4) (ZACCARON *et al.*, 2014).

$$PF (\%) = \frac{(P_i - P_f)}{P_i} \times 100 \quad (4)$$

Sendo:

PF: perda ao fogo;

P_i: peso inicial do corpo de prova após secagem a 110°C (g);

P_f: peso final do corpo de prova após queima (g).

3.2.6.3 Absorção de água

Após o resfriamento, os corpos de prova foram secos em estufa a uma temperatura de 110 °C durante 24h. Em seguida, foram pesados em uma balança e, logo após, foram colocados dentro de um recipiente com água destilada durante 24h. A seguir, os corpos de prova foram removidos e foi retirado o excesso de água com o auxílio de um pano umedecido, para que eles novamente pudessem ser pesados, de forma a calcular a quantidade de água absorvida por cada corpo de prova.

Os ensaios de absorção de água (AA) foram realizados de acordo com a norma ASTM C373 (2018) e foi utilizada a Equação (5) para o cálculo da absorção de água dos corpos de prova.

$$AA (\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_s} \times 100 \quad (5)$$

Sendo:

AA: absorção de água;

P_u: peso do corpo de prova úmido (g);

P_s: peso do corpo de prova seco (g).

3.2.6.4 Porosidade aparente

Os ensaios de porosidade aparente (PA) foram realizados por meio da determinação dos pesos dos corpos de prova secos, úmidos e imersos e, com base

nisso, utilizou-se a Equação (6) para determinar os valores da porosidade aparente (ASTM C373, 2018).

$$PA (\%) = \frac{(P_u - P_s)}{P_u - P_i} \times 100 \quad (6)$$

Sendo:

PA: porosidade aparente;

P_u: peso do corpo de prova úmido (g);

P_s: peso do corpo de prova seco (g);

P_i: peso do corpo de prova imerso em água (g).

3.2.6.5 Massa específica aparente

De acordo com a norma ASTM C373 (2018) foi determinada a massa específica aparente dos corpos de prova secos e queimados. A massa específica aparente (MEA) é a relação entre o peso do corpo de prova seco e o seu volume aparente, que é a diferença entre o peso do corpo de prova úmido e o peso do corpo de prova imerso em água. As massas foram pesadas através de balança digital OHAUS Adventurer Modelo ARA520 (precisão de 0,01 g). Com isso, a massa específica aparente foi calculada de acordo com a Equação (7).

$$MEA = \frac{P_s}{P_u - P_i} \quad (7)$$

Sendo:

MEA: massa específica aparente (g/cm³);

P_s: peso do corpo de prova seco (g);

P_u: peso do corpo de prova úmido (g);

P_i: peso do corpo de prova imerso em água (g).

3.2.6.6 Resistência à compressão

De acordo com a norma ASTM C67 (2018) foi calculada a resistência à compressão (RC) dos corpos de prova queimados. A resistência à compressão foi obtida por meio da Equação (8).

$$RC = \frac{F}{A} \quad (8)$$

Sendo:

RC: resistência à compressão (MPa);

F: carga de ruptura do corpo de prova (N);

A: área da seção transversal do corpo de prova (mm²).

A resistência à compressão foi determinada por meio do equipamento de ensaios mecânicos EMIC modelo DL 20000, com capacidade de carga de 200 kN. A Figura 26 mostra o equipamento utilizado para a realização do ensaio de resistência à compressão dos corpos de prova.

Figura 26 – Equipamento utilizado
no ensaio de resistência à
compressão dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.6.7 Resistência à abrasão

Segundo as normas ICONTEC NTC 3829 (2004) e ICONTEC NTC 5282 (2004), a resistência à abrasão (RA) foi determinada por meio do cálculo do índice de

abrasão (IA) dos corpos de prova queimados, que foi calculado conforme a Equação (9).

$$IA = \frac{0,69 \times AA}{RC} \quad (9)$$

Sendo:

IA: índice de abrasão;

AA: absorção de água em valor absoluto (%);

RC: resistência à compressão (MPa).

3.2.7 Análise comparativa

A análise comparativa foi realizada entre as propriedades de absorção de água, porosidade aparente, massa específica aparente, resistência à compressão e resistência à abrasão entre os corpos de prova produzidos em laboratório e os adoquins coletados e produzidos em uma indústria cerâmica situada na região de Teresina. Os adoquins fabricados nessa indústria estão em fase de estudos e testes e ainda não foi iniciada a sua comercialização. A Figura 27 mostra os adoquins que foram coletados nessa indústria cerâmica e que foram utilizados na análise comparativa.

Figura 27 – Adoquins coletados em uma indústria cerâmica situada na região de Teresina



Fonte: dados da pesquisa (2019).

A resistência à compressão dos adoquins coletados foi determinada por meio do equipamento de ensaios mecânicos EMIC modelo PC200C, com capacidade de carga de 2000 kN. A Figura 28 ilustra o equipamento utilizado para a realização do ensaio de resistência à compressão dos adoquins.

Figura 28 – Equipamento utilizado no ensaio de resistência à compressão dos adoquins



Fonte: dados da pesquisa (2019).

A análise comparativa entre os corpos de prova das formulações cerâmicas e os adoquins fabricados na indústria serve de base para verificar qual a melhor forma de processar a massa cerâmica, para que haja a obtenção de um produto final de melhor qualidade.

3.2.8 Análise macroestrutural

Os corpos de prova queimados foram analisados com a finalidade de observar possíveis defeitos nas suas superfícies após a etapa de queima. Além disso, foi avaliado também o efeito estético (coloração) dos corpos de prova causado pela

presença de ferro e de possíveis carbonatos na massa, além da influência da adição de chamote nos corpos de prova.

3.2.9 Análise microestrutural

3.2.9.1 Microscopia óptica

A microestrutura das amostras foi analisada por microscopia óptica (MO), com o auxílio do microscópio óptico modelo CX31, da marca Olympus e por meio do *software* “Motic Imagens Plus 2.0 ML”, no qual foram observados os poros e os possíveis defeitos presentes nas amostras após o processo de sinterização. A Figura 29 mostra o equipamento utilizado na análise de microscopia óptica dos corpos de prova.

Figura 29 – Equipamento utilizado na microscopia óptica



Fonte: dados da pesquisa (2019).

3.2.9.2 Difração de raios X

A técnica de difração de raios X foi realizada para determinar as fases cristalinas presentes nos corpos de prova queimados nas temperaturas de 950 °C, 1050 °C e 1150 °C. O equipamento utilizado para a realização do ensaio foi o mesmo empregado no item 3.2.1.2.

3.2.10 Verificação quanto ao recomendado pelas normas

De acordo com os resultados encontrados das propriedades tecnológicas, foi constatado se os corpos de prova atenderam às especificações técnicas das normas ASTM C902 (2015) e ICONTEC NTC 3829 (2004) que tratam sobre a utilização de adoquins em locais que possuem circulação de pedestres e tráfego de veículos leves. Além disso, em relação às normas ASTM C1272 (2017) e ICONTEC NTC 5282 (2004) que abordam sobre a utilização de adoquins em regiões de tráfego veicular pesado, calçadas comerciais e aplicações industriais, também foi verificado se os corpos de prova atendem às especificações dessas normas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS-PRIMAS

4.1.1 Análise química

A análise química das matérias-primas foi realizada por fluorescência de raios X. A composição química da massa argilosa e do chamote apresentaram como componentes básicos o SiO_2 e o Al_2O_3 , com predominância de SiO_2 , devido à alta concentração de quartzo nos materiais. A presença do Al_2O_3 está relacionada aos argilominerais que compõem as matérias-primas. Também houve a presença de um elevado teor de Fe_2O_3 , que é o óxido responsável pela cor avermelhada dos materiais, além do K_2O , que é um óxido fundente que auxilia na redução da temperatura de queima.

Os demais elementos químicos identificados no ensaio, como o MgO , são componentes quase sempre encontrados na argila vermelha e no chamote e são importantes para a melhoria das propriedades físicas e microestruturais, devido às possíveis transformações de fase que podem vir a ocorrer após a sinterização da massa cerâmica.

O chamote apresentou uma pequena variação no percentual dos óxidos em relação aos da massa argilosa. Essa variação ocorreu, pois o chamote é composto por um ou mais produtos cerâmicos, como blocos ou telhas, que apresentam conforme a aplicação, formulações diferentes de matérias-primas. Isso fez com que as matérias-primas que formaram o chamote fossem compostas por um maior percentual de SiO_2 e um menor percentual de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e K_2O , por exemplo. A Tabela 7 apresenta a composição química das matérias-primas, com os percentuais dos óxidos encontrados.

Tabela 7 – Composição química das matérias-primas (% em peso)

Amostra	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	CaO	TiO_2	MgO	Outros
Massa argilosa	59,25	21,44	9,75	4,78	0,69	1,46	2,27	0,36
Chamote	64,56	19,24	8,74	3,25	0,76	1,41	1,54	0,50

Fonte: dados da pesquisa (2019).

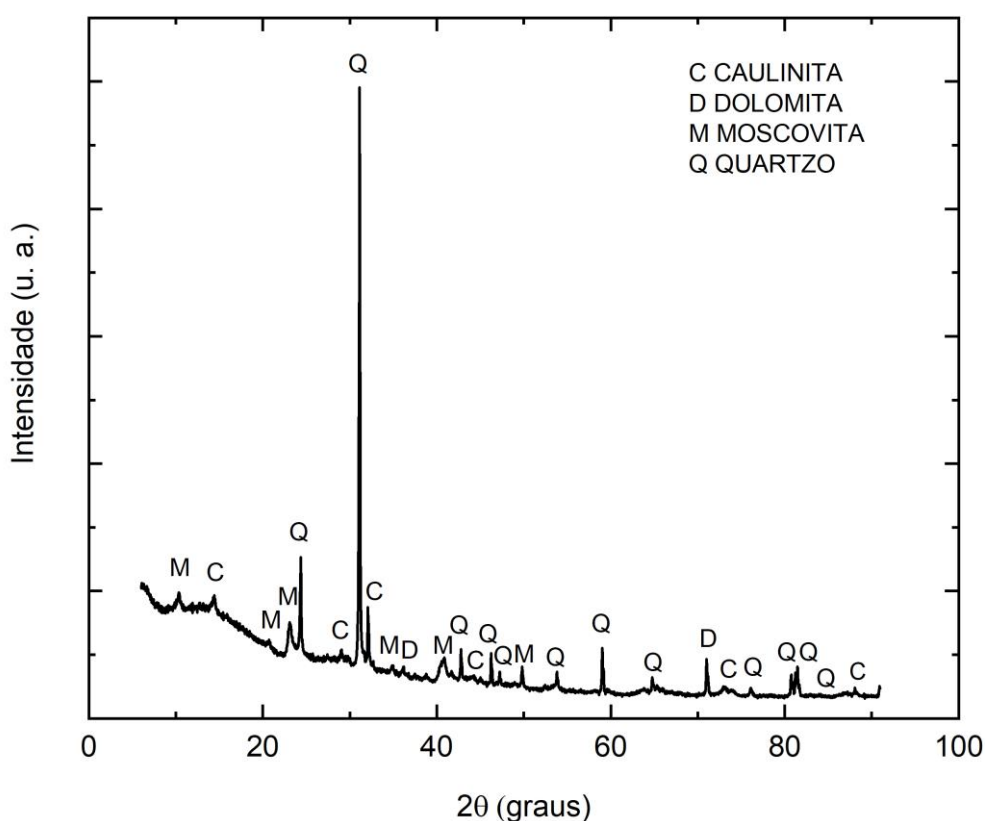
4.1.2 Análise mineralógica

Na análise mineralógica da massa argilosa foram identificados picos de difração de fases cristalinas referentes a caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$) e quartzo (SiO_2), o que corrobora

com a FRX que detectou a presença de óxidos de silício, de alumínio, de potássio, de cálcio e de magnésio.

A caulinita, devido ao seu alto teor de alumínio, tem a função de equilibrar as reações durante a fase de vitrificação da massa cerâmica. A dolomita auxilia na melhoria da resistência mecânica da peça cerâmica. A moscovita age como fundente por apresentar potássio em sua composição. Segundo Soares *et al.* (2014b), o quartzo desempenha o papel de melhorar a secagem e a saída de gases na queima, minimizar a retração da peça cerâmica e contribuir com a viscosidade da fase líquida formada durante o processo de queima. A Figura 30 mostra o resultado da análise mineralógica da massa argilosa.

Figura 30 – Análise mineralógica da massa argilosa

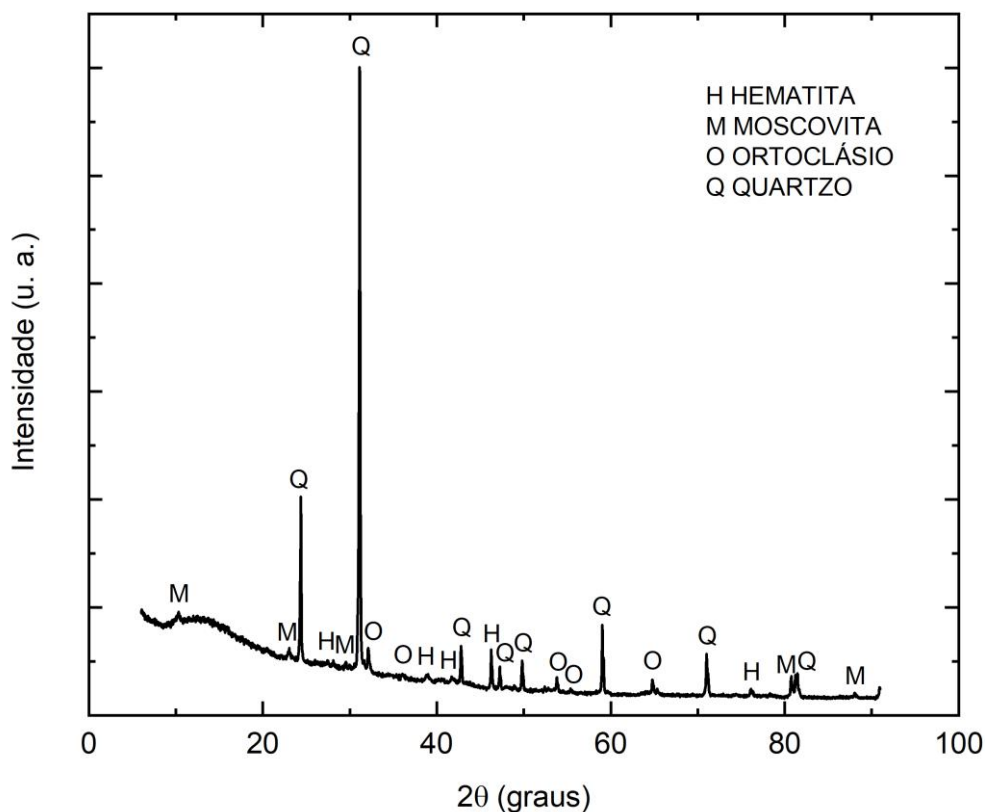


Fonte: dados da pesquisa (2019).

Na análise mineralógica do chamote foram identificados picos de difração de fases cristalinas referentes à hematita (Fe_2O_3), moscovita ($\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$), ortoclásio (KAlSi_3O_8) e quartzo (SiO_2), o que está de acordo com a FRX que detectou a presença de óxidos de silício, de alumínio, de potássio e de ferro. Em relação à massa argilosa, houve mudança nos minerais encontrados no chamote, por ser um material que já havia passado por um processo de queima, com a presença de hematita, responsável pela coloração avermelhada da peça após a queima, e de

ortoclásio, que contribui para a formação de fase líquida dos constituintes da peça cerâmica. O quartzo e a moscovita encontrados no chamote apresentam as mesmas funções da massa argilosa, diferindo apenas na concentração de cada fase. A Figura 31 apresenta o resultado da análise mineralógica do chamote.

Figura 31 – Análise mineralógica do chamote



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.1.3 Análise racional

Os resultados da análise racional evidenciam que há uma predominância da fase cristalina quartzo na massa argilosa, seguido de moscovita, de caulinita e de dolomita. Essas quantidades encontradas mostram que a massa argilosa se apresenta como propícia para ser utilizada tanto na fabricação de cerâmica estrutural quanto na de adoquim.

O chamote, por sua vez, também apresentou predominância de quartzo, seguido de ortoclásio, de moscovita e de hematita. Essa diferença, entre a massa argilosa e o chamote, se dá pelo fato do chamote já ter passado por um processo de queima, havendo a formação das fases cristalinas ortoclásio e hematita e a decomposição de parte da moscovita, além da decomposição total da caulinita e da dolomita. A Tabela 8 mostra a concentração das fases cristalinas das matérias-primas.

Tabela 8 – Concentração das fases cristalinas das matérias-primas

Matérias-primas	Fases quantificadas (%)					
	Caulinita	Dolomita	Hematita	Moscovita	Ortoclásio	Quartzo
Massa argilosa	14,98	1,92	–	40,42	–	42,68
Chamote	–	–	8,74	10,34	38,15	42,77

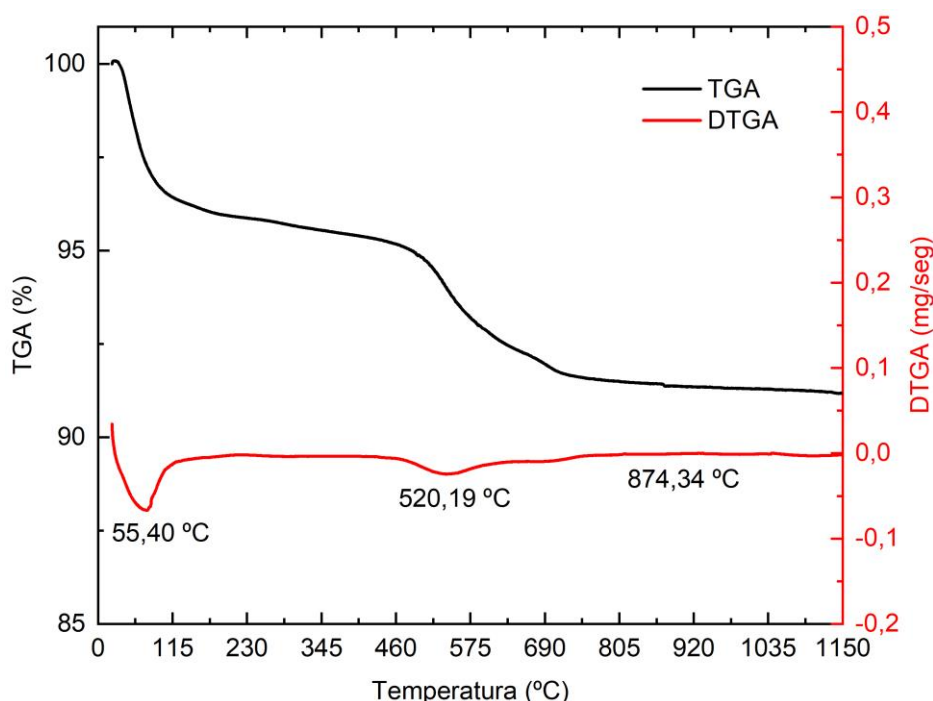
Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.1.4 Análise térmica

Na análise térmica da massa argilosa observou-se inicialmente um pico a 55,40 °C com uma perda de massa de 1,56%, caracterizada pela perda de água livre. No segundo evento, há outro pico na temperatura de 520,19 °C com uma perda de massa de 3,99%, caracterizada pela queima de matéria orgânica e a liberação de hidroxila da estrutura dos argilominerais, além da transformação alotrópica do quartzo α em β .

O terceiro evento identificado ocorreu na temperatura de 874,34 °C com uma perda de massa de 3,07%, devido, principalmente, à decomposição da dolomita com a liberação de CO₂ e à saída da água de constituição dos argilominerais (SOARES *et al.*, 2014a). Houve uma perda de massa total de 8,84%. A Figura 32 mostra o resultado da análise termogravimétrica e da derivada da análise termogravimétrica da massa argilosa.

Figura 32 – Curva termogravimétrica e derivada da curva termogravimétrica da massa argilosa

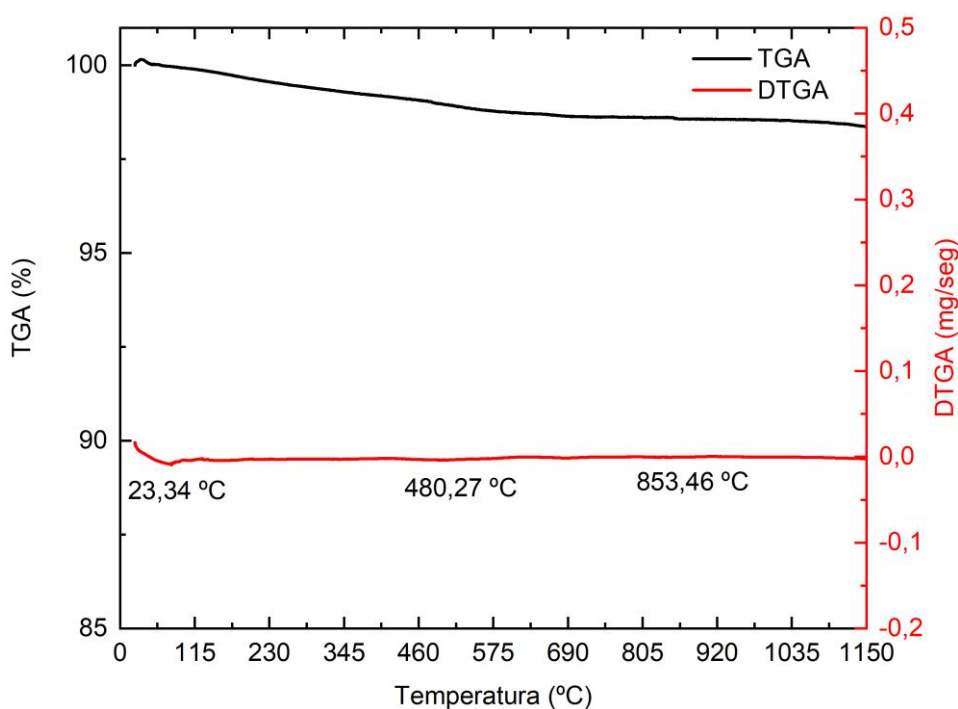


Fonte: dados da pesquisa (2019).

Em relação ao chamote foi observado inicialmente um pico a 23,34 °C com uma perda de massa de 0,04%, bem menor em comparação à massa argilosa, pois o chamote é um material que já havia passado por um processo de queima. Essa perda de massa é caracterizada pela perda de água livre. No segundo evento, há um pico presente na temperatura de 480,27 °C com uma perda de massa de 1,01%, caracterizada pela queima da matéria orgânica que é menor em relação à massa argilosa.

O terceiro evento ocorreu na temperatura de 853,46 °C, em que houve uma perda de massa de 0,43% devido à liberação da água de constituição dos argilominerais. Houve uma perda de massa total de 1,71%. A Figura 33 apresenta o resultado da análise termogravimétrica e da derivada da análise termogravimétrica do chamote.

Figura 33 – Curva termogravimétrica e derivada da curva termogravimétrica do chamote



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.1.5 Análise granulométrica

Conforme a distribuição granulométrica das matérias-primas foi verificado que a massa argilosa apresenta uma porcentagem de finos elevada se comparada com o chamote que, por sua vez, apesar da moagem realizada, apresenta granulometria mais grosseira. A granulometria mais fina proporciona uma reatividade mais eficiente

4.1.6 Análise de plasticidade

O índice de plasticidade foi calculado para todas as formulações dos corpos de prova. O aumento do teor de chamote, que é um material não plástico e de granulometria mais grosseira que a massa argilosa, ocasionou uma redução no valor desse índice. A Tabela 10 apresenta os valores encontrados para os índices de plasticidade das formulações das matérias-primas.

Tabela 10 – Índice de plasticidade

Formulação	Índice de plasticidade
A0	15,59
A2,5	15,56
A5	14,41
A10	12,90
A20	11,17

Fonte: dados da pesquisa (2019).

As formulações A0 e A2,5 apresentam plasticidade alta, o que permite a utilização em piso intertravado cerâmico, pois com essa plasticidade a moldagem é facilitada, o que contribui com a diversificação de formatos e de dimensões na fabricação de peças. As demais formulações, que possuem valores próximos de plasticidade, são classificadas como medianamente plásticas e podem ser utilizadas na fabricação de piso intertravado cerâmico, por também apresentarem facilidade, apesar de inferior, de moldagem das peças.

4.1.7 Análise residual

A análise residual foi realizada para identificar o teor de impurezas existentes na amostra de massa argilosa. A presença de determinados resíduos pode ocasionar a alteração de certas características do produto cerâmico como a cor, a plasticidade, a retração linear, a absorção de água e a resistência mecânica, além de influenciar na temperatura de queima, podendo ser necessária uma temperatura maior ou menor, dependendo da natureza e da quantidade de impurezas presentes.

Através da identificação visual, verificou-se no resíduo da massa argilosa, a presença de matéria orgânica, sílica livre, mica e grânulos de óxido de ferro, que são frequentemente encontrados em argilas que possuem coloração avermelhada. A Tabela 11 mostra a quantidade de resíduo presente na massa argilosa.

Tabela 11 – Resíduo retido na peneira nº 325 da ABNT

Matéria-prima	Peso inicial (g)	Peso final (g)	Resíduo (%)
Massa argilosa	100	13,63	13,63

Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA QUEIMADOS

4.2.1 Retração linear

O cálculo da retração linear de secagem foi realizado para uma média de 15 corpos de prova para cada formulação. Os resultados encontrados na retração linear de secagem apresentaram valores muito próximos, considerando o desvio padrão. Apesar disso, em relação à média dos corpos de prova ocorreu uma redução na retração linear de secagem com o aumento do teor de chamote.

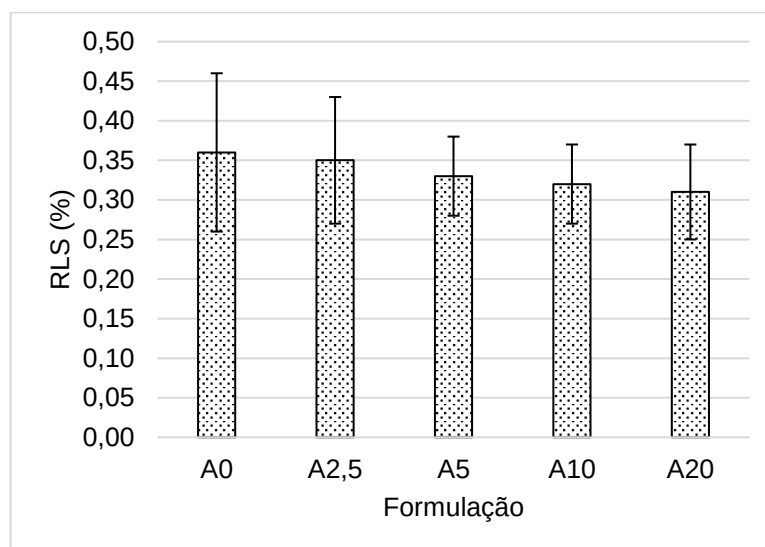
O chamote, que é um material não plástico, ao ser adicionado, ocasiona a redução da retração linear de secagem da peça cerâmica. A Tabela 12 e a Figura 35 apresentam a retração de linear de secagem dos corpos de prova na temperatura de 110 °C.

Tabela 12 – Retração linear de secagem a 110 °C

Temperatura	RLS (%)				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
110 °C	0,36 ± 0,10	0,35 ± 0,08	0,33 ± 0,05	0,32 ± 0,05	0,31 ± 0,06

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 35 – Retração linear de secagem dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

No cálculo da retração linear de queima foi utilizada uma média de 5 corpos de prova para cada formulação e suas respectivas temperaturas de queima. Com o aumento do teor de chamote, que é um material não plástico e de granulometria mais grosseira que a massa argilosa, nas formulações de massa cerâmica para a mesma temperatura de queima, ocorreu uma redução na retração linear de queima, assim como ocorreu na retração linear de secagem.

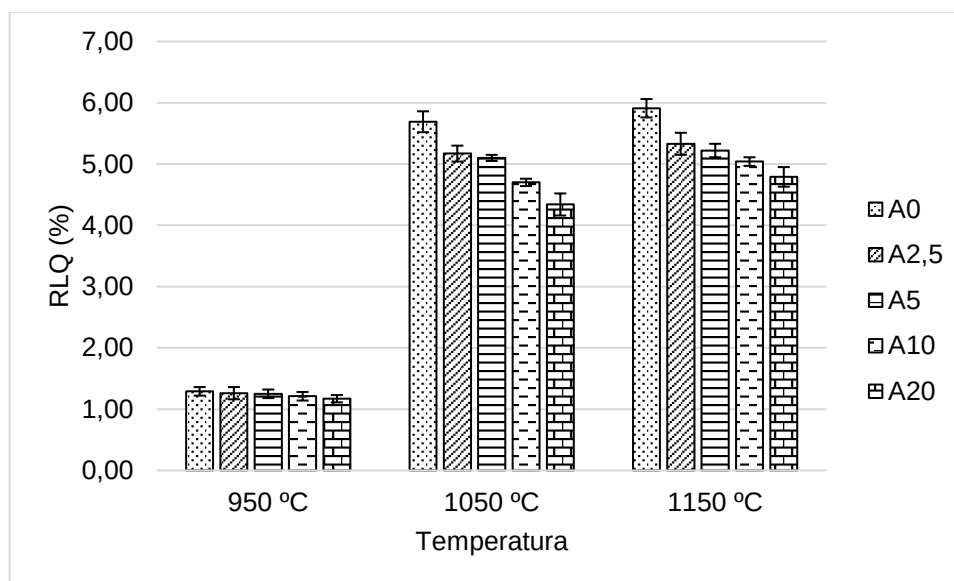
Com a elevação da temperatura de queima, ocorreu um aumento significativo da retração linear de queima nas demais temperaturas em relação à temperatura de 950 °C devido a um maior fechamento que ocorre nos poros dos corpos de prova, o que proporciona uma maior densificação da massa cerâmica. Desse modo, a formulação A0 apresentou os maiores valores de retração linear de queima. De forma geral, o desvio padrão na média dos corpos de prova foi pequeno, o que contribui para a estabilidade dimensional da peça cerâmica. A Tabela 13 e a Figura 36 mostram os resultados da retração de linear de queima dos corpos de prova.

Tabela 13 – Retração linear de queima

Temperatura	RLQ (%)				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
950 °C	1,29 ± 0,07	1,26 ± 0,10	1,25 ± 0,07	1,21 ± 0,07	1,17 ± 0,06
1050 °C	5,69 ± 0,17	5,17 ± 0,13	5,10 ± 0,05	4,70 ± 0,06	4,34 ± 0,18
1150 °C	5,91 ± 0,15	5,33 ± 0,18	5,22 ± 0,11	5,04 ± 0,07	4,79 ± 0,16

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 36 – Retração linear de queima dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.2.2 Perda ao fogo

A análise de perda ao fogo foi realizada com uma média de 5 corpos de prova para cada formulação e suas correspondentes temperaturas de queima. Com o aumento do teor de chamote para a mesma temperatura de queima, ocorre uma redução na perda ao fogo dos corpos de prova, pois o chamote é um material que já passou por um processo de queima anteriormente e, com isso, seus materiais constituintes já haviam sido submetidos às transformações de queima, como a perda de água livre e a carbonização da matéria orgânica, até a temperatura de aproximadamente 950 °C.

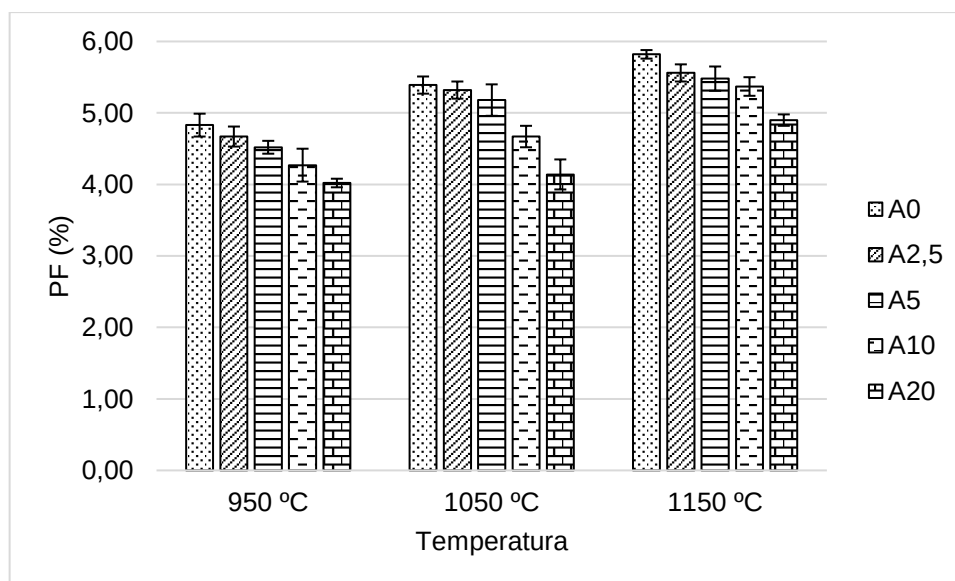
Com o aumento da temperatura de queima, também há um aumento na perda ao fogo, devido às demais transformações de queima que ocorrem nos corpos de prova, como a decomposição dos carbonatos presentes nas matérias-primas. A Tabela 14 e a Figura 37 apresentam os resultados da perda ao fogo dos corpos de prova.

Tabela 14 – Perda ao fogo

Temperatura	PF (%)				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
950 °C	4,83 ± 0,16	4,67 ± 0,14	4,52 ± 0,09	4,27 ± 0,23	4,02 ± 0,06
1050 °C	5,39 ± 0,12	5,32 ± 0,12	5,18 ± 0,22	4,67 ± 0,15	4,14 ± 0,21
1150 °C	5,82 ± 0,06	5,56 ± 0,12	5,48 ± 0,17	5,37 ± 0,13	4,90 ± 0,08

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 37 – Perda ao fogo dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.2.3 Absorção de água

A análise de absorção de água também foi realizada para uma média de 5 corpos de prova em cada formulação e suas respectivas temperaturas de queima. Houve um aumento na absorção de água, conforme aumentou-se o teor de chamote das amostras. Isso ocorre, pois o chamote apresenta uma granulometria mais grosseira em relação à massa argilosa, o que dificulta, durante a queima, o fechamento dos poros existentes na peça.

Na temperatura de 950 °C, os valores de absorção de água, apesar de aumentarem com o aumento do teor de chamote, apresentaram valores próximos, principalmente ao se considerar o desvio padrão das amostras. Esses valores foram próximos, devido ao chamote apresentar comportamento inerte nessa faixa de temperatura, em virtude desse material já ter passado por um processo de queima. Desse modo, esse resíduo desempenha uma influência mais significativa nas formulações de massa cerâmica, somente a partir de temperaturas de queima superiores a que ele havia sido queimado, como é o caso das temperaturas de 1050 °C e 1150 °C.

O aumento da temperatura de queima ocasionou uma redução significativa na absorção de água dos corpos de prova, a partir da temperatura de 1050 °C, visto que ocorreu uma maior densificação das amostras, por haver uma maior formação de fase líquida dos seus constituintes que penetram nos poros e ocasionam, conseqüentemente, uma redução nos números desses poros presentes nos interstícios dos corpos de prova.

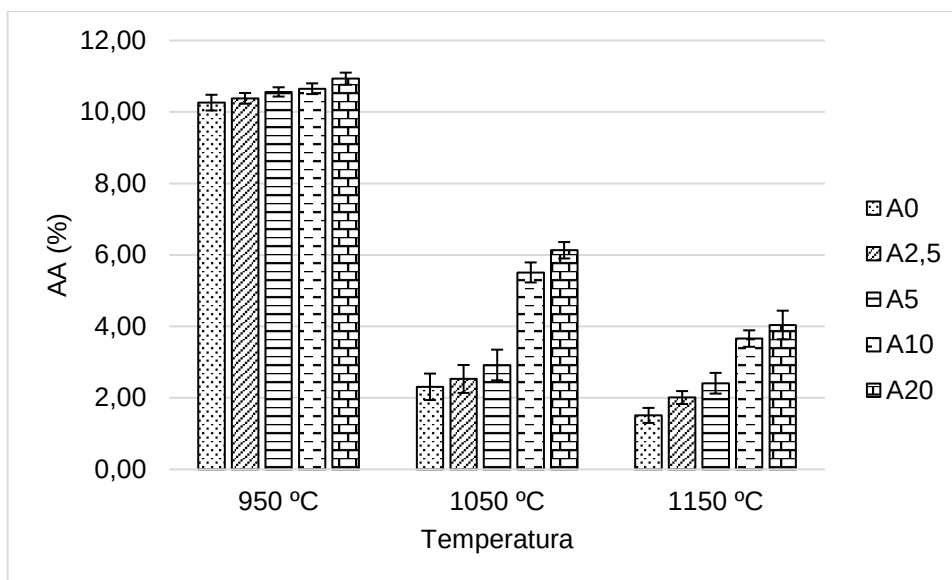
Dessa forma, entre as temperaturas de 950 °C e 1150 °C ocorreu uma elevada redução na absorção de água dos corpos de prova, especialmente na formulação A0, em que houve uma redução de aproximadamente 85%. A Tabela 15 e a Figura 38 apresentam os resultados obtidos no ensaio de absorção de água dos corpos de prova.

Tabela 15 – Absorção de água

Temperatura	AA (%)				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
950 °C	10,26 ± 0,22	10,38 ± 0,15	10,56 ± 0,13	10,65 ± 0,15	10,93 ± 0,17
1050 °C	2,31 ± 0,37	2,53 ± 0,39	2,92 ± 0,43	5,51 ± 0,28	6,13 ± 0,23
1150 °C	1,51 ± 0,21	2,01 ± 0,18	2,41 ± 0,29	3,66 ± 0,23	4,04 ± 0,40

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 38 – Absorção de água dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.2.4 Porosidade aparente

A porosidade aparente apresentou os menores valores na temperatura de 1150 °C e os maiores na temperatura de 950 °C, o que corrobora com o ensaio de absorção de água, pois essas propriedades possuem correlação direta, na qual quanto maior a quantidade de poros maior será a absorção de água. Na temperatura de 950 °C, assim como na absorção de água, a porosidade aparente apresentou elevados valores em comparação às demais temperaturas, devido também a menor formação de fase líquida que proporciona, em grande parte, o fechamento dos poros.

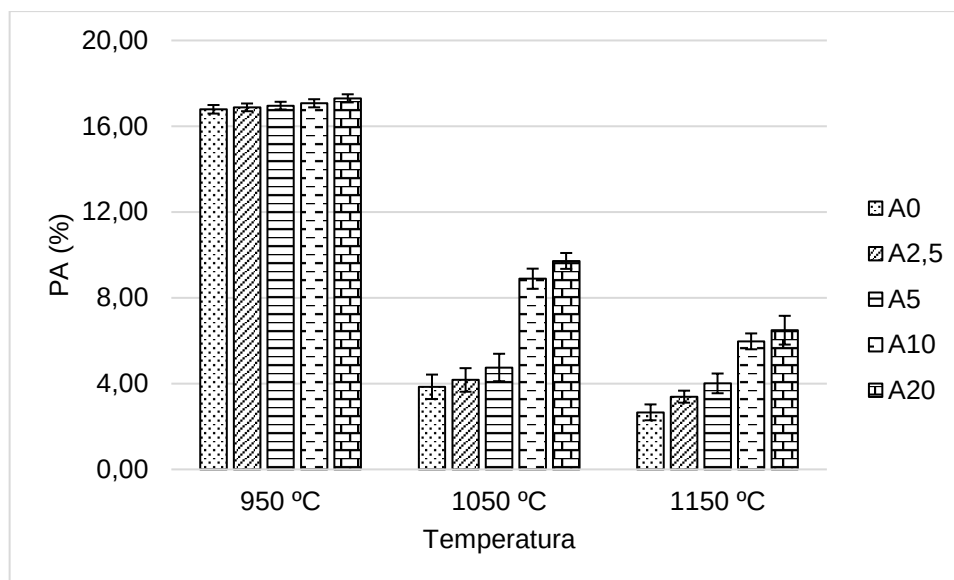
Assim, com o aumento da temperatura, houve uma redução significativa na porosidade aparente, devido a uma maior reação entre os constituintes da massa cerâmica, com a elevação da fase líquida, e posterior vitrificação da peça cerâmica, que contribuem para uma maior redução no número de poros dos corpos de prova. A Tabela 16 e a Figura 39 mostram os resultados da porosidade aparente das amostras.

Tabela 16 – Porosidade aparente

Temperatura	PA (%)				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
950 °C	16,79 ± 0,20	16,88 ± 0,18	16,96 ± 0,18	17,07 ± 0,19	17,30 ± 0,19
1050 °C	3,85 ± 0,57	4,17 ± 0,55	4,75 ± 0,64	8,89 ± 0,47	9,72 ± 0,37
1150 °C	2,66 ± 0,37	3,39 ± 0,28	4,01 ± 0,46	5,97 ± 0,37	6,49 ± 0,67

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 39 – Porosidade aparente dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.2.5 Massa específica aparente

Em relação à massa específica aparente, foi observado que quanto maior o teor de chamote, que possui uma granulometria mais grosseira, menor é o valor dessa propriedade tecnológica. Isso ocorre, pois a adição desse resíduo ocasiona um menor preenchimento dos poros e, conseqüentemente, uma menor densificação da massa cerâmica.

Com o aumento da temperatura de queima, há uma elevação dos valores da massa específica aparente dos corpos de prova, em virtude da maior vitrificação e densificação das peças. Esses valores mais elevados estão de acordo com os resultados obtidos na retração linear de queima, absorção de água e porosidade aparente, pois quanto maior a densidade do corpo cerâmico menor serão os espaços vazios ou poros presentes no seu interior.

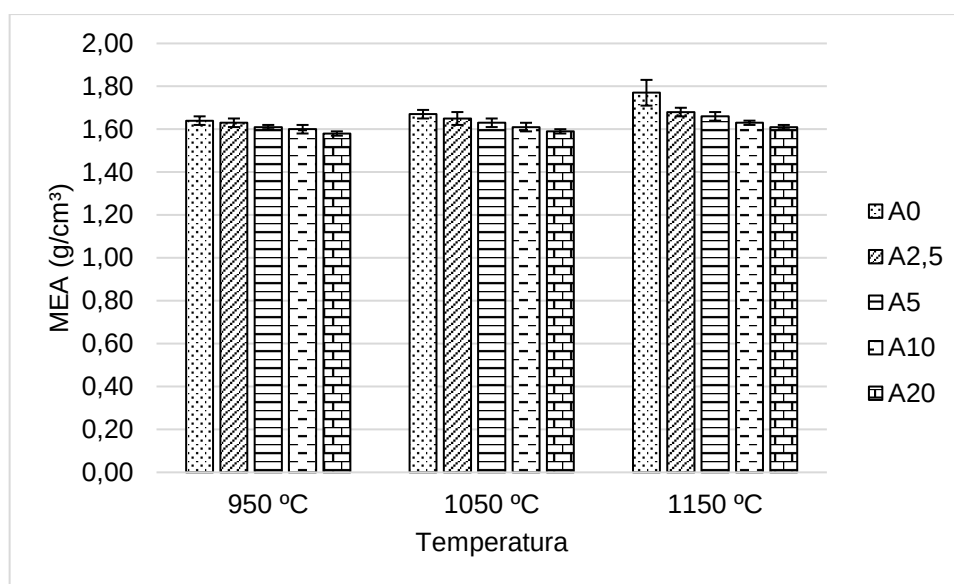
Na temperatura de 950 °C, a MEA apresentou valores próximos, considerando o desvio padrão da média, devido a uma menor formação de fase líquida na massa cerâmica, em comparação às temperaturas de 1050 °C e 1150 °C. Os maiores resultados obtidos ocorreram na temperatura de 1150 °C, visto que nesta temperatura a fase líquida torna-se ainda menos viscosa, o que facilita o preenchimento dos poros no interior da peça cerâmica e, conseqüentemente, a densificação dessa peça. A Tabela 17 e a Figura 40 apresentam os resultados da massa específica aparente dos corpos de prova.

Tabela 17 – Massa específica aparente

Temperatura	MEA (g/cm ³)				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
950 °C	1,64 ± 0,02	1,63 ± 0,02	1,61 ± 0,01	1,60 ± 0,02	1,58 ± 0,01
1050 °C	1,67 ± 0,02	1,65 ± 0,03	1,63 ± 0,02	1,61 ± 0,02	1,59 ± 0,01
1150 °C	1,77 ± 0,06	1,68 ± 0,02	1,66 ± 0,02	1,63 ± 0,01	1,61 ± 0,01

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 40 – Massa específica aparente dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.2.6 Resistência à compressão

O aumento da quantidade de chamote acarretou uma redução na resistência à compressão dos corpos de prova, por haver um maior número de poros e uma menor densificação das peças, conforme aumentou-se o teor desse resíduo. Na temperatura de 950 °C, os valores de resistência à compressão, apesar de diminuírem com o aumento do teor de chamote, apresentaram valores muito próximos, especialmente quando se considera o desvio padrão das amostras.

Com o aumento da temperatura de queima, houve um elevado aumento na resistência à compressão dos corpos de prova, pois nessas maiores temperaturas, ocorre uma grande redução no número de poros e um elevado aumento na densificação da massa cerâmica como mostrado nos ensaios de absorção de água, porosidade aparente e massa específica aparente. Isso ocorre também devido às transformações de fase durante a queima em temperaturas elevadas, com o

surgimento, por exemplo, das fases cristalinas, espinélio (MgAl_2O_4) e mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$).

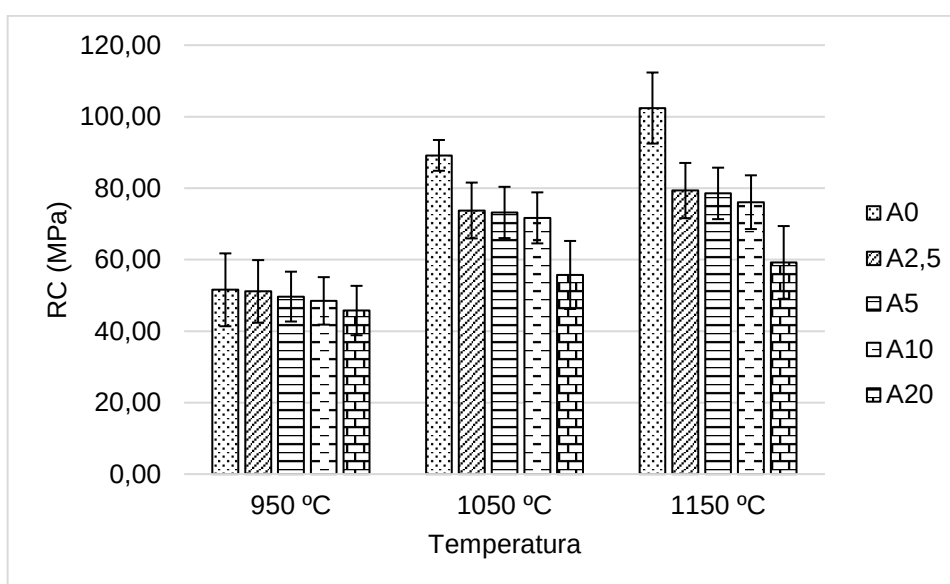
A formação dessas novas fases cristalinas justifica o elevado acréscimo de resistência à compressão, especialmente na formulação A0 na temperatura de 1150 °C, que foi a única formulação que apresentou a formação da fase cristalina mulita. Na formulação A0 esse acréscimo de resistência foi de praticamente 100% entre as temperaturas de 950 °C e 1150 °C. A Tabela 18 e a Figura 41 apresentam os resultados da resistência à compressão dos corpos de prova.

Tabela 18 – Resistência à compressão

Temperatura	RC (MPa)				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
950 °C	51,56 ± 10,19	51,11 ± 8,76	49,66 ± 6,97	48,46 ± 6,64	45,76 ± 6,91
1050 °C	89,17 ± 4,31	73,75 ± 7,81	73,20 ± 7,17	71,68 ± 7,14	55,71 ± 9,52
1150 °C	102,41 ± 9,94	79,32 ± 7,73	78,53 ± 7,20	76,07 ± 7,52	59,22 ± 10,17

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 41 – Resistência à compressão dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.2.7 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão dos corpos de prova, determinada por meio do cálculo do índice de abrasão, diminuiu conforme houve aumento do teor de chamote, pois quanto maior o índice de abrasão, mais ocorre desgaste superficial nos corpos de prova. Na temperatura de 950 °C, o índice de abrasão apresentou valores muito

próximos, principalmente ao se considerar o desvio padrão da média, assim como foi observado nos ensaios de absorção de água e de resistência à compressão.

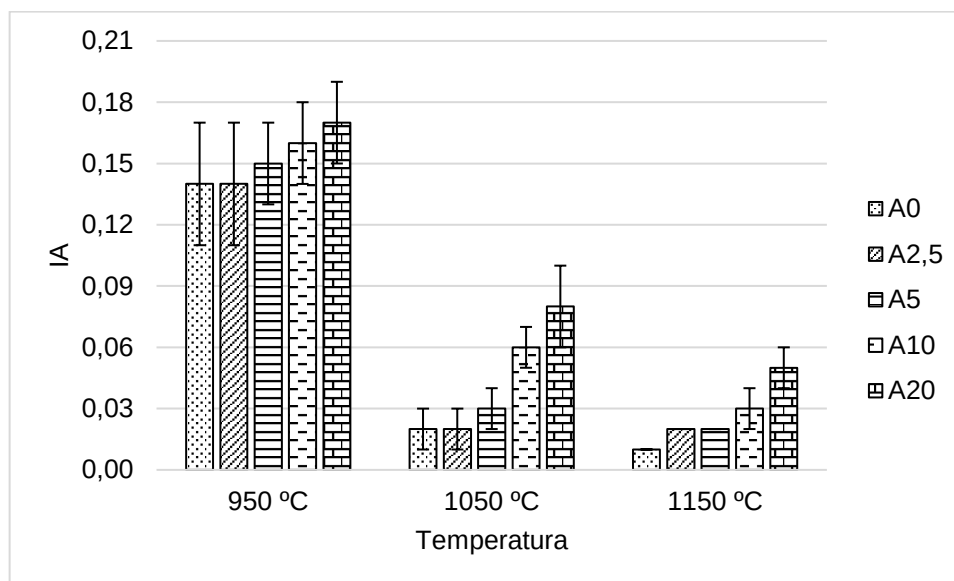
Com o aumento da temperatura de queima, o índice de abrasão foi reduzido, devido a menor absorção de água e a maior resistência à compressão que os corpos de prova apresentaram nas temperaturas mais elevadas, o que torna a massa cerâmica mais resistente a desgastes desse tipo. A Tabela 19 e a Figura 42 mostram os resultados do índice de abrasão dos corpos de prova.

Tabela 19 – Índice de abrasão

Temperatura	IA				
	Formulação				
	A0	A2,5	A5	A10	A20
950 °C	0,14 ± 0,03	0,14 ± 0,03	0,15 ± 0,02	0,16 ± 0,02	0,17 ± 0,02
1050 °C	0,02 ± 0,01	0,02 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,08 ± 0,02
1150 °C	0,01 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,02 ± 0,00	0,03 ± 0,01	0,05 ± 0,01

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Figura 42 – Índice de abrasão dos corpos de prova



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA

Os adoquins coletados na indústria cerâmica foram conformados por extrusão e queimados em uma temperatura de aproximadamente 950 °C. As propriedades tecnológicas dos adoquins foram determinadas para uma média de 5 unidades. Em relação a essas propriedades, os corpos de prova produzidos no laboratório, inclusive os da formulação A20, apresentaram melhores resultados em relação aos adoquins

coletados na indústria. Isso ocorreu devido, principalmente, à forma de produção, pois as amostras feitas no laboratório foram produzidas por prensagem, o que garantiu um melhor empacotamento das partículas e a consequente redução dos poros da massa cerâmica quando os corpos de prova passaram pelo processo de queima. A Tabela 20 apresenta os resultados das propriedades tecnológicas dos adoquins coletados na indústria.

Tabela 20 – Propriedades tecnológicas dos adoquins

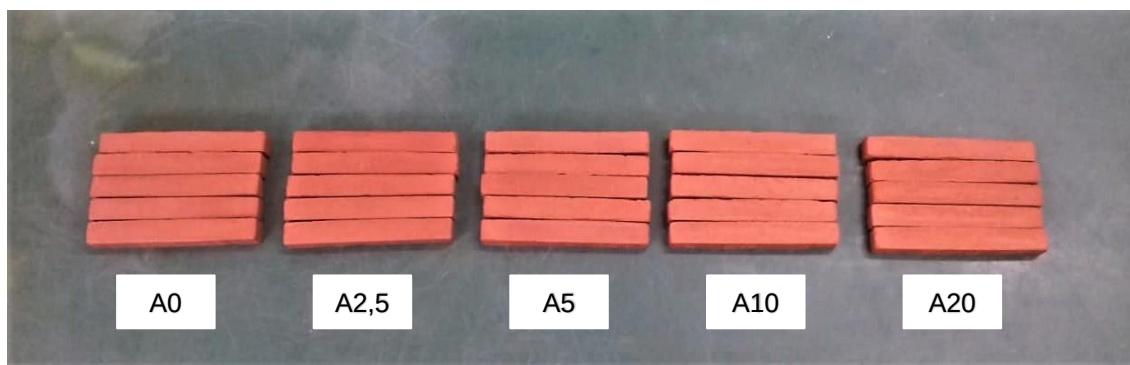
Propriedades tecnológicas	Valor médio
AA (%)	$12,35 \pm 0,34$
PA (%)	$19,25 \pm 0,35$
MEA (g/cm ³)	$1,56 \pm 0,03$
RC (MPa)	$43,36 \pm 4,20$
IA	$0,20 \pm 0,02$

Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.4 ANÁLISE MACROESTRUTURAL

Nos corpos de prova queimados a 950 °C foi observada uma queima uniforme em todas as formulações, com suas superfícies apresentando uma cor mais clara em relação às demais temperaturas. Apesar da adição de chamote, não houve presença de defeitos significativos e também não ocorreu o comprometimento estético dos corpos de prova. A Figura 43 apresenta os corpos de prova após serem queimados a 950 °C.

Figura 43 – Corpos de prova queimados a 950 °C

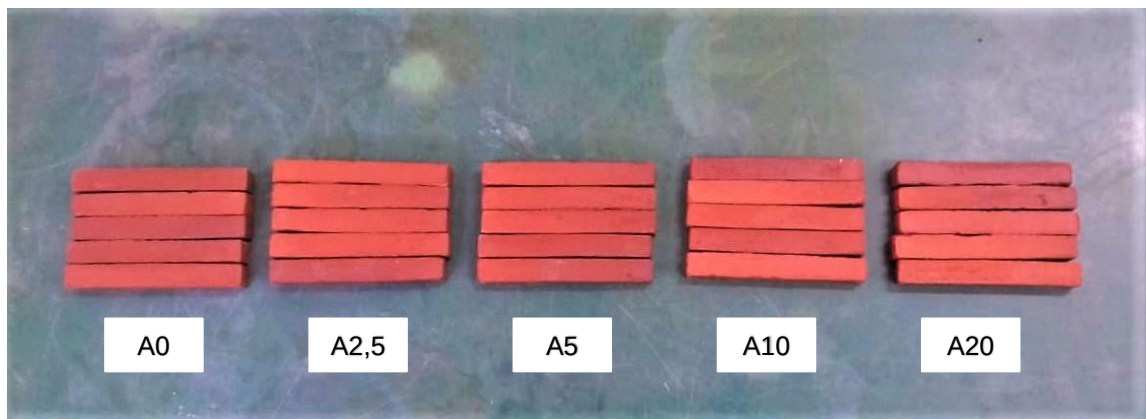


Fonte: dados da pesquisa (2019).

Nos corpos de prova queimados a 1050 °C também houve uma queima uniforme nas cinco formulações, com suas superfícies apresentando uma cor mais

escura, devido a uma temperatura de queima maior em relação à temperatura de 950 °C. Com uma temperatura mais elevada, há uma maior degradação dos constituintes dos corpos de prova, tornando essas superfícies mais escuras. Apesar disso, a queima e a adição de chamote não ocasionaram a presença significativa de defeitos e também não afetaram a estética das amostras. A Figura 44 mostra os corpos de prova após serem queimados a 1050 °C.

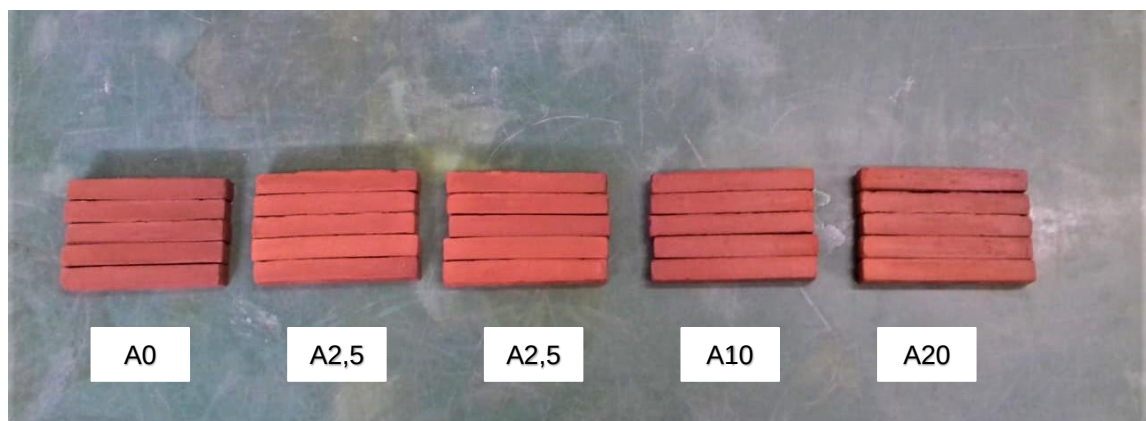
Figura 44 – Corpos de prova queimados a 1050 °C



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Na queima dos corpos de prova a 1150 °C, percebe-se uma coloração ainda mais escura, em comparação com os corpos de prova queimados nas temperaturas inferiores. Para argilas vermelhas, essa temperatura é próxima do ponto de fusão do material, o que ocasiona uma degradação intensa dos constituintes da amostra. Apesar da elevada temperatura e da adição de chamote, a estética também não foi prejudicada de forma significativa. A diferença básica em relação aos corpos de prova queimados em temperaturas inferiores foi basicamente a coloração mais escura. A Figura 45 apresenta os corpos de prova após serem queimados a 1150 °C.

Figura 45 – Corpos de prova queimados a 1150 °C



Fonte: dados da pesquisa (2019).

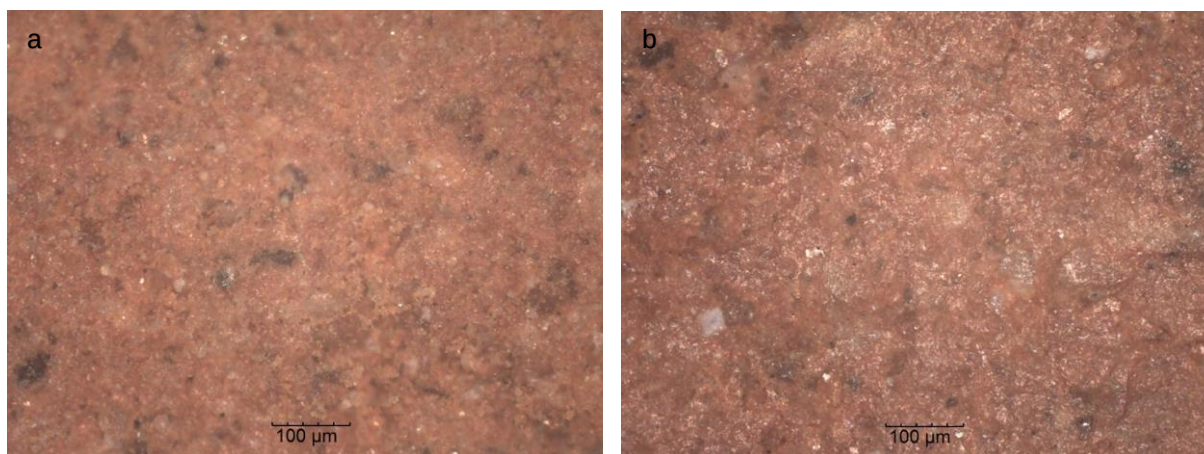
4.5 ANÁLISE MICROESTRUTURAL

4.5.1 Microscopia óptica

A análise de microscopia óptica foi realizada para os corpos de prova queimados nas formulações A0 e A20, nas temperaturas de 950 °C, 1050 °C e 1150 °C, com uma ampliação de 100 vezes. Na temperatura de 950 °C, os corpos de prova apresentaram uma coloração mais clara em relação às demais temperaturas, assim como foi observado na análise macroestrutural, com menor formação de fase vítrea, o que indica uma sinterização menos acentuada.

A formulação A0 apresentou menos poros e defeitos em relação à formulação A20, pois o chamote presente nessa formulação, por possuir uma granulometria mais grosseira que a massa argilosa, dificultou a sinterização do corpo de prova. A Figura 46 apresenta as imagens do microscópio óptico das formulações A0 e A20 na temperatura de 950 °C.

Figura 46 – Imagens do microscópio óptico das formulações A0 (a) e A20 (b) na temperatura de 950 °C



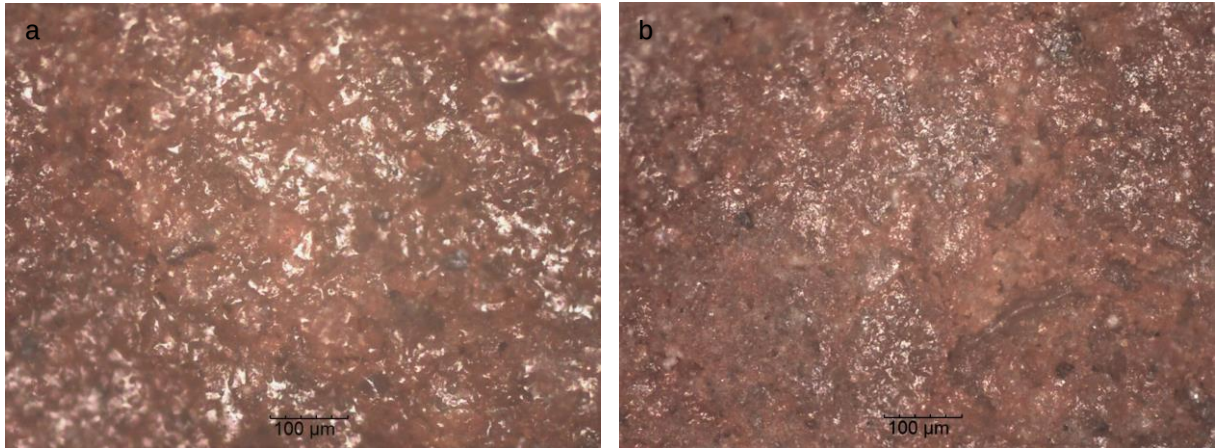
Fonte: dados da pesquisa (2019).

Na temperatura de 1050 °C, os corpos de prova apresentaram uma coloração mais escura em relação à temperatura anterior, devido a maior sinterização dos seus constituintes. Houve também uma maior formação de fase vítrea, acompanhada da redução no número de poros, especialmente na formulação A0, pois na formulação A20 há a presença de chamote que dificulta a vitrificação da massa.

A formulação A0 também apresentou um menor número de defeitos em relação à formulação A20, pois houve uma queima mais uniforme dessa formulação, por não haver presença de chamote, que torna a granulometria da massa cerâmica mais

grosseira. A Figura 47 mostra as imagens do microscópio óptico das formulações A0 e A20 na temperatura de 1050 °C.

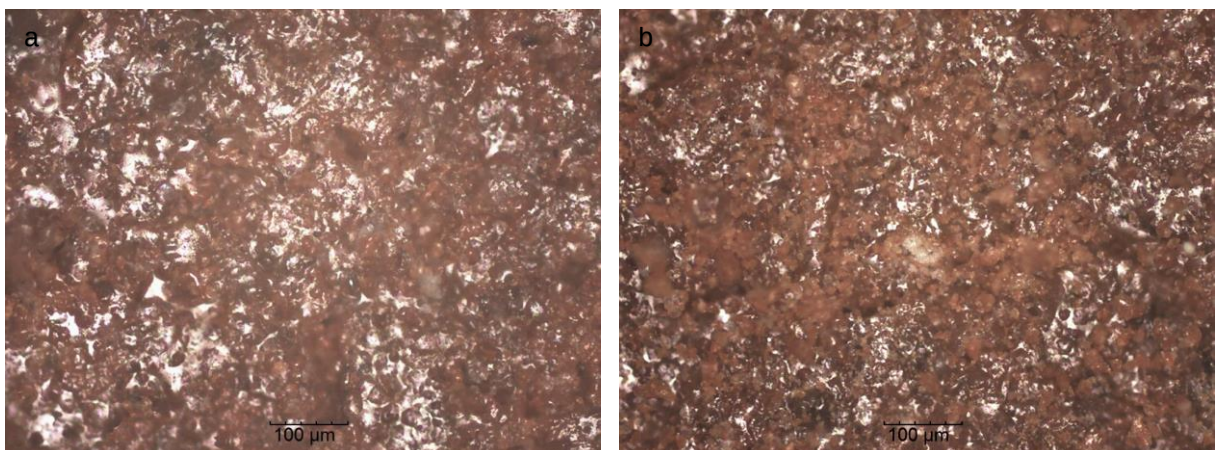
Figura 47 – Imagens do microscópio óptico das formulações A0 (a) e A20 (b) na temperatura de 1050 °C



Fonte: dados da pesquisa (2019).

Na temperatura de 1150 °C, a coloração dos corpos de prova ficou ainda mais escura, devido à elevação da temperatura e a maior sinterização dos constituintes da massa cerâmica. A formação de fase vítrea também aumentou em relação às demais temperaturas, principalmente na formulação A0, devido ao chamote presente na formulação A20 que também dificulta a vitrificação nessa temperatura. As formulações apresentaram uma redução ainda mais significativa na quantidade de poros e também não surgiram defeitos significativos, especialmente na formulação A0. A Figura 48 apresenta as imagens do microscópio óptico das formulações A0 e A20 na temperatura de 1150 °C.

Figura 48 – Imagens do microscópio óptico das formulações A0 (a) e A20 (b) na temperatura de 1150 °C



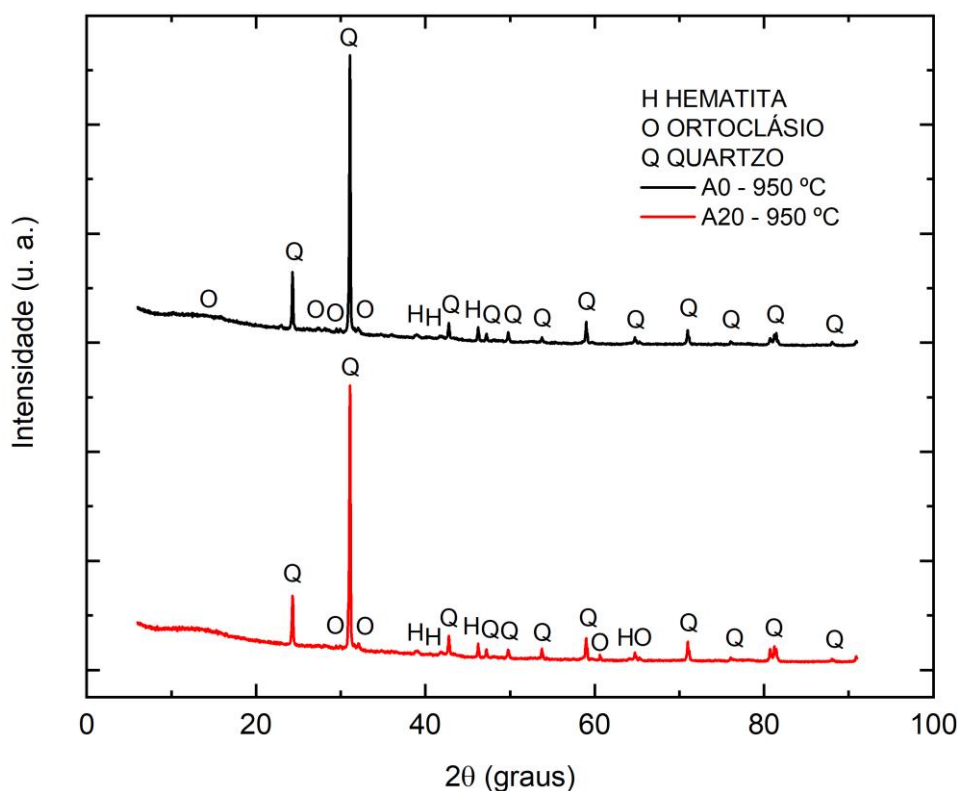
Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.5.2 Difração de raios X

A análise mineralógica foi realizada nos corpos de prova queimados das formulações A0 e A20, que foram as formulações que apresentaram os melhores e os piores resultados, respectivamente, nas temperaturas de 950 °C, 1050 °C e 1150 °C. Na análise mineralógica das formulações A0 e A20 a 950 °C foram identificados picos de difração das mesmas fases cristalinas, sendo elas a hematita (Fe_2O_3), o ortoclásio (KAlSi_3O_8) e o quartzo (SiO_2). Isso ocorre, pois o chamote presente na formulação A20 apresenta-se como inerte, por já ter sido queimado a aproximadamente 950 °C. Com isso, ocorreram pequenas mudanças nas fases identificadas.

A temperatura de 950 °C foi a única que apresentou ortoclásio o que justifica a maior AA e os menores valores de RLQ e RC. Nessa temperatura, o potássio presente no ortoclásio não fundiu totalmente, agindo, dessa forma, como material inerte. Dessa forma, não houve contribuição efetiva na formação de fase líquida que é responsável pelo adensamento da peça. A Figura 49 apresenta a análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 950 °C.

Figura 49 – Análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 950 °C



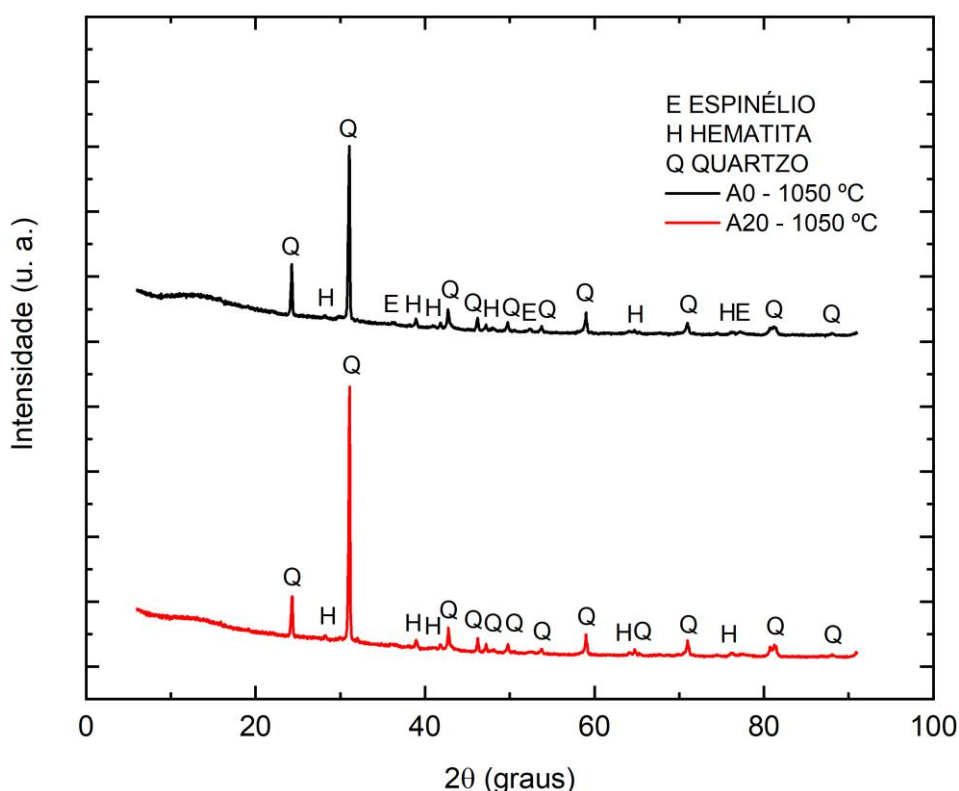
Fonte: dados da pesquisa (2019).

Na temperatura de 1050 °C, por sua vez, houve uma mudança mais significativa nas fases cristalinas identificadas entre as formulações A0 e A20, havendo o

desaparecimento da fase cristalina ortoclásio (KAlSi_3O_8), que indica a fusão e, consequente, formação de fase líquida do potássio, em ambas as formulações e o surgimento da fase cristalina espinélio (MgAl_2O_4) somente na formulação A0. Essa maior formação de fase líquida, ocasiona redução na absorção de água e aumento na resistência mecânica dos corpos de prova, como foi verificado nos resultados de AA e RC.

Na formulação A20, não houve a formação de espinélio devido ao chamote que, por ser um material que já havia passado por um processo de queima, dificulta a formação de fase líquida dos óxidos de magnésio e alumínio e, consequentemente, a reação e a fusão entre os constituintes da massa cerâmica, impedindo, assim, a formação dessa nova fase cristalina. A Figura 50 mostra a análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 1050 °C.

Figura 50 – Análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 1050 °C



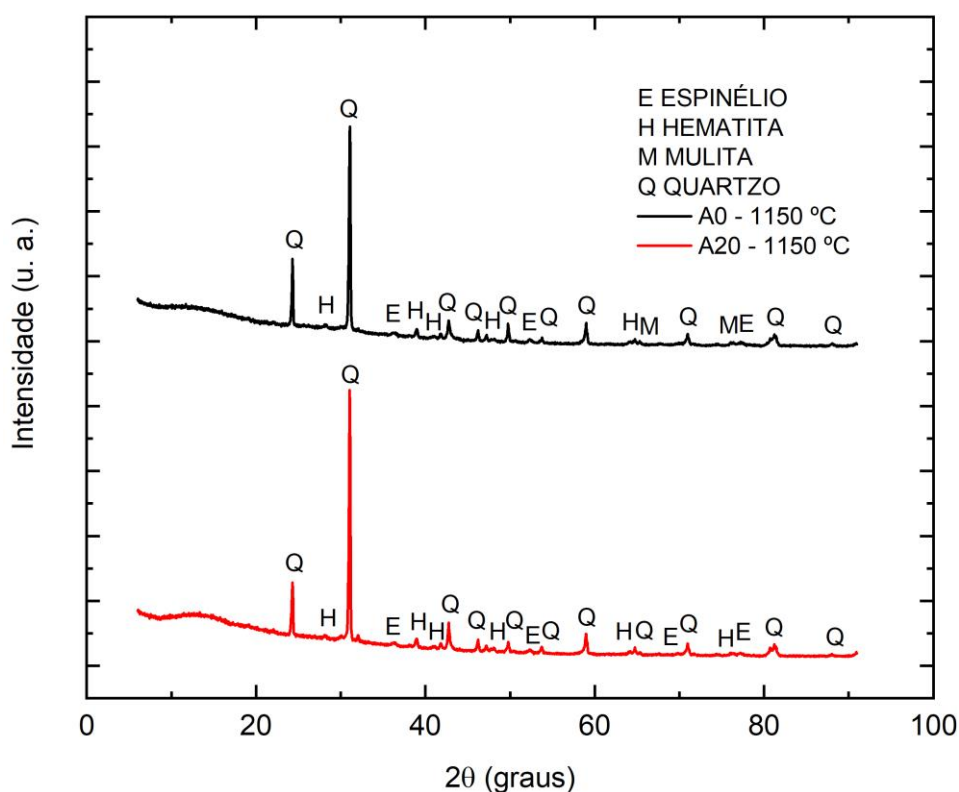
Fonte: dados da pesquisa (2019).

Com o aumento da temperatura até alcançar a temperatura de 1150 °C, houve a formação de uma nova fase cristalina na formulação A0, a mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$). Essa fase não foi identificada na formulação A20, pois o chamote dificultou a reação entre os óxidos de silício e de alumínio. Contudo, assim como na formulação A0, houve formação de espinélio na formulação A20, que devido à elevação de temperatura,

possibilitou uma maior formação de fase líquida dos óxidos, facilitando, assim, uma maior reação entre os constituintes da massa, entre eles, os óxidos de magnésio e de alumínio.

A fase líquida ao ser formada, preenche os vazios microestruturais da massa cerâmica, auxilia na densificação, reduz a porosidade com o processo de vitrificação e, conseqüentemente, diminui a absorção de água e aumenta a resistência à compressão dos corpos de prova. A Figura 51 apresenta a análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 1150 °C.

Figura 51 – Análise de difração de raios X das formulações A0 e A20 na temperatura de 1150 °C



Fonte: dados da pesquisa (2019).

4.6 VERIFICAÇÃO QUANTO AO PRECONIZADO PELAS NORMAS

As formulações dos corpos de prova e de suas respectivas temperaturas de queima só foram consideradas dentro do recomendado pelas normas técnicas, quando houve atendimento simultâneo das propriedades de absorção de água, resistência à compressão e resistência à abrasão. Em relação à norma ASTM C902 (2015), considerou-se as classificações com maior exigência nessa norma, que são a classe SX que indica que o pavimento está sujeito ao congelamento e o tipo I no qual

o piso está sujeito à alta abrasão. No que se refere à norma ICONTEC NTC 3829 (2004) também foram consideradas as especificações técnicas relativas ao tipo I. A Tabela 21 mostra o atendimento ou não das especificações dos corpos de prova em relação às normas técnicas que tratam sobre a utilização do adoquim em passeios e em tráfego veicular leve.

Tabela 21 – Verificação das propriedades tecnológicas em relação às normas técnicas ASTM C902 (2015) e ICONTEC NTC 3829 (2004)

Norma	Temperatura	Formulação				
		A0	A2,5	A5	A10	A20
ASTM C902	950 °C	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
	1050 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	1150 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
NTC 3829	950 °C	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
	1050 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende
	1150 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Atende

Fonte: dados da pesquisa (2019).

No que diz respeito às normas ASTM C1272 (2017) e ICONTEC NTC 5282 (2004) foi levado em consideração as especificações técnicas do tipo F, que são relativas a pavimentos flexíveis. A Tabela 22 mostra o atendimento ou não das especificações dos corpos de prova em relação às normas técnicas que abordam sobre a utilização do adoquim em regiões de tráfego veicular pesado, calçadas comerciais e aplicações industriais.

Tabela 22 – Verificação das propriedades tecnológicas em relação às normas técnicas ASTM C1272 (2017) e ICONTEC NTC 5282 (2004)

Norma	Temperatura	Formulação				
		A0	A2,5	A5	A10	A20
ASTM C1272	950 °C	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
	1050 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Não atende
	1150 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Não atende
NTC 5282	950 °C	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende	Não atende
	1050 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Não atende
	1150 °C	Atende	Atende	Atende	Atende	Não atende

Fonte: dados da pesquisa (2019).

Conforme as normas ASTM C902 (2015) e ICONTEC NTC 3829 (2004), os corpos de prova das formulações só atendem aos requisitos para serem utilizados em passeios e em tráfego veicular leve, a partir da temperatura de 1050 °C. Na

temperatura de 950 °C, nenhuma formulação atendeu a todos os parâmetros, considerando a classe SX e o tipo I, exigidos por essas normas técnicas.

Em relação às normas ASTM C1272 (2017) e ICONTEC NTC 5282 (2004), os corpos de prova só atenderam as especificações para utilização em regiões de tráfego veicular pesado, calçadas comerciais e aplicações industriais a partir da temperatura de 1050 °C, com exceção da formulação A20 que não atendeu às especificações técnicas exigidas para o pavimento do tipo flexível. Caso o pavimento intertravado seja classificado como rígido, a formulação A20 atende às especificações na temperatura de 1150 °C.

Ainda conforme norma ASTM C902 (2015), se forem consideradas a classe MX que indica pavimento destinado ao uso externo, onde a resistência ao congelamento não é um fator e o tipo II no qual o piso está sujeito à abrasão intermediária, os corpos de prova atendem às especificações técnicas a partir da temperatura de 950 °C. Em relação à norma ICONTEC NTC 3829 (2004) caso seja considerado o tipo II, as especificações também são atendidas a partir de 950 °C.

5 CONCLUSÃO

A caracterização das matérias-primas por meio das análises química e mineralógica mostraram que tanto a massa argilosa como o chamote apresentam óxidos e minerais propícios para a fabricação de adoquins. A análise térmica mostrou que o chamote apresenta menor perda de massa, por ter sido submetido a um processo de queima anteriormente, além de eventos térmicos semelhantes, pois a massa argilosa e o chamote possuem composições químicas e mineralógicas similares.

A adição de chamote nas formulações das massas cerâmicas ocasionou melhoria em algumas propriedades tecnológicas, como a retração linear de secagem e de queima e a perda ao fogo. Nas demais propriedades, não houve prejuízo significativo com a incorporação desse resíduo na massa cerâmica. Isso mostra que essa adição é benéfica, pois além de melhorar algumas propriedades, se reduz a quantidade de massa argilosa a ser utilizada na fabricação do piso intertravado cerâmico, o que proporciona a redução de custos.

Em relação à temperatura de queima, conforme aumentou-se a temperatura, apesar de haver aumento na retração linear de queima e na perda ao fogo, essas propriedades apresentaram valores em níveis adequados. Nas demais propriedades tecnológicas dos corpos de prova ocorreram melhorias significativas, que são benéficas, pois tornam o piso intertravado cerâmico mais resistente e durável, sem afetar de forma considerável a estética, gerando, assim, a valorização econômica e o aumento das potencialidades de utilização desse produto.

As propriedades tecnológicas dos corpos de prova, para utilização em passeios e em tráfegos de veículos leves, foram atendidas em relação às normas técnicas americanas e colombianas em todas as formulações, a partir da temperatura de 1050 °C. Em relação ao tráfego de veículos pesados, calçadas comerciais e aplicações industriais, os corpos de prova também só atenderam às especificações técnicas a partir da temperatura de 1050 °C, exceto a formulação A20, que não atendeu às especificações para esse tipo de utilização em nenhuma temperatura de queima.

Desse modo, conforme os resultados encontrados, a partir da temperatura de 1050 °C e as respectivas formulações, com exceção da formulação A20, se torna mais adequada a utilização do adoquim nas diversas utilizações que ele possui, devido ao ganho econômico e ao atendimento às normas técnicas. Na medida em que se utiliza

uma menor temperatura de queima, ocorre uma redução nos custos de fabricação da peça cerâmica.

Conclui-se, assim, que é viável a adição de chamote como matéria-prima alternativa na produção de adoquim, pois o chamote é um resíduo que gera redução no impacto ambiental, sem influenciar de forma expressiva nas propriedades tecnológicas do piso intertravado cerâmico. Desse modo, mantém-se a durabilidade do produto, nas variadas formas de utilização em que ele é aplicado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Adicionar outros tipos de aditivos, fundentes ou resíduos, para analisar a influência nas propriedades tecnológicas e microestruturais do adoquim;
- Adotar outras pressões de conformação na prensagem para a obtenção da pressão de conformação ideal;
- Realizar estudo de viabilidade econômica na fabricação do piso intertravado cerâmico.

REFERÊNCIAS

AL-FAKIH, A. *et al.* Incorporation of waste materials in the manufacture of masonry bricks: an update review. **Journal of Building Engineering**, v. 21, p. 37-54, 2019.

ALMEIDA, K. S.; SOARES, R. A. L.; MOURA, C. S. Análise dos impactos ambientais gerados pela indústria de cerâmica vermelha no Piauí. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 5, p. 33-34, set./out. 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C67**: sampling and testing brick and structural clay tile. ASTM, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C373**: standard test methods for determination of water absorption and associated properties by vacuum method for pressed ceramic tiles and glass tiles and boil method for extruded ceramic tiles and non-tile fired ceramic whiteware products. ASTM, 2018.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C902**: pedestrian and light traffic paving brick. ASTM, 2015.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1272**: heavy vehicular paving brick. ASTM, 2017.

ARAÚJO, I. O. *et al.* Caracterização química de caulins de Junco do Seridó-PB. **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 2, p. 36-38, mar./abr. 2012.

ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE NORMALIZACIÓN Y CERTIFICACIÓN. **AENOR UNE – EN 1344**. Adoquines de arcilla cocida. Especificaciones y métodos de ensayo. Madrid: AENOR, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de pavimento intertravado: passeio público**. São Paulo: ABCP, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6459**: solo: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6592**: rochas e solos. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7180**: solo: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7181**: solo: análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9781**: peças de concreto para pavimentação: especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004**: resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10006**: procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15953**: pavimento intertravado com peças de concreto: execução. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BISCARO, E. *et al.* O efeito da natureza dos caulins sobre a transparência de esmaltes de revestimentos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 17, n. 2, p. 15-19, mar./abr. 2012.

BRAGA, W. A.; SANTOS, M. W. L. C.; SALES, J. C. Qualidade na indústria de cerâmica vermelha: medidas e alternativas para o controle dimensional. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 5, p. 40-43, set./dez. 2016.

BRITO, I. P. *et al.* Avaliação de novos depósitos de argilas do Estado da Paraíba visando sua aplicação como matérias-primas cerâmicas. **Cerâmica**, v. 61, n. 360, p. 391-398, out./dez. 2015.

CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: parte I – introdução e a indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 1, p. 20-34, jan./mar. 2019a.

CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: parte II – indústria de revestimentos. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 2, p. 13-21, abr./jun. 2019b.

CABRAL JUNIOR, M. *et al.* Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no estado de São Paulo: parte III – indústrias de colorifícios, sanitários e cerâmica técnica - isoladores. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 3, p. 15-26, jul./set. 2019c.

CABRAL JUNIOR, M.; AZEVEDO, P. B. M. Potencial técnico e econômico do aproveitamento de resíduos da indústria de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 22, n. 3, p. 29-38, mai./jun. 2017.

CANDIDO, V. S. *et al.* Desenvolvimento de adoquim cerâmico com argilas caulínicas, chamote e argilito. **Cerâmica**, v. 59, n. 350, p. 310-316, abr./jun. 2013.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

CARVALHO, J. P. R. G. *et al.* Development of ceramic paver with ornamental rock waste. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 8, n. 1, p. 599-608, jan./mar. 2019.

CARVALHO, R. A. *et al.* Utilização de resíduos de corpos de prova de concreto para fabricação de pavimentação intertravada. **Revista InterScientia**, v. 6, n. 2, p. 12-29, 2018.

CASTRO, R. J. S. *et al.* Estudo do efeito do feldspato e resíduo de caulim na produção de revestimento cerâmico. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 1, p. 30-36, jan./fev. 2015.

CASTRO, R. J. S.; SOARES, R. A. L.; NASCIMENTO, R. M. Produção de revestimento cerâmico semi-poroso com adição de chamote de telhas. **Matéria**, v. 17, n. 4, p. 1166-1175, 2012.

COLETTI, C. *et al.* Recycling trachyte waste from the quarry to the brick industry: effects on physical and mechanical properties, and durability of new bricks. **Construction and Building Materials**, v. 166, p. 792-807, 2018.

CORRÊA, K. T. P. A.; VASCONCELOS, A. M. Análise da capacidade do processo de secagem em uma cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 5, p. 40-44, set./dez. 2015.

COTA, T. G. *et al.* Incorporation of waste from ferromanganese alloy manufacture and soapstone powder in red ceramic production. **Applied Clay Science**, v. 161, p. 274-281, 2018.

FERNANDES, I. V.; MENDONÇA, A. M. G. D. Aproveitamento de sobras da serragem de mármore para produção de pisos intertravados. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 2084-2100, 2020.

FERREIRA, D. S. *et al.* Estudo da potencialidade da produção de adoquim com massa cerâmica utilizada em telhas prensadas. **Cerâmica Industrial**, v. 24, n. 1, p. 40-46, jan./mar. 2019.

FINKLER, M. *et al.* Aditivo surfactante de fonte renovável para redução do consumo energético na extrusão de massas de cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 64, n. 371, p. 373-380, jul./set. 2018.

FREITAS, C. S. R. *et al.* Influência de diferentes processos de conformação nas características finais de produtos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 14, n. 3, p. 15-18, mai./jun. 2009.

HENGL, H. L. *et al.* Horizontal deformation resistance of paving block superstructures - influence of paving block type, laying pattern, and joint behaviour. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v.11, n.8, p. 846-860, 2018.

GARCIA SOBRINHO, R. A.; DIAS, J. F. Estudo da variação de propriedades de blocos cerâmicos de vedação conforme a variação da posição de queima, na vertical, em fornos do tipo abóboda de chama invertida. **Cerâmica Industrial**, v. 23, n. 2, p. 31-35, abr./jun. 2018.

HENRIQUES JUNIOR, M. F.; SCHWOB, M. R. V.; RODRIGUES, J. A. P. **Manual de fornos eficientes para a indústria de cerâmica vermelha**. 2. ed. Rio de Janeiro: INT/MCTI, 2015.

HOFFMANN, F. S.; SANTOS, G.; MORELLI, M. R. Estudo de fundente e argilito com potencial para uso em formulações de porcelanato. **Cerâmica**, v. 58, n. 346, p. 174-185, abr./jun. 2012.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. **ICONTEC NTC 3829**: adoquín de arcilla para tránsito peatonal y vehicular liviano. Bogotá: ICONTEC, 2004.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. **ICONTEC NTC 5282**: adoquín de arcilla para tráfico vehicular pesado. Bogotá: ICONTEC, 2004.

LIMBACHIYA, V.; GANJIAN, E.; CLAISSE, P. Strength, durability and leaching properties of concrete paving blocks incorporating GGBS and SF. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 273-279, 2016.

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

LOPES, R. C.; BACARJI, E. Pisos intertravados com a incorporação de resíduos minerais. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 9, n. 1, p. 22-36, 2014.

MALPESA. **Ladrillo Cara Vista y Adoquín Cerámico**. Bailén: Malpesa, 2015.

MURUGAN, R. B.; NATARAJAN, C.; CHEN, S. Material development for a sustainable precast concrete block pavement. **Journal of Traffic and Transportation Engineering**, v. 3, n. 5, p. 483-491, 2016.

NANDI, V. S. *et al.* Adição de vidro reciclado de lâmpadas na fabricação de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 5, p. 29-32, set./dez. 2014.

NANDI, V. S. *et al.* Estudo do comportamento energético em forno túnel de cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 5, p. 30-39, set./dez. 2015.

OLIVEIRA, Y. L. *et al.* Estudo da reutilização de resíduos de telha cerâmica (chamote) em formulação de massa para blocos cerâmicos. **Cerâmica Industrial**, v. 21, n. 2, p. 45-50, mar./abr. 2016.

RÊGO, V. R.; SOARES, R. A. L. Avaliação do processo produtivo e das propriedades tecnológicas de blocos cerâmicos produzidos na região da grande Teresina. **Cerâmica Industrial**, v. 20, n. 3, p. 42-45, mai./jun. 2015.

RODRIGUES, J. A. P. *et al.* **Cerâmica vermelha – projeto EELA no Brasil**. Rio de Janeiro: INT/MCTI, 2017.

SANTOS, P. S. **Ciência e Tecnologia de Argilas**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1989. v. 1.

SANTOS, R. C. *et al.* Interação entre características de argilas e parâmetros de processamento sobre propriedades tecnológicas de corpos cerâmicos. **Cerâmica**, v. 63, n. 367, p. 361-368, jul./set. 2017.

SILVA, A. C. *et al.* Análise de viabilidade econômica financeira para a implantação de uma central de massa em uma indústria cerâmica de Itaboraí, RJ. **Cerâmica**, v. 60, n. 356, p. 490-500, out./dez. 2014.

SILVA, A. C.; MÉXAS, M. P.; QUELHAS, O. L. G. Restrictive factors in implementation of clean technologies in red ceramic industries. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, p. 441-451, 2017.

SILVA, A. L. *et al.* Avaliação das composições de massas argilosas a partir da incorporação de resíduo da indústria de cerâmica vermelha na obtenção de membranas cerâmicas tubulares. **Matéria**, v. 22, n. 1, p. 1-8, 2017a.

SILVA, A. L. *et al.* Avaliação de novos depósitos de argilas provenientes da região sul do Amapá visando aplicação na indústria cerâmica. **Cerâmica**, v. 64, n. 369, p. 69-78, jan./mar. 2018.

SILVA, F. M. *et al.* Avaliação da resistência mecânica de pisos intertravados de concreto sustentáveis (PICS). **Matéria**, v. 22, n. 1, p. 1-11, 2017b.

SILVA, P. F. F. **Análise quantitativa de fases em matérias-primas cerâmicas: desenvolvimento e validação de software com programação em Matlab adequada ao método de análise racional UFSC**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, Teresina, 2015.

SOARES, R. A. L. *et al.* Influência do teor de calcário no comportamento físico, mecânico e microestrutural de cerâmicas estruturais. **Cerâmica Industrial**, v. 15, n. 2, p. 38-42, mar./abr. 2010.

SOARES, R. A. L. *et al.* Avaliação da adição de dolomita em massa de cerâmica de revestimento de queima vermelha. **Cerâmica**, v. 60, n. 356, p. 516-523, out./dez. 2014a.

SOARES, R. A. L. *et al.* Efeito da adição de calcita oriunda de jazida de argila em massa de cerâmica de revestimento. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 3, p. 27-32, mai./jun. 2014b.

TEIXEIRA, A. S. N. M.; SOARES, R. A. L.; TEIXEIRA, P. R. S. Estudo e avaliação do uso e escória granulada de fundição na produção de cerâmicas estruturais. **Cerâmica Industrial**, v. 23, n. 2, p. 36-40, abr./jun. 2018.

ZACCARON, A. *et al.* Incorporação de chamote na massa de cerâmica vermelha como valorização do resíduo. **Cerâmica Industrial**, v. 19, n. 3, p. 33-39, mai./jun. 2014.

ZACCARON, A. *et al.* Adição de chamote na massa de cerâmica vermelha como valorização de resíduo na fabricação de blocos de vedação: estudo em escala laboratorial. **Revista Engenharia e Construção Civil**, Curitiba, v. 3, n. 1, p. 1-16, jan./jun. 2016.

ZACCARON, A. *et al.* Avaliação da resistência mecânica e absorção de água em cerâmica vermelha com incorporação de chamote. **Scientia Plena**, v. 14, n. 2, p. 1-8, 2018.