

**UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS – UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
NÍVEL MESTRADO**

ANTÔNIO CÉLIO MACHADO JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE LODO GERADO NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES FRIGORÍFICOS (LF) COMO MATÉRIA-PRIMA NA FABRICAÇÃO DE
ARGILA EXPANDIDA**

São Leopoldo

2019

ANTÔNIO CÉLIO MACHADO JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE LODO GERADO NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES FRIGORÍFICOS (LF) COMO MATÉRIA-PRIMA NA FABRICAÇÃO DE
ARGILA EXPANDIDA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Orientadora: Prof. Dra. Feliciane Andrade Brehm

São Leopoldo

2019

M149a Machado Júnior, Antônio Célio.
Avaliação da adição de lodo gerado no tratamento de efluentes frigoríficos (LF) como matéria-prima na fabricação de argila expandida / por Antônio Célio Machado Júnior. -- São Leopoldo, 2019.

97 f. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo, RS, 2019.
Orientação: Prof^a. Dr^a. Feliciane Andrade Brehm, Escola Politécnica.

1. Engenharia civil. 2. Reaproveitamento (Sobras, refugos, etc.). 3. Frigoríficos. 4. Lodo residual. 5. Materiais de construção – Reaproveitamento. 6. Resíduos industriais – Reaproveitamento. 7. Resíduos como material de construção. I. Brehm, Feliciane Andrade. II. Título.

CDU 624
620.28
.....691:628.5

Catálogo na publicação:
Bibliotecária Carla Maria Goulart de Moraes – CRB 10/1252

ANTÔNIO CÉLIO MACHADO JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DA ADIÇÃO DE LODO GERADO NO TRATAMENTO DE
EFLUENTES FRIGORÍFICOS (LF) COMO MATÉRIA-PRIMA NA FABRICAÇÃO DE
ARGILA EXPANDIDA**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

Aprovado em 18 de janeiro de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Daniela Migliavacca Osório – FEEVALE

Prof^ª. Dr^ª. Daiane Calheiro – UNISINOS

Prof. Dr. Carlos Moraes – UNISINOS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me proporcionar a oportunidade de crescimento pessoal e profissional.

À professora Feliciane, pela orientação e sua eficiência na formação de mestres. Também pelas conversas e preocupações com as futuras responsabilidades. Levo este perfil de compromisso, que acredito fazer a diferença na vida das pessoas.

A todo o grupo do PPGEC da UNISINOS, por viabilizar a primeira turma de Minter do programa, condensando o curso em módulos.

À Unifimes, pela concessão da bolsa de estudos e incentivo à formação de seu quadro de funcionários.

Aos laboratoristas dos Laboratórios de Caracterização e Valorização de Materiais, Materiais de Construção Civil e ITT Fóssil, onde grande parte da pesquisa foi desenvolvida. Agradeço por compartilhar a experiência e esclarecer dúvidas durante os programas experimentais.

Às empresas, pelo fornecimento das matérias-primas utilizadas e contribuição com a pesquisa científica.

RESUMO

A crescente demanda por sistemas mais sustentáveis colabora para estudos que envolvem o gerenciamento de resíduos. A legislação exige das indústrias responsabilidade diante dos resíduos gerados. No Brasil, um resíduo gerado em grandes volumes e que preocupa em relação ao seu destino final, é o lodo de tratamento de efluentes frigoríficos (LF). Este resíduo é gerado durante o processo de tratamento de efluentes utilizado na maioria dos frigoríficos do país. Por isso, sugere-se identificar suas características para prever possibilidades de transformação do resíduo em matéria-prima em outros processos. Um setor que se destaca na possibilidade de absorção de resíduos, é o da construção civil, visto toda sua dependência de recursos naturais e uso diverso em toda sua cadeia. A literatura aponta tendências de valorização do resíduo na fabricação de agregados leves como a argila expandida. Nesse sentido, esta pesquisa teve como objetivo principal avaliar a fabricação de argila expandida com adição de LF. Para isso, foram coletados LF de uma indústria e argila natural de duas jazidas da mesma região. Em seguida as matérias primas foram caracterizadas em termos físicos, químicos, mineralógicos e térmicos. Por fim foram realizados testes de sinterização com incorporação de 0%, 5% e 10% em massa de LF em matriz argilosa. O tratamento térmico foi realizado nas temperaturas de 1100°C, 1150°C e 1200°C. Dentre os resultados, verificou-se que as argilas possuem compostos majoritários de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , enquanto o LF apresentou 94,79% de matéria orgânica. As argilas apresentaram fases cristalinas de quartzo e de montmorilonita em comum, enquanto a argila 1 apresentou ainda o óxido de cálcio e manganês hidratado e a argila 2 apresentou o silicato de alumínio e potássio. Foi constatado potencial de produção de argila expandida em uma das argilas da região, em que houve expansão de 29,10% em volume, na temperatura de 1200°C. Já com a adição de LF na argila, ocorreu expansão de 6,42% no teor de 5% de LF na mesma temperatura. Através do DRX foi constatado a presença das fases mineralógicas de quartzo, hematita, silimanita e muscovita nos materiais obtidos. Para os corpos de prova que sofreram expansão pirolástica, os testes de absorção foram de 7,83% para a argila de referência e 6,62% para a argila com 5% de LF. A massa específica aparente da argila expandida foi de 1,22g/cm³ e 1,39g/cm³, respectivamente. A análise de morfologia apontou camada externa vitrificada e camada interna porosa,

características típicas da argila expandida. Em uma visão geral dos resultados, nas condições realizadas nesta pesquisa, o LF não se mostrou eficiente no processo de produção de agregados leves, pois a sua adição provocou a inibição da expansão da argila.

Palavras-chave: Valorização de resíduos. Lodo de frigorífico. Argila expandida. Reciclagem.

ABSTRACT

The growing demand for more sustainable systems contributes to studies that involve waste management. Legislation already requires industries to take responsibility for waste generated. In Brazil, a residue generated in large volumes and that worries about its final destination, is the poultry industry sludge (PS). It is a result of the effluent treatment process used in most of the country's refrigerators. Therefore, it is suggested to identify its characteristics to predict possibilities of transformation of the residue into raw material in other processes. One sector that stands out in the possibility of absorbing waste is the construction sector, given its dependence on natural resources and diverse use throughout its chain. The literature indicates tendencies of recovery of the residue in the manufacture of light aggregates such as expanded clay. In this sense, this research had as main objective to evaluate the manufacture of expanded clay with addition of PS. For this, PS was collected from an industry and natural clay from two deposits of the same region, thus identifying the possibility of industrial symbiosis between the two companies. Then the raw materials were characterized in physical, chemical, mineralogical and thermal form. Finally, sintering tests were carried out with the incorporation of 0%, 5% and 10% by mass of PS in a clayey matrix. The heat treatment was performed at temperatures of 1100°C, 1150°C and 1200°C. Among the results, it was verified that the clays have major compounds of SiO₂, Al₂O₃ and Fe₂O₃, while the PS presented 94.79% of organic matter. The clays presented crystalline phases of quartz and montmorillonite in common, while clay 1 also presented hydrated calcium and manganese oxide and clay 2 presented aluminum and potassium silicate. The potential for the production of expanded clay was found in one of the clays of the region, where there was an expansion of 29.10% in volume, at a temperature of 1200°C. Already with the addition of PS in the clay, there was an expansion of 6.42% in the 5% PS content at the same temperature. Through the XRD the mineralogical phases of quartz, hematite, silimanite and muscovite in the obtained materials were verified. For the specimens that underwent pyroplastic expansion, the absorption tests were of 7.83% for referent clay and 6.62% for clay with 5% of PS. The apparent specific mass of the expanded clay was 1.22g/cm³ and 1.39g/cm³, respectively. The morphology analysis showed vitrified outer layer and porous inner layer, typical characteristics of expanded clay. Considering an overview of the results, in the

conditions performed in this research, the LF was not efficient in the process of production of light aggregates, because its addition caused the inhibition of the clay expansion.

Key-words: Waste recovery. Poultry industry sludge. Expanded clay. Recycling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma de atividades de um frigorífico de abate de aves	22
Figura 2 – Rota de geração de LF flotado	27
Figura 3 – Formação de uma fase vítrea contínua que favorece a expansão.....	37
Figura 4 – Pressão interna exercida pelos gases contra a pressão da camada externa	38
Figura 5 – Zonas em que se encontram as composições químicas das argilas com característica expansiva	39
Figura 6 – Etapas do processo de fabricação de argila expandida	40
Figura 7 – Ordem de prioridades na elaboração do plano de gerenciamento de resíduos conforme a Lei 12.305/2010	44
Figura 8 –Lodo frigorífico gerado na indústria	50
Figura 9 – Foto aérea da localização dos materiais e de seus processos	51
Figura 10 – Resumo das etapas do programa experimental da pesquisa	52
Figura 11 – LF coletado e armazenado.....	53
Figura 12 – Argilas coletadas e armazenadas	53
Figura 13 – Organograma das etapas de produção da argila expandida em escala laboratorial.....	57
Figura 14 – Argila natural seca (A) e argila natural moída (B).....	57
Figura 15 – Secagem (A), processo de moagem (B) e LF moído (C)	58
Figura 16 – Mistura dos materiais (A), amostra homogeneizada (B) e corpo de prova finalizado (C)	59
Figura 17 – Curva granulométrica das argilas.....	67
Figura 18 – Curva granulométrica do LF	69
Figura 19 – Resultado de DRX da Argila 1	70
Figura 20 – Resultado de DRX da Argila 2	71
Figura 21 – Resultado de DRX das cinzas do LF após o ensaio de perda ao fogo ..	73
Figura 22 – Análise térmica da Argila 1.....	73
Figura 23 – Análise térmica da Argila 2.....	74
Figura 24 – Gráficos de expansão em função das formulações e temperaturas.....	76
Figura 25 – Gráficos de massa específica aparente em função das formulações e temperatura	78
Figura 26 – Resultado de DRX da argila expandida com 5% de adição LF.....	82

Figura 27 – Características dos corpos de prova formulados com a Argila 2 nas três temperaturas	85
Figura 28 – Características dos corpos de prova formulados com a Argila 2 nas três temperaturas	86
Figura 29 – Morfologia externa de argilas expandidas encontradas na literatura	87
Figura 30 – Estrutura interna da argila expandida da formulação A2-5	88
Figura 31 – Morfologia interna de argilas expandidas encontradas na literatura	89

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Caracterizações realizadas nas matérias - primas utilizadas na confecção da argila expandida.....	34
Quadro 2 – Caracterização da argila em diferentes estudos	35
Quadro 3 – Comparativo de fases encontradas em análise de DRX de argila expandida.....	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maiores produtores mundiais de carne de frango (mil toneladas)	21
Tabela 2 – Quantidades de resíduos sólidos gerados na produção diária da Perdigão Agroindustrial S/A – Unidade Serafina Corrêa/RS	24
Tabela 3 – Quantidades de fluídos gerados na produção diária da Perdigão Agroindustrial S/A – Unidade Serafina Corrêa/RS	24
Tabela 4 – Análise elementar do LF realizadas na literatura	29
Tabela 5 – Análise imediata do LF identificada na literatura	29
Tabela 6 – Composição das cinzas (% b.s. ¹)	30
Tabela 7 – Composição da argila expandida brasileira	32
Tabela 8 – Absorção de água da argila expandida	33
Tabela 9 – Formulações e tratamentos térmicos realizados por outros autores que fabricaram agregado leve com adição de resíduos	46
Tabela 10 – Descrição das argilas utilizadas neste trabalho	50
Tabela 11 – Ensaio de caracterização das argilas e LF	54
Tabela 12 – Quantitativo de materiais para ensaios de caracterização	59
Tabela 13 – Ensaio de caracterização dos corpos de prova após a sinterização ...	60
Tabela 14 – Resultados de FRX das argilas comparado a outros estudos	62
Tabela 15 – Resultado de FRX do LF	63
Tabela 16 – Comparativo entre análises do LF	64
Tabela 17 – Resultados de umidade e perda ao fogo dos materiais	65
Tabela 18 – Valores de pH das Argilas 1 e 2 e do LF	66
Tabela 19 – Comparativo de distribuição granulométrica de argilas	68
Tabela 20 – Massa específica das matérias-primas	69
Tabela 21 – Fases encontradas em análise de DRX da Argila 1	70
Tabela 22 – Fases encontradas em análise de DRX da Argila 2	71
Tabela 23 – Fases encontradas em análise de DRX da Argila 2	72
Tabela 24 – Comparativo de análise térmica	74
Tabela 25 – Massa específica de agregados leves com adição de resíduos	80
Tabela 26 – Comparativo bibliográfico entre temperatura, expansão e densidade aparente	81
Tabela 27 – Fases encontradas no DRX da argila expandida com 5% de LF	82
Tabela 28 – Comparação com outras literaturas quanto à absorção de água	84

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATD	Análise Térmica Diferencial
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DRX	Difração de Raios X
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
FRX	Fluorescência de Raios X
LCVMat	Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais
LF	Lodo de Frigorífico
LMC	Laboratório de Materiais de Construção
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Normas Brasileiras de Regulação
pH	Potencial Hidrogeniônico
TG	Análise Termogravimétrica
µm	Micrômetro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 JUSTIFICATIVA	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	18
1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 A INDÚSTRIA FRIGORÍFICA E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS	20
2.1.1 Geração do Lodo Frigorífico (LF)	22
2.1.2 Caracterização do Lodo Frigorífico (LF)	28
2.2 ARGILA EXPANDIDA	30
2.2.1 Fenômeno de Expansão Piroplástica	35
2.2.2 Processo de Fabricação do Agregado Leve	40
2.3 GERENCIAMENTO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS	43
2.4 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA ARGILA EXPANDIDA	45
3 MATERIAIS E MÉTODOS	50
3.1 MATERIAIS	50
3.1.1 Argila Natural	50
3.1.2 Lodo Frigorífico (LF)	50
3.2 MÉTODOS	51
3.2.1 Etapa 1: Amostragem dos Materiais	52
3.2.2 Etapa 2: Ensaio de Caracterização das Matérias-primas	54
3.2.2.1 Fluorescência de Raios X – FRX	54
3.2.2.2 Perda ao Fogo e Teor de Umidade	54
3.2.2.3 pH	55
3.2.2.4 Análise Granulométrica	55
3.2.2.5 Massa Específica	55
3.2.2.6 Difrações de Raios X – DRX	56
3.2.2.7 Análise Termogravimétrica – TG e Análise Térmica Diferencial – ATD	56
3.2.3 Etapa 3: Formulações, Preparo dos Corpos de Prova e Sinterização	56
3.2.4 Etapa 4: Caracterização da Argila Expandida com Adição de LF	60

3.2.4.1 Expansão Piroplástica.....	60
3.2.4.2 Massa Específica Aparente.....	61
3.2.4.3 Difração de Raios X – DRX.....	61
3.2.4.4 Absorção de Água.....	61
3.2.4.5 Morfologia.....	61
4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	62
4.1 CARACTERIZAÇÕES DAS ARGILAS E DO LF.....	62
4.1.1 Caracterização Química das argilas e do LF.....	62
4.1.2 Perda ao Fogo e Teor de Umidade.....	64
4.1.3 pH.....	66
4.1.4 Análise Granulométrica.....	66
4.1.5 Massa Específica.....	69
4.1.6 Difração de Raios X – DRX.....	70
4.1.7 Análise Termogravimétrica – TG e Análise Térmica Diferencial – ATD.....	73
4.2 RESULTADOS DAS SINTERIZAÇÕES.....	75
4.2.1 Testes de Expansão.....	75
4.2.2 Massa Específica Aparente.....	78
4.2.3 Difração de Raios X – DRX.....	81
4.2.4 Absorção de Água.....	83
4.2.5 Morfologia.....	84
4.2.5.1 Estrutura Externa.....	85
4.2.5.2 Estrutura Interna.....	87
5 CONCLUSÃO.....	90
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

Durante toda evolução do ser humano, os recursos naturais sempre foram fonte de alternativas para que o homem buscasse a transformação do meio em que vive. A natureza frente ao homem, durante muito tempo, parecia ter recursos infinitos ou que sempre se regenerariam.

A engenharia acompanha o homem desde sua existência, em cada técnica ou ideia que o mesmo desenvolvia, e ao longo de toda sua existência, fez com que chegasse hoje às condições tecnológicas diversas. A vida ficou mais fácil e cômoda devido à evolução. Porém, nos tempos modernos, com o grande crescimento populacional, o ser humano passou a ser extremamente dependente destes recursos. Sabe-se que muitos desses recursos já nem existem mais e muitos deles estão em processo de desaparecimento.

Contudo, percebeu-se que a importância da valorização e reaproveitamento dos materiais de formas alternativas. Hoje, pode-se dizer que a ciência tem uma nova área, que concentra o estudo e desenvolvimento de técnicas de valorização de resíduos (PEREIRA, 2006). Porém, essa nova área da ciência precisa de incentivos e recursos para transformar os materiais e recuperar os recursos que foram extraídos da natureza de forma que passem a serem incluídos em um sistema ecoeficiente.

O crescimento populacional, bem como sua concentração em grandes centros urbanos, exige a transformação do espaço físico. Obras diversas de infraestrutura (rodovias, sistemas de abastecimento e saneamento, obras de industrialização e as edificações urbanas), consomem de forma exponencial os recursos naturais do planeta. O setor de engenharia civil torna-se com isso, um grande potencial de desafios e oportunidades. Ao mesmo tempo em que apresenta benefícios com o aumento de estruturas e construções, tem como desafio ser menos dependente das matérias-primas naturais e mitigar o excesso de danos que os processos modernos causam, como emissão de CO₂ e geração de resíduos pelo setor.

Neste contexto, percebe-se uma grande oportunidade, visto que o setor de engenharia tem grande capacidade de absorver diversos tipos de materiais, inclusive resíduos (JOHN, 2000).

Um resíduo gerado em grandes volumes pelas indústrias e sistemas de tratamento de efluentes é o lodo resultante do processo de tratamento de efluentes, ou simplesmente lodo frigorífico (LF). Devido à quantidade gerada e o processo

químico em sua geração, a destinação ainda é um problema (SENA, 2005). Alguns estudos propõem sistemas de incorporação do LF na área agrícola (ROCHA et al., 2013). Assim como existem pesquisas de utilização em produção de materiais cerâmicos. Segundo Archela et al. (2003), grande volume do resíduo tem destinações em locais de botafora e em alguns casos, o material é lançado em canais, córregos e rios. Segundo os autores, o LF lançado em canais de água gera diversos impactos ambientais, como problemas de turbidez, odores, materiais em suspensão e alterações na demanda de oxigênio, que passa a ser consumido para oxidação da matéria orgânica presente no resíduo.

Um material que contribui com o setor da construção com inovação e diversificação de usos, é a argila expandida. Dentro da classificação de agregados leves, o material tem se destacado na fabricação de componentes de baixa densidade frente aos materiais tradicionais. Em alguns estudos, já se viabilizam sua fabricação com aproveitamento de resíduos, o que gera um benefício duplo, por ser um material com propriedades diferenciadas diante dos tradicionais, e que pode consumir menos recursos naturais, e que contribui assim com a sustentabilidade de processos interempresariais (MODOLO et al., 2013).

A argila expandida é um agregado leve com diversas aplicações, como enchimento leve de lajes e telhados, substituição de agregados na produção de concreto, paisagismo e sistemas de isolamento térmico (ROSSIGNOLO, 2009). Sua produção com uso de resíduos industriais proporciona a redução de exploração de recursos naturais, o que exemplifica uma alternativa benéfica ao meio ambiente. Frente a essa oportunidade, as pesquisas recentes se intensificam com o objetivo de contribuir com o desenvolvimento de novos materiais sustentáveis (TAKAHASHI, 2006). Uma das possibilidades é a de utilização de LF como substituição parcial da argila natural para fabricação de argila expandida. Ainda vale ressaltar que a destinação ambiental correta do LF em aterros tem gerado alta despesa financeira, principalmente devido ao transporte do volume diariamente gerado (GONDIM, 2017).

1.1 JUSTIFICATIVA

A indústria e a construção civil contribuem para o desenvolvimento econômico e social de uma região, porém em seus ciclos operacionais ainda se vê alta dependência dos recursos naturais e ainda elevada geração de resíduos. Torna-se

um grande desafio garantir um ciclo sustentável para os dois setores em âmbitos sociais, econômicos e ambientais, onde se vê oportunidades de pesquisa e estudos que colaborem com a problemática.

Vista a grande geração de resíduos destes setores, a Lei 12.305 (BRASIL, 2010) implementou a política nacional de resíduos sólidos, que exige das indústrias um plano de gerenciamento de resíduos. Uma das oportunidades no sistema de gestão ambiental é a simbiose entre os setores, que envolve a utilização de resíduos da indústria na produção de materiais de construção civil, por exemplo. A medida que o setor da construção civil passa a inserir em seu processo resíduos industriais na fabricação de seus materiais de consumo, justifica-se a busca de soluções ambientais eficientes que venham a contribuir com o gerenciamento de resíduos.

Diante de toda problemática que envolve os setores da indústria e da construção civil, este estudo atende aos objetivos de políticas que buscam a proteção ao meio ambiente e também de garantir sustentabilidade aos setores que são importantes na sociedade. Este trabalho traz oportunidades no desenvolvimento de novos materiais a partir de consórcio entre dois setores aparentemente distintos. Outro ponto importante desta pesquisa, é o de buscar aplicação de novas tecnologias em regiões como o interior de Goiás, onde a pesquisa ainda tem muito a contribuir com esta região de grande potencial e em crescente desenvolvimento, muitas vezes com pouca análise de impactos ambientais.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos desta pesquisa estão descritos nos itens a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é avaliar a viabilidade da adição de lodo gerado no tratamento de efluentes frigoríficos (LF) como matéria prima na fabricação de argila expandida.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) caracterizar o lodo de tratamento de efluentes da indústria frigorífica;
- b) caracterizar as argilas de duas jazidas situadas na região de Mineiros/GO;
- c) avaliar as propriedades da argila expandida com adição de 0%, 5% e 10% de LF;
- d) comparar as propriedades físicas das amostras de referência e amostras com adição de LF.

1.3 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

Devido à abrangência dos processos que podem influenciar nos resultados da pesquisa, faz-se necessário apontar algumas particularidades:

- a) o LF foi coletado por um determinado período do ano, no qual os processos da empresa variam de acordo com campanhas de mercado e ocasionam alterações nas propriedades do resíduo;
- b) as argilas escolhidas são de duas empresas de processamento de blocos cerâmicos, que não foram utilizadas em nenhum processo que avaliassem suas características expansivas.
- c) o processo de fabricação de argila expandida em escala industrial é mais eficiente que o processo em escala laboratorial. Este trabalho se limitou apenas à escala laboratorial, apontada pela literatura como o primeiro passo para uma implementação da fabricação de argila expandida em uma região.

1.4 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta dissertação foi estruturada em 5 capítulos. O primeiro capítulo é a introdução ao tema da dissertação e os objetivos da pesquisa realizada.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica acerca do tema, onde é contemplado a indústria frigorífica e a geração de resíduos, argila expandida e o gerenciamento e valorização de resíduos.

O terceiro capítulo é referente ao programa experimental e apresenta os materiais utilizados, as argilas naturais da região de Mineiros/GO e o LF de uma indústria do mesmo município, que foi utilizado na produção de argila expandida e na etapa seguinte foi realizada a caracterização dos corpos de prova produzidos.

O quarto capítulo apresenta os resultados e discussões sobre os ensaios realizados nos laboratórios, que envolve desde a caracterização das matérias-primas de argila e LF, apresentação dos resultados de formulações e testes de sinterização realizados, até a caracterização dos corpos de prova produzidos.

O quinto capítulo aborda as conclusões da pesquisa e também as sugestões de trabalhos futuros, indicadas após a realização do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentadas as revisões de literatura necessárias para o embasamento do tema desta pesquisa.

2.1 A INDÚSTRIA FRIGORÍFICA E A GERAÇÃO DE RESÍDUOS

De acordo com Padilha et al. (2005), o início do desenvolvimento da avicultura no Brasil em escala industrial ocorreu na década de 1930. A primeira experiência foi no Estado de Santa Catarina, na empresa Sadia, com base em experiências americanas. Foi a partir de 1950 que a atividade atingiu bons níveis de crescimento e competitividade, fomentada pelo surgimento de inúmeras inovações tecnológicas e também pela boa adaptação da atividade no país. Segundo Belusso e Hespanhol (2010), na década de 1970 começaram as exportações brasileiras de carne de frango e o setor ganhou destaque nos estados de Santa Catarina e Paraná.

O bom desempenho da avicultura no Brasil pode ser explicado pela vocação agrícola do país e pela introdução de novas tecnologias, melhorias genéticas, uso de instalações mais apropriadas e alimentação racional, em que a manutenção desse bom desenvolvimento exige uma evolução constante no setor (VOGADO, 2016). As novas tecnologias propiciaram maior controle produtivo com a criação dos frangos em galpões, onde se tem condições ambientais artificiais, que juntamente com a política agrícola trouxe acesso aos mercados consumidores, aptidão dos produtores, condições de transporte e a disponibilidade de matérias-primas como o milho e a soja para a produção de frango, em que estes foram os principais responsáveis pela expansão das plantas industriais avícolas no Brasil (BELUSSO e HESPANHOL, 2010).

Desde a sua implantação, a atividade no Brasil teve uma grande expansão, em que ocupa atualmente a segunda posição mundial na produção avícola, atrás apenas dos Estados Unidos. O consumo de proteína avícola ocupa o segundo tipo de carne mais consumida a nível mundial (UNFRIED; YOSHI, 2012). A Tabela 1 apresenta os números de produção da avicultura nos anos de 2014, 2015 e 2016.

Tabela 1 – Maiores produtores mundiais de carne de frango (mil toneladas)

País	Ano		
	2014	2015	2016
ESTADOS UNIDOS	17.299	17.966	18.365
BRASIL	12.692	13.080	13.480

Fonte: Adaptado de ABPA (2017).

De um ponto de vista ambiental, segundo Ferreira (2016) e Schenini et al. (2006), a intensificação da produção avícola causa uma série de impactos ambientais. O processamento frigorífico de aves gera resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões atmosféricas decorrentes da energia consumida em toda cadeia produtiva. Segundo Vogado (2016), problemas de gestão ambiental referente aos resíduos gerados, acarretam diversos impactos no solo que os recebe, devido ao excesso de minerais e mau uso dos processos de compostagem. A destinação de efluentes líquidos com tratamentos ineficientes e em alguns casos sem tratamento trazem prejuízo aos canais receptores.

As empresas do ramo frigorífico são as responsáveis pelo processamento de carnes e o aumento em suas atividades industriais diante da demanda mundial por proteína animal trouxe como consequência o grande aumento da dependência dos recursos naturais. Diante disso, as empresas passaram a se preocupar com a questão ambiental, em que se procura causar o mínimo de impacto negativo ao meio ambiente durante todo seu processo produtivo (DA CRUZ; DE ARAÚJO, 2015).

Nesse sentido, durante as etapas de abate de aves, seguida de seu processamento é necessária uma separação e tratamento dos dejetos líquidos, semi-sólidos e sólidos que são gerados em grande quantidade durante o processo, antes mesmo de serem liberados no meio ambiente, pois são poluentes (MATSUMURA, 2007).

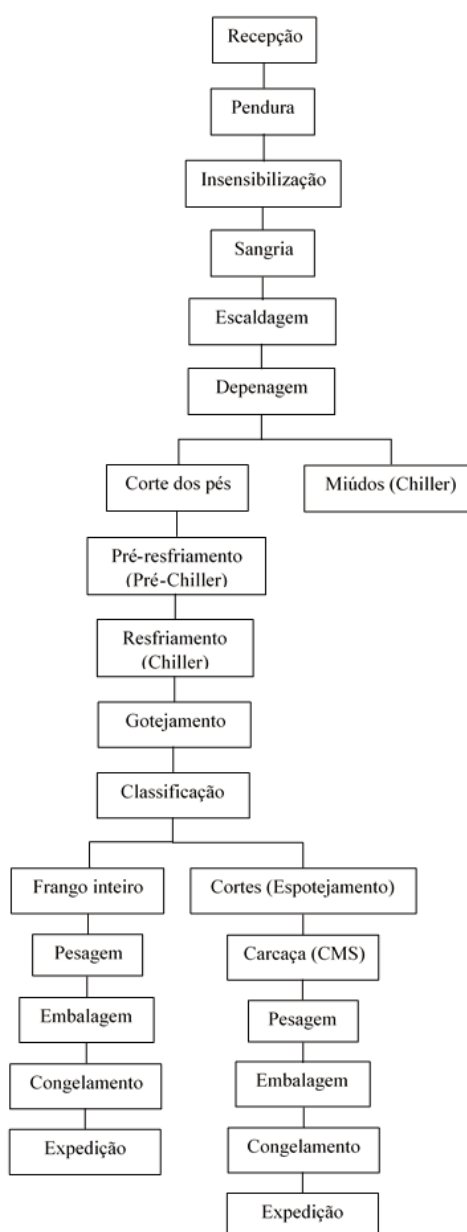
De acordo com Padilha et al. (2005), no abatedouro de aves muitas partes do frango são descartadas durante seu abate, sejam por não serem de consumo humano ou por não possuir fins comerciais. Visto isso, estes resíduos necessitam de um destino apropriado para não poluir o meio ambiente. Os mesmos autores ainda citam que os resíduos são divididos em dois grupos, os resíduos sólidos (penas, vísceras, cabeças, pés, peles diversas, ossos diversos, borra do flotador e as carcaças) e os fluídos (sangue, e os efluentes líquidos). Nesse contexto, para atender as normas ambientais, as empresas do setor buscam sistemas de tratamento destes resíduos,

por exemplo naquele em que é gerado o LF, resultado do processo de tratamento de efluentes líquidos, que passa a ser objeto de estudo deste trabalho.

2.1.1 Geração do Lodo Frigorífico (LF)

De acordo com Schilling (2014), os processos de abate de aves em um frigorífico podem ser apresentados através do fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma de atividades de um frigorífico de abate de aves



Fonte: Adaptada de Schilling (2014, p. 12).

De acordo com Matsumura (2007), os processos de abate do frango em uma indústria avícola podem ser resumidos nas seguintes etapas: recepção, atordoamento, sangria, escaldagem, evisceração, lavagem final, resfriamento, gotejamento, embalagem, armazenamento e aproveitamento dos subprodutos.

Na etapa de recepção, as aves chegam dentro de gaiolas transportadas em caminhões. Antes de serem abatidas, elas permanecem em local dotado de chuveiros e ventiladores, para promover a redução da mortalidade. As aves que estão doentes ou mortas são destinadas a produção de farinha de origem animal. Após o fim do processo, toda a área e os caminhões são lavados (MATSUMURA, 2007). Nessa etapa são utilizados em torno de 12.700 litros de água por dia, se considerado um frigorífico médio (abate de 100.000 a 250.000 aves/dia), em que produz-se resíduos como fezes, penas e água de limpeza (FERNANDES, 2004).

Após a recepção das aves, elas são presas pelos pés no transporte aéreo, e encaminhadas para o atordoamento, onde recebem um choque elétrico de 70 V na região da cabeça. Esse procedimento imobiliza a ave e auxilia no relaxamento dos músculos, para a extração de maior quantidade de sangue (MATSUMURA, 2007).

Em seguida, as aves são encaminhadas a sangria, onde são sangradas com um corte na jugular e seguem para um túnel, onde o sangue é captado por canaletas e destinado à fábrica de farinha de origem animal ou lançado no sistema de tratamento de efluentes líquidos (MATSUMURA, 2007).

Na etapa da escaldagem, as aves passam pela primeira etapa de lavagem, imergida em água a temperatura de 55 a 60°C, durante 90 a 120 segundos. Na depenagem, tem-se o consumo de água, em que é feita de forma contínua em máquinas depenadeiras em série. Nesta etapa, há injeção contínua de água fria através de chuveiros, em seguida, as penas removidas são recolhidas na saída das canaletas onde elas caem e são destinadas a fabricação de ração (MATSUMURA, 2007).

Após a remoção das penas e limpeza externas, segue a evisceração, que consiste no corte do abdome, em que são retiradas as vísceras, seguida dos pulmões e separação dos miúdos. Nesta fase, os pulmões e moelas recebem os devidos cuidados, os miúdos são selecionados e resfriados. E por fim, as aves passam por uma lavagem final, depois da retirada dos órgãos internos e são encaminhadas para o resfriamento (MATSUMURA, 2007).

Na evisceração as aves são transportadas por ganchos. Após elas são derrubadas em tanques abertos, chamados de pré-chiller, onde é feito o pré-resfriamento, em seguida terminam de resfriar no sistema chiller, para permanecer resfriadas com adição de gelo (MATSUMURA, 2007).

Por fim, as aves são encaminhadas para o gotejamento, onde são removidos o excesso de água e são destinadas a serem embaladas e armazenadas.

Nas Tabelas 2 e 3 é possível observar os resultados da pesquisa desenvolvida por Padilha et al. (2005), que mostra o quantitativo de resíduos sólidos e efluentes líquidos gerados no abate de aves em um dia.

Tabela 2 – Quantidades de resíduos sólidos gerados na produção diária da Perdigão Agroindustrial S/A – Unidade Serafina Corrêa/RS

Tipo	Quantidade (kg)
Penas	18.500
Vísceras cruas	26.000
Cabeças	7.000
Pés	1.500
Peles	1.500
Gorduras	300
Ossos	6.000
Borra do Flotador	9.000
Resíduos de cama de aviário	1.000
Restos de carcaças (resíduos)	18.200

Fonte: Padilha et al. (2005).

Tabela 3 – Quantidades de fluídos gerados na produção diária da Perdigão Agroindustrial S/A – Unidade Serafina Corrêa/RS

Tipo	Quantidade (lts/kgs/m³)
Sangue	14.000
Efluentes líquidos	2.400

Fonte: Padilha et al (2005).

Segundo Schenini (2006), os resíduos gerados no processo de abate das aves podem ser subdivididos em efluentes líquidos denominados de linha vermelha (penas, vísceras, ossos e sangue), constituído de conteúdo proteico e gordurosos e em efluente denominado de linha verde (areia, excremento e argilas).

Para Sena (2005), a indústria avícola é responsável por uma grande geração de efluentes líquidos devido ao elevado consumo de água no processo que são contaminados com os resíduos do processo produtivo, o que implica na necessidade de um tratamento eficiente para adequada liberação antes de sua disposição final.

O método de tratamento depende do tipo de efluente gerado, do controle operacional da indústria e as características da água contaminada (MENDES, 2005; FERREIRA, 2016). Segundo Schatzmann (2009), geralmente os efluentes de abatedouros de aves são tratados em Estações de Tratamento de Efluentes (ETE). Os efluentes gerados variam de indústria para indústria, porém, geralmente contêm altas taxas de compostos orgânicos, como Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio (N), Fósforo (F), óleos, gorduras e proteínas (DEDIK; MONAV, 2009; FERREIRA, 2016). Este efluente necessita de um tratamento adequado, que é dividido em tratamento preliminar ou pré tratamento, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário ou avançado.

Primeiramente, é feito o tratamento preliminar, que tem a função de proteger os equipamentos da ETE de entupimentos, obstruções e desgastes, pois o efluente é composto por materiais grosseiros, matéria orgânica, nutrientes e demais poluentes dissolvidos. Este tratamento preliminar é feito por meio de gradeamento, peneiramento, caixa de areia, dentre outros (SPELLMAN, 2003; SCHATZMAN, 2009). O material retido no peneiramento, como as penas, as vísceras, os ossos e demais sólidos, são destinados para a produção de farinha na fábrica de subprodutos (SHATZMANN, 2009).

Em seguida, é realizado o tratamento primário, com o principal objetivo de remoção de sólidos suspensos, de material flotante, óleos e graxas. Nesta etapa, pode-se remover 40% a 70% dos sólidos em suspensão, e cerca de 35% de DBO, que podem ser utilizadas as técnicas de sedimentação, coagulação/floculação, flotação e precipitação química (CAMAROTA, 2011).

Segundo Schetzmann (2009), os equipamentos geralmente são os decantadores e os flotadores. O autor ainda cita a importância da separação do tratamento primário para a linha verde e vermelha, pois evita a contaminação do material proteico e lipídico da linha vermelha, o que permite seu reaproveitamento.

Segundo Sena (2005), a flotação é um processo físico-químico, que a separação de partículas, agregados ou gotículas são por adesão de bolhas de ar, e como as bolhas de ar possuem densidade menor que o meio aquoso, flutuam ou flutam até a superfície do reator, que na sequência é removida por pás.

O tratamento secundário abrange todos os processos biológicos de tratamento de efluentes, desde os de natureza aeróbica e de natureza anaeróbica, como objetivo de transformar a matéria orgânica biodegradável dos efluentes em sólidos

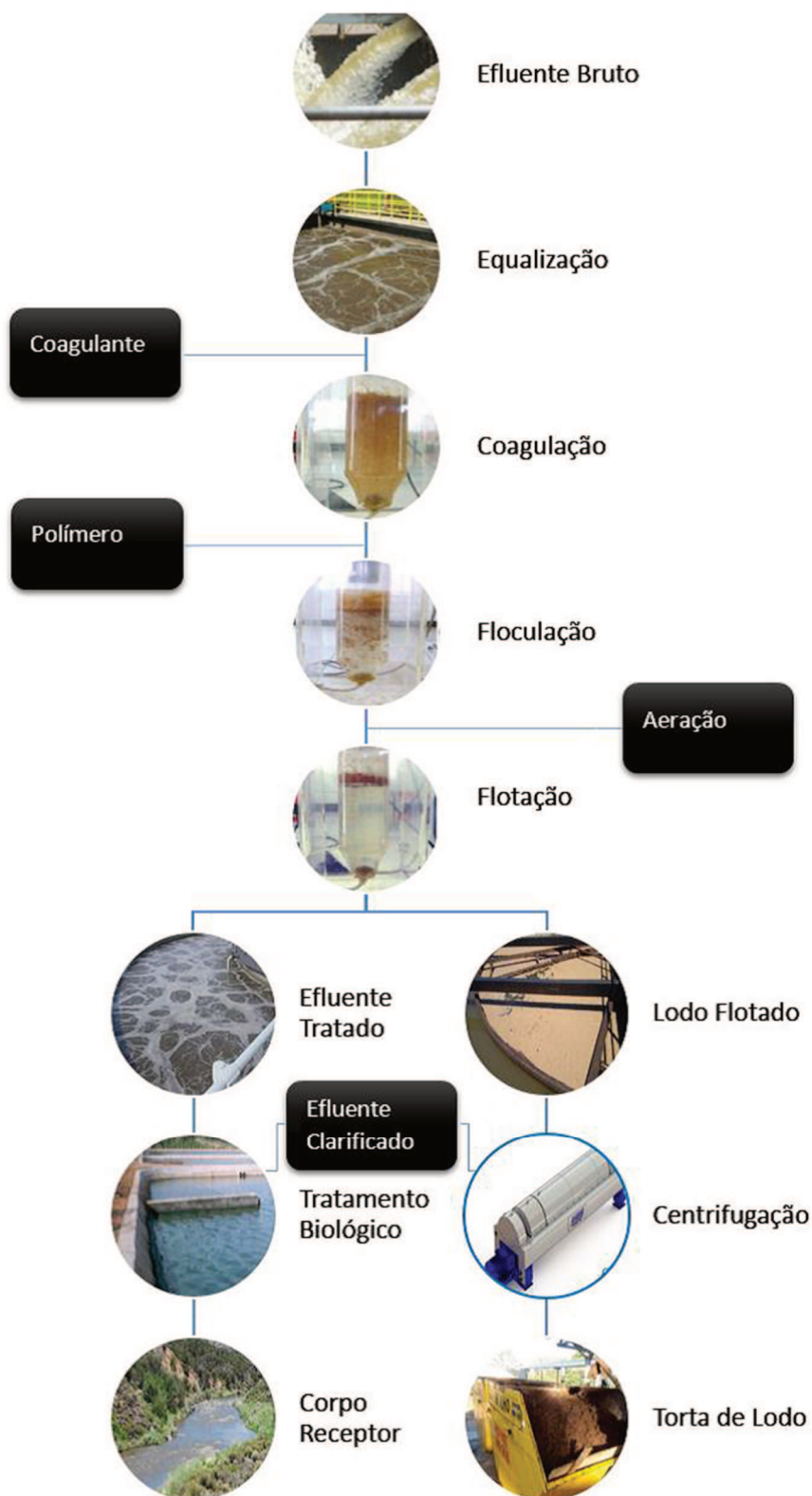
sedimentáveis ou gases. E nesta etapa se destaca o processo de lodos ativos, lagoas aeradas, lagoas de estabilização, filtros biológicos e desgastes anaeróbicos (CAMAROTA, 2011).

Por fim, tem-se o tratamento terciário ou avançado, que é realizado após o tratamento primário e secundário, com o objetivo de melhorar a qualidade do efluente, quando os sistemas anteriores não atingem todos os parâmetros de lançamento estabelecidos pelo órgão ambiental na Licença de Operação. Assim, é aplicado o tratamento terciário, definido como um método de remoção de contaminante (substância suspensas e dissolvidas), que não foram removidos dos efluentes de processos biológicos convencionais, o que inclui remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo (SPELMAN, 2003; SCHATZMANN, 2009).

O processo de geração do LF se inicia com o processo físico-químico, com a equalização do efluente bruto, e em seguida o agente floculante e polímeros são adicionados para intensificar o processo de separação da gordura, também faz uso de dosagens de produtos que induz a formação de microbolhas de ar, o que auxilia no processo de flotação. Assim, ocorre o agrupamento de partículas de gorduras e material orgânico suspenso em “flocos”, em que é elevado à superfície da água para que o LF seja retirado do flotador por raspadores e a água enviada para o tratamento secundário (PINTO et al., 2015; FERREIRA, 2016).

Para Ferreira (2016), o LF é a parte sólida do efluente, e que possui umidade aproximada de 60%. A Figura 2 representa a rota de geração de LF flotado de forma resumida para um melhor entendimento.

Figura 2 – Rota de geração de LF flotado



Fonte: Ferreira (2016, p. 48).

A rota apresentada na Figura 2 é a mais utilizada nos sistemas de tratamento de efluentes. Porém, algumas empresas substituem a etapa de centrifugação por um

sistema de retirada de excesso de umidade através de uma prensa, chamada prensa-lodo.

Desta forma, percebe-se que a agroindústria frigorífica produz uma quantidade significativa de resíduos sólidos e efluentes líquidos, o que gera impactos ambientais significativos quando não tratados de forma correta. Nesse sentido, torna-se indispensável a busca por uma gestão adequada destes resíduos e conhecimento detalhado dos potenciais de utilização de cada resíduo.

2.1.2 Caracterização do Lodo Frigorífico (LF)

Segundo Sena (2005), o LF é gerado a partir do tratamento físico-químico de efluentes líquidos frigoríficos por flotação simples, em que grande quantidade de matéria orgânica e de sólidos suspensos são removidos por meio da agregação de praticamente todos os sólidos do LF através dos compostos formados pelo uso de coagulantes a base de sulfatos de ferro ou de alumínio.

Segundo Brady (2012 apud ROCHA et al., 2013), diante de todos os benefícios ambientais e sustentáveis dos sistemas de tratamento de efluentes, alerta-se uma desvantagem, em que o LF, o maior volume em resíduo sólido gerado neste tratamento e a preocupação de como destinar este resíduo. Vários estudos apontam para o uso potencial como fertilizante, em que o Brasil com sua vasta agricultura, uma boa sugestão de garantir o processo sustentável.

Na maioria dos países, a gestão de resíduos sólidos provenientes de processo de efluentes industriais e sanitários é uma questão de grande relevância no órgão ambiental, o que leva ao desenvolvimento de vários estudos a respeito da gestão alternativa do LF (MENEHINI; PROINELLI, 2015).

Nos estudos observados na literatura, encontram-se resultados das análises do LF, mas a grande maioria relacionado às propriedades químicas elementares, onde o foco é a determinação de elementos químicos presentes para possível destinação, como material para queima em caldeira ou como material de compostagem agrícola. Os principais elementos encontrados nas análises de LF são carbono, oxigênio, nitrogênio e hidrogênio (SENA, 2005; MENEHINI; PROINELLI, 2015; VIRMOND, 2007).

A Tabela 4 apresenta algumas caracterizações elementares, que no estudo realizado por Sena (2005) foram executadas através do equipamento CHN modelo

Perkin Elmer-240 e LECO (enxofre) modelo SC-132, e nos estudos de Meneghini e Proinelli (2015) e Virmond (2007) não apresentam a técnica utilizada.

Tabela 4 – Análise elementar do LF realizadas na literatura

Autor	Ano	Análise elementar (%)				
		C	O	N	H	S
Sena	2005	54,59	23,85	8,22	7,60	ND*
Virmond	2007	50,90	20,24	8,10	7,90	0,30
Meneghini e Proinelli	2015	31,5	18,6	11,6	11,5	0,31

*ND = não disponível.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar a Tabela 4 é possível observar que o LF é composto basicamente por C, O, N e H, pelo fato do seu processo de tratamento remover grandes quantidades de matéria orgânica e de sólidos suspensos. Conforme analisado pelos autores, o LF tem maior concentração de carbono, com valores entre 31,5% e 54,59%, seguido por oxigênio com teores entre 18,5% até 23,85% e ainda nitrogênio e hidrogênio com teores entre 7,6% até 11,6%. O estudo realizado por Sena (2005) mostra resultados realizados com amostras no estado úmido. Já os demais trabalhos mostram o resultado feito com amostras secas para a realização das análises.

Outra análise realizada por autores e identificada na literatura é a análise imediata, que identifica o conjunto de processos de separação dos componentes das misturas. Na Tabela 5 pode-se visualizar as misturas que foram identificadas no LF.

Tabela 5 – Análise imediata do LF identificada na literatura

Autor	Ano	Análise imediata (%)			
		Cinzas	Material volátil	Carbono fixo	Umidade
Sena	2005	5,43	80,80	13,46	70,00
Virmond	2007	12,30	74,80	8,40	15,00
Meneghini e Proinelli	2015	17,53	64,22	N.D.	12,80

Fonte: Elaborada pelo autor.

Através das informações da Tabela 5, percebe-se que há uma diferença de umidade do LF nos três estudos, onde a umidade se encontra alta (70%) no estudo realizado por Sena (2005), e nos dois demais estudos se encontra com 12,80% e 15,00%, pelo fato da análise ser realizado com o LF em base seca. Outra análise com valores diferentes encontrada na literatura e presente na Tabela 5 é a análise das cinzas, e apresenta um valor menor (5,43%) no estudo realizado por Sena (2005), e nos demais estudos que apontam valores de 12,3% e 17,53%. Entre os resultados da análise imediata, o da quantidade de cinzas é importante para o presente estudo, pois

os elementos que constituem as cinzas, como o ferro e o cálcio, são importantes no processo de fabricação da argila expandida com a adição de LF. Na Tabela 6 são apresentados os elementos que compõem as cinzas resultantes do LF em estudo realizado por Virmond (2007).

Tabela 6 – Composição das cinzas (% b.s.¹)

Elemento	Composição (%)
Fe ₂ O ₃	32,40
CaO	17,40
MgO	1,30
Na ₂ O	1,70
K ₂ O	1,70
SiO ₂	4,90
Al ₂ O ₃	1,70
TiO ₂	<0,30
P ₂ O ₅	36,30

¹Base seca.

Fonte: Virmond (2007).

Na Tabela 6 é possível observar que a cinza resultante da secagem do solo é constituída principalmente por ferro, cal e fósforo e em menores quantidades por outros elementos. Entre os elementos encontrados em maior quantidade, o ferro é um dos mais importantes, pelo fato de influenciar positivamente no processo de expansão da argila.

2.2 ARGILA EXPANDIDA

Os agregados leves podem ser naturais ou artificiais, dentre agregados naturais, pode-se citar a diatomita, pedras-pomes, escórias, cinzas vulcânicas e tufos, em que a maioria é de origem vulcânica, com exceção da diatomita. Já os agregados artificiais são obtidos por tratamento térmico de algumas matérias-primas, como a argila, folhetos, ardósia, diatomito, perlita, vermiculita e escória expandida (ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005).

Dentre os agregados leves, destaque-se a argila expandida, devido a possibilidade de sua utilização na construção civil como agregado para concretos e enchimentos leves. Na Europa, este material tem se destacado também pelas características sustentáveis no seu processo, pois tem alto rendimento em sua produção, e que a extração de 1 m³ de matéria prima torna possível produzir em média 5 m³ de argila expandida. Outra evidência na contribuição ambiental é a possibilidade de absorver resíduos na sua produção (EXCA, 2018).

Segundo Melo (2000), a argila expandida é um material resultante do processo de aquecimento de argilas com propriedades expansivas. O material foi descoberto em 1885 após estudos realizados por Stephen J. Hayde, engenheiro da indústria cerâmica de Kansas nos Estados Unidos, e passou por processo industrial em 1918 nos Estados Unidos, onde era denominada Haydite. Até a segunda guerra mundial, o material era utilizado na produção de barcos de concreto leve, e depois passou a ganhar espaço na indústria da construção, e teve sua disseminação na Europa após esse período (ACI 213R-03, 2003).

De acordo com Moravia et al. (2006), a argila expandida é produzida por aquecimento de determinados tipos de argilas a uma temperatura de aproximadamente de 1200°C. Quando atinge esta temperatura, parte dos constituintes da argila se fundem e geram uma massa viscosa, e a outra parte se decompõe quimicamente, que liberam gases que não são expelidos devido a fase líquida que envolve a partícula. Dessa forma, a estrutura porosa se mantém após o resfriamento, e se expande em até sete vezes o seu volume inicial, o que resulta em um material leve.

Pelas características da argila expandida, a mesma possui aplicações variadas no setor da construção civil. A argila pode ser utilizada para integrar as caixas de ar das paredes duplas, que funcionam como isolante térmico e acústico, na intervenção de regularização na estrutura de piso, onde atua também como elementos drenantes na estrutura dos pisos térreos (ROSSIGNOLO, 2003).

Segundo Wei et al. (2016), agregados leves têm muitas aplicações práticas, com destaque no uso para produção de concreto leve na construção civil. O agregado leve possui uma massa específica baixa, em que a massa específica corresponde a menos de três quartos de um agregado com massa normal. Como resultado ocorre uma possível redução do uso de aços reforçados e cimento, conseqüentemente a redução do custo da construção.

Logo, o uso da argila expandida na construção civil tem como vantagem a redução de massa das estruturas, que proporciona um melhor isolamento acústico e térmico, bem como economia na infraestrutura, formas e escoras. O material funciona como um agregado leve e para isso requer avaliação e realização de ensaios de caracterização e ensaios específicos para indicar o comportamento do agregado (PINTO, 2005). Os agregados comuns, como areia e brita têm densidade entre 2,4 e

2,8 g/cm³, enquanto os agregados leves têm entre 0,8 e 2,0 g/cm³ (CHEESEMAN et al., 2005).

De acordo com Rossignolo (2003), o concreto nas últimas duas décadas passou por uma grande evolução, em função do desenvolvimento de técnicas e equipamentos para estudos dos concretos e ao uso de novos materiais. O agregado leve é um material com bom desempenho em relação ao concreto convencional, com sua utilização no concreto leve, que o autor define como concreto com estrutura porosa, onde sua massa específica é inferior ao concreto tradicional, e pode ser obtido com a utilização de agregado leve ou com a incorporação de ar (concreto celular) ou sem finos.

Atualmente no Brasil, somente uma empresa produz a argila expandida, que é a Cinexpan Indústria e Comércio Ltda, no município de Várzea Paulista, localizado a 60 km de São Paulo. Cerca de 60% da produção de argila expandida é destinada ao setor da construção civil nacional, e os outros 40% são absorvidos pela indústria têxtil, de ornamentação e outras aplicações como substratos (MENDES, et al., 2016).

Rossignolo (2009) realizou estudos com a argila expandida nacional, fabricada pela empresa Cinexpan, que possui granulometrias diferentes para poder atender o setor da construção civil, da indústria têxtil e de jardinagem. Os agregados leves empregados no concreto estrutural são os com denominação de Cinexpan 0500 ($D_{máx} = 4,8$ mm), Cinexpan 1506 ($D_{máx} = 12,5$ mm) e Cinexpan 2215 ($D_{máx} = 19,0$ mm). Como resultado do estudo com a argila expandida, foi possível obter a sua composição química (obtida pela técnica de FRX), os valores de absorção de água e a massa específica. Em relação a sua composição química, ela é constituída principalmente por sílica, alumínio e ferro, como pode ser observado na Tabela 7.

Tabela 7 – Composição da argila expandida brasileira

Composto	Porcentagem %
Si O ₂	62,3
Al ₂ O ₃	17,7
Fe ₂ O ₃	10,3
Mg O	2,8
K ₂ O	4,1
Ti O ₂	1,0
Na ₂ O	0,3
Ca O	0,4
PF	0,7

Fonte: Rossignolo (2009).

O fabricante ainda fornece o valor de absorção de água da argila expandida, que varia de acordo com a granulometria do agregado, já que a empresa fabrica três tipos de agregados leve, como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Absorção de água da argila expandida

Tempo	Absorção de água (%) (em massa)		
	Cinexpan 0500	Cinexpan 1506	Cinexpan 2215
30 min	1,8	2,7	4,0
1 hora	2,7	3,5	5,0
1 dia	6,0	7,0	10,3

Fonte: Adaptado de Rossignolo (2009).

O valor de absorção de água tem uma grande variação de acordo com o tipo de agregado leve e com o tempo de absorção de água. Os valores apresentados de absorção de água se devem à quantidade de poros que é formada no interior do agregado leve e a formação da camada externa vitrificada.

Outro resultado apresentado por Rossignolo (2009) é a massa específica do agregado leve, que é apresentada de acordo com o seu tipo, sendo 1,51 g/cm³ para o agregado Cinexpan 0500, 1,11 g/cm³ para o agregado Cinexpan 1506 e 0,64 g/cm³ para o agregado Cinexpan 2215.

Diante da possibilidade de fabricação da argila expandida com adição de resíduos, é necessário realizar e avaliar a caracterização das matérias-primas utilizadas. O Quadro 1 reúne as caracterizações que alguns autores realizaram para a fabricação de argila expandida.

Quadro 1 – Caracterizações realizadas nas matérias - primas utilizadas na confecção da argila expandida

Autor	Trabalho	Caracterização	Ensaio
Modolo et al. (2013)	Argila expandida com resíduo (Lodo de cal)	Caracterização física; Caracterização química; Caracterização mineralógica; Caracterização térmica.	Granulometria e Massa específica; FRX e Perda ao fogo; DRX; Análise térmica diferencial e Termogravimetria.
Pinto (2005)	Argila expandida com resíduo (Lodo de cal)	Caracterização física; Caracterização química; Caracterização mineralógica; Caracterização térmica; Caracterização morfológica.	Granulometria, Massa específica e Absorção de água; FRX; DRX; Análise térmica diferencial e Termogravimetria; MEV.
Takahashi (2006)	Argila expandida com resíduo (escória de alumínio)	Caracterização física; Caracterização química; Caracterização mineralógica; Caracterização térmica; Caracterização morfológica.	Granulometria (Laser) e MEV; FRX; DRX; Análise térmica diferencial e Termogravimetria; MEV.
Bauer (2017)	Argila expandida com resíduo (Lodo de ETA)	Caracterização física; Caracterização química; Caracterização mineralógica; Caracterização térmica.	Granulometria, Massa específica, Umidade e Superfície específica; DRX; FRX, Perda ao fogo e pH.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No Quadro 1 pode-se observar que as principais caracterizações aplicadas nos estudos com argila expandida são as físicas, químicas, mineralógicas e térmicas. Com os resultados destas caracterizações é possível obter as informações necessárias para avaliar as propriedades das matérias-primas, e observar se atendem as necessidades para serem utilizadas na confecção do agregado leve. O Quadro 2 apresenta uma relação dos resultados de caracterizações que foram realizadas em trabalhos que utilizam a argila.

Quadro 2 – Caracterização da argila em diferentes estudos

Autor	Trabalho	FRX	DRX	ATG	ATD
Takahashi (2006)	Utilização da escória de alumínio na fabricação de argila expandida	Si – 48,1 % Fe – 17,6 % Al – 15,2 % K – 14,6 % Ca – 2,5% Ti – 1,5% Mn – 0,3 % Zr – 0,1% Zi – 0,1% Itrio - <0,1 Sr - <0,1 Total – 100% (elementar)	Mistura de vários argilominerais (mica, ilita, quartzo e caulinita – predominante)	Perda de água até 150° C; Perda de massa por liberação de matéria orgânica e água de cristalização de 150° C a 650° C.	Reação endotérmica a 150° C (devido à perda de água adsorvida); Reação exotérmica a 500° C (provável desidroxilação da caulinita); Reação exotérmica a 800° C (provável transição cristalina* da argila).
Pinto (2005)	Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves	Si O ₂ – 54% Al ₂ O ₃ – 19% Fe ₂ O ₃ – 7,4% CaO – 1,6% MgO – 3,9% K ₂ O – 4,2% Perda ao fogo – 8,8% (compostos)	Quartzo (maioritário), ilita, dolomita e feldspato	ND*	Endotérmica entre 100° C e 200° C (perda de água); Entre 200° C e 300° C (oxidação da matéria orgânica); Entre 500° C e 600° C (saída de água estrutural).
Bauer (2017)	Valorização de lodo de ETA como matéria-prima para a fabricação de argila expandida	Si O ₂ - >50% Fe ₂ O ₃ e Al ₂ O ₃ – Entre 5% e 50% Na ₂ O, MgO, P ₂ O ₅ , SO ₃ , K ₂ O, CaO, TiO ₂ e MnO - <5% (compostos)	Quartzo (predominante), muscovita, albita e hematita	ND	ND

*ND – Não disponível.

*Transição cristalina – Reação de vitrificação da argila.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através do Quadro 2, percebe-se como principais componentes da argila (matéria-prima para a fabricação de argila expandida), o silício, ferro e alumínio, elementos que influenciam no processo de fabricação do agregado leve.

2.2.1 Fenômeno de Expansão Piroplástica

O fenômeno da expansão da argila é um processo que de forma ideal, produz uma estrutura por piroexpansão, e forma um material de baixa densidade. O processo

da piroexpansão só é possível pela liberação de gases das substâncias presentes na matéria-prima e também pela formação de uma fase vítrea que ocorre na temperatura de fusão, fase esta que garantirá uma superfície exterior impermeável e com boa resistência mecânica (GOMES NETO, 1998; DE GENNARO et al., 2004).

Para que a argila produza uma estrutura celular por piroexpansão com uma baixa massa específica, são necessárias algumas condições conforme Riley (1951) e De Gennaro et al. (2004):

- a) deve conter uma ou mais substâncias que desenvolvam gases a altas temperaturas, o que produz expansão suficiente e a massa específica aparente desejada;
- b) deve produzir uma fase líquida altamente viscosa em temperatura de fusão, pode-se assim aprisionar os gases, o que caracteriza a fase vítrea na faixa de temperatura de fusão;
- c) durante o resfriamento das pelotas deve formar um filme vítreo externo, que torne a superfície externa impermeável a água, homogênea e mecanicamente resistente.

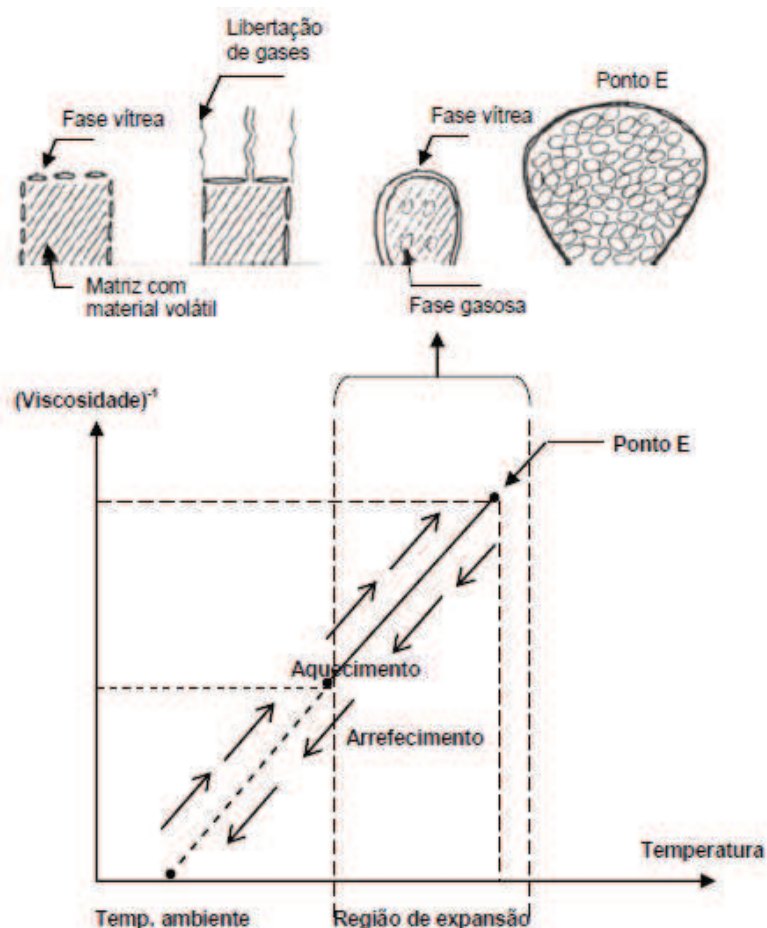
Para que ocorra o fenômeno da expansão são necessários gases naturais ou substâncias adicionadas às matérias-primas (aditivos). Os gases naturais podem ser de acordo com De Gennaro et al. (2004):

- a) vapor de água proveniente da volatilização das moléculas de água das camadas interiores ou água de cristalização dos minerais de argila ou outros silicatos;
- b) CO e CO₂ da combustão da matéria orgânica;
- c) CO₂ a partir da dissociação de carbonatos;
- d) O₂ e CO₂ formados pela redução do ferro férrico;
- e) SO_x da oxidação do sulfeto;
- f) F e Cl dos minerais da argila.

Já os materiais artificiais usados na liberação de gases são os carvões, ceras e hidrocarbonetos, em que a combustão leva à geração de dióxido de carbono, monóxido de carbono e fuligens.

A Figura 3 representa o processo em que ocorre a expansão, em que no aquecimento ocorre a liberação de gases e a formação da camada vítrea.

Figura 3 – Formação de uma fase vítrea contínua que favorece a expansão

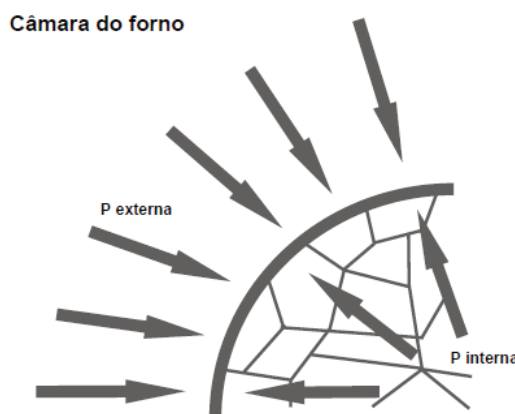


Fonte: Mendes (1998, p. 25).

Na Figura 3, a parte inferior que apresenta o gráfico de viscosidade e temperatura, é possível entender o tratamento térmico do agregado e identificar a faixa de expansão. O aumento da temperatura implica uma diminuição da viscosidade. A faixa de viscosidade ideal da massa vítrea é a que corresponde à região de expansão. Nesta região há um equilíbrio entre a pressão exercida pelos gases internos e a pressão exercida pela camada externa (Figura 4). Abaixo desta região, a viscosidade é muito elevada, o que não leva ao selamento dos poros superficiais. Acima, a viscosidade é muito baixa, desta forma se torna insuficiente para reter os gases formados, o que origina um coalescimento dos poros e a elevação da massa específica aparente do agregado (MENDES, 1998).

A Figura 4 representa a pressão interna exercida pelos gases contra a pressão da camada externa.

Figura 4 – Pressão interna exercida pelos gases contra a pressão da camada externa



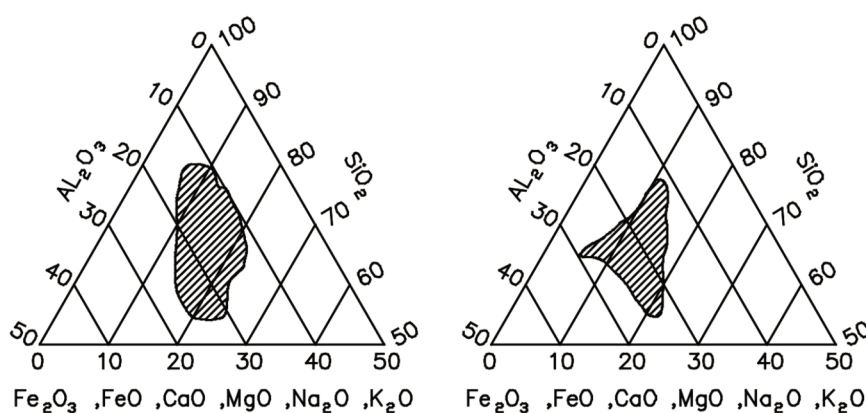
Fonte: Mendes (1998, p. 26).

Conforme pode-se observar na Figura 4 a camada superficial pode ser expandida idealmente até um limite crítico, que depende da relação entre a pressão interna e externa e a interação entre a fase gasosa e a fase vítrea (MENDES, 1998).

Para prever o comportamento ideal das argilas na piroexpansão são usados alguns métodos, tais como: análise da composição química, análise mineralógica, análise granulométrica, ensaios de queima lenta e/ou rápida e ensaios de resistência mecânica dos agregados (SANTOS et al., 1986).

Diante da disponibilidade de fontes de matérias-primas com as mais diversas composições de argila, há a necessidade de se estudar suas características expansivas. Uma das características que indicam se a argila é expansiva, é a sua composição química, que pode ter variações entre os principais compostos de SiO_2 , Al_2O_3 e outros como Fe_2O_3 , que devem estar dentro dos limites aproximados representados pelo diagrama ternário da Figura 5 (COUTINHO, 1988; MORAVIA et al., 2006).

Figura 5 – Zonas em que se encontram as composições químicas das argilas com característica expansiva



Fonte: Moravia et al. (2006, p. 194).

Riley (1951) correlacionou a viscosidade do material fundido pela queima com a composição química da matéria-prima. Logo, a composição química da argila está relacionada ao processo de ocorrência ou não do processo de expansão. Estas zonas indicadas na Figura 5 apresentam a região de formação de fase termoplástica com viscosidade adequada para gerar gases (MENDES, 1998). Para Murray e Smith (1958), a composição química, dentro dos parâmetros, não garante a expansão das argilas. Para que isto ocorra o material deve conter um mineral que libere gás na temperatura de sinterização, que pode variar entre 1100°C e 1300°C.

De acordo com Riley (1951), a reação mais significativa envolvida na formação do gás é a redução parcial de óxido férrico, de acordo com a Equação 1:



O óxido férrico é produzido pela limonita ou hematita presente na argila natural ou pela decomposição, com ou sem oxidação, do ferro ou de compostos ferrosos tais como biotita, montmorilonita e illita (Riley, 1951; Santos, 1992). No estudo realizado por Conley et al (1948), foram avaliadas oitenta argilas que sofrem expansão, em que destas, no mínimo 5% possuíam decompostos de ferro. O mesmo estudo identificou que 90% das argilas que sofrem expansão possuíam pH acima de 5, e as que não sofreram expansão o pH foi inferior a 5.

Na queima rápida dos agregados leves, o material orgânico fica retido pela camada vítrea e a sua decomposição produz gás. Para White (1959), durante a

queima dos agregados leves teores acima de 2% de conteúdos orgânicos causam problemas na queima, em que o ideal seria entre 0,3% e 1%. Para Mielenz et al. (1955), a estrutura densa da matéria-prima é importante na fabricação, visto que retarda a formação de gases necessários para a expansão, enquanto os compostos porosos permitem uma queima acelerada do carbono.

2.2.2 Processo de Fabricação do Agregado Leve

O processo da fabricação da argila expandida, segundo Melo (2000), é definido pelas etapas de extração da argila, seguido pela preparação do material, que é feito pela formação dos grãos que irão passar pelo tratamento térmico. Em seguida ocorre o aquecimento, parte fundamental do processo, com temperaturas que devem chegar em torno de 1200°C. Durante o aquecimento ocorre a expansão do composto e, por fim, a perda de calor e o armazenamento da argila expandida.

De forma simplificada, o processo de fabricação da argila expandida pode ser explicado pelas etapas descritas na Figura 6.

Figura 6 – Etapas do processo de fabricação de argila expandida



Fonte: Adaptada de Melo (2000, p. 64).

Para a fabricação de agregados leves, podem ser utilizados dois processos, a sinterização e o forno rotativo. Em ambos a matéria-prima sofre expansão e produz agregados com características particulares. Os agregados leves produzidos por processo de sinterização possuem altos valores de absorção e formato irregular. Os agregados leves produzidos por fornos rotativos possuem granulometria variada,

formato regular arredondado, além das características de baixa permeabilidade e parte central esponjosa, que resulta em pouca absorção de água, o que leva esse tipo de agregado leve a ser mais empregado na produção de concreto leve.

No processo de sinterização, a matéria-prima é misturada com uma quantidade adequada de combustível e colocada sobre uma grelha móvel em um forno com altas temperaturas, que resulta na sua expansão em função da formação de gases. Os agregados obtidos pelo processo de sinterização apresentam os poros abertos, sem nenhum recobrimento, que aumenta assim, os valores de absorção de água. Outra característica do agregado é sua massa específica, que normalmente varia entre 0,65 e 0,9 g/cm³ (GOMES NETO, 1998; ROSSIGNOLO, 2009; ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2003).

No processo de fornos rotativos são aproveitadas as características de expansão de alguns materiais, como algumas argilas, quando submetidas a altas temperaturas, entre 1000°C e 1300°C, em que forma uma capa vítrea capaz de aprisionar gases. No Brasil, a argila expandida é produzida pelo processo de fornos rotativos (SANTOS et al., 1986; GOMES NETO, 1998; MAYCÁ, 2009). Segundo Rossignolo (2009), os agregados leves produzidos no Brasil por este processo têm massa específica que varia entre 0,64 e 1,51 g/cm³.

O processo de fabricação da argila expandida por meio de forno rotativo conforme descrito por Rossignolo (2009) e Santos et al. (1986) acontece pelas seguintes etapas:

- a) homogeneização: a matéria-prima é lançada em depósito para homogeneização;
- b) desintegração: etapa em que o material é colocado em desintegrador, que reduz os grandes torrões em diâmetros máximos de 5 mm;
- c) mistura e nova homogeneização: com o uso de esteiras o material é transportado para o misturador, com o objetivo de deixar a argila com a plasticidade adequada para a extrusão. Geralmente é realizada a correção com água nessa etapa, além de se adicionar aditivos para melhorar a plasticidade da argila e suas propriedades piroexpansivas;
- d) laminação: os torrões de argila maiores que 5 mm precisam ter seu tamanho reduzido, visto que isto é possível através do uso de dois cilindros rotativos, o que deixa o material pronto para a extrusão;

- e) pelotização/granulação: é realizada por extrusão contínua, onde o material é forçado contra uma grande placa circular perfurada com orifícios circulares. O material que sai pelos orifícios é cortado por uma lâmina rotativa que fica em frente a extrusora, e forma assim as pelotas que vão possuir o diâmetro dos orifícios. Estas pelotas são lançadas ao forno e para que não colem uns aos outros são cobertas por sílica fina ou com outro tipo de argila para tornar a superfície mais macia;
- f) secagem e queima: é considerada a etapa mais importante e ocorre dentro do forno rotativo. O processo de queima das pelotas, como sua condução, a inclinação do forno, o tempo de permanência dentro do forno, entre outras características específicas, depende das características das argilas e devem ser estudados visto a maior economia do processo e do desempenho do produto. Durante o processo ocorre a secagem das pelotas, e quando o forno atinge a temperatura entre 1000°C e 1350°C na zona de combustão ocorre a piroexpansão das pelotas, geralmente o combustível usado é óleo ou gás. De acordo com Pinto (2005), se o forno rotativo tiver 50 m de comprimento, ele gira a velocidade variável de uma volta em cada 30-50 segundos. De acordo com a inclinação do forno, os cilindros de material levam cerca de 2 horas para atravessá-lo. Na primeira parte do forno as pelotas são secas pelos próprios gases de combustão, em seguida as pelotas são deslocadas lentamente para a zona quente e, na zona de combustão, o forno atinge sua temperatura máxima para a expansão das pelotas, em que varia para cada material (faixa entre 1100 a 1350°C). Na temperatura de sinterização com vapor de 1170°C ocorre a expansão do material, pois estará numa fase plástica, em que os gases são liberados à medida que o material expande, o que forma uma estrutura celular leve.
- g) resfriamento: o equipamento de resfriamento é um cilindro em que é soprado ar em contracorrente através de ventiladores. Este ar aquece e é reaproveitado na combustão a processar-se no forno;
- h) armazenamento/classificação: após serem resfriados, os agregados leves são classificados através de peneiramento, em seguida é ensacado e armazenado para comercialização.

Todo o processo que envolve a fabricação de argila expandida, depende das propriedades de sua matéria-prima, que deve ter como principal característica a propriedade expansiva. Segundo Ozguven e Gunduz (2012), para identificação de propriedades expansivas de argilas e para uma boa implementação de uma fábrica em uma determinada região, sugere-se o estudo com o mesmo processo de fabricação, porém em escala laboratorial, com as formulações realizadas em fornos do tipo mufla (OZGUVEN E GUNDUZ, 2012; SANTOS, 1992).

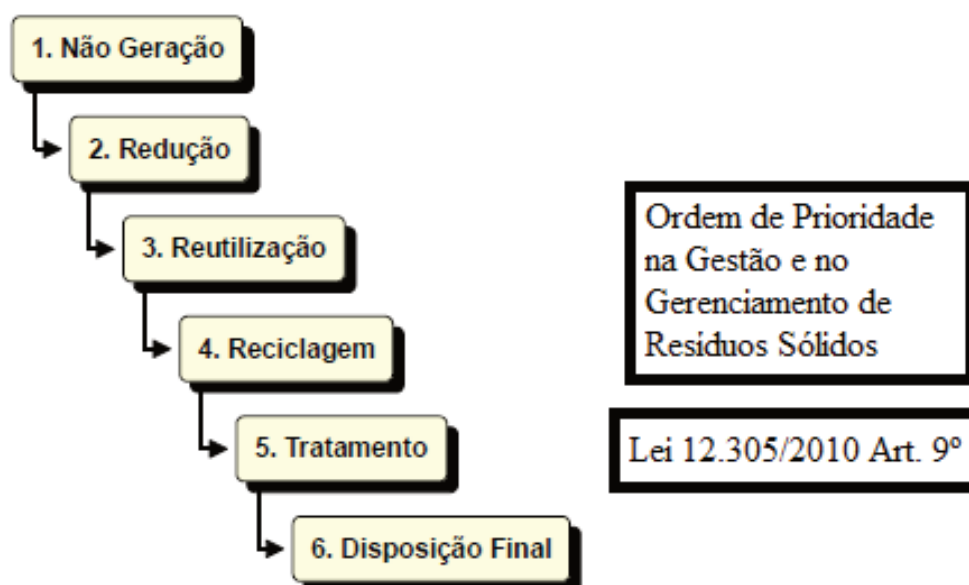
2.3 GERENCIAMENTO E VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS

O crescimento da população a cada dia aliado a um maior poder aquisitivo, faz que esse aumento no padrão de vida, faz que consumidores tradicionais tornem-se consumidores de alto padrão, que impacta diretamente em todos os setores da economia. Por isso, os setores produtivos necessitam ampliar seus negócios e sua produção, o que causa duas grandes problemáticas. A primeira problemática é a exploração demasiada de recursos naturais, o que resulta em escassez de determinadas matérias-primas. A segunda questão é a geração de resíduos que está cada dia mais frequente, que gera grandes quantidades e diversidades desses resíduos (HANSEN, 2016).

Jacobi e Basen (2011) reforçam que o fato do aumento da perspectiva de vida e o crescimento da população, associado à urbanização e ao aumento do consumo de novas tecnologias ocasiona a produção de resíduos, que causa impactos socioambientais. Segundo Modolo et al. (2013), o aumento das atividades industriais que demandam recursos naturais em seus processos que provocam escassez destes recursos. Durante a cadeia produtiva, o processo ainda tem volumes consideráveis de geração de resíduos que não fazem parte do produto final.

Com a escassez de recursos naturais e aumento da geração de resíduos, no Brasil instalou-se a Política Nacional de Resíduos Sólidos, definida pela Lei 12.305 (BRASIL, 2010), que exige dos municípios e indústrias um plano de gerenciamento de resíduos. A Figura 7 representa o artigo nono da lei, onde é definida uma ordem de prioridades com visão de sustentabilidade na elaboração do plano.

Figura 7 – Ordem de prioridades na elaboração do plano de gerenciamento de resíduos conforme a Lei 12.305/2010



Fonte: Adaptada do Portal Resíduos Sólidos (2018).

Em relação aos resíduos industriais, uma das preocupações é a disposição final, que deve ser realizada diariamente. Nesse sentido, para Medeiros et al. (2010), o comprometimento estético da paisagem, custo do processamento-recolhimento e a degradação dos recursos naturais são apontados como os principais problemas ambientais e econômicos relacionados à disposição dos resíduos.

O desperdício causa consequências, tais como o mau uso de recursos, perdas econômicas e a poluição ambiental, porém a extensão e impacto dessas consequências começaram a ser entendidos no âmbito ambiental (BAUSTISTO-LAZO; SHORT, 2013). Os autores ainda citam a importância da eliminação dos resíduos, que vem a ser um dos pilares da competitividade entre as empresas, que se torna cada vez mais essencial para os fabricantes por causa do aumento da consciência ambiental. Assim, é perceptível que a redução de resíduos seja benéfica a qualquer empresa.

Diante das problemáticas relacionadas à disposição dos resíduos industriais, uma alternativa que passa a ser objeto de estudos é a incorporação de resíduos na produção de novos produtos (DOS SANTOS; TEIXERA; KNISS, 2014). Ainda segundo os autores, muitos são os benefícios da incorporação de resíduos industriais em novos produtos, como a redução de impactos ambientais e seus benefícios, a redução de resíduos, a redução do consumo de recursos naturais, preservação das

reservas de matérias-primas, os ganhos econômicos pela redução e minimização de custos, seja pelo armazenamento ou transporte dos resíduos, por fim o desenvolvimento autossustentado, melhoria da imagem empresarial, reutilização de solos ocupados com resíduos, etc.

Atualmente a gestão de resíduos tem uma importância significativa pelo fato de passar a ser fonte geradora de matéria-prima, e conseqüentemente reduzirem o descarte de substância na natureza. Por isso, tem-se o interesse em reintegrar os resíduos no processo produtivo, seja por meio da reciclagem, do reuso ou da recuperação, para contribuir com o desenvolvimento sustentável e a redução de passivos ambientais (DOS SANTOS, TEIXEIRA e KNIESS, 2014).

Nesse contexto, Jacobi e Basen (2011) abordam a importância de padrões de produção e consumo sustentável, que juntamente ao gerenciamento dos resíduos sólidos podem levar a redução dos impactos ao meio ambiente e à saúde.

De acordo com Ekvall et al. (2007), para se obter benefícios ambientais significativos, pode-se citar diferentes processos de gestão de resíduos e seus benefícios, como a incineração de resíduos com recuperação de energia que leva a redução do uso de outras fontes de energia, o uso de materiais provenientes de reciclagem que substitui a produção de material virgem, e por fim o tratamento biológico que pode diminuir a necessidade de fertilizantes artificiais e combustíveis para veículos.

2.4 INCORPORAÇÃO DE RESÍDUOS NA ARGILA EXPANDIDA

Diante dos problemas relacionados à geração de resíduos industriais, alguns trabalhos vêm sendo realizados, que visam a incorporação de resíduos na argila expandida, que ganha cada vez mais espaço no setor da construção civil.

A Tabela 9 mostra os estudos realizados sobre a produção de argila expandida com adição de resíduos feita por outros autores, de forma a comparar os teores de resíduos incorporados, as temperaturas de testes de tratamento térmico e a rampa de aquecimento utilizado por cada pesquisador.

Tabela 9 – Formulações e tratamentos térmicos realizados por outros autores que fabricaram agregado leve com adição de resíduos

Autor/ano	Resíduos	Teores de adição de resíduos	Temperatura	Rampa de aquecimento	Tempo de permanência
Pinto (2005)	Argila expandida com Lodo de cal	0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%	1170°C	10°C / min	8 min
Takahashi (2006)	Argila expandida com escória de alumínio	5%, 10%, 15% e 20%	Entre 1000 e 1170°C	ND	3 min
Bauer (2017)	Argila expandida com resíduo Lodo de Estação de Tratamento de Água (ETA)	5%, 10%, 15% e 20%	1000, 1100, 1150 e 1200°C	15°C / min e 20°C	ND
Li et al. (2016)	Lodo de esgoto, argila salina e esmectita	75%:20%:5%	1000, 1050, 1100 e 1150°C	ND	5, 10, 15, e 20 min
Wei, Cheng e Ko (2016)	Cinza volante de carvão e pó de vidro	75%:25%	Entre 1050 e 1300°C	ND	10 min
Kourti e Cheeseman (2010)	Cinza volante de carvão e pó de vidro	60%:40%	1120°C	ND	ND
Hwang et al. (2012)	Cinzas volantes e sedimentos de reservatório	Cinzas volantes (10, 30 e 50%) e sedimentos de reservatórios (90, 70 e 50%)	1070 a 1150°C	ND	ND

*ND = Não Disponível.

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na literatura existem estudos realizados com a adição de resíduos para a fabricação de agregados leves, no qual utilizam argilas, lodos, cinzas, pó de vidro, entre outros. As proporções variam de acordo com as propriedades de cada resíduo, de forma que deva atender os requisitos mínimos para o processo de expansão. Outra característica que interfere na expansão do agregado leve é a temperatura de sinterização, que varia entre 1000°C e 1300°C, como nos trabalhos citados na Tabela 9. Alguns autores testaram tempos diferentes de sinterização, onde o agregado leve permanece sob determinada temperatura, por um determinado período.

Takahashi (2006) utilizou a escória de alumínio incorporada na argila para fabricação da argila expandida. Nesse estudo, a incorporação da escória de alumínio junto à massa de argila foi na proporção de 5%, 10%, 15% e 20% em massa, e foram

sinterizadas em temperaturas de 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1170°C. A argila estudada possui teores de SiO₂ e Fe₂O₃ de 62,3 % e 9,39%, respectivamente. A escória de alumínio também possui na sua composição química silício e ferro. As amostras com adição de escória de alumínio e submetidas a temperatura de 1000°C, 1050°C, 1100°C tiveram expansão pirolástica superior às amostras sem a adição de escória. Nas temperaturas de 1050°C, 1100°C e 1170°C e com incorporação de 15% de escória, a autora não obteve bom resultado, em que a amostra se expandiu e se fragmentou. Os melhores resultados foram com a incorporação de 5% de escória na amostra, onde foram obtidos resultados próximos às argilas comerciais.

Pinto (2005) estudou a aplicação de um conjunto de resíduos da indústria celulósica (lamas primárias e biológicas, dregs e grits) na confecção de agregados leves de argila expandida. As composições utilizadas tinham quantidades variadas de lamas primárias (5-30%), lamas biológicas (5-40%) e misturas destas lamas com 5% de dregs, e os grits foram utilizados como cobertura das amostras. Os corpos de prova confeccionados tinham formato esférico e massa entre 2,3 e 2,5 g. A autora utilizou forno rotativo na sinterização dos corpos de provas, com uma temperatura de 1170°C e por um tempo de 8 minutos. O resultado de massa específica obtido pela autora para o agregado leve foi entre 0,344 e 0,544 g/cm³ para as amostras que continham lamas primárias, e entre 0,322 e 0,623 g/cm³ para as amostras que continham lamas biológicas. Os melhores resultados encontrados pela autora foram para as formulações com incorporação de lamas primárias entre 10 e 20% e para as formulações com incorporação de lamas biológicas entre 10 e 30%.

Li et al. (2016) utilizou lodo de esgoto, argila salina e esmectita para a confecção de agregado leve. Os principais elementos químicos que constituem o lodo de esgoto, a argila salina e a esmectita são SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Os autores confeccionaram os corpos de prova na proporção de mistura de materiais sólidos fixos de 75%: 20%: 5% (lodo de esgoto: argila salina: esmectita) em massa e uma relação água-sólido de 0,4. As temperaturas de sinterização foram de 1000°C, 1050°C, 1100°C e 1150°C e mantidas durante 5, 10, 15, e 20 minutos. Como resultado do processo de sinterização a 1150°C, formou-se uma estrutura interna porosa e uma camada superficial do esmalte vitrificado. Outro resultado obtido foi o de absorção de água, que reduziu com o aumento da temperatura, onde 14,3% e 1,06% foram registrados para 1100°C e 1150°C, respectivamente. Também foi obtida a densidade aparente do agregado leve a temperatura de 1150°C, que obteve uma baixa

densidade a granel (que considera os vazios entre os diversos componentes do material) de $0,665\text{g/cm}^3$.

Wei et al. (2016) confeccionou agregado que continham cinza volante de carvão e pó de vidro a uma relação de massa de 75%:25%. O agregado leve foi confeccionado em prensa de alta pressão no formato cilíndrico. O processo de sinterização foi realizado em um forno elétrico, por um período de 10 minutos, a uma temperatura entre 1050°C e 1300°C . O processo de resfriamento ocorreu de forma natural. Para melhor análise do agregado leve, após a sinterização, foi investigado a perda de massa, a densidade da partícula, a taxa de absorção de água, resistência a compressão, DRX e as fases cristalinas. A composição química da cinza volante de carvão é majoritária para os compostos SiO_2 e Al_2O_3 , e menores quantidades de Fe_2O_3 e CaO . Já o pó de vidro é constituído principalmente por SiO_2 e Na_2O , e em menores quantidades CaO e MgO . Os autores destacam que os tamanhos das partículas interferem no processo de sinterização. A taxa de absorção representa o número de poros que está aberto para a atmosfera. Quando a temperatura de sinterização é muito alta, a taxa de absorção tende a subir pelo fato de ter maior quantidade de poros abertos para a atmosfera. Os autores concluíram que a adição de cinzas volantes de carvão reduz de 50°C a 100°C a temperatura de sinterização do agregado leve. Em relação à densidade das pelotas queimadas, estas são inferiores a $2,0\text{g/cm}^3$.

Kourti e Cheeseman (2010) estudou a produção de agregado leve a partir de cinzas volantes de lenhite e resíduos de vidro. Estes resíduos têm como principais elementos em sua composição química o SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , MgO e Na_2O , respectivamente. As amostras foram confeccionadas com diferentes proporções, porém, a proporção de 60% de cinzas volantes e 40% de resíduos de vidro em massa foram analisadas quanto à densidade média e absorção de água. Estas amostras tiveram seu processo de sinterização a 1120°C , e obteve uma densidade média de $1,35\text{g/cm}^3$ e de absorção de água de 16%.

Hwang et al. (2012) em seu estudo produziu agregado leve com a adição de 10-50% de cinzas volantes (cinzas de ciclone e cinzas do purificador) e sedimentos de reservatórios. Para o estudo da composição química das matérias-primas foi utilizado o FRX. A composição química do sedimento do reservatório foi de: SiO_2 em 60,92%, Al_2O_3 em 25,21% e em menores quantidades de Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O e K_2O em 9,96%. Já a composição química da cinza volante e cinza do purificador

apresentaram baixa quantidade de SiO_2 e Al_2O_3 , enquanto os elementos (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O e K_2O) estão na proporção de 47,91-59,05%. Desta forma, o sedimento de reservatórios corresponde aos requisitos de argila expandida (SiO_2 : 48-70%, Al_2O_3 : 8-25% e os demais elementos: 4,5-31% de acordo com a Riley (1951). Os agregados leves foram fabricados em três proporções diferentes de cinzas volantes e de sedimentos de reservatórios. A temperatura de sinterização foi de 1070°C a 1150°C. A massa específica dos agregados leves apresentou variação de 0,88 e 1,69 g/cm³, dependendo da composição das amostras e da temperatura de sinterização. O mesmo aconteceu com o valor de absorção de água, que variou de 7,6 a 29%.

A partir dos estudos mencionados verificou-se que foram utilizadas diferentes matérias-primas para a confecção de agregado leve. Através da análise dos resultados de composição química, percebe-se uma padronização dos resultados, em que alguns componentes são encontrados em todas as pesquisas, como o SiO_2 , Fe_2O_3 , Al_2O_3 .

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item são apresentados os materiais e métodos utilizados para a execução do programa experimental deste trabalho.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho estão descritos a seguir.

3.1.1 Argila Natural

As argilas utilizadas no trabalho e suas respectivas denominações são apresentadas na Tabela 10.

Tabela 10 – Descrição das argilas utilizadas neste trabalho

Produto	Origem	Denominação	Utilização
Argila	Argila da Cerâmica 1	Argila 1	Produção de blocos cerâmicos
Argila	Argila da Cerâmica 2	Argila 2	Produção de blocos cerâmicos

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.1.2 Lodo Frigorífico (LF)

O LF utilizado na pesquisa foi armazenado em contêiner logo após o processo de prensagem. Na Figura 8 pode-se observar o LF utilizado nesta pesquisa.

Figura 8 –Lodo frigorífico gerado na indústria



Fonte: Registrada pelo autor.

Na Figura 9 é possível visualizar com maior precisão as localizações dos materiais aplicados neste trabalho.

Figura 9 – Foto aérea da localização dos materiais e de seus processos



Fonte: Google Maps (2018).

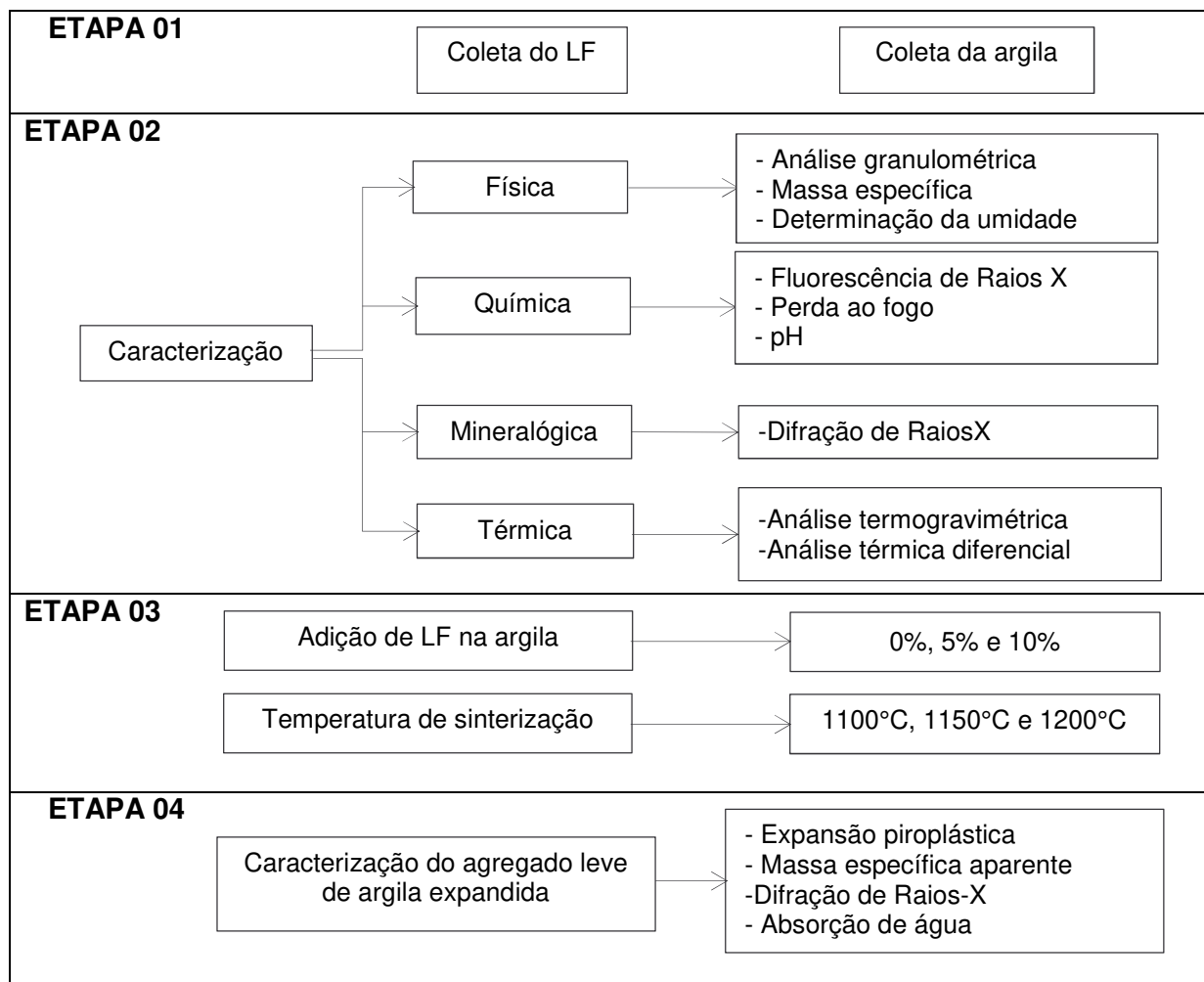
3.2 MÉTODOS

A metodologia deste estudo foi dividida em 5 etapas:

- a) etapa 1: amostragem dos materiais;
- b) etapa 2: ensaios de caracterização das matérias-primas;
- c) etapa 3: formulações, preparo dos corpos de prova e sinterização;
- d) etapa 4: ensaios de caracterização da argila expandida produzida.

O diagrama apresentado na Figura 10 resume as etapas que foram realizadas para a execução do programa experimental. O programa será descrito de acordo com cada etapa nos itens na sequência do trabalho.

Figura 10 – Resumo das etapas do programa experimental da pesquisa



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1 Etapa 1: Amostragem dos Materiais

A NBR 10.007 (ABNT, 2004) define critérios de amostragem de resíduos sólidos. Para isso foi definido um plano de amostragem para o LF, que compreendeu no estudo do processo de geração, definição dos meios de coleta até a armazenagem e transporte ao laboratório. Por orientações da empresa geradora, foram programadas as coletas entre os dias 18 e 22 de dezembro de 2017, onde foram coletados por dia, cerca de 2 kg de amostras simples do resíduo, que totalizou em uma quantidade 10 kg de LF. Por se tratar de um material granular com presença de umidade, foi utilizado

um amostrador de polietileno em formato de concha. As amostras foram armazenadas em frascos de polietileno. O material foi acondicionado na temperatura de 4°C com ausência de luz, para garantir a preservação das propriedades do LF. Na Figura 11 pode-se visualizar o material armazenado e refrigerado para o transporte.

Figura 11 – LF coletado e armazenado



Fonte: Registrada pelo autor.

As amostras de argila foram coletadas em duas jazidas que se localizam próximo ao município de Mineiros/GO. A coleta foi realizada no mês de janeiro de 2018. Foram coletadas cerca de 50 kg de argila. Como as análises foram realizadas na Unisinos e a matéria-prima coletada em Mineiros/GO, para uma melhor conservação das propriedades das amostras, a argila foi armazenada em sacos de polietileno conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 – Argilas coletadas e armazenadas



Fonte: Registrada pelo autor.

3.2.2 Etapa 2: Ensaios de Caracterização das Matérias-primas

A etapa 2 consistiu na caracterização das amostras de LF e das argilas através de ensaios físicos, químicos e térmicos. Estes ensaios se encontram organizados na Tabela 11.

Tabela 11 – Ensaios de caracterização das argilas e LF

Ensaio	Aplicação	Argilas	LF
Fluorescência de Raios X	Identificação dos elementos químicos presentes	X	X
Perda ao Fogo e Teor de Umidade	Avaliação do comportamento térmico e quantificação da umidade	X	X
pH	pH dos materiais	X	X
Análise Granulométrica	Distribuição e tamanho das partículas	X	X
Massa Específica	Determinação da relação entre massa e volume	X	X
Difração de Raios X – DRX	Identificação das fases cristalinas	X	
Análise Termogravimétrica – TG e Análise Térmica Diferencial - DTA	Avaliação do comportamento térmico como perdas de massa e reações que ocorrem	X	

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2.1 Fluorescência de Raios X – FRX

Através do FRX foi possível identificar as composições elementares qualitativas do LF e composições quantitativas da argila. Para isso foi realizado a moagem das amostras em gral de ágata para obtenção do material passante na peneira de malha 200 (abertura de 0,074 mm). As análises foram realizadas com o uso do espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva, marca EDX 720 HS - Shimadzu do Brasil, instalado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) na Unisinos.

3.2.2.2 Perda ao Fogo e Teor de Umidade

Através da análise de perda ao fogo foi possível identificar a perda de massa dos materiais quando submetidos ao tratamento térmico, tanto o LF como a argila foram analisados. A análise de perda ao fogo foi realizada de acordo com a Norma CEMP 120 – Determinação da perda ao fogo (ABIFA, 2015). Através de ensaio foi possível determinar a evaporação de água na temperatura de 105°C, que gerou o teor de umidade dos materiais. Foi possível também verificar a decomposição da matéria orgânica na temperatura de 525°C, o material volátil na temperatura de 950°C e as

demais perdas das amostras. Esta técnica utilizou o forno mufla (Quimis), situado no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) na Unisinos.

3.2.2.3 pH

A análise de pH foi realizada nas amostras das duas argilas, no LF e na mistura de argila e LF. A análise é importante pois é uma das características que sugerem potencial de piroexpansão no processo de sinterização da argila expandida (SANTOS, 1992).

Para realização do ensaio, foram preparados 5mL de material, referente a cada formulação. Em seguida foi adicionado 100 mL de água deionizada em um Becker que ficou em processo de agitação por 5 minutos. Depois de 10 minutos de descanso utilizou-se o pHmetro até a estabilização da leitura. A análise foi realizada no Laboratório de Química na Unisinos, onde utilizou-se o agitador da marca Ethik e o pHmetro da marca Digimed modelo DM-20.

3.2.2.4 Análise Granulométrica

Através da análise de granulometria é possível identificar o perfil de dimensões dos grãos componentes dos materiais de partida, o LF e as argilas.

As argilas foram preparadas, de forma que foram moídas até a uma fração passante na peneira de malha 200 (abertura de 0,074 mm), necessário para melhor reprodução dos resultados. As análises foram realizadas pela técnica de granulometria a laser, com o analisador de partículas modelo S3500 - Microtrac, no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) na Unisinos.

A determinação da distribuição granulométrica do LF foi realizada de acordo com a norma NBR 7181 (ABNT,1984), através da técnica de peneiramento no Laboratório de Materiais de Construção Civil na Unisinos.

3.2.2.5 Massa Específica

As análises de massa específica foram realizadas no Laboratório de Caracterização e Valorização de Materiais (LCVMat) na Unisinos, através de um picnômetro a gás hélio da marca Micromeritics (modelo Accupyc II 1340). Com esta

análise, é possível identificar as massas específicas do LF e da argila, onde o gás faz o preenchimento de vazios, desta forma é possível quantificar a massa da unidade e volume real dos materiais.

3.2.2.6 Difrações de Raios X – DRX

O ensaio de DRX foi realizado para identificar os compostos cristalinos nas matérias-primas da argila.

O preparo das amostras foi por moagem em gral de ágata até atingir uma granulometria inferior a 44 micrômetros. A análise foi realizada no laboratório do ITT Fóssil na Unisinos. Os difratogramas foram obtidos através da utilização de uma fonte de $\text{CuK}\alpha$ com passo de $3^\circ 2\theta/\text{min}$ e o intervalo angular analisado foi de 4 a 80° . Os resultados foram analisados através do software X'Pert High Score.

3.2.2.7 Análise Termogravimétrica– TG e Análise Térmica Diferencial – ATD

A análise termogravimétrica permite avaliar a mudança de massa de um material em função da variação da temperatura em regime controlado (atmosfera e pressão). É necessária uma balança de precisão com um forno programado para aumentar a temperatura com uma taxa de aquecimento constante.

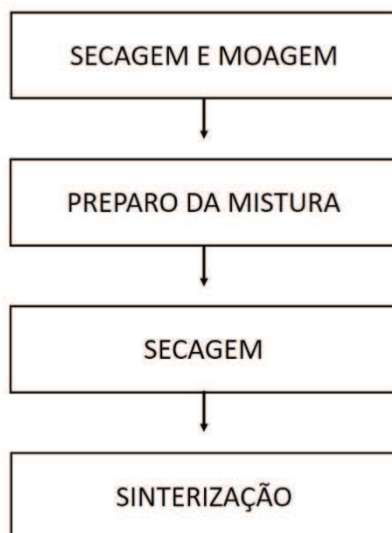
A análise térmica diferencial sinaliza as transformações do material quando submetido a um tratamento térmico controlado, onde foram identificadas se as transformações são endotérmicas ou exotérmicas.

As análises foram realizadas de forma simultânea em uma termobalança do LCVMat na Unisinos, modelo RB*3000*20 (BP Engenharia com as temperaturas entre 25°C e 1000°C com taxa de aquecimento de $10^\circ\text{C}/\text{min}$.

3.2.3 Etapa 3: Formulações, Preparo dos Corpos de Prova e Sinterização

A produção de argila expandida em escala laboratorial seguiu as seguintes etapas apresentadas no organograma da Figura 13.

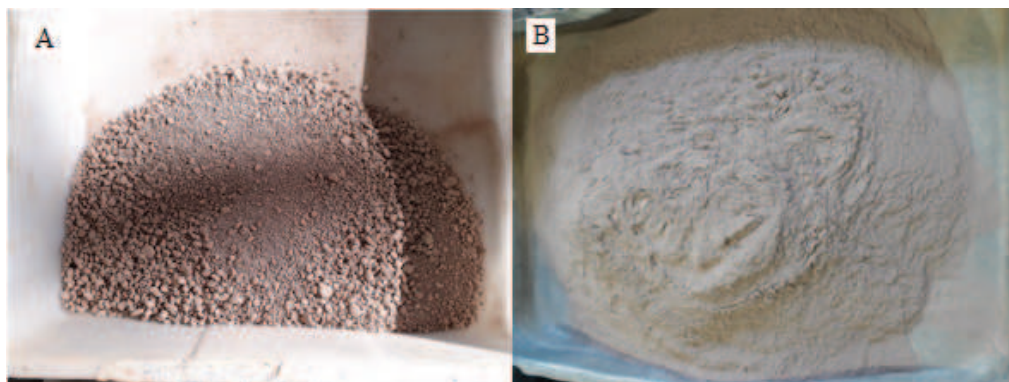
Figura 13 – Organograma das etapas de produção da argila expandida em escala laboratorial



Fonte: Elaborada pelo autor.

Inicialmente foram colocados os materiais (argila e LF) em estufa a 105°C por 24 horas. Em seguida, os materiais foram submetidos à moagem. As argilas foram moídas em moinho de bolas por cinco minutos até atingirem granulometria inferiores a 300 µm, e o LF que possui matéria orgânica em sua composição, foi moído em gral de porcelana até atingirem a mesma faixa de granulometria da argila. Os processos de secagem e moagem foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção Civil na Unisinos. A Figura 14 mostra a argila natural seca (A) e após o processo de moagem (B).

Figura 14 – Argila natural seca (A) e argila natural moída (B)



Fonte: Registrada pelo autor.

Na Figura 15 é possível visualizar o LF após a secagem (A), o LF no processo de moagem (B) e o LF moído (C).

Figura 15 – Secagem (A), processo de moagem (B) e LF moído (C)



Fonte: Registrada pelo autor.

Na etapa de preparo da mistura, as formulações utilizadas na pesquisa foram elaboradas entre as composições em percentuais de massa de LF e argila. Para as duas argilas, utilizou-se a composição de referência sem adição de resíduo, e foram elaboradas formulações nos percentuais de 5% e 10% em massa de adição de LF sob amassa da argila. A água necessária para conformação foi adicionada posteriormente para permitir a moldagem dos corpos de prova. Foram preparados 5 corpos de prova para cada formulação, sendo cada um com massa entre 2,3 g e 2,8 g, e foram preparados manualmente em formato esférico. A Tabela 12 apresenta as formulações utilizadas no estudo, bem como as denominações que foram empregadas nas descrições.

Tabela 12 – Quantitativo de materiais para ensaios de caracterização

Formulação	% de incorporação de LF	Quant. de argila (g)	Quant. de LF (g)	Quant. de água (g)	Total (g)
A1 – 0	0%	8,00	0,00	2,00	10,00
A1 – 5	5%	7,43	0,37	2,20	10,00
A1 – 10	10%	7,00	0,70	2,30	10,00
A2 – 0	0%	8,00	0,00	2,00	10,00
A2 – 5	5%	7,43	0,37	2,20	10,00
A2 – 10	10%	7,00	0,70	2,30	10,00

A1 – 0: Formulação da argila 1 de referência

A1 – 5: Formulação da argila 1 com 5% em massa de LF

A1 – 10: Formulação da argila 1 com 10% em massa de LF

A2 – 0: Formulação da argila 2 de referência

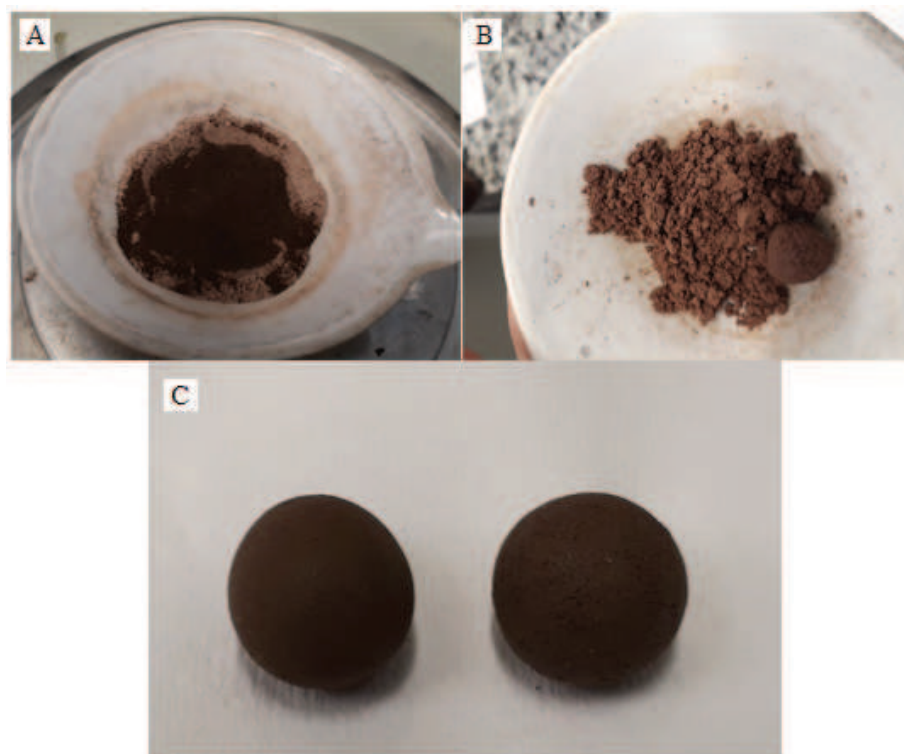
A2 – 5: Formulação da argila 2 com 5% em massa de LF

A2 – 10: Formulação da argila 2 com 10% em massa de LF

Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 16 mostra a sequência do procedimento realizado nas formulações. Na primeira imagem (A) é possível visualizar as porções de argila e LF. Na segunda imagem (B) visualiza-se a homogeneização dos materiais após a adição de água e na terceira imagem (C) são apresentados os corpos de provas preparados para o processo de secagem e sinterização.

Figura 16 – Mistura dos materiais (A), amostra homogeneizada (B) e corpo de prova finalizado (C)



Fonte: Registrada pelo autor.

O processo de secagem consiste em colocar os corpos de prova formulados, ilustrados na Figura 16 (C), em estufa à 105°C por duas horas antes do processo de sinterização.

Por fim na etapa 3, os corpos de prova foram sinterizados. A sinterização foi realizada nas temperaturas de 1100°C, 1150°C e 1200°C. Foi realizado um total de 54 testes de expansão. A taxa de aquecimento foi de 20°C/min e o tempo de sinterização foi de 180 minutos.

3.2.4 Etapa 4: Caracterização da Argila Expandida com Adição de LF

Na etapa 4 foram realizados ensaios para avaliar as propriedades dos produtos obtidos após o tratamento térmico. Na Tabela 13 pode-se visualizar os ensaios necessários para a caracterização dos corpos de prova.

Tabela 13 – Ensaios de caracterização dos corpos de prova após a sinterização

Item	Ensaio	Laboratório
01	Expansão	Unisinos – LCVMat
02	Massa específica aparente	Unisinos – LCVMat
03	DRX	Unisinos – ITT Fóssil
04	Absorção de água	Unisinos – LMC
05	Morfologia	Unisinos – LCVMat

Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.4.1 Expansão Piroplástica

O produto que se espera obter com a pesquisa deste trabalho é a argila expandida. Portanto a análise de expansão piroplástica é de fato o que comprova se o produto condiz com o objetivo proposto.

A análise de expansão é avaliada com o cálculo do volume médio dos corpos de prova, que foram obtidos através da medição do diâmetro médio dos corpos de prova formulados e depois com a medição do diâmetro médio dos corpos de prova após sinterização. Com base nos valores iniciais, foram indicadas as porcentagens médias de expansão para cada formulação.

3.2.4.2 Massa Específica Aparente

A massa específica aparente é uma das principais características das propriedades da argila expandida, devido a sua classificação como agregado leve. Foi obtido através do cálculo que relaciona massa e volume de cada corpo de prova. A medição de massa foi realizada em uma balança de precisão e o diâmetro médio medido com um paquímetro digital. Foram realizados no LCVMat na Unisinos.

3.2.4.3 Difração de Raios X – DRX

Assim como para análise dos materiais de partida, o ensaio de DRX foi realizado nos corpos de prova de argila expandida para identificar a estrutura cristalina e os compostos formados pelos elementos presentes nos produtos obtidos. A composição utilizada para este ensaio foi a que obteve melhor expansão com a adição de LF, com o objetivo de avaliar as fases do material devido a presença do mesmo. O ensaio foi realizado no Laboratório do ITT Fóssil na Unisinos. Os difratogramas foram obtidos através da utilização de uma fonte de $\text{Cu}\alpha\text{K}$ com escala de $3^\circ 2\theta/\text{min}$ e o intervalo angular analisado foi de 4 a 80° . Os resultados foram analisados através do software X'Pert High Score.

3.2.4.4 Absorção de Água

A absorção de água é uma propriedade importante a ser avaliada nos corpos de prova de argila expandida. O ensaio foi realizado de acordo com a norma NBR NM 53 (ABNT, 2003) no LMC na Unisinos.

3.2.4.5 Morfologia

O ensaio de morfologia pode ser definido como as características externas dos corpos de prova e também as características internas das formulações que sofreram expansão pirolástica. A avaliação foi realizada através de relatório fotográfico no LMC na Unisinos.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios descritos na etapa da metodologia desta pesquisa.

4.1 CARACTERIZAÇÕES DAS ARGILAS E DO LF

Este item da pesquisa apresenta os resultados obtidos da caracterização das matérias-primas de argila e LF utilizadas na produção de argila expandida.

4.1.1 Caracterização Química das argilas e do LF

A Tabela 14 apresenta os resultados da caracterização química obtida por Fluorescência de RaiosX para a Argila 1 e para a Argila 2.

Tabela 14 – Resultados de FRX das argilas comparado a outros estudos

Elemento	Argila 1 (%)	Argila 2 (%)	Pinto (2005) (%)	Silva (2016) (%)
SiO ₂	47,51	53,12	54,00	48,18
Al ₂ O ₃	16,30	10,90	19,00	19,56
Fe ₂ O ₃	4,193	5,818	7,400	9,380
MgO	1,238	1,327	3,900	1,240
K ₂ O	1,208	3,361	4,200	2,790
TiO ₂	0,844	0,702	0,860	2,020
Na ₂ O	0,481	0,796	<0,500	1,600
CaO	0,142	0,361	1,600	0,730
P ₂ O ₅	0,051	0,005	<0,500	0
MnO	0,011	0,053	<0,300	0

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 14 pode-se observar que a Argila 1 e a Argila 2, possuem alta concentração de SiO₂, valores próximos de 50% para as duas argilas, no qual a Argila 1 apresenta um valor de 53,12% e a Argila 2 possui valor de 47,51%. Outro composto que se destaca pela concentração é o Al₂O₃, com valores de 16,29% para Argila 1 e 10,90% para Argila 2. O Fe₂O₃ também é um dos principais compostos da argila, com concentração de 4,193% para Argila 1 e 5,818% para Argila 2. A Argila 1 ainda contém 1,238% de MgO, 1,208% de K₂O e para as demais composições valores inferiores a1%. E a Argila 2 ainda contém 3,361% de K₂O, 1,327% de MgO e para as demais formulações porções menores que 1%.

É possível perceber que são predominantes as composições de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ nas argilas em estudo. Estes compostos encontrados nas argilas são

importantes para o processo de fabricação de argila expandida (SANTOS, 1992). Ainda segundo o autor, para uma expansão pirolástica adequada devem existir pelo menos 7% a 8% de Fe_2O_3 . Porém, esta porcentagem de Fe_2O_3 citada pelo autor não ocorre nas duas argilas em estudo, onde na argila 1 foi encontrado um teor de 4,193% e na argila 2 o valor obtido foi de 5,818%. Porém, o autor afirma que a expansão pode ocorrer se os compostos de ferro tiverem um teor mínimo de 5%. Santos (1992) ainda cita que a análise química por FRX não garante que esses índices sejam suficientes para a expansão pirolástica. Para isso, é necessário o teste em escala laboratorial ou industrial com a argila para confirmar a possível produção de argila expandida.

Observa-se a Tabela 14 também são apresentados os resultados obtidos por outros trabalhos sobre a composição de argilas analisadas com potencial de produção de agregados leves.

Com a análise destes trabalhos realizados com argila, percebe-se uma semelhança nos resultados, em que há a predominância dos elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . As maiores concentrações são de óxido de silício (SiO_2), com valores próximos ou superiores a 50% para as argilas deste trabalho e as argilas dos demais estudos. Outros compostos que se encontram em maiores quantidades nas argilas estudadas por outros autores são os óxidos de alumínio e de ferro. Logo, percebe-se que estes compostos são elementos comuns da argila, independente da região de origem. Percebe-se que as argilas deste trabalho apresentam menores concentrações de Al_2O_3 e Fe_2O_3 quando comparados com as argilas utilizadas nas pesquisas de Pinto (2005) e Silva (2016).

O resultado de FRX para o LF é apresentado na Tabela 15.

Tabela 15 – Resultado de FRX do LF

Elementos majoritários (>50%)	Menor quantidade (5% < x < 50%)	Elementos traços (<5%)
Fe	P	S, Ca, Si, K, Zn, Al, Cu, Mn

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se na tabela 15 a predominância de ferro, com mais de 50%, seguido por fósforo, com quantidade entre 5% e 50% e diversos elementos traços abaixo de 5%, como enxofre, cálcio, silício, potássio, zinco, alumínio, cobre e manganês.

A Tabela 16 apresenta a caracterização química do LF fornecida pela empresa geradora do resíduo em estudo, resultado de uma análise química elementar realizada

por laboratório terceirizado comparados com as composições químicas do LF estudados em outras literaturas.

Tabela 16 – Comparativo entre análises do LF

Autor	Análise elementar (%)				
	C	O	N	H	S
LF*	55,62	n.d.	8,18	7,11	0,38
Sena (2005)	54,59	23,85	8,22	7,60	n.d.
Virmond (2007)	50,90	20,24	8,10	7,90	0,30

*L.F - Análise fornecida pela empresa

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar a Tabela 16, percebe-se bastante semelhança entre as composições químicas elementares do LF da pesquisa com relação aos estudos de Sena (2005) e Virmond (2007), no qual é presença do carbono majoritária em todas as composições com 55,62%, 54,59% e 50,90% respectivamente, determinados em base seca. Em seguida a composição de oxigênio mostra teor acima de 20% nos dois estudos, enquanto esse teor não pode ser detectado pela técnica utilizada. A composição de nitrogênio foi bem próxima entre eles, sendo 8,18% para o LF estudado neste trabalho, 8,22% para o LF de Sena (2005) e 8,10% para o LF de Virmond (2007). A composição de hidrogênio do LF desta pesquisa também foi bem próxima à da literatura. Segundo Sena (2005), esse procedimento de tratamento de efluentes de frigoríficos no Brasil tem o mesmo padrão em diversas indústrias, pois é um sistema consolidado como eficiente na remoção do máximo possível de sólidos existentes, o que justifica assim a semelhança do LF gerado em locais e empresas diferentes.

4.1.2 Perda ao Fogo e Teor de Umidade

A Tabela 17 apresenta os resultados de perda ao fogo e teor de umidade das argilas e do LF.

Tabela 17 – Resultados de umidade e perda ao fogo dos materiais

	Umidade		Perda ao fogo (%)
	Matéria-prima	Média (%)	
Argilas	Argila 1	24,49	8,55
	Argila 2	4,71	5,42
	Pinto (2005)	-	8,80
	Silva (2016)	-	14,50
LF	LF	65,63	85,56
	Sena (2005)	70,00	-

*N.R. Não Realizado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme apresentado na Tabela 17, a presença de umidade é bem variável em relação aos três materiais, inclusive entre as argilas, onde a Argila 1 tem uma umidade média de 24,49% e a Argila 2 tem apenas 4,71%. Essa variação de umidade é devido a jazida de origem de cada argila, onde a Argila 1 provém de uma região úmida, enquanto a jazida da Argila 2 fica em uma região rochosa e com pouca presença de umidade. O LF é o que apresenta maior umidade entre os três materiais, isso é devido ao seu processo, pois se trata de um resíduo gerado no tratamento de efluente e mesmo após a separação de sólidos, ainda se encontra com alto teor de umidade, com uma umidade média de 65,63% e na análise de perda ao fogo, apresentou um valor de 85,56%.

O trabalho realizado por Sena (2005) apresenta a umidade do LF com valor de 70%. Segundo o autor, esse resultado é devido ao LF ser um resíduo sólido proveniente do efluente líquido e, mesmo após a passagem da prensa não é possível retirar toda umidade do material.

Outro resultado que pode ser visualizado na Tabela 17 é a perda ao fogo das argilas em estudo, no qual apresentou uma perda no valor de 8,55% para Argila 1 e o valor de 5,42% para a Argila 2. Através dos dados, percebe-se que as argilas desta pesquisa possuem valores de perda ao fogo menores do que os encontrados nos outros estudos, porém o valor encontrado para a Argila 1 de 8,55% é próximo do encontrado por Pinto (2005). Já a perda ao fogo da Argila 2 é a mais baixa entre as analisadas com 5,42%.

Segundo Santis e Rossignolo (2014), a perda ao fogo está associada principalmente a umidade das argilas e pela perda de hidroxilas de hidróxidos de Al (OH)₃ e Fe (OH)₃. Estes fenômenos foram analisados a partir dos resultados de perda de massa obtidos em análise térmica no tópico 4.1.6.

4.1.3 pH

Na Tabela 18 são apresentados os valores de pH para as duas argilas, o LF e as formulações utilizadas nos testes. As leituras foram realizadas a uma temperatura de 25°C.

Tabela 18 – Valores de pH das Argilas 1 e 2 e do LF

Formulações com a Argila 1			Formulações com a Argila 2			LF
A1 – 0	A1 – 5	A1 – 10	A2 – 0	A2 – 5	A2 – 10	
5,86	5,33	5,08	6,77	6,14	5,60	4,94

Fonte: Elaborada pelo autor.

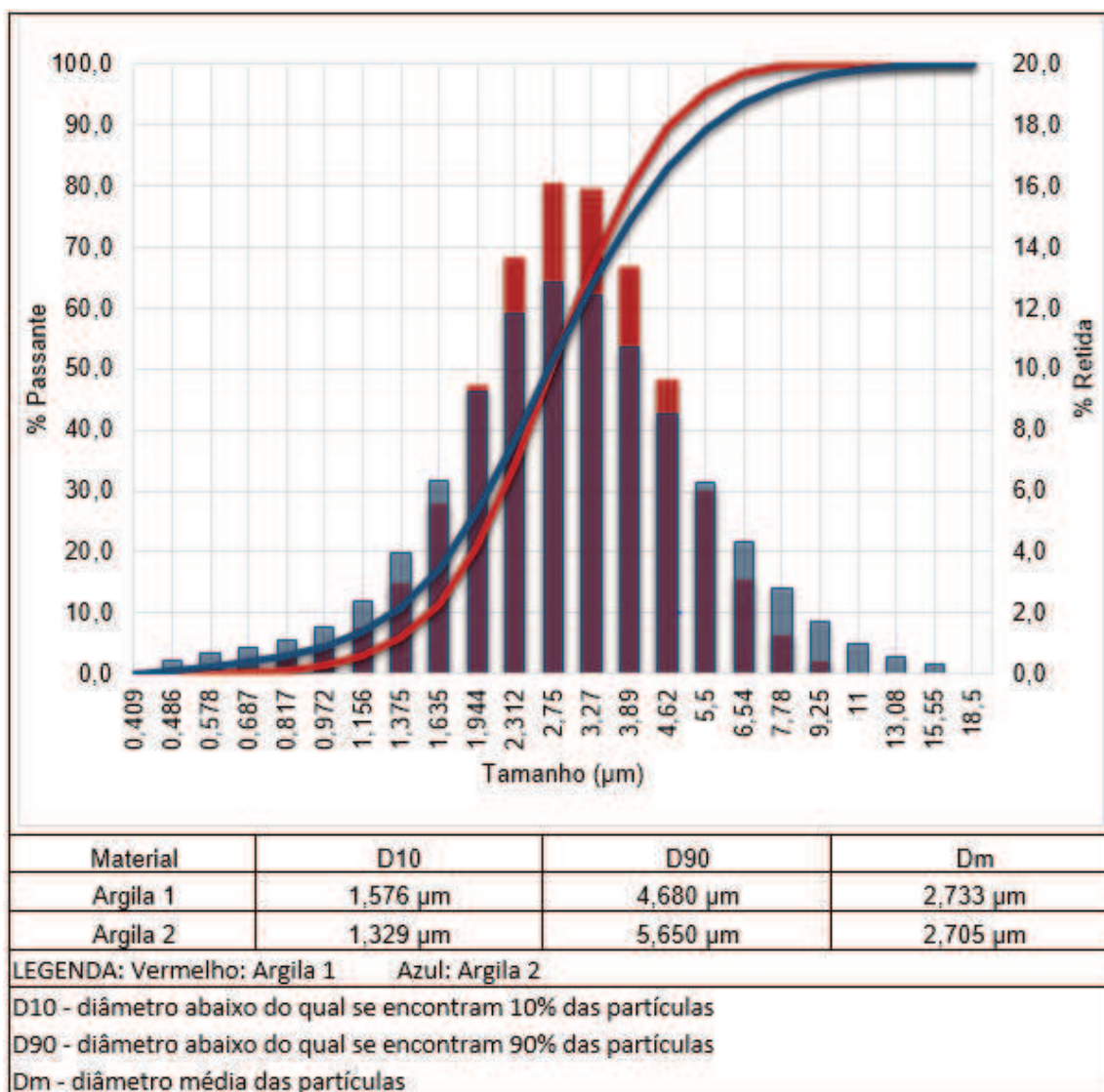
De acordo com a Tabela 18, os valores de pH para as formulações da Argila 1 são respectivamente de 5,86 (referência), de 5,33 (com 5% de LF) e de 5,08 (com 10% de LF). Já para as formulações da Argila 2 os resultados foram respectivamente de 6,77 (referência), 6,14 (com 5% de LF) e de 5,60 (com 10% do LF). O LF obteve pH de 4,94.

Observa-se um valor menor de pH para o LF em comparação com as argilas e um valor de pH menor da Argila 1 em comparação com a Argila 2. Conseqüentemente, foi observado valores de pH que diminuíram com as formulações que continham maior percentual de LF. Segundo Santos (1992), em um estudo que avaliou as propriedades de argilas que expandiam, 90% delas tinha pH superior a 5. Essa condição foi atingida em todas as formulações, no qual a formulação A1-10 foi a que mais se aproximou desse limite, com pH de 5,08. O mesmo autor não considera também que seja uma condição suficiente e necessária para a expansão da argila, pois o material deve ser submetido aos testes de sinterização para comprovação.

4.1.4 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria a laser realizado nas argilas é exibido na Figura 17.

Figura 17 – Curva granulométrica das argilas



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 17 são apresentados também os valores do D_{10} (diâmetro abaixo do qual se encontram 10% das partículas), D_{90} (diâmetro abaixo do qual se encontram 90% das partículas) e D_m (diâmetro média das partículas) das argilas.

Observa-se as faixas de granulometria muito próximas entre as duas argilas, no qual o D_{50} das duas argilas é praticamente igual, com 2,705 µm para a Argila 2 e 2,733 µm para a Argila 1, ou seja, faixa granulométrica bem características das argilas. A Argila 1 tem a faixa granulométrica compreendida entre 0,687 µm e 9,25 µm, enquanto a Argila 2 tem sua faixa granulométrica entre 0,486 µm e 15,55 µm, ou seja, uma faixa de distribuição entre valores mínimos e máximos menor para a Argila 1 em relação à Argila 2. Segundo Pracidelli e Melchades (1997), essa variação na distribuição é importante, pois a parte mais fina é responsável por garantir maior

plasticidade à massa cerâmica, o que garante também boa homogeneidade e resistência mecânica dos produtos sinterizados. Já as porções com maiores granulometrias têm menor plasticidade o que contribui para uma sinterização que gere menos deformações.

Na Tabela 19 é apresentada uma comparação entre os resultados obtidos de distribuição granulométrica das duas argilas do presente trabalho, com a de argilas estudadas por outros autores utilizadas para produção de agregados leves de argila expandida.

Tabela 19 – Comparativo de distribuição granulométrica de argilas

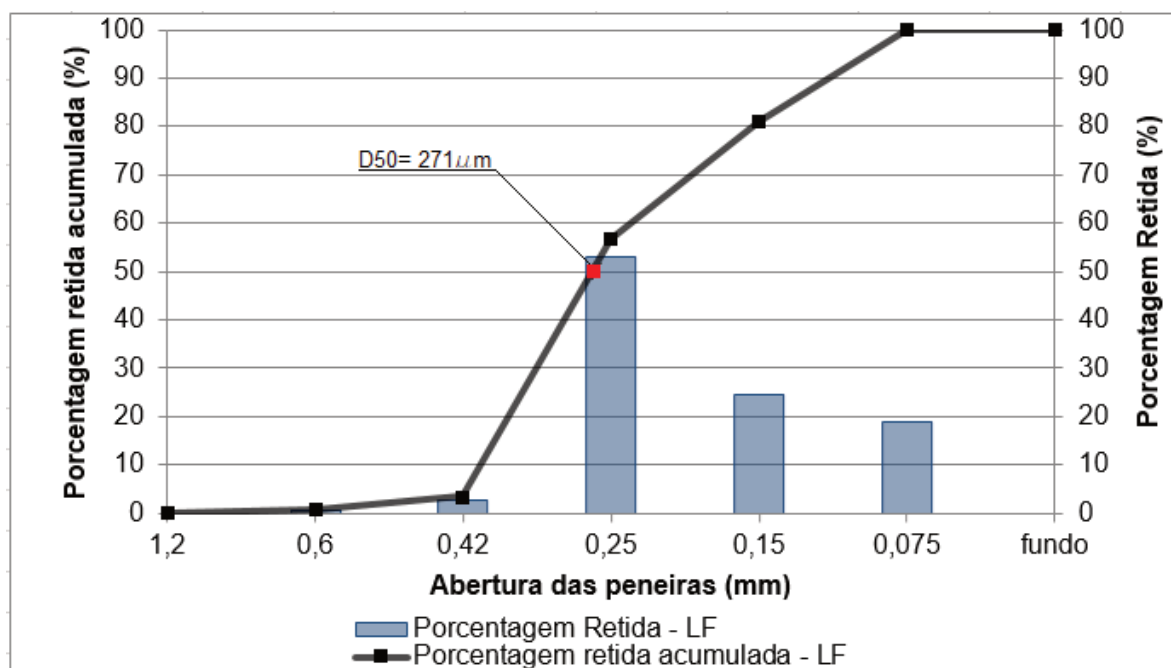
Pesquisa	D₁₀ (μm)	D₉₀(μm)	D_m(μm)
Argila 1	1,576	4,68	2,896
Argila 2	1,329	5,65	3,01
Takahashi (2006)	0,50	16,00	2
Wei et al. (2016)	3,52	30,07	10,78

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelos valores apresentados na Tabela 19, percebe-se que os materiais do estudo têm um D₉₀ inferior às demais argilas utilizadas para produção de argila expandida. Já o D₁₀ dos materiais deste estudo são intermediários em relação aos outros dois apresentados, assim como o diâmetro médio, que também ficou acima do diâmetro médio da argila do estudo de Takahashi (2006) e abaixo da argila de Wei et al. (2016). Segundo Pinto (2005), essa distribuição granulométrica é típica de argilas da indústria cerâmica. Para Damasceno (1973), a real influência da granulometria para o processo de expansão das argilas é incerta, porém indica que as frações mais finas com menos de 5 μm são as principais responsáveis pela expansão.

A análise granulométrica do LF foi realizada por peneiramento e sua curva granulométrica é apresentada na Figura 18.

Figura 18 – Curva granulométrica do LF



Fonte: Elaborada pelo autor.

O LF tem granulometria média superior ao das argilas, com D_{50} de 271 μm , valor obtido através da ponderação da curva sinalizada no gráfico da Figura 18. Como citado nas análises de granulometria das argilas, quanto menor o diâmetro das partículas menor será a plasticidade da massa cerâmica, em que o incremento do LF na argila aumenta a granulometria da composição e diminui a plasticidade e homogeneidade (GRUN, 2007).

4.1.5 Massa Específica

Na Tabela 20 são apresentados os valores de massa específica para as duas argilas e para o LF.

Tabela 20 – Massa específica das matérias-primas

Material	Massa específica (g/cm^3)
Argila 1	2,54
Argila 2	2,58
LF	1,83

Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se as massas específicas das argilas na Tabela 20 bem próximos das características das argilas utilizadas em cerâmicas, que segundo Santos et al. (1986) fica entre 2,5 e 2,7 g/cm^3 . Porém, os valores de massa específica não são apontados

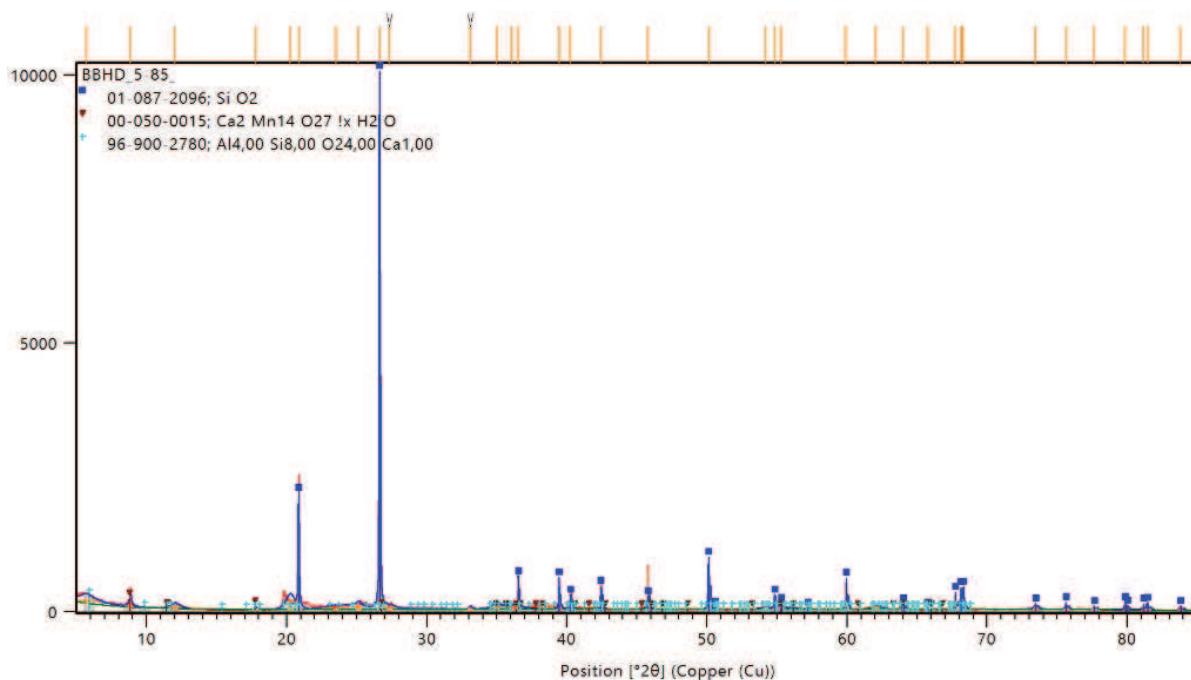
como propriedades com influência direta na expansão das argilas, já que os intervalos de variação para diversas argilas normalmente estão compreendidos na faixa apontada, neste contexto o resultado basicamente mostrou-se um complemento das informações e características das matérias-primas.

Já o LF tem massa específica de $1,83\text{g/cm}^3$, valor menor do que o das argilas, com isso a substituição parcial da argila expandida pelo LF implica na redução da massa específica dos agregados produzidos.

4.1.6 Difração de Raios X – DRX

Na Figura 19 é apresentado o difratograma da Argila 1, seguida da apresentação das suas fases encontradas na Tabela 21.

Figura 19 – Resultado de DRX da Argila 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 21 – Fases encontradas em análise de DRX da Argila 1

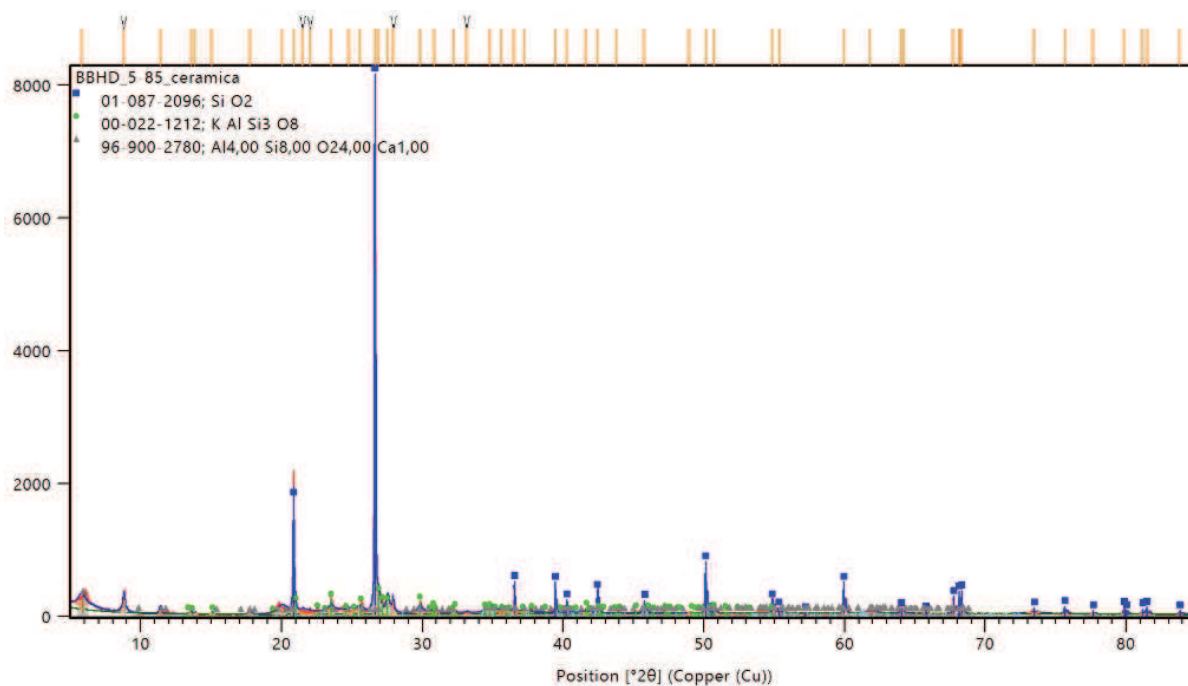
Fase	Base de dados	Fórmula química
Quartzo	ICDD 01-087-2096	SiO_2
Óxido de cálcio e manganês hidratado	ICDD 00-050-0015	$\text{Ca}_2\text{Mn}_{14}\text{O}_{27} \cdot x\text{H}_2\text{O}$
Montmorillonita	COD 96-900-2780	$\text{Al}_4\text{Si}_8\text{O}_{24}\text{Ca}_1$

Fonte: Elaborada pelo autor.

Conforme Tabela 21, as fases cristalinas da Argila 1 se apresentam na forma de quartzo, de óxido de cálcio e manganês hidratado e de montmorillonita.

Na Figura 20 apresenta-se o difratograma da Argila 2, seguida da apresentação das suas fases encontradas na Tabela 22.

Figura 20 – Resultado de DRX da Argila 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 22 – Fases encontradas em análise de DRX da Argila 2

Fase	Base de dados	Fórmula química
Quartzo	ICDD 01-087-2096	SiO ₂
Silicato de alumínio e Potássio	ICDD 00-022-1212	KAlSi ₃ O ₈
Montmorillonita	COD 96-900-2780	Al ₄ Si ₈ O ₂₄ Ca ₁

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Tabela 22 apresentam-se as fases cristalinas encontradas na Argila 2 na forma de quartzo, de silicato de alumínio e potássio e de montmorillonita.

Na Tabela 23 é possível observar a comparação entre os resultados de DRX das argilas utilizadas neste estudo em comparação com argilas de outros autores que produziram argila expandida em laboratório.

Tabela 23 – Fases encontradas em análise de DRX da Argila 2

Autor	Fases encontradas
Pinto (2005)	Quartzo, Ilita, Dolomita e Feldspato
Takahashi (2006)	Quartzo, Mica, Ilita e Caulinita
Bauer (2017)	Quartzo, Muscovita, Albita e Hematita
Silva (2016)	Quartzo e Caulinita
Ozguven e Gunduz (2012)	Quartzo, Ilita, Clorito, Feldspato, Calcita
Liao e Huang (2011)	Quartzo, Albita, Clinocloro, Muscovita
Dissertação – Argila 1 (2018)	Quartzo, Óxido de cálcio e manganês hidratado e Montmorillonita
Dissertação – Argila 2 (2018)	Quartzo, Silicato de alumínio e potássio e Montmorillonita

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o que é apresentado na Tabela 23, o quartzo é a fase encontrada em todas as composições, já as demais fases variam de argila para argila. Para Pereira (2006), o quartzo é característico das formações cristalinas das argilas e assume comportamento inerte no processo de expansão, ou seja, não sofre decomposição, por isso, torna-se necessário avaliar as demais fases.

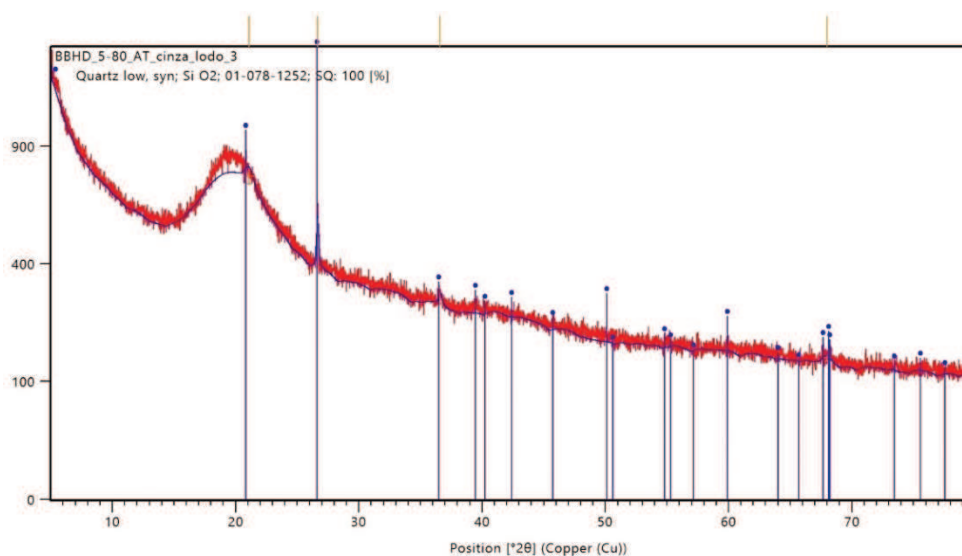
Para Santos (1992), argilas com propriedades expansivas apresentam fases características como a ilita, a caulinita, a montmorillonita, o feldspato, a mica e a clorita, porém, não são garantia de que as argilas irão expandir, para realmente confirmar a expansão de determinada argila é necessário que seja realizado o teste de sinterização. Um dos minerais apontados pelo autor e que foi encontrado em todas as composições das argilas deste estudo é a montmorillonita.

Já a fase em forma de óxido de cálcio e manganês hidratado na Argila 1, é um agente fundente no processo de sinterização que tende a preencher poros e, conseqüentemente, aumentar a massa específica aparente e a resistência mecânica do material produzido. (GRUN, 2007).

O silicato encontrado na Argila 2 é um argilomineral que pertence ao grupo das micas, que são constituídos predominantemente por silício, alumínio, magnésio, ferro e potássio, que no processo de sinterização libera O₂, o que favorece o processo de expansão das argilas (Pereira, 2006). Segundo Grun (2007), as formas de óxidos que contém potássio são provenientes de grupos de feldspatos e micas, que confirmam a proximidade do apontado também por Pereira (2006).

Na Figura 21 encontra-se o difratograma das cinzas do LF, após o ensaio de perda ao fogo.

Figura 21 – Resultado de DRX das cinzas do LF após o ensaio de perda ao fogo



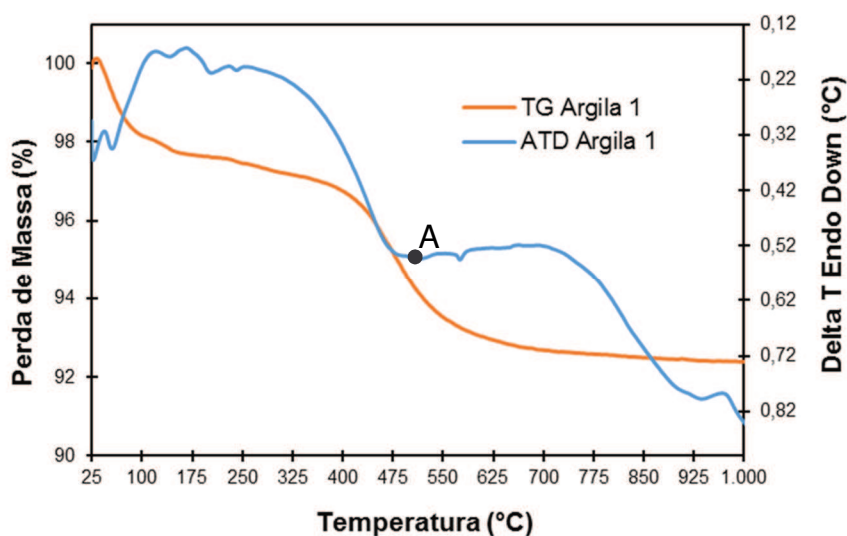
Fonte: Elaborada pelo autor.

Através da análise do difratograma da cinza do lodo, apresentado na Figura 21, pode-se identificar halo de amorfismo, sendo que a maior parte da amostra está na forma amorfa, apresentando também sílica na forma de quartzo.

4.1.7 Análise Termogravimétrica – TG e Análise Térmica Diferencial – ATD

As Figuras 22 e 23 apresentam o resultado de análise térmica simultânea (ATD-TG) da Argila 1 e da Argila 2, respectivamente.

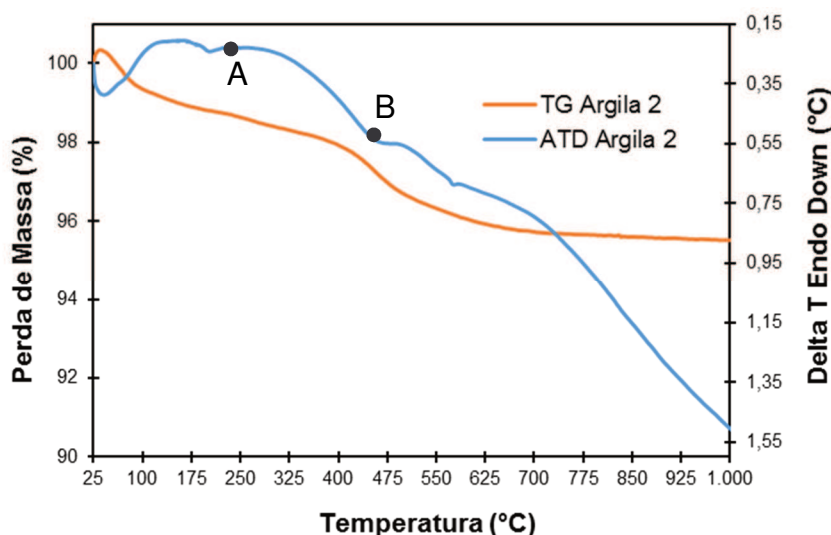
Figura 22 – Análise térmica da Argila 1



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível identificar na Figura 22 a análise térmica diferencial da Argila 1, representada pela linha em azul, com pico endotérmico no ponto A na temperatura de 488,62°C. A perda de massa total foi de 7,61% à temperatura de 1000°C, obtido na análise termogravimétrica, representada pela linha em laranja.

Figura 23 – Análise térmica da Argila 2



Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível observar na Figura 23 a análise térmica diferencial da Argila 2, representada pela linha em azul, com picos endotérmicos nos pontos A e B nas temperaturas de 239,13°C e 454,05°C, com perda de massa de 4,49% a temperatura de 1000 °C, obtidos na análise termogravimétrica.

Através da Tabela 24 é possível comparar a análise térmica com outra literatura que também utilizou argila para produção de agregados leves de argila expandida.

Tabela 24 – Comparativo de análise térmica

Estudos	Picos endotérmicos (ATD)	Perda de massa (TG)
Argila 1	488,62°C	7,61%
Argila 2	239,13°C e 454,05°C	4,49%
Pinto (2006)	120°C e 230°C	8,8%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se perceber que a Argila 2 apresentou seu primeiro pico endotérmico na temperatura de 239,13°C, este valor pode ser comparado ao resultado obtido por Pinto (2006), pois o mesmo obteve pico à 230°C em sua argila em estudo. Segundo Pinto (2006), picos nos intervalos entre 200°C e 300°C estão relacionados à oxidação da matéria orgânica, apontados como importantes para a expansão, pois nesse processo

ocorre a liberação de gases como o CO e o CO₂. Já a Argila 1 não apresentou pico neste intervalo.

São denominadas reações de oxidação da matéria orgânica toda reação que ocorre entre um composto orgânico e o elemento químico oxigênio (O), devido ao fato de haver um aumento do nox dos átomos de carbono envolvidos.

Por último, a Argila 1 apresentou um pico a 488,62°C e a Argila 2 um pico a 454,05°C. Segundo Oliveira e Maganha (2006), picos no intervalo de 350°C e 650°C, apontam para combustão das substâncias orgânicas contidas na argila. A combustão é a reação de oxidação mais comum que ocorre nos compostos orgânicos.

As perdas de massa das argilas em estudo foram inferiores a argila utilizada por Pinto (2006), sendo 7,61% para a Argila 1, 4,49% para a Argila 2 e 8,8% para a argila utilizada por Pinto (2006). De acordo com Santos (1992), a perda de massa na sinterização contribui para a formação de agregados mais leves devido a redução da relação massa/volume, desta forma a Argila 1 se torna mais interessante do ponto de vista de produção de agregados leves do que da Argila 2. Porém, somente a perda de massa não garante um agregado leve, pois o valor depende também do volume do mesmo, e que o aumento do volume só ocorre quando há a expansão dos agregados.

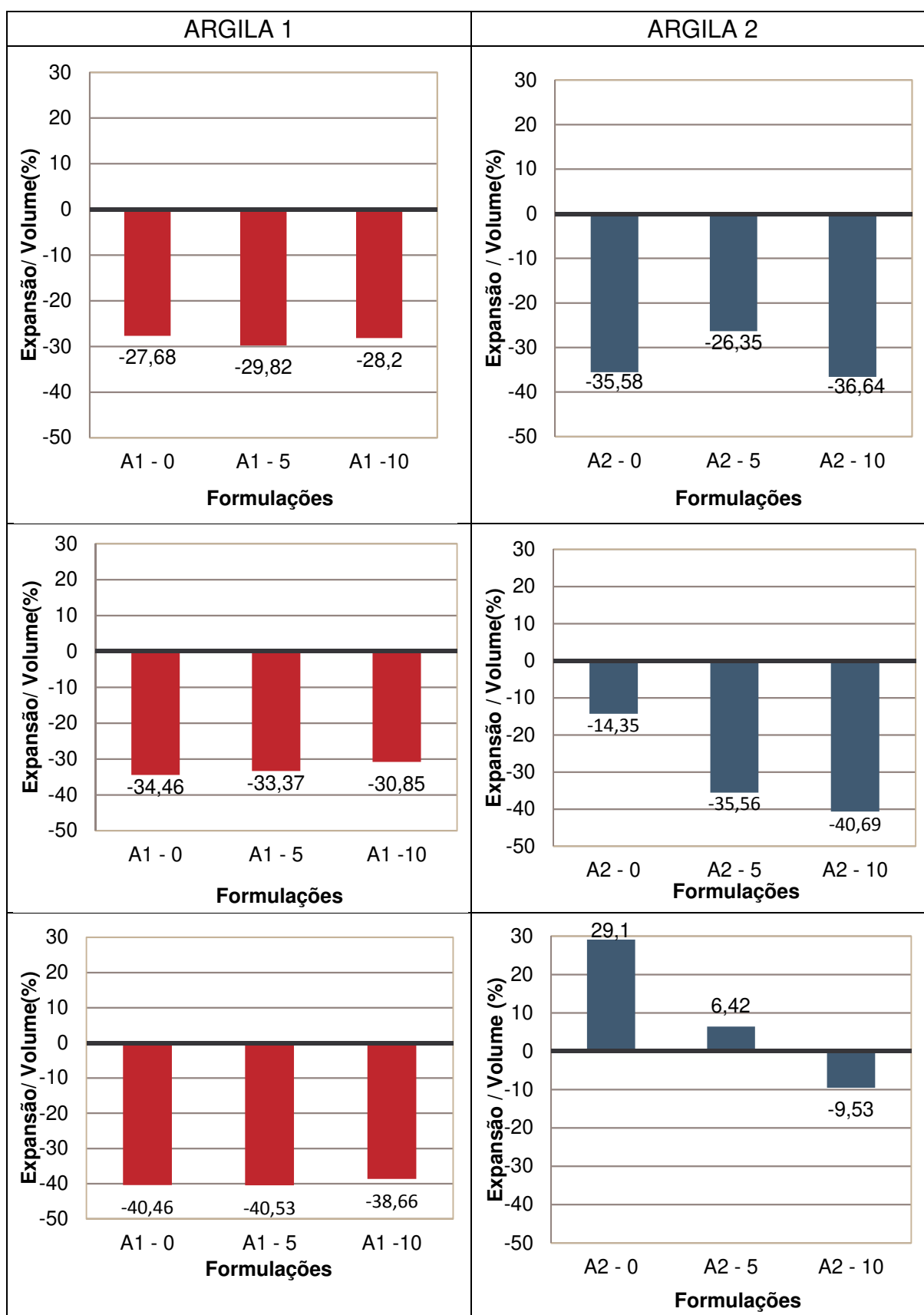
4.2 RESULTADOS DAS SINTERIZAÇÕES

Neste item são apresentados os testes das sinterizações para Argila 1 e Argila 2. Os resultados representam uma média de cinco corpos de prova testados para cada composição e para cada temperatura.

4.2.1 Testes de Expansão

A Figura 24 apresenta os gráficos de variação de volume do corpo de prova após a sinterização, onde é possível verificar a influência da temperatura e da adição do LF nas composições.

Figura 24 – Gráficos de expansão em função das formulações e temperaturas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme apresentado na Figura 24, percebe-se que não houve expansão dos corpos de prova para as composições da Argila 1 em nenhuma das três temperaturas. Houve a redução em suas dimensões nas sinterizações, desta forma a adição de LF não fez diferença considerável na expansão para as composições da Argila 1. Também é possível perceber que o aumento da temperatura ocasionou uma redução ainda maior nos volumes dos corpos de prova da Argila 1. O aumento da temperatura favorece a fundição de alguns compostos, como a fase de óxido de cálcio e manganês hidratado apontado em DRX para a Argila 1, com isso, ocorre o fechamento de poros por materiais fundentes, o que provoca a redução do volume (GRUN, 2007).

Para as composições da Argila 2, houve expansão nos corpos de prova sinterizados à 1200°C, com expansão de 29,10% na composição A2-0 e de 6,42% na composição A2-5. Já nos demais corpos de prova não houve expansão. Percebe-se as adições de LF inibiu a expansão dos produtos formulados. O único valor que ficou incoerente com o padrão foi o da formulação A2-5 na temperatura de 1100°C, em que a redução foi de -26,35%, ou seja, menor redução do que a formulação A2-0, em que a redução foi de -35,58% e menor redução do que a formulação A2-10, em que a redução foi de -36,64%.

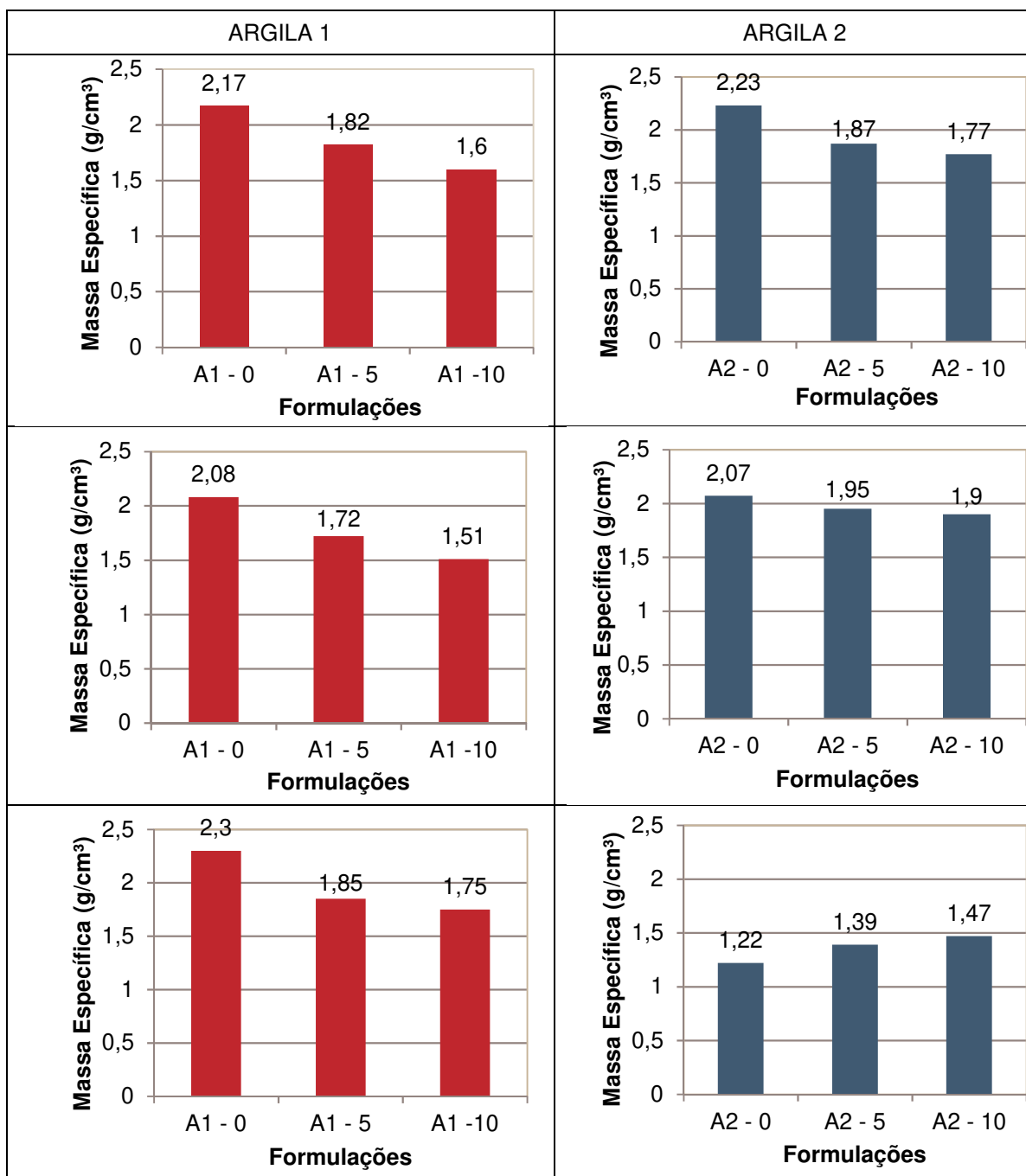
Ao analisar a Figura 24, é possível perceber ainda que a temperatura de sinterização de 1200°C foi a que gerou as expansões para os corpos de prova A2-0 e A2-5. Já para a Argila 1, não foi verificado nenhum indício de expansão nem na temperatura de 1200°C.

Diante dos resultados de expansão e das análises das propriedades químicas obtidas por DRX e FRX, a Argila 1 e a Argila 2 apresentaram em sua composição o quartzo e a Montmorolonita, e este último é um argilomineral encontrado em argilas com propriedades expansivas. Porém a Argila 1 apresentou em uma das suas fases o óxido de cálcio e manganês hidratado, que é um material fundente e não contribui com a expansão da argila. Já a Argila 2 possui em uma das suas fases o silicato de alumínio e potássio que no processo de sinterização libera O_2 , que favorece a expansão das argilas. Além disso, a Argila 1 apresentou um teor de Fe_2O_3 de 4,19%, apontado na literatura como um valor abaixo do esperado para que ocorra expansão, onde o valor ideal para expansão apontado por Santos (1992) é de pelo menos 5% de compostos de ferro. A Argila 2 por sua vez apresentou teor de Fe_2O_3 de 5,82% em sua composição e obteve expansão.

4.2.2 Massa Específica Aparente

Na Figura 25 são apresentados os resultados das massas específicas aparentes das formulações das argilas testadas.

Figura 25 – Gráficos de massa específica aparente em função das formulações e temperatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se nos gráficos da Figura 25 uma redução na massa específica aparente dos corpos de prova à medida que se aumentou a porcentagem de LF em matriz argilosa. Isso é percebido em todas formulações das composições da Argila 1, no qual para a temperatura de 1100°C a massa específica aparente foi de 2,17, 1,82 e 1,60 g/cm³ para as formulações A1-0, A1-5 e A1-10, o que mostra a contribuição do LF para produção de um agregado mais leve. Para a temperatura de 1150°C, a massa específica aparente também diminuiu com adição de LF, onde foi obtido valores de 2,08, 1,72 e 1,51 g/cm³ para as formulações A1-0, A1-5 e A1-10. Para a temperatura de 1200°C, também foi semelhante a redução de massa específica aparente, porém apresentou valores mais altos do que nas temperaturas anteriores, sendo 2,30, 1,85 e 1,75 g/cm³ para as formulações A1-0, A1-5 e A1-10. Esse aumento está relacionado às reduções de volume, apontados na Figura 24, onde não houve expansão.

Para as composições da Argila 2 percebe-se o mesmo comportamento da redução de massa específica para as formulações sinterizadas à 1100°C, com valores de 2,23, 1,87 e 1,77 g/cm³ para as formulações A2-0, A2-5 e A2-10, respectivamente. Também ocorreu redução da massa específica para as formulações A2-0, A2-5 e A2-10, com valores de massa específica de 2,07, 1,95 e 1,90 g/cm³ na temperatura de 1150. Já na temperatura de 1200°C, as formulações que continham LF tiveram valores de massa específica aparente maiores, ao contrário de todas as formulações da Argila 1 e da Argila 2 até a temperatura de 1150°C, onde os valores obtidos foram de 1,22, 1,39 e 1,47 g/cm³ para as formulações A2-0, A2-5 e A2-10, respectivamente. Ao analisar a Figura 24, encontra-se a justificativa desta mudança de comportamento, pois os corpos de provas A2-0 e A2-5 sofreram expansão na temperatura de 1200°C, o que ressalta a importância deste fenômeno para obtenção dos agregados leves.

Com isso percebe-se que a massa específica da argila expandida tem variações de acordo com a formulação e temperatura de sinterização.

As massas específicas encontradas para as argilas expandidas apresentaram valores variados, de acordo com a formulação e temperatura de sinterização. Apesar da argila expandida não ter se expandido na maioria dos casos, sua massa específica teve valores baixos, situação que pode ser explicada pelo fato do LF ter massa específica menor que das argilas utilizadas, tal substituição do material argiloso por LF contribuiu para reduzir as massas específicas dos corpos de prova. A formulação que ocorreu expansão foi a da Argila 2 sem adição de LF e com adição de 5% de LF,

com temperatura de sinterização a 1200°C g/cm³. Estas formulações foram as que apresentaram menor massa específica, com valores de 1,22 g/cm³ para a formulação sem adição de LF e 1,39 g/cm³ para a adição de 5% de LF.

Ao observar a Figura 25, percebe-se que para as formulações que não sofreram expansão, os valores de massa específica aparente foram menores para as composições da Argila 1 do que para a Argila 2, nas temperaturas de 1100°C e 1150°C, isso devido a Argila 1 ter uma maior perda de massa na sinterização, conforme análise térmica apresentada na Tabela 23.

Para estabelecer um comparativo bibliográfico, na Tabela 25 são apresentados os resultados de outros autores que fabricaram agregados leves a partir de resíduos.

Tabela 25 – Massa específica de agregados leves com adição de resíduos

Autor	Resíduos	Massa específica (g/cm³)
Takahashi (2006)	Argila expandida com escoria de alumínio	Entre 0,60 e 1,60
Li et al. (2016)	Lodo de esgoto, argila salina e esmectita	0,665
Wei, Cheng e Ko (2016)	Cinza volante de carvão e pó de vidro	Inferior a 2,0
Kourti e Cheeseman (2010)	Cinza volante de carvão e pó de vidro	Média de 1,65
Hwang et al. (2012)	Cinzas volantes e sedimentos de reservatório	Entre 0,65 e 1,69

Fonte: Elaborada pelo autor.

Pelos valores apresentados na Tabela 25, verifica-se que apesar de não ter ocorrido expansão dos corpos de prova da maioria das formulações neste trabalho, a massa específica resultante apresenta valores próximos de outros estudos, portanto atende as exigências do setor da construção civil.

Para uma avaliação mais completa da sinterização, do ponto de vista da expansão, na Tabela 26 apresenta-se um comparativo entre esta pesquisa com alguns resultados da literatura, onde pode-se avaliar a expansão, a temperatura e a massa específica aparente.

Tabela 26 – Comparativo bibliográfico entre temperatura, expansão e densidade aparente

Trabalho	Temperatura	Expansão	Densidade aparente
Formulação A2-0	1200°C	29,10%	1,22 g/cm ³
Formulação A2-5	1200°C	6,42%	1,39 g/cm ³
Takahashi (2006)	1170°C	13,33% à 26,67%	1,10 a 1,50 g/cm ³
Mendes (1998)	1200°C e 1250°C	N.D.	1,00 a 1,60 g/cm ³
Silva (2016)	1250°C	N.D.	1,51 a 1,66 g/cm ³

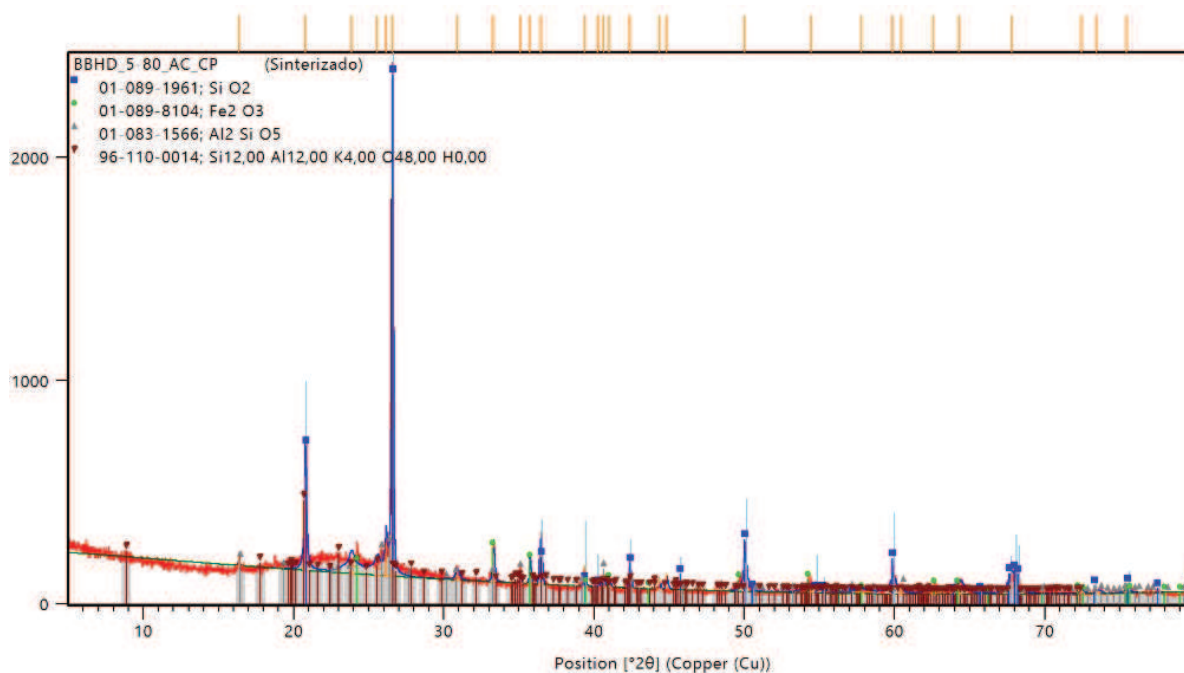
Fonte: Elaborada pelo autor.

Observa-se a partir da Tabela 26 que os valores de massa específica aparente estão entre 1,0 e 1,66 g/cm³, portanto os valores obtidos nesta pesquisa são intermediários aos valores encontrados na literatura. Alguns autores não publicaram o valor de expansão, e indicaram apenas o valor de massa específica aparente encontrado, visto que é a propriedade mais relevante quando se trata de argila expandida e agregados leves. As temperaturas também são semelhantes e variam entre 1170°C a 1250°C.

4.2.3 Difração de Raios X – DRX

Na Figura 26 é apresentado o difratograma da argila expandida (A2-5) sinterizada a 1200°C, seguida da apresentação das suas fases encontradas na Tabela 27.

Figura 26 – Resultado de DRX da argila expandida com 5% de adição LF



Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 27 – Fases encontradas no DRX da argila expandida com 5% de LF

Fase	Base de dados	Fórmula química
Quartzo	ICDD 01-087-2096	SiO ₂
Hematita	ICDD 01-089-8104	Fe ₂ O ₃
Silimanita	ICDD 01-083-1566	Al ₂ SiO ₅
Muscovita	COD - 96-110-0014	Si ₂ Al ₁₂ K ₄ O ₄₈ H ₀

Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com o que está apresentado na Tabela 27, os principais compostos encontrados nas análises de argila expandida produzida com 95% da Argila 2 e 5% de LF foram sílica (SiO₂) na forma de quartzo; óxido férrico (Fe₂O₃) na forma de hematita; óxido de alumínio e silício (Al₂SiO₅) na forma de silimanita e do mineral muscovita com fórmula molecular de Si₂Al₁₂K₄O₄₈H₀.

A partir do Quadro 3, é possível comparar o resultado de DRX da argila expandida produzida nesta pesquisa com a de outros autores que analisaram a fase mineralógica da argila expandida.

Quadro 3 – Comparativo de fases encontradas em análise de DRX de argila expandida

Trabalho	Fases encontradas
Dissertação(A2-5)	Quartzo – SiO_2 ; Hematita – Fe_2O_3 ; Silimanita – Al_2SiO_5 ; Muscovita – $\text{Si}_12\text{Al}_2\text{K}_4\text{O}_{48}\text{H}_0$.
Silva (2016)	Quartzo – SiO_2 ; Hematita – Fe_2O_3 ; Anortita – $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$; Mulita – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$;
Moravia et al (2004)	Quartzo – SiO_2 ; Silicato de magnésio – $\text{Mg}(\text{SiO}_4)$; Silício de ferro alumínio – $\text{AlO}_5\text{Fe}_3\text{SiO}_5$; Óxido de alumínio magnésio – MgAl_2O_4 .
Mendes (1998)	Quartzo – SiO_2 ; Hematita – Fe_2O_3 ; Alumina – Al_2O_3 ; Mulita – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Ao observar o Quadro 3, percebe-se a presença de quartzo em todas as análises que, segundo Silva (2016), é justificada pela presença de sílica constatada em FRX. Outra semelhança entre este estudo ocorreu com os trabalhos de Mendes (1998) e Silva (2016) com a presença da fase de hematita, onde também se percebe essa fase constatada na análise de FRX da matéria-prima. Já as demais fases não apresentaram semelhança em fases minerais, mas percebe-se pela composição química, fases que se alternam em aglomerações dos elementos Si, Fe, Al, Mg, K, Ca, O e H, todos constatados nas análises de FRX. Segundo Ugarte et al. (2008), a muscovita é um mineral do grupo das micas. A fase silimanita encontrada na argila expandida produzida nesta pesquisa, segundo Santos et al (2014), tem por característica fornecer resistência mecânica e resistência a altas temperaturas, que ajuda diversificar usos da argila expandida como material de enchimento e isolante térmico.

4.2.4 Absorção de Água

Os testes de absorção de água foram realizados para as composições que sofreram o processo de expansão, ou seja, as composições com matéria-prima da Argila 2, na matriz com argila referência e na composição que contém 5% de LF. Na Tabela 28 são apresentados os resultados do teste, assim como resultados obtidos em outras literaturas sobre o valor de absorção de agregados leves.

Tabela 28 – Comparação com outras literaturas quanto à absorção de água

Autor/ano	Resíduos	Expansão	Absorção de água (%)
Dissertação	LF – Composição A2-0	29,10%	7,83%
	LF – Composição A2-5	6,42%	6,62%
Takahashi (2006)	Argila expandida com escoria de alumínio	13,33% a 26,67%	Média de 19 %
Li et al. (2016)	Lodo de esgoto, argila salina e esmectita	N.D.	Entre 1,06 e 14,3 %
Kourti e Cheeseman (2010)	Cinza volante de carvão e pó de vidro	N.D.	16%
Hwang et al. (2012)	Cinzas volantes e sedimentos de reseqvatório	N.D.	Entre 7,6 e 19%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar os testes apresentados na Tabela 28, percebe-se que a composição de argila A2-0 apresentou uma absorção média de 7,83%. Já para a composição que contém 5% de LF, o valor médio de absorção foi de 6,62%. Verifica-se uma menor absorção na composição A2-5 do que a composição A2-0. À medida que o corpo de prova sofre maior processo de expansão, é gerado no interior maior número de vazios e conseqventemente, uma maior absorção de água (ROSSIGNOLO, 2009).

Através das informações obtidas na literatura e também dos valores de absorção encontrados, pode-se perceber que os valores de absorção de água variam num intervalo de 1,06% (Li et al., 2016) e 19% (TAKAHASHI, 2006; HWANG ET AL., 2012). Desta forma, os valores obtidos nesta pesquisa estão compreendidos neste intervalo.

Ao observar a Tabela 28, pode-se perceber que a argila utilizada por Takahashi (2006), apresentou expansão entre 13,33% e 26,67%, valores semelhantes aos testes de expansão para as argilas em estudo, embora tenha apresentado maior taxa de absorção de água, isso pode ocorrer devido as características morfológicas do agregado (ROSSIGNOLO, 2009).

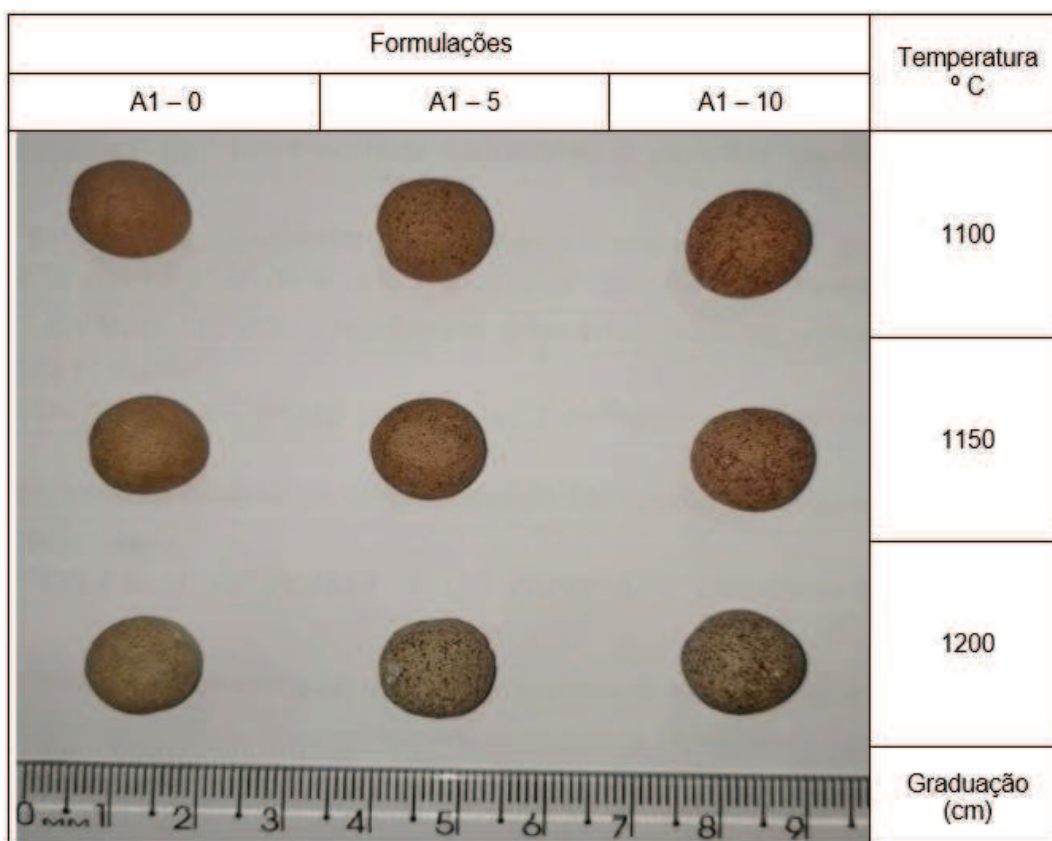
4.2.5 Morfologia

A análise morfológica foi realizada através de observação visual, que foi representada por figuras, onde se percebe as características dos agregados obtidos tanto na parte externa, quanto no interior dos materiais nas formulações testadas.

4.2.5.1 Estrutura Externa

Na Figura 27 é possível verificar as características dos corpos de prova formulados com a Argila 1 nas três temperaturas.

Figura 27 – Características dos corpos de prova formulados com a Argila 2 nas três temperaturas

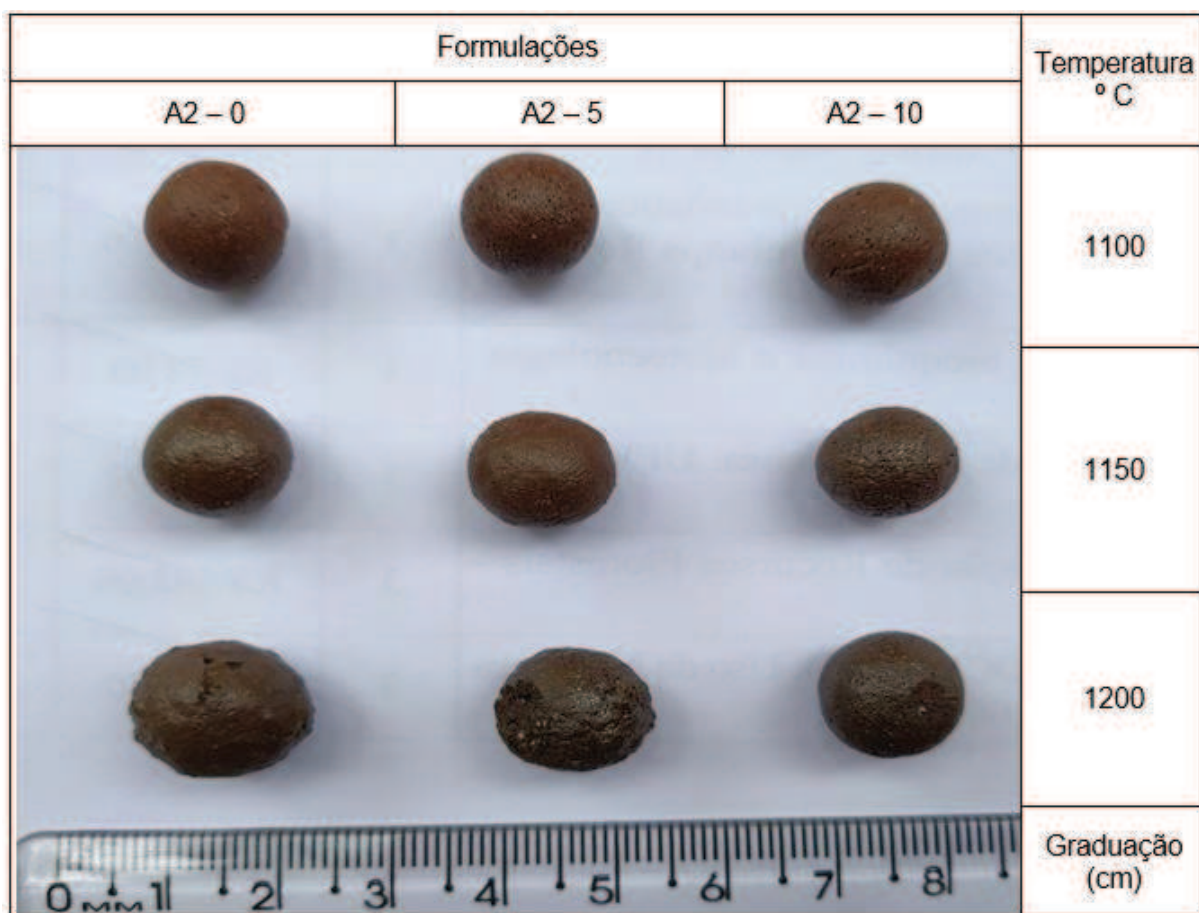


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 27 pode-se observar um clareamento dos corpos de prova à medida que a temperatura de sinterização aumenta. Também é possível perceber os pigmentos que ficaram com a presença de LF nas formulações com 5% e 10% de LF.

Na Figura 28 é possível verificar as características dos corpos de prova formulados com a Argila 2 nas três temperaturas.

Figura 28 – Características dos corpos de prova formulados com a Argila 2 nas três temperaturas



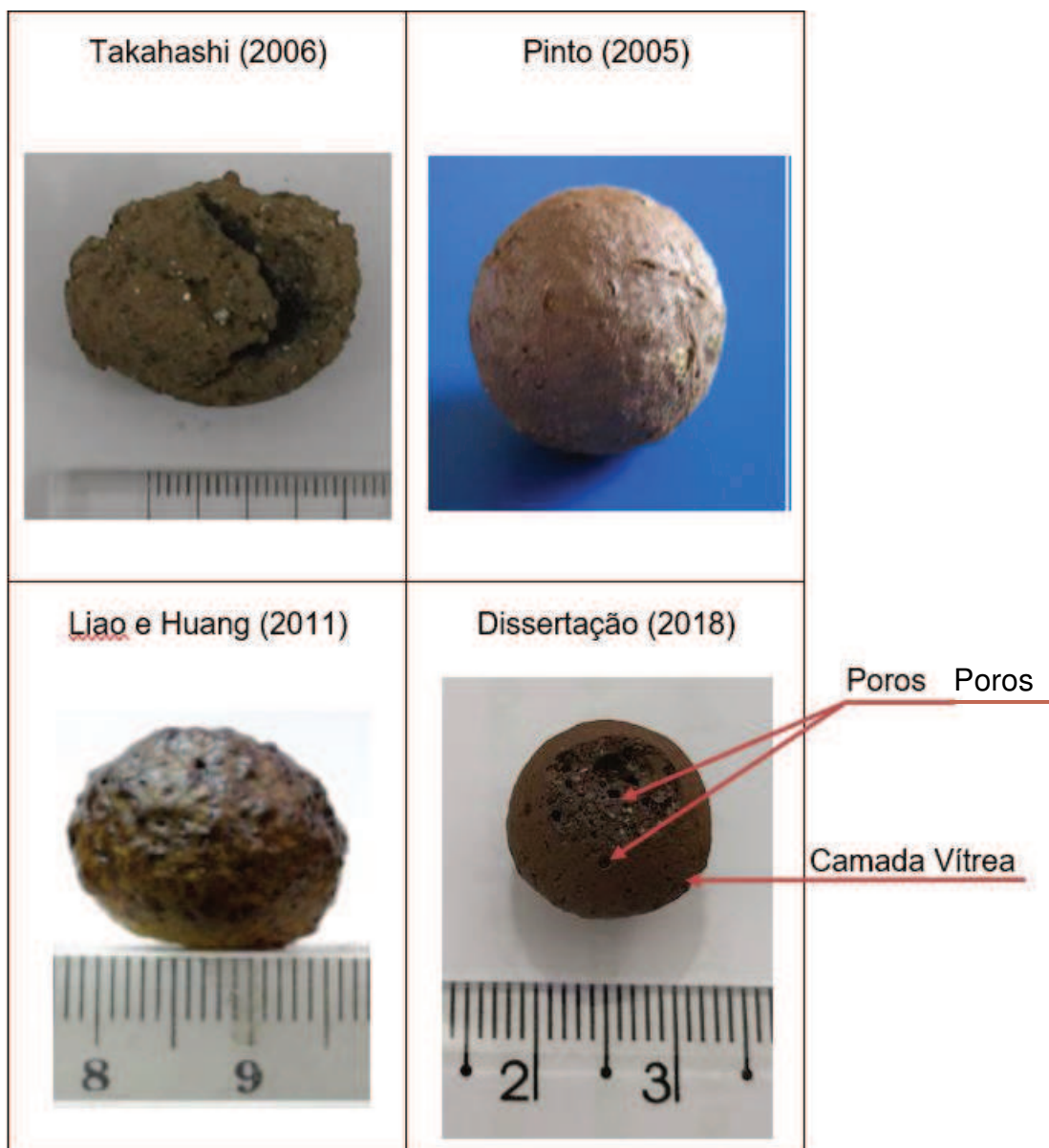
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 28 pode-se observar que houve uma coloração mais escura nos corpos de prova sinterizados em maior temperatura, ao contrário do que ocorreu com os corpos de prova formulados com a Argila 1. Também é possível verificar as maiores dimensões devido à expansão que ocorreu nos corpos de prova A2-0 e A2-5.

A estrutura externa característica da argila expandida é através da presença de poros de abertura durante a sinterização.

Na Figura 29 é possível avaliar a morfologia externa de argilas expandidas formuladas por outros autores comparadas com a da formulação A2-5 do estudo.

Figura 29 – Morfologia externa de argilas expandidas encontradas na literatura



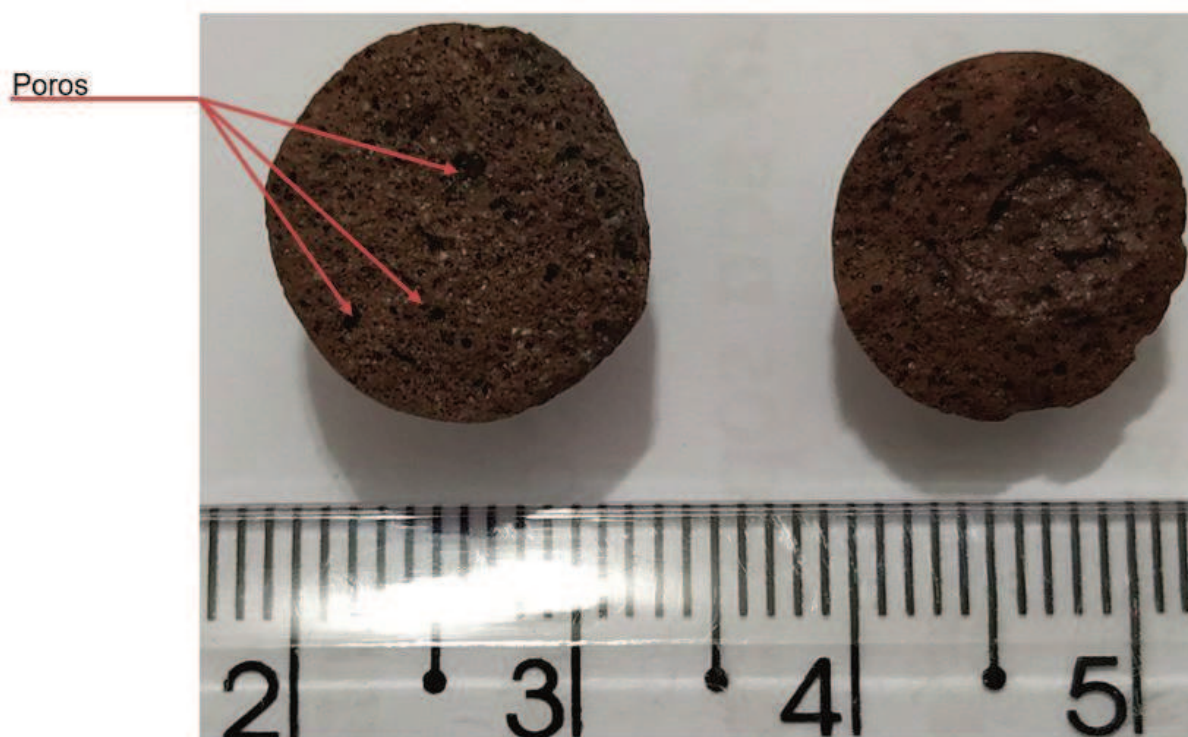
Fonte: Elaborada pelo Autor.

Ao observar as imagens da Figura 29, percebe-se semelhança entre a argila expandida da dissertação, a produzida por Liao e Huang (2011) e a produzida por Pinto (2005), onde é possível visualizar a camada externa vitrificada e a presença de poros gerados.

4.2.5.2 Estrutura Interna

A estrutura interna é outra importante característica da argila expandida. Na Figura 30 é apresentada a estrutura interna da formulação A2-5.

Figura 30 – Estrutura interna da argila expandida da formulação A2-5

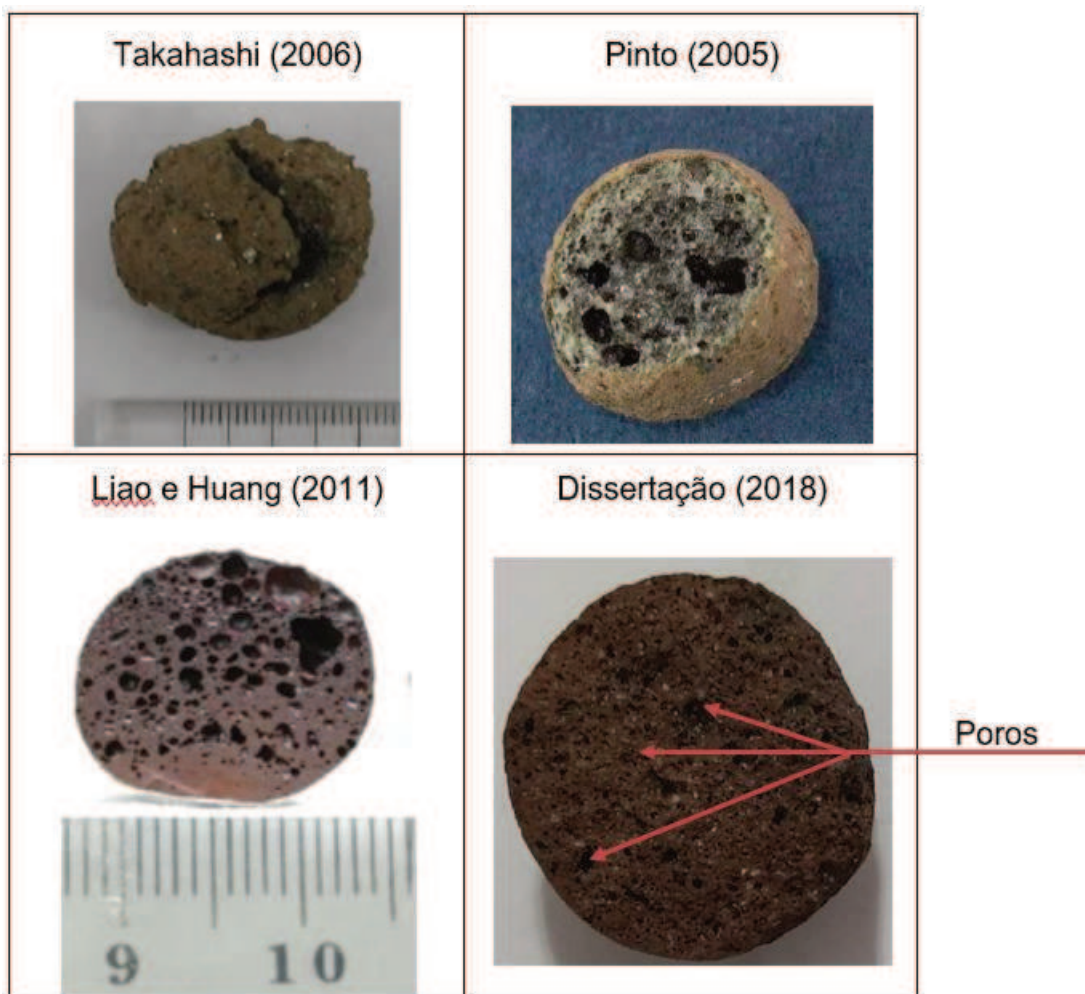


Fonte: Registrada pelo autor.

Ao analisar a Figura 30, observa-se que a estrutura interna dos agregados leves produzidos apresenta grande quantidade de poros e vazios formados durante a expansão, característica do agregado leve, em que os vazios levam o material ao aumento de seu volume e conseqüentemente à baixa massa específica aparente.

Na Figura 31 é possível avaliar a morfologia interna de argilas expandidas fabricadas por outros autores em comparação com a da formulação A2-5. A característica típica de sua estrutura interna é a presença de poros de diversos tamanhos e em alguns casos, até a interligação entre os poros.

Figura 31 – Morfologia interna de argilas expandidas encontradas na literatura



Fonte: Elaborada pelo autor.

Ao analisar a Figura 31, percebe-se semelhança entre a argila expandida da dissertação e as demais apresentadas na literatura. Porém os produtos de Liao e Huang (2011) e Pinto (2005), em uma análise visual, aparentemente, apresentaram poros de maior dimensão, enquanto os agregados produzidos nesta pesquisa mostraram maior quantidade de poros, mas com menores dimensões.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo estudar a possibilidade de adição de LF gerado na indústria frigorífica na produção de agregados leves de argila expandida a partir de duas jazidas de argila natural, provenientes da região de Mineiros/GO, que são matéria-prima na produção de cerâmica vermelha em duas empresas do mesmo município. A partir da revisão de literatura e programa experimental realizado, pode-se concluir a respeito da fabricação de agregados leves a partir de argilas da região com adição de LF.

Em relação à caracterização das matérias-primas, pode-se concluir que:

- a) as argilas das duas jazidas possuem como composição majoritária o SiO_2 , seguido de Al_2O_3 e depois por Fe_2O_3 . Os argilominerais encontrados nas argilas foram o quartzo e a montmorilonita para as duas argilas, óxido de cálcio e manganês hidratado para a Argila 1 e silicato de alumínio e potássio para a Argila 2. A massa específica real da Argila 1 foi de $2,54 \text{ g/cm}^3$ e da Argila 2 foi de $2,58 \text{ g/cm}^3$;
- b) o LF apresentou 94,79% de matéria orgânica em sua composição e entre as fases inorgânicas, destacou-se o Si, Fe e Al. Sua massa específica real foi de $1,9344 \text{ g/cm}^3$. O teor de umidade do LF foi de 65,63%.

Referente ao processo de sinterização das argilas, pode-se concluir que:

- a) as características naturais da Argila 1 não possuem propriedades expansivas nas temperaturas de 1100°C , 1150°C e 1200°C . A adição de LF na argila 1 fez com que os produtos obtidos adquirissem menor massa específica aparente;
- b) a Argila 2 apresentou expansão pirolástica na temperatura de 1200°C para a formulação A2-0, com 29,10% de expansão e também para a formulação A2-5, com 6,42%. A massa específica aparente foi de 1,22 e $1,39 \text{ g/cm}^3$, para as formulações A2-0 e A2-5, respectivamente. A adição de LF inibiu a expansão das formulações da Argila 2;
- c) os testes de absorção de água apontaram valores de 7,83% para a composição A2-0 e 6,62% para a composição A2-5;

- d) as análises de morfologia interna e externa dos corpos de prova produzidos apresentaram características típicas da argila expandida, com camada externa vitrificada e material com poros no seu interior, o que confirma a expansão do material.

Nos termos abordados nesta pesquisa, diante das matérias-primas utilizadas e os testes realizados, o LF não se mostrou eficiente no processo de produção de agregados leves, pois a sua adição provocou a inibição da expansão da argila.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para contribuição e aprofundamento do tema abordado, sugere-se a continuidade do estudo realizado, com as seguintes propostas:

- a) executar estudo similar, de forma a criar uma base de dados com a análise das argilas naturais da região do sudoeste goiano;
- b) realizar testes com aditivos com propriedades expansivas na Argila 2, como por exemplo óleos minerais e cinzas;
- c) fazer um estudo de viabilidade econômica para a produção de agregados leves de argila expandida.

REFERÊNCIAS

- ACI (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE). Guide for structural lightweight aggregate concrete. ACI 213R-03. 2003.
- ARCHELA, E. et al. **Considerações sobre a geração de efluentes líquidos em centros urbanos**. Geografia (Londrina), v. 12, n. 1, p. 517-526, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 7181: **Solo – Análise granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- _____. NBR 10007: **Amostragem de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- _____. NBR NM 53: **Agregado Graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.
- BAUER, L. A. Falcão. **Materiais de construção**. v. 1. 5 ed. São Paulo: LTC, 1994.
- BAUTISTA-LAZO, S.; SHORT, T. Introducing the all seeing eye of business: a model for understanding the nature, impact and potential uses of waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 40, p. 141-150, fev. 2013.
- BELUSSO, D.; HESPANHOL, A. N. **A evolução da avicultura industrial brasileira e seus efeitos territoriais**. Revista Percurso, v. 2, n. 1, p. 25-51, 2010.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da natureza e propriedades dos solos**. 3 ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- CAMMAROTA, M. C. Notas de Aula – **Tratamento de Efluentes Líquidos – EQB – 485 Engenharia do Meio Ambiente**. Universidade Federal do Rio de Janeiro Escola de Química. Rio de Janeiro (2011).
- CHEESEMAN, C. R.; VIRDI, G. S. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 45, n. 1, p. 18-30, 2005.
- COUTINHO, A. S. **Fabrico e propriedades do betão**. 2 ed. Portugal: LNEC, 1988.
- DA CRUZ, Franciane Paula; DE ARAÚJO, Weliton Eduardo Lima. **Avaliação dos aspectos e impactos ambientais no setor de abate de um frigorífico em Cachoeira Alta-GO**. UniRV Online: Revista Científica Eletrônica Interdisciplinar da Universidade de Rio Verde, v. 1, n. 1, 2015.
- DAMASCENO, E.C. **Pesquisa de algumas matérias-primas para agregados leves**. Tese (Livre Docência) – Departamento de Engenharia de Minas, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1973. p. 5-89.
- DE GENNARO, R. et al. Zeolitic tuffs as raw materials for lightweight aggregates. **Applied Clay Science**, v. 25, n. 1, p. 71-81, 2004.

DEBIK, E.; MANAV, N. **Sequence optimization in a sequencing batch reactor for biological nutrient removal from domestic wastewater**. *Bioprocess Biosystem Engineering*, 33 (05): 533-540, 2009.

DOS SANTOS, M. R.; TEIXEIRA, C. E.; KNISS, C. T. Avaliação de desempenho ambiental na valorização de resíduos sólidos de processos industriais. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 7, 2014.

EKVALL, T. et al. What life-cycle assessment does and does not do in assessments of waste management. **Waste Management**, v. 27, n. 8, p. 989–996, 2007.

EXCA (EUROPEAN EXPANDED CLAY ASSOCIATION). **Production**: from 1 m³ clay to 5 m³ expanded clay. 2018. Disponível em: <<http://www.exca.eu/expanded-clay/#production>>. Acesso em: 15 dez. 2018.

FERNANDES, M. A. **Avaliação de desempenho de um frigorífico avícola quanto aos princípios da produção sustentável**. [Tese] Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

FERREIRA, A. **Estudo de viabilidade técnica e econômica da utilização do lodo flotado proveniente do tratamento de efluentes de um frigorífico de aves com biomassa para produção de vapor**. 2016.

GOMES NETO, D.P. **Dosagem de microconcretos leves de alto desempenho para produção de pré-fabricados esbeltos de pequena espessura**: Estudo de Caso. 1998. 56 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1998.

GONDIM, G. V. **Potencial de geração de energia a partir dos resíduos sólidos orgânicos e efluentes líquidos gerados em uma unidade agroindustrial**. 2017. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, 2017.

GOOGLE MAPS. 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps>>. Acesso em: 15 maio 2018.

GRUN, E. **Caracterização de Argilas provenientes de Canelinha/SC e estudo de formulações de massas cerâmica**. Dissertação Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Estadual de Santa Catarina, Joinville, SC (2007).

HANSEN, D. M. **Avaliação das propriedades pozolânicas de um resíduo de cerâmica vermelha para emprego como material cimentício suplementar**. 2016.

HWANG, C. L. et al. Manufacture and performance of lightweight aggregate from municipal solid waste incinerator fly ash and reservoir sediment for self-consolidating lightweight concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 10, p. 1159-1166, 2012.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. **Gestão de resíduos sólidos em São Paulo**: desafios da sustentabilidade. *Estudos Avançados*, v.25, n.71, p. 135-158, 2011.

JOHN, V. M.; AGOPYAN, V. Reciclagem de resíduos da construção civil. **Seminário Reciclagem de Resíduos Sólidos Domiciliares**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2000.

KOURTI, I.; CHEESEMAN, C. R. Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from lignite coal fly ash and recycled glass. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 11, p. 769-775, 2010.

LI, B. et al. Effects of a two-step heating process on the properties of lightweight aggregate prepared with sewage sludge and saline clay. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 119-126, 2016.

LIAO, Yi-Chong; HUANG, Chi-Yen. Effects of heat treatment on the physical properties of lightweight aggregate from water reservoir sediment. **Ceramics International**, v. 37, n. 8, p. 3723-3730, 2011.

MATSUMURA, E. M. **Perspectivas para conservação e reúso de água na indústria de alimentos-estudo de uma unidade de processamento de frangos**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. 2007.

MAYCÁ, J.; CREMONINI, R. A.; RECENA, F. A. **Contribuição ao estudo da argila expandida nacional como alternativa de agregado graúdo para Concretos Leves Estruturais (CLE)**. Trabalho apresentado no Curso de Especialização em Construção Civil, 2006.

MEDEIROS, E. N. M. et al. **Incorporação de cinza de lenha, lodo de estação de tratamento de água e cinza de casca de arroz em massa cerâmica**. Utilização da técnica de planejamento. *Cerâmica*, v. 56, p. 399-404, 2010.

MELO, A. C. F. **Betões leves vibro comprimidos com agregados de argila expandida: Estudo de composição e caracterização experimental**. 2000.

MENDES, A. A., CASTRO, H. F.; PEREIRA, E. B.; JUNIOR, A. F. **Aplicação de lipases no tratamento de águas residuárias com elevados teores de lipídeos**. *Revista Química Nova*, v. 28, n. 2, p. 296-305, 2005;

MENDES, M. R. **Desenvolvimento de agregados leves a partir de subproduto da mineração de carvão e de lodo de estação de tratamento de efluentes de indústria têxtil**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

MENEGHINI, C.; PROINELLI, R. Análise de viabilidade da queima de lodo frigorífico em uma caldeira à lenha. **Unoesc & Ciência – ACET**, p. 7-14, 2015.

MIELENZ, R.C.; KING, M.E. Physical-chemical properties and engineering performance of clays. **Calif. Div. Mines Bull**, v. 169, p. 196-254, 1955.

MODOLO, R. C. E.; FERREIRA, V. M.; LABRINCHA, J. A.; TARELHO, L. A. C.; SENFF, L.; COSTA, N. **Lime mud as raw material in lightweight aggregate production**. 2013.

MORAVIA, W. G. et al. Caracterização microestrutural da argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. **Revista Cerâmica**, v. 52, p. 193-199, 2006.

MURRAY AND SMITH, J. M. Lightweight aggregate potentialities of some indiana shales. **Indiana Geol. Survey Rept. Progr**, 1958.

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

OLIVO, R. **O mundo do frango: cadeia produtiva da carne do frango**. Criciúma: 2006.

OZGUVEN, A.; GUNDUZ, L. Examination of effective parameters for the production of expanded clay aggregate. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 6, p. 781-787, 2012.

PADILHA, A. C. M. et al. Gestão ambiental de resíduos da produção na Perdigão Agroindustrial S/A-Unidade Industrial de Serafina Corrêa-RS. In: NEVES, M. F.; BIALOSKORSKI, S.; SCARE, R. F. **Congresso Brasileiro de Economia e Sociologia Rural**. 2005.

PEREIRA, F. R. **Valorização de resíduos industriais como fonte alternativa mineral: composições cerâmicas e cimentícias**. 2006. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais) – Departamento de Engenharia Cerâmica e do Vidro. Universidade de Aveiro, 2006.

PINTO, L. A. M.; PISANO, A. Aspectos ambientais do abate de aves: uma revisão. **Revista UNINGÁ Review**, v. 22, n. 3, p. 44-50, 2015.

PINTO, S. J. F. **Valorização de resíduos da indústria da celulose na produção de agregados leves**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro.

PORTAL RESÍDUOS SÓLIDOS. 2018. Disponível em: <<https://portalresiduossolidos.com/>>. Acesso em: 20 set. 2018.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G. Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. **Cerâmica Industrial**, v. 2, n. 1/2, p. 31-35, 1997.

REPÓRTER BRASIL. A Indústria do frango no Brasil. Ed.: Marcel Gomes. São Paulo: **Monitor**, v. 2, jun. 2016.

RILEY, C. M. Relation of chemical properties to the bloating of clays. **J. American Ceramic Society**, v. 34, p. 121-128, 1951.

ROCHA, J. H. T. et al. Composto de lodo de esgoto como substrato para mudas de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 73, p. 27-35, 2013.

ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve de alto desempenho modificado com SB para pré-fabricados esbeltos-dosagem, produção, propriedades e microestrutura**. 2003. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

- ROSSIGNOLO, J. A. **Concreto leve estrutural: produção, propriedades, microestrutura e aplicações.** São Paulo: Pini, 2009.
- ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C.;MORAIS, J. A. Properties of high performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates. **Cement & Concrete Composites**, v. 25, p. 77-82, 2003.
- SANTIS, Bruno Carlos; ROSSIGNOLO, João Adriano. Avaliação da influência de agregados leves de argila calcinada no desempenho de concretos estruturais. **Ambiente Construído**, v. 14, n. 4, p. 21-32.
- SANTOS, M. E.; SALOMÃO, J. R.; FARIAS, R.; COSTA, E. **Argila expandida como agregado para concreto leve.** São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 1986.
- SANTOS, M. R.; TEIXEIRA, C. E.; KNISS, C. T. Avaliação de desempenho ambiental na valorização de resíduos sólidos de processos industriais. **Revista de Administração da Universidade Federal de Santa Maria**, v. 7, 2014.
- SANTOS, P. S. **Ciência e tecnologia das argilas.** São Paulo: Edgard Blucher, 1992. v.1 e 2.
- SCHATZMANN, H. C. **Tratamento avançado do efluente de frigorífico de aves e reuso de água.** Tese. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2009.
- SCHENINI, P. C.; DA ROSA, A. L. M.; RIBEIRO, M. M. A. **O mecanismo de desenvolvimento limpo como atrativo ao investimento ambiental: estudo de caso em um frigorífico de bovinos.** III SEGeT–Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Resende-RJ, 2006.
- SCHILLING, T. U. A. **Aspectos tecnológicos do abate e processamento de frangos de corte.** Monografia (Graduação em Medicina Veterinária) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. Universidade de Brasília, 2014.
- SENA, R.F. **Avaliação da biomassa obtida pela otimização da flotação de efluentes da indústria de carnes para geração de energia.** 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.
- SPELLMAN, F. R. **Handbook of water and waste water treatment plant operations.** London: Lewis Publishers, 2003. p. 669
- TAKAHASHI, E. A. N. **Utilização da escória de alumínio na fabricação de argila expandida.** 2006.
- UGARTE, J. F. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. **Vermiculita.** In: CETEM. Rochas e minerais industriais. 1 ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2005. Cap. 32, p.677-698.
- UNFRIED, L. C.; YOSHI, C. V. H. **Sustentabilidade no abate e processamento de aves.** 2012.

VIRMOND, E. et al. **Aproveitamento do lodo de tratamento primário de efluentes de um frigorífico como fonte de energia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

VOGADO, G. M. S. et al. Evolução da avicultura brasileira. **Nucleus Animalium**, v. 8, n. 1, 2016.

WEI, Y. L.; CHENG, S. H.; KO, G. W. Effect of waste glass addition on lightweight aggregates prepared from F-class coal fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 112, p. 773-782, 2016.

WHITE, W. A. **Lightweight aggregate resources of Illinois**. Illinois State Geological Survey, 1959.