



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

**ESTUDO DA SINTERIZAÇÃO EM REATOR VERTICAL DE LEITO FIXO:
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADO
SINTÉTICO A PARTIR DE CINZA VOLANTE E BIOMASSA**

DANIELLY DA SILVA QUARESMA

2016



**ESTUDO DA SINTERIZAÇÃO EM REATOR VERTICAL DE LEITO FIXO:
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADO
SINTÉTICO A PARTIR DE CINZA VOLANTE E BIOMASSA**

Danielly da Silva Quaresma

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientador: Emanuel Negrão Macêdo
Coorientador: José Antônio da Silva Souza

Belém
Maio/2016

ESTUDO DA SINTERIZAÇÃO EM REATOR VERTICAL DE LEITO FIXO:
DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADO
SINTÉTICO A PARTIR DE CINZA VOLANTE E BIOMASSA

Danielly da Silva Quaresma

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA
AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU
DE DOUTORA EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:

Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo
(PRODERNA – ITEC/UFPA – Orientador)

Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza
(PRODERNA– ITEC/UFPA –Coorientador)

Prof. Dr. Márcio Ferreira Martins
(PPGEM - UFES – Examinador Externo)

Prof. Dr. Edemarino Araújo Hildebrando
(PPGEQ – ITEC/UFPA – Examinador)

Prof. Dr. Davi do Socorro Barros Brasil
(PPGEQ – ITEC – UFPA – Examinador)

Prof. Dr. Marcos Allan Leite dos Reis
(PRODERNA – ITEC/UFPA – Examinador)

BELÉM, PA – BRASIL

MAIO DE 2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Quaresma, Danielly da Silva, 1984-

Estudo da sinterização em reator vertical de leito fixo: desenvolvimento de processo para produção de agregado sintético a partir de cinza volante e biomassa / Danielly da Silva Quaresma. - 2016.

Orientador: Emanuel Negrão Macêdo;

Coorientador: José Antônio da Silva Souza.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, Belém, 2016.

1. Reatores químicos. 2. Agregados (Materiais de construção). 3. Sinterização. 4. Resíduos industriais- reaproveitamento. I. Título.

CDD 22. ed. 660.2832

Dedico este trabalho aos meus pais por todo apoio, amor e atenção dedicados a mim, para que pudesse concretizar este projeto, sem eles a jornada seria mais difícil de percorrer.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde, força, coragem e sabedoria para enfrentar os desafios e dificuldades deste trabalho.

Agradeço aos meus amados pais Benedito Quaresma e Adalgisa Quaresma por sempre estarem ao meu lado de forma incondicional e por serem a base forte da minha vida.

Ao meu querido irmão Fabrício Quaresma e minha cunhada Vivianne Moraes por todo apoio fornecido durante esta caminhada.

Ao meu namorado Bruno Akio Urakawa por todo apoio, dedicação, amor, e compreensão fornecidos a mim para que pudesse seguir esta jornada.

A minha Madrinha Marilene Coelho por todo incentivo e apoio durante esta trajetória.

Aos meus orientadores Prof. Dr. José Antônio da Silva Souza e Prof. Dr. Emanuel Negrão Macêdo por toda orientação e dedicação.

Aos amigos que encontrei ao longo deste trabalho, Alacid Neves, Elzelis Muller, Luiz Felipe Pereira, que compartilharam comigo todo conhecimento, amizade, carinho e dedicação para a realização deste projeto. A vocês meus sinceros agradecimentos por me acompanharem em todos os momentos desta caminhada.

Ao querido amigo Luis Venancio pela amizade, orientações e ajuda no decorrer deste trabalho.

A minha querida amiga Raimunda Maia, por todo auxílio necessário e amizade dedicados a mim neste trabalho.

Aos amigos Alvino Melo, Pamela Bezerra, Diego Hildebrando e Fernando Aracaty pela ajuda e amizade.

Aos amigos do curso de Engenharia Química que trabalharam na iniciação científica auxiliando de forma voluntária para realização deste trabalho.

A Técnica e amiga Lianne Maria Magalhães Dias e ao Técnico e amigo Augusto Freitas por toda ajuda fornecida durante este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa concedida.

A HYDRO ALUNORTE pelo fornecimento das amostras para os experimentos.

Neste momento final, gostaria de agradecer aos Profissionais do Laboratório de Engenharia Química, Instituto de Geociências - Laboratório de Raios-X e Laboratório de Engenharia Civil que contribuíram diretamente para realização deste trabalho.

Ame a realidade que constróis e nada deterá o teu voo.

(Autor desconhecido)

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutora em Engenharia de Recursos Naturais (Dra.Eng.).

ESTUDO DA SINTERIZAÇÃO EM REATOR VERTICAL DE LEITO FIXO: DESENVOLVIMENTO DE PROCESSO PARA PRODUÇÃO DE AGREGADO SINTÉTICO A PARTIR DE CINZA VOLANTE E BIOMASSA

Danielly da Silva Quaresma

Maio/2016

Orientador: Emanuel Negrão Macêdo

Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais

Os agregados sintéticos vêm sendo empregados na construção civil como uma medida para redução do extrativismo mineral. Dentro desse contexto, a reciclagem de resíduos industriais configurasse hoje como a base da maioria dos processos de redução da exploração dos recursos minerais. Este trabalho apresenta a formulação de um processo de caráter ambiental e autossustentável do ponto de vista energético, parâmetros para desenvolver um processo para produção de agregado sintético a partir de cinza volante e biomassa, em reator de leito fixo. Dessa forma, para a produção do agregado foram confeccionadas pelotas com uma mistura de argila, cinza volante e carvão vegetal em proporções fixas. Preencheu-se o reator com 20% de pelotas ($6,35 \text{ mm} > \text{pelota} \geq 4 \text{ mm}$) e 80% de carvão vegetal ($3,36 \text{ mm} > \text{carvão} \geq 1,70 \text{ mm}$) classificados para promover a eficiência das reações de combustão e consequente processo de sinterização em diferentes velocidades de ar (Darcy a $20 \text{ }^\circ\text{C}$) de $0,0059 \text{ m.s}^{-1}$ (1º Experimento), $0,0098 \text{ m.s}^{-1}$ (2º Experimento) e $0,017 \text{ m.s}^{-1}$ (3º Experimento). Por meio de difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura foi identificada a presença de mulita no agregado sintético. Este material é caracterizado como agregado leve, de acordo com as normas vigentes. Com os agregados sintéticos fabricou-se concretos leves, segundo a norma estabelecida, sem função estrutural na construção civil, mas com aplicações de resistência moderada, podendo ser utilizados em contrapiso. O processo se mostrou interessante para a sinterização de agregados com boa aderência à matriz de cimento, podendo ser facilmente controlado pela composição, granulometria, gradiente de temperatura e fluxo gasoso, reduzindo os impactos ambientais, à medida que o material produzido implica na não extração de agregados naturais.

Palavras-chave: Cinza volante; agregado sintético; sinterização; reator de leito fixo.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

SINTERING OF STUDY IN FIXED BED REACTOR VERTICAL: DEVELOPMENT PROCESS FOR AGGREGATE PRODUCTION OF SYNTHETIC ASH FROM BIOMASS AND STEERING WHEEL

Danielly da Silva Quaresma

Maio/2016

Advisor: Emanuel Negrão Macêdo

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources

The synthetic aggregates have been employed in civil construction as a measure for the reduction of mineral extraction. Within this context, the recycling of industrial waste configured today as the basis of the majority of processes to reduce the exploitation of mineral resources. This paper presents the formulation of a process of environmental character and self-sustaining from an energy point of view parameters to develop a process for the production of synthetic aggregate from fly ash and biomass fixed bed reactor. Thus, for the production of aggregate pellets were made from a mixture of clay, fly ash and charcoal in fixed proportions. The reactor is filled with 20% pellets ($6.35 \text{ mm} > \text{pellet} \geq 4 \text{ mm}$) and 80% charcoal ($3.36 \text{ mm} > \text{carbon} \geq 1.70 \text{ mm}$) rated for promoting the efficiency of combustion reactions and subsequent sintering process at different air velocities (Darcy at $20 \text{ }^\circ\text{C}$) of $0.0059 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1^o Experiment), $0.0098 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (2^o Experiment) and $0.017 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (3^o Experiment). By means of X-ray diffraction and scanning electron microscopy was identified the presence of mullite in synthetic aggregate. This material is characterized as lightweight aggregate, in accordance with current standards. With synthetic aggregates manufactured to lightweight concrete, according to the established standard, without structural function in civil construction, but with applications of moderate resistance and may be used in the counterfloor. The process if showed interesting for the sintering of aggregates with good adhesion to the matrix of cement, and can easily be controlled by composition, granulometry, temperature gradient and gaseous flow, reducing environmental impacts, to the extent that the material produced implies in not extraction of natural aggregates.

Keywords: fly ash; synthetic aggregate; sintering; fixed bed reactor.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	17
1.1 MOTIVAÇÃO.....	17
1.2 OBJETIVO GERAL.....	20
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
1.4 SÍNTESE DO TRABALHO.....	21
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1 RESÍDUOS.....	22
2.1.1 Reciclagem de resíduos	23
2.1.2 Geração de resíduos da indústria minero-metalúrgica	25
2.2 CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL.....	27
2.2.1. Reciclagem e utilização de cinzas de carvão mineral	29
2.2.2 Pesquisas sobre a utilização de cinzas volantes no estado do Pará	33
2.3 INDÚSTRIA CERÂMICA	35
2.3.1 Cerâmica vermelha	35
2.3.2 Cerâmica branca	36
2.3.3 Revestimentos	37
2.3.4 Resíduos na indústria cerâmica	38
2.4 INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	39
2.5 AGREGADO - UMA VISÃO GERAL	40
2.5.1 Agregado sintético	46
2.5.2 Agregado leve	47
2.5.2.1 Processos de produção.....	50
2.5.3 Agregado a partir de resíduos e suas aplicações	51
2.6 SINTERIZAÇÃO	55
2.6.1 Reações de sinterização em materiais cerâmicos	58
2.6.2 Reações de estado sólido para sílico-aluminatos em material cerâmico	59
2.6.2.1 Reações de vitrificação	60
2.6.2.2 Reações de formação de mulita	61
2.7 REATORES DE LEITO FIXO	63

2.7.1 Combustão em meio poroso.....	65
2.7.2 Propagação da frente de combustão	67
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	72
3.1 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO ...	72
3.2 PRÉ-TRATAMENTO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	72
3.2.1 Cinza volante.....	72
3.2.2 Argila	73
3.2.3 Carvão vegetal	73
3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO.....	75
3.3.1 Fabricação das pelotas	75
3.3.2 Fabricação do carvão vegetal granulado.....	77
3.3.3 Medida dos percentuais em volume de pelotas e carvão vegetal.....	78
3.3.4 Mistura de alimentação do reator	79
3.3.5 Reator de leito fixo.....	79
3.3.6 Protocolo dos experimentos	81
3.3.7 Agregado sintético produzido.....	83
3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	87
CAPÍTULO 4 - CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS.....	90
4.1 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO ...	90
4.1.1 Cinza volante.....	90
4.1.2 Argila	92
4.1.3 Carvão vegetal	94
4.2 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DOS CONCRETOS	95
4.2.1 Cimento	95
4.2.2 Areia.....	95
4.2.3 Seixo rolado	95
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	97
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PELOTAS E DO CARVÃO GRANULADO.....	97
5.1.1 Análise de distribuição granulométrica.....	97
5.1.1.1 Pelotas.....	97
5.1.1.2 Carvão vegetal granulado	99

5.1.2 Medida de massa das correntes de alimentação do reator	100
5.1.3 Análise de massa específica.....	101
5.1.4 Porosidade	101
5.2 DADOS OBTIDOS DURANTE O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO	102
5.2.1 Evolução da temperatura.....	102
5.2.1.1 Comportamento do fenômeno da ignição.....	105
5.2.2 Perfil de temperatura	107
5.2.3 Velocidade da frente de combustão	111
5.3 ANÁLISES REALIZADAS NO AGREGADO SINTÉTICO PRODUZIDO.....	114
5.3.1 Distribuição granulométrica.....	114
5.3.2 Propriedades cerâmicas	116
5.3.3 Microscopia eletrônica de varredura.....	117
5.3.4 Difração de raios-X.....	123
5.4 ANÁLISES REALIZADAS NOS CONCRETOS PRODUZIDOS.....	125
5.4.1 Análise granulométrica do agregado sintético para ser utilizado no concreto	125
5.4.2 Resistência à compressão axial simples e medida das propriedades cerâmicas	126
5.4.3 Microscopia eletrônica de varredura nos grupos de concretos produzidos.	131
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES	134
CAPÍTULO 7 - MELHORIAS FUTURAS	136
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
APÊNDICE A	151

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – (a) Dimensões e (b) Conformações da superfície.	42
Figura 2.2- Forma e textura típica de areia de jazida tipo leito de rio.	43
Figura 2.3 – (a) Contínua, (b) descontínua e (c) Uniforme.	43
Figura 2.4 – (a) Concreto com agregados leves, (b) Concreto celular e (c) Concreto sem finos.	49
Figura 2.5 – Forno rotativo.	50
Figura 2.6 – Micrografia dos agregados produzidos pelos processos de (a) sinterização e (b) forno rotativo.	51
Figura 2.7 – (a) Estágio inicial de sinterização com a formação do “pescoço”, onde X representa o diâmetro do pescoço entre partículas e D é o diâmetro das partículas e (b) Micrografia eletrônica de varredura da formação do “pescoço” entre partículas esféricas induzidas por sinterização.	57
Figura 2.8 - Microestrutura de um material cerâmico sinterizado após a retirada da camada amorfa, evidenciando fases como a mulita e o quartzo.	58
Figura 2.9 - (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final.	59
Figura 2.10 - Modelo representativo das etapas relativas às reações de vitrificação na sinterização de materiais cerâmicos em temperaturas elevadas de (a) a (d), com consequente redução de volume: (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final.	60
Figura 2.11- Modelo de sinterização destacando o mecanismo de difusão em material policristalino: (1) difusão superficial; (2) difusão volumétrica; (3) evaporação condensação; (4) difusão volumétrica; (5) difusão volumétrica na fronteira de grão; (6) difusão no contorno de grão.	61
Figura 2.12 – Transformação de mulita primária (metacaulinita) em mulita secundária de morfologia acicular.	62
Figura 2.13 - Fenômenos acoplados de transferência de calor e massa, fluxo e reação química em um meio poroso reativo.	66
Figura 2.14 - Arranjo contra-corrente (a) e co-corrente (b).	69
Figura 3.1 – (a) Cinza volante, (b) Argila e (c) Carvão vegetal.	72
Figura 3.2 – (a) Estufa, (b) Moinho de bolas.	73
Figura 3.3 – (a) Britador de mandíbulas, (b) Carvão pulverizado.	74

Figura 3.4 – (a) Balança, (b) Tambor rotativo.....	76
Figura 3.5 - Pelotas confeccionadas	77
Figura 3.6 – Pelotas classificadas	77
Figura 3.7 – (a) Moinho de discos, (b) Carvão Classificado, (c) Ro-tap por via seca ...	78
Figura 3.8 – Lã de rocha contida no reator.....	80
Figura 3.9 – Distribuição dos termopares.....	81
Figura 3.10 – <i>Paperless Recorder</i> do tipo PHL	82
Figura 3.11– Sistema de ignição.....	83
Figura 3.12 - Desenho esquemático do dispositivo experimental.....	83
Figura 3.13 – Agregados produzidos.....	84
Figura 3.14 – Embutimento do agregado sintético.....	84
Figura 3.15 - Aparato para obter a massa imersa	85
Figura 3.16 – Fluxograma do processo de produção do agregado sintético.....	86
Figura 3.17 – (a) Cimento, (b) Areia, (c) Agregado sintético e (d) Seixo rolado.	87
Figura 3.18 – Fluxograma do processo de produção dos concretos	89
Figura 4.1 – Difratoograma de raios-X da cinza volante	91
Figura 4.2- Distribuição granulométrica da cinza volante	92
Figura 4.3- Difratoograma de raios-X da argila	93
Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da argila.....	93
Figura 4.5 – Difratoograma de raios-X do carvão vegetal	94
Figura 4.6 – Distribuição granulométrica da areia	95
Figura 4.7 – Distribuição granulométrica do seixo rolado	96
Figura 5.1 – Distribuição granulométrica das pelotas para o 1º Experimento	98
Figura 5.2 – Distribuição granulométrica das pelotas para o 2º Experimento	98
Figura 5.3 – Distribuição granulométrica das pelotas para o 3º Experimento	98
Figura 5.4 – Distribuição granulométrica do carvão granulado para o 1º Experimento	99
Figura 5.5 – Distribuição granulométrica do carvão granulado para o 2º Experimento	99
Figura 5.6 – Distribuição granulométrica do carvão granulado para o 3º Experimento	100
.....	
Figura 5.7 – Evolução da temperatura do 1º Experimento.....	102
Figura 5.8 – Evolução da temperatura do 2º Experimento.....	103
Figura 5.9 – Evolução da temperatura do 3º Experimento.....	104
Figura 5.10 – Comportamento da ignição do combustível para o 1º Experimento.....	105
Figura 5.11 – Comportamento da ignição do combustível para o 2º Experimento.....	106

Figura 5.12 – Comportamento da ignição do combustível para o 3º Experimento.....	106
Figura 5.13 – Comportamento do perfil de temperatura do 1º Experimento	108
Figura 5.14 – Comportamento do perfil de temperatura do 2º Experimento	109
Figura 5.15 – Comportamento do perfil de temperatura do 3º Experimento	109
Figura 5.16 – Retração sofrida pelo leito	110
Figura 5.17 – Velocidade da frente de combustão para o 1º Experimento.....	111
Figura 5.18 – Velocidade da frente de combustão para o 2º Experimento.....	112
Figura 5.19 – Velocidade da frente de combustão para o 3º Experimento.....	112
Figura 5.20 – Distribuição granulométrica dos agregados produzidos no 1º Experimento	114
Figura 5.21 – Distribuição granulométrica dos agregados produzidos no 2º Experimento	115
Figura 5.22 – Distribuição granulométrica dos agregados produzidos no 3º Experimento	115
Figura 5.23 – Micrografia do agregado sintético do 1º experimento com ampliação de 80x	117
Figura 5.24 – Micrografia do agregado sintético do 1º experimento com ampliação de 800x	118
Figura 5.25 – Micrografia do agregado sintético do 2º experimento com ampliação de 80x	119
Figura 5.26 – Micrografia do agregado sintético do 2º experimento com ampliação de 800x	120
Figura 5.27 – Micrografia do agregado sintético do 3º experimento com ampliação de 80x	121
Figura 5.28 – Micrografia do agregado sintético do 3º experimento com ampliação de 800x	122
Figura 5.29 – Difratoograma do agregado sintético produzido no 1º Experimento.....	123
Figura 5.30 – Difratoograma do agregado sintético produzido no 2º Experimento.....	124
Figura 5.31 – Difratoograma do agregado sintético produzido no 3º Experimento.....	124
Figura 5.32 – Distribuição granulométrica dos agregados do 1º Experimento	125
Figura 5.33 – Distribuição granulométrica dos agregados do 2º Experimento	125
Figura 5.34 – Distribuição granulométrica dos agregados do 3º Experimento	126
Figura 5.35 – Ruptura ocorrida no concreto.....	128
Figura 5.36 – Formação de vazios no corpo de prova.....	129

Figura 5.37 – Micrografia do concreto com seixo rolado (CSR)	131
Figura 5.38 – Micrografia do concreto com agregados do 1º experimento (CAS1ºEXP)	132
Figura 5.39 – Micrografia do concreto com agregados do 2º experimento (CAS2ºEXP)	132
Figura 5.40 – Micrografia do concreto com agregados do 3º experimento (CAS3ºEXP)	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Composição química da cinza volante	28
Tabela 2.2 – Constituintes químicos em base seca (%).....	28
Tabela 2.3 – Limite da distribuição granulométrica do agregado miúdo.....	44
Tabela 2.4 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.	44
Tabela 3.1 – Velocidade de ar (Darcy 20 °C).....	75
Tabela 3.2 - Composição das matérias primas	76
Tabela 3.3 – Número de corpos de prova moldados	88
Tabela 4.1 - Composição química da cinza volante	90
Tabela 4.2 - Composição química da argila	92
Tabela 4.3 – Resultado da análise imediata.....	94
Tabela 4.4 - Exigências físicas e mecânicas.....	95
Tabela 4.5 – Medida das propriedades cerâmicas do seixo rolado	96
Tabela 5.1 – Massas obtidas a partir dos 20% de pelotas e 80% de carvão vegetal	100
Tabela 5.2 – Massa específica dos materiais preparados	101
Tabela 5.3 – Porosidade do leito	101
Tabela 5.4 – Massa dos agregados produzidos.....	114
Tabela 5.5 – Medida das propriedades cerâmicas	116
Tabela 5.6 – Resistência à compressão	126
Tabela 5.7 – Propriedades cerâmicas e resistência à compressão dos concretos	130

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Os resíduos industriais podem ser classificados de acordo com sua natureza física, composição química e através dos riscos potenciais ao meio ambiente. A origem da produção destes resíduos resulta das inúmeras atividades industriais que estão estabelecidas em diferentes seguimentos, nos quais a maioria dos processos utilizados geram produtos de interesse, bem como os subprodutos ou resíduos com características e composições muito variadas de natureza inerte ou altamente tóxica com potencial de reciclagem e ou reutilização (SOUZA *et al.*, 2006).

As principais preocupações com relação à emissão de resíduos estão voltadas para as repercussões que estes materiais podem ter sobre a saúde humana e sobre o meio ambiente, uma vez que os resíduos produzidos pelas indústrias dispõem particularmente de atenção e cuidado, pois quando incorretamente gerenciados, tornam-se uma grave ameaça ao meio ambiente (TAKENAKA *et al.*, 2011).

Atualmente tem ocorrido uma crescente produção industrial e conseqüentemente uma intensa geração de resíduos. Desta forma, a adequada destinação destes materiais é um dos grandes desafios para as indústrias, para que se torne possível atenuar ou no mínimo exaurir problemáticas como: escassez de áreas para acomodar estes resíduos, a possibilidade de disputa de terras com a população circunvizinha a planta industrial, problemas de contaminação da área que cerca a indústria, dentre outros (TANCREDI, 2010).

As mudanças ainda são lentas no que se refere à diminuição do potencial poluidor do parque industrial. Porém, a legislação invoca o princípio da responsabilidade das indústrias em tratar o resíduo desde a sua geração até sua disposição final aplicando processos produtivos que gerem menos resíduos. Contudo, grandes volumes de resíduos sólidos ainda são gerados e com isso, várias indústrias de diversos setores, passaram procurar soluções alternativas (TANCREDI, 2010).

Um dos setores que mais se destaca na procura de soluções alternativas, como a reciclagem de resíduos industriais e urbanos, é a indústria cerâmica, em virtude de possuir elevado volume de produção que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos e que, aliado às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às

particularidades do processamento cerâmico, faz dessa indústria uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos (WENDER e BALDO, 1998).

Dentro do contexto do reaproveitamento de resíduos para ser utilizado na indústria cerâmica destaca-se a incorporação destes na produção de agregados para serem aplicados na construção civil. De acordo com o estudo realizado por Souza (2010) no resíduo formado a partir do beneficiamento da bauxita para produção de alumina (lama vermelha), este tem sido aplicado na fabricação de agregado sintético em função de suas características físico-químicas importantes para a sinterização destes materiais, o qual tem mostrado resultados satisfatórios quanto a resistência mecânica deste material ser superior a dos agregados naturais, podendo substituir facilmente do ponto de vista técnico os agregados extraídos da natureza.

Diante desta perspectiva, relacionada à reciclagem dos resíduos industriais, outro resíduo interessante para ser utilizado na fabricação de agregados sintéticos é a cinza volante, gerada a partir da calcinação de carvão mineral para produção de energia, uma vez que este resíduo apresenta em sua composição química elevadas concentrações de sílico-aluminatos segundo Siqueira *et al.* (2012), e que de acordo com Brindley e Nakahira (1959) são constituintes favoráveis a formação de mulita, a partir das reações de estado sólido em temperaturas acima de 1000 °C, conferindo resistência mecânica aos materiais, neste caso os agregados sintéticos.

Outro fator associado a importância da reciclagem da cinza volante, está relacionado a quantidade com que este resíduo é gerado. Segundo dados estatísticos, no Brasil são gerados aproximadamente 1.700.000 toneladas de cinzas de carvão mineral por ano, deste total 80% são de cinzas volantes e 20% de cinzas pesadas, apesar de quimicamente inerte, este resíduo apresenta problemas ambientais pela sua constituição granulométrica e pela quantidade com que é gerado (PAPROCKI *et al.*, 2008).

A nível mundial, a produção anual de cinzas de carvão é estimada em cerca de 600 milhões de toneladas, onde as cinzas volantes constituem aproximadamente 500 milhões de toneladas, correspondendo 75 a 80% do total de cinzas produzidas (YEOLE *et al.*, 2014).

No que se refere as aplicações da cinza volante, de acordo com o trabalho realizado por Popovics (1992), há relatos de que as cinzas volantes quando sinterizadas podem prover agregados leves de boa qualidade para aplicação em concreto. A cinza também pode ser empregada em argamassa, de forma semelhante ao concreto. Na argamassa a cinza pode substituir certa quantidade de cimento ou, ainda, substituir certa

quantidade de areia, mantendo-se constante à proporção de cimento (CRUZ, 2002). O autor Faria (2011) mostra que as atividades industriais tem mostrado utilização na fabricação de cimento, concreto, tijolos, além de uma rota alternativa na produção de vidros e compósitos. A pesquisa realizada por Shaheen *et al.* (2014) apresenta a utilização da cinza na melhoria do solo, Güneyisi *et al.* (2015) na produção de concreto auto-adensável, Itskos *et al.* (2015) no desenvolvimento de zeólita e recentemente a cinza volante tem mostrado aplicação na fabricação de agregado leve sinterizado, de acordo com o estudo de Yiu Lo *et al.* (2016), entre outros.

Observa-se na literatura que a cinza volante apresenta inúmeras aplicações e que no trabalho de Paprocki *et al.* (2008), apenas 30% das cinzas são comercializadas principalmente na produção do clínquer, utilizado para a fabricação do cimento Portland. Outra questão também foi analisada, em relação a quantidade restrita de pesquisas acerca da utilização de cinzas volantes para a produção de agregado sintético, no estado do Pará, onde os estudos recentes mostram aplicação na produção de argamassas, concretos e síntese de zeólitas.

Segundo Paprocki *et al.* (2008), em virtude da pequena parcela de cinzas reaproveitadas no país, o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para a utilização de uma maior quantidade deste resíduo está sendo constantemente investigado.

Neste contexto, a cinza volante é um material interessante, possuindo um potencial importante para sua reciclagem na produção de agregado sintético.

O desenvolvimento do processo para obter agregado sintético no dispositivo experimental (reator de leito fixo) projetado neste trabalho, é baseado no processo de combustão da biomassa, quando bem controlado promove a sinterização de forma homogênea e em todas as faces do material, atingindo temperaturas da ordem de 1200 °C, requisito para que aconteça as reações exotérmicas entre os aluminatos e silicatos para formação de mulita secundária acicular (forma mais estável da mulita formada nestas condições) (BRINDLEY e NAKAHIRA, 1959).

A outra vantagem está relacionada a economia de energia que este dispositivo proporciona, visto que a sinterização ocorre a partir da combustão da biomassa, neste processo, que segue de forma autônoma ao longo do reator. Após o término da ignição, a reação se completa sem necessidade de fonte extra de energia durante o processo de produção do material sinterizado. Portanto gerando um produto mais competitivo do ponto de vista comercial.

1.2 OBJETIVO GERAL

O trabalho objetiva formular um processo de caráter ambiental e autossustentável do ponto de vista energético, mediante a definição dos parâmetros de controle para a fabricação de agregado sintético em reator de leito fixo, a partir de matéria prima proveniente de resíduos industriais gerados sempre em grandes quantidades como a cinza volante e biomassas, visando aplicabilidade na construção civil.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Construir um reator vertical de leito fixo para promover o processo de combustão em co-corrente com alimentação de ar para baixo e consequente sinterização do agregado sintético;

- Investigar as características de forma detalhada da cinza volante (rica em sílico-aluminatos) e do carvão vegetal, durante a transformação de fases na sinterização da mistura em reator de leito fixo;

- Entender o mecanismo das reações de estado sólido a partir de sílico-aluminatos, responsáveis pela formação de mulita, presentes na cinza volante e argila, com o auxílio de técnicas de caracterização como difração de raios-X e microscopia eletrônica de varredura;

- Realizar as medidas das propriedades cerâmicas do agregado sintético fabricado, para qualifica-lo quanto sua massa específica aparente e assim classifica-lo como leve ou pesado de acordo com as normas técnicas;

- Avaliar as condições experimentais favoráveis a obtenção do agregado sintético para ser utilizado em concreto convencional ou em concretos especiais na construção civil.

1.4 SÍNTESE DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta as motivações que levaram ao estudo do aproveitamento da cinza volante de carvão mineral como matéria prima para fabricação de agregado sintético com aplicabilidade na construção civil. Neste capítulo também são apresentados os objetivos a serem alcançados neste trabalho.

O Capítulo 2 refere-se a revisão da literatura acerca dos resíduos oriundos das indústrias minero-metalúrgicas como matéria prima para a indústria cerâmica. Também é apresentada uma abordagem sobre a reciclagem e utilização da cinza volante. Enfatiza-se ainda, as indústrias cerâmicas e da construção civil, destacando-se uma visão geral dos agregados, além de seções dedicadas ao processo de sinterização e suas respectivas reações de estado sólido em materiais cerâmicos. Neste capítulo apresenta-se também uma revisão sobre reatores de leito fixo, bem como a combustão em meio poroso e a propagação da frente de combustão.

O Capítulo 3 apresenta de forma detalhada os materiais utilizados e a metodologia experimental desenvolvida para o processo de produção do agregado sintético e dos concretos.

O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos a partir da caracterização das matérias primas empregadas na fabricação dos agregados sintéticos e dos concretos.

O capítulo 5 expõe as análises dos resultados e suas respectivas discussões antes, durante e após o processo de sinterização para a obtenção do agregado sintético, além da aplicação deste produto na fabricação de concretos.

No Capítulo 6 são abordadas as principais conclusões do trabalho referente ao estudo da sinterização em reator vertical de leito fixo para produção de agregado sintético a partir de cinza volante e biomassa e dos concretos produzidos.

Por fim são apresentados no capítulo 7 algumas melhorias futuras com relação a produção de agregado sintético em reator vertical de leito fixo.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 RESÍDUOS

A ABNT NBR 10004:2004 define os resíduos sólidos, como resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Para os efeitos desta norma, os resíduos são classificados em:

- Resíduos classe I - perigosos: são aqueles que apresentam periculosidade (risco à saúde pública e/ou riscos ao meio ambiente), ou uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade. Exemplos: baterias, produtos químicos e lâmpadas fluorescentes.

- Resíduos classe II – não perigosos: são aqueles classificados em Resíduos classe II A – não inertes e Resíduos classe II B – inertes. Exemplos: resíduos de madeira, materiais têxteis, minerais não-metálicos, entre outros.

- Resíduos classe II A – não inertes: aqueles que podem apresentar propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Exemplos: lixo orgânico e papel.

- Resíduos classe II B – inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. Exemplos: tijolos, vidros, plásticos, compósitos, borrachas e embalagens plásticas, que não se decompõem em curto prazo.

Nesse contexto de classificação destaca-se o resíduo industrial, que é um material resultante de processos industriais, o qual segundo Missiaggia (2002) podem ser classificados em:

I. Recicláveis: são aqueles que podem ser inseridos em um novo processo para serem transformados em um novo produto;

II. Não-recicláveis: são aqueles encaminhados para disposição final, geralmente no solo, pois não puderam ser reciclados devido a fatores financeiros, tecnológicos e sociais. A recuperação de materiais que agreguem valor comercial é, sem dúvida, uma

alternativa interessante de se evitar os problemas de tratamento e disposição final de resíduos sólidos industriais.

A legislação ambiental brasileira apresenta vários métodos de destinação final para resíduos, cabendo ao gerador escolher o mais adequado ambientalmente e economicamente ao seu processo. Os principais métodos de destinação final são: aterro industrial, landfarming, compostagem, incineração (grade fixa, grade móvel ou vibratória, tambor rotativo, injeção líquida e leito fluidizado), pirólise, co-processamento, desidratação e técnicas de estabilização de resíduos (encapsulamento) (ACIJ, 2009).

Em 2010 foi criada a LEI Nº 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Estão sujeitas à observância desta Lei as pessoas físicas ou jurídicas, de direito público ou privado, responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos sólidos e as que desenvolvam ações relacionadas à gestão integrada ou ao gerenciamento de resíduos sólidos, não aplicando-se aos rejeitos radioativos, que são regulados por legislação específica (DOU, 2010).

Segundo Tancredi (2010), de forma concomitante à crescente produção industrial encontra-se a necessidade de tratamento dos resíduos gerados, dado que, um planejamento satisfatório, com conseqüente destinação adequada ao resíduo gerado torna possível atenuar ou no mínimo exaurir problemáticas como: escassez de áreas para acomodar estes resíduos, a possibilidade de disputa de terras com a população circunvizinha a planta industrial, problemas de contaminação da área que cerca a indústria, dentre outros. Na prática a legislação ambiental fez com que muitas empresas investissem em tecnologias mais limpas, ou seja, em processos produtivos que geram menos resíduos. Contudo, grandes volumes de resíduos sólidos são gerados e atualmente preocupam os empresários, devido principalmente a dois fatores: ao custo relativamente elevado para a gestão e a destinação atual dos resíduos, além da responsabilidade ambiental. Com isso, várias indústrias, principalmente as mais importantes e as mais bem administradas, de diversos setores industriais, passaram procurar soluções alternativas.

2.1.1 Reciclagem de resíduos

A reciclagem de resíduos, independentemente do seu tipo, apresenta inúmeras vantagens em relação à utilização de recursos naturais *in natura*, dentre as quais se tem

(MENEZES *et al.*, 2002): redução do volume de extração de matérias primas; redução do consumo de energia; menores emissões de poluentes, melhoria da saúde e segurança da população; preservação dos recursos naturais, prolongando sua vida útil e reduzindo a destruição da paisagem, fauna e flora.

Segundo Menezes *et al.* (2002), nas últimas décadas, a pesquisa sobre a reciclagem de resíduos industriais vem sendo intensificada em todo o mundo. Na América do Norte e Europa, a reciclagem é vista, pela iniciativa privada, como um mercado altamente rentável. Muitas empresas investem em pesquisa e tecnologia, o que aumenta a qualidade do produto reciclado e propicia maior eficiência do sistema produtivo. Paralelamente, a reciclagem de resíduos urbanos ganha evidência, em virtude do crescente volume de rejeitos sólidos e da indisponibilidade cada dia maior de locais para descarte desse material, em particular em grandes centros urbanos, com elevada densidade demográfica.

No Brasil, diversos pesquisadores têm se dedicado ao estudo desse tema. Menezes *et al.* (2002) mostram em seu trabalho que a reciclagem ainda não faz parte da cultura dos empresários e cidadãos. A reciclagem de resíduos industriais ainda possui índices insignificantes frente ao montante produzido e, a cada dia, os rejeitos urbanos agridem mais o meio ambiente, em virtude da falta de tratamentos adequados e fiscalização sobre a manipulação e descarte desses rejeitos. O aproveitamento dos rejeitos industriais, para uso como materiais alternativos, não é novo e tem dado certo em vários países do Primeiro Mundo.

Segundo o economista Calderoni (1999), calcula-se em 5,8 bilhões de reais por ano o total que o Brasil deixa de arrecadar com materiais recicláveis. Uma fortuna equivalente a dezessete vezes o orçamento do Ministério do Meio Ambiente. Dessa forma, os princípios que norteiam a reciclagem de resíduos são os seguintes:

- a) Reduzir - a produção do lixo;
- b) Reutilizar - os materiais (sempre que possível);
- c) Reciclar - o que não pode ser reduzido nem reutilizado.

Para os resíduos industriais inúmeras propostas de aplicação são desenvolvidas, visando sempre a reciclagem ou utilização destes resíduos, na tentativa de minimizar os efeitos de armazenagem dos mesmos.

2.1.2 Geração de resíduos da indústria minero-metalúrgica

A geração de resíduo na indústria de mineração na Amazônia preocupa a sociedade como um todo, de acordo com Meirelles (2007), em face à crescente implantação de grandes projetos de mineração em municípios próximos aos grandes centros urbanos, e as implicações ambientais inerentes aos descartes de imensas massas de resíduos gerados nos processos de produção da indústria minero-metalúrgica. Os hábitos de consumo da sociedade moderna, a definição de regulamentações específicas, para a indústria de mineração e metalurgia, a implementação de centros de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias adequadas, constituem pauta de ações específicas de setores governamentais e empresariais na reciclagem de resíduos da indústria de mineração.

Um exemplo desse tipo de indústria, é a do Alumínio que tornou-se particularmente conhecida pela grande geração de resíduo, pois é necessário a lavra de 8 toneladas de minério (bauxita) para a produção de 1 tonelada de alumínio primário (HILDEBRANDO *et al.*, 1999).

De acordo com Souza (2010), situam-se por toda a extensão da região Norte do Brasil, grandes jazidas minerais, que embora já geologicamente identificadas e avaliadas, são do ponto de vista de aplicação tecnologicamente quase desconhecidas. Estas importantes jazidas podem vir a se converter em matérias primas básicas para a indústria de não-metálicos e em particular à indústria cerâmica, como a cerâmica avançada, cerâmica branca, cerâmica vermelha, indústria de refratários, materiais para construção civil como cimento, gesso, sílica amorfa, etc.

O conhecimento geológico acumulado até o momento revela a ocorrência de grandes jazidas minerais não-metálicos em toda a Amazônia, como caulins, a gipsita, pirofilita, quartzo, bauxitas e argilas do tipo caoliníticas, montmoriloníticas e ílticas (SOUZA, 2010).

A indústria de mineração e metalurgia, principalmente voltada para a produção de metais, cerâmicos e da construção civil, constitui cerca de 90% do extrativismo mineral na Amazônia. Este setor vem enfrentando problemas a nível mundial devido à crescente geração de resíduos sólidos. Vários destes resíduos são gerados em grande quantidade, o que provoca um grande transtorno na armazenagem, porém, outra parte considerável destes resíduos possui alguma contaminação físico-química, que são devido aos reagentes agregados nos processos de separação e produção, como na manipulação destes materiais. De uma forma ou de outra, há sempre grande dificuldade na estocagem e depósitos destes

resíduos, que também podem apresentar granulometria muito fina, podendo formar emulsões gasosas com ar atmosférico, exigindo sistemas de coleta de alto custo, como precipitadores eletrostáticos, utilizados no tratamento dos gases efluentes na maioria dos processos de calcinação em sistemas contínuos, geradores de poeira abaixo de 2 microns (SOUZA, 2010).

No trabalho de Souza (2010), alguns resíduos da indústria de mineração e metalurgia, por exemplo, devido a sua composição, possuem características mineralógicas e físico-químicas, que podem ser utilizados diretamente como matéria prima para a indústria cerâmica, destacando-se a indústria de cerâmica vermelha, que produz insumos para a construção civil, a indústria de cimento, que pode utilizar grande parte destes materiais como carga ou combustíveis e a indústria de refratários. Podemos destacar hoje na região, diversas indústrias capazes de gerar resíduos com características para serem reutilizados na indústria cerâmica. A seguir, algumas indústrias com seus respectivos índices de geração de resíduos e provável aplicação:

- 1- Resíduo da indústria do alumínio: nesse setor encontramos três indústrias, a Mineração de Bauxita (MRN) que gera um volume de 2×10^6 t/ano com possibilidade de reciclagem na indústria de cerâmica vermelha; a ALUNORTE que produz 4×10^6 t/ano no Processo Bayer que apresenta potencial para ser utilizado nas indústrias de cerâmica vermelha e construção civil; a ALBRAS com um volume gerado de 15×10^3 t/ano no processo Hall-Héroult que pode ser aplicado como aditivo para as indústrias de cimento e cerâmica vermelha.
- 2- Resíduo da indústria do cobre: essa indústria apresenta dois resíduos, o resíduo de flotação com um volume gerado acima de 10^7 t/ano podendo ser utilizado na indústria da construção civil; o resíduo de lixiviação ácida produzido com índice ainda desconhecido e sem proposta de utilização.
- 3- Resíduo da indústria do caulim: nessa indústria existe o resíduo do beneficiamento primário e secundário com índices desconhecidos. O resíduo primário pode ser aplicado na construção civil e o secundário na indústria cerâmica.
- 4- Resíduo da produção de seixo lavado: apresenta índice ainda desconhecido, com relação ao seu volume gerado, porém apresenta possibilidade de reciclagem na construção civil, no tratamento de água e abrasivos.

- 5- Resíduo da produção de ferro gusa: não apresenta informação referente ao seu volume gerado, mas pode ser utilizado na indústria cerâmica e da construção civil.

Conforme evidenciado na literatura a indústria cerâmica absorve inúmeros resíduos industriais e urbanos, entre esses resíduos, estão as cinzas volantes que merecem destaque, em função de suas características, aplicações e a grande quantidade com que são geradas, as quais serão abordadas na próxima seção.

2.2 CINZA VOLANTE DE CARVÃO MINERAL

A principal aplicação do carvão mineral no mundo é a geração de energia elétrica por meio de usinas termelétricas. Em segundo lugar vem a aplicação industrial para a geração de vapor necessário aos processos de produção, tais como secagem de produtos, cerâmicas e fabricação de vidros. No entanto, em todas essas atividades, são gerados subprodutos resultantes da queima de carvão conhecidas como cinzas de carvão mineral (SIQUEIRA, 2011).

Segundo Freire e Beraldo (2003), cinza volante é um produto da calcinação de carvão mineral em caldeiras de leito fluidizado empregadas geralmente na produção de energia termelétrica.

A combustão do carvão nesses fornos, de acordo com Tancredi (2010), produzem duas cinzas: a cinza volante, assim chamada por ser recolhida nos gases de exaustão da caldeira, e as cinzas de grelha ou cinzas pesadas, de granulometria mais grossa, que se depositam no piso da câmara de combustão. As cinzas volantes, além de apresentarem granulometria mais fina, são resfriadas mais rapidamente, apresentando composição mineralógica predominantemente vítrea, ou seja, na sua grande parte são materiais amorfos contendo porcentagens muito baixas de componentes cristalinos, constituídos por agulhas finíssimas de mulita.

A Tabela 2.1 apresenta a composição química da cinza volante obtida a partir da Usina Termelétrica *Nashik Thermal Power Plant*, localizada na cidade de *Nashik* na Índia.

Tabela 2.1 – Composição química da cinza volante

Óxidos dos elementos	(% em peso)
SiO ₂	57,13
Al ₂ O ₃	34,24
Fe ₂ O ₃	2,78
CaO	2,84
MgO	0,91
TiO ₂	0,91
K ₂ O	0,65

Fonte: YEOLE *et al.*, 2014.

No âmbito nacional, as termelétricas brasileiras, localizadas na região sul do Brasil, são as principais responsáveis pela queima do carvão mineral e geração de cinza volante (HOPPE, 2008). Nessa região, podem ser citadas as cinzas volantes (cinza leve) e pesadas da Usina Termelétrica Presidente Médici, em Candiota - RS, onde a caracterização química consta na Tabela 2.2 (PIRES *et al.*, 2002).

Tabela 2.2 – Constituintes químicos em base seca (%)

Óxidos	Cinza leve	Cinza pesada
SiO ₂	56,7	58,9
Al ₂ O ₃	38,4	36,0
Fe ₂ O ₃	2,5	2,4
CaO	1,1	1,3
MgO	0,2	0,2
K ₂ O	0,6	0,6
TiO ₂	0,5	0,6
SO ₃	0,2	0,0

Fonte: PIRES *et al.*, 2002.

Segundo Mehta e Monteiro (2008), as diferenças na composição química e mineralógica das cinzas volantes dependem da natureza do carvão mineral, onde as cinzas podem ser produto da combustão do antracito, carvões betuminosos, carvões de lignita e sub-betuminosos. De acordo com Hoppe (2008), essas características dependem da eficácia da queima do carvão, pois uma queima inadequada resulta em teor elevado de carbono residual e em heterogeneidades das características físico-químicas das partículas das cinzas.

A cinza volante é a mais comum entre as pozolanas artificiais, apresentando formato esférico e uma finura muito acentuada, com diâmetros compreendidos entre 1µm e 150µm. A superfície específica varia, em geral, 250 m²/Kg a 550 m²/Kg (AZEVEDO, 2002 *apud* SIQUEIRA, 2011).

A norma americana ASTM C618 classifica as cinzas volantes em dois tipos: classe F e classe C. As cinzas volantes da classe F apresentam baixo teor de cálcio (menos de 10% de CaO) e são obtidos da queima de antracito ou carvão betuminoso e apresentam propriedades pozolânicas, mas não cimentícias. As cinzas volantes da classe C apresentam alto teor de cálcio (entre 10% e 30% de CaO) e são produtos da queima de lignito ou carvão sub-betuminoso e tem propriedades pozolânicas e cimentícias.

Segundo Azevedo (2002 *apud* SIQUEIRA, 2011), a pozolanicidade das cinzas está intimamente relacionada com o teor de sílica, visto ser a sílica amorfa que se combina com a cal livre e a água dando origem à formação de quantidades suplementares de C-S-H.

Estima-se que a produção anual de cinzas de carvão no mundo, atinja na atualidade, cerca de 600 milhões de toneladas, onde as cinzas volantes constituem aproximadamente 500 milhões de toneladas, correspondendo 75 a 80% do total de cinzas produzidas (YEOLE *et al.*, 2014).

2.2.1. Reciclagem e utilização de cinzas de carvão mineral

O resíduo de combustão de carvão gerado por algumas indústrias de mineração que passaram a queimar carvão mineral para geração de energia, apesar de quimicamente inerte, traz problemas ambientais pela sua constituição granulométrica e pela quantidade com que é gerado. É um material interessante para a indústria cerâmica e a indústria de pavimentação e de revestimento, possuindo um potencial muito interessante para sua reciclagem nestas indústrias.

Essas cinzas volantes são correntemente depositadas ou utilizadas como aterro, o que causa um impacto ambiental altamente negativo, em virtude: da potencialidade de lixiviação de substâncias tóxicas para o solo e o lençol freático, da mudança da composição elementar da vegetação que cresce nas circunvizinhanças dos depósitos e do aumento de elementos tóxicos através da cadeia alimentar (EROL *et al.*, 2000).

No Brasil são geradas cerca de $1,7 \times 10^6$ toneladas de cinzas por ano (80 % de cinzas volantes e 20 % de cinzas pesadas). As usinas termelétricas são responsáveis por 90 % desta geração, enquanto que o restante é produzido por empresas de pequeno e grande porte (indústria de celulose e petroquímica). Deste total, apenas 30 % das cinzas são comercializadas principalmente na produção do clínquer, utilizado para a fabricação do cimento Portland, sendo o restante disposto em bacias ou utilizado para recompor minas de carvão desativadas. Em virtude da pequena parcela de cinzas reaproveitada no

país, o desenvolvimento de tecnologias inovadoras para o reaproveitamento de uma maior quantidade deste resíduo está sendo constantemente investigado (PAPROCKI *et al.*, 2008).

Segundo Yeole *et al.* (2014), a queima do carvão mineral em larga escala para geração de energia começou na década de 1920, desde então muitos milhões de toneladas de cinzas tem sido geradas. Nesse cenário, várias pesquisas têm sido realizadas para tornar a cinza volante melhor utilizável, na tentativa de criar produtos a partir desse resíduo industrial e assim proporcionar uma forma adicional de reaproveitamento da cinza volante.

Uma aplicação das cinzas volantes (obtidas do processo de combustão do carvão em pó) quando sinterizadas, está na produção de agregados leves (cerca de 900 kg/m³) de boa qualidade para aplicação em concretos. O material é economicamente viável, pois além de ser um subproduto contém uma quantidade suficiente de carbono (3 a 10%) para reduzir os custos com combustíveis. Os tipos de cinzas volantes utilizadas no fabrico de agregados leves são geralmente os provenientes do carvão betuminoso (POPOVICS, 1992).

Segundo Silva *et al.* (1997), de uma maneira geral, os grupos industriais que utilizam o subproduto cinza e escória de carvão podem ser divididos em três categorias: construção, fabricação e estabilização de resíduos.

No grupo industrial da construção estão: o concreto, a fabricação de cimento Portland pozolânico, argamassa, cinzas em processos de estabilização sob pressão, aterros estruturais e outros.

No grupo da fabricação destacam-se: artefatos de concreto celular autoclavado, artefatos de cinza-cal (sílico-calcários) autoclavados ou curados em meio ambiente, artefatos de cimento, artefatos cerâmicos, artefatos sinterizados, agregados leves, concreto leve e filler em plástico.

No grupo de estabilização de resíduos encontram-se: os resíduos tóxicos imobilizados com sucesso, pela estabilização e solidificação usando cinzas volantes com água e produtos aglomerantes como cal, cimento Portland e gipsita.

A indústria da construção civil é normalmente o maior usuário dos subprodutos do carvão mineral. Eles estão sendo cada vez mais usados como material aditivo ao concreto para obter melhores propriedades de produtos frescos e endurecidos. O uso de cinzas volantes modifica a composição da pasta de cimento, influencia a hidratação e a

microestrutura de argamassas e pastas, a permeabilidade e a resistência do concreto (POON, 1997).

Estudos realizados por Cruz (2002), as cinzas leve ou pesada pode ser usada no concreto sob três formas: como constituinte do concreto, introduzida no misturador da mesma maneira que o cimento Portland e o agregado; como componente do cimento, moída como clínquer Portland ou misturada ao cimento Portland; como matéria prima na fabricação do cimento Portland, no estágio de pré- queima.

O trabalho de Wang *et al.* (2005) e de outros estudiosos relatam que modificações nas cinzas aumentam sua capacidade de adsorção.

Segundo Tancredi (2010), a cinza de carvão mineral pode ser utilizada em concretos porque é um material rico em sílica de alta pozolanicidade e provoca alterações positivas na microestrutura do concreto, que normalmente acarreta em aumento da resistência à compressão, aumento da durabilidade, aumento da coesão do concreto no estado fresco.

Em um estudo de revisão sobre cinzas leves, Ahmaruzzaman (2010) faz considerações interessantes sobre as perspectivas das cinzas, e que futuras pesquisas poderão estabelecer um grande potencial em aplicações ambientais e alternativas para substituir o carvão ativado em zeólitas para adsorção no ar ou no tratamento da poluição da água.

Ao usar a cinza de carvão, em vez de estocá-las, evita-se a degradação ambiental e os custos energéticos associados à mineração de matérias primas virgens. Para cada tonelada de cinzas usadas no lugar de cimento portland cerca de uma tonelada de dióxido de carbono é impedido de entrar na atmosfera da Terra (SIQUEIRA, 2011).

As atividades industriais pertinentes à utilização de cinzas volantes em artigos economicamente viáveis tem sido popular nos últimos anos como na fabricação de cimento, concreto e tijolos. Uma rota alternativa para a utilização desses rejeitos é na fabricação de vidros e compósitos (FARIA, 2011).

Segundo critério de avaliação de resíduos para uso na Construção Civil a OEC, (*Organization for Economic Cooperation and Development*) a cinza volante é classificada na categoria de resíduos de Classe 1, materiais com potencial de aplicação máxima, ou seja, possuem as melhores propriedades tanto na sua ocorrência natural, na forma processada ou combinada, ou quando já registrado um desempenho satisfatório (LACÔRTE, 2013).

No trabalho realizado por Ukwattage *et al.* (2013), as cinzas volantes podem ser utilizadas para realizar a correção do solo em terras agrícolas, em função do potencial que esses materiais apresentam na melhoria das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo auxiliando na fertilidade e produtividade deste, além de melhorar no sequestro de carbono terrestre, melhorando o microclima dos solos produzindo formas estáveis de carbono. No entanto, o trabalho relata que há necessidade de realizar maiores investigações, em relação à taxa de aplicação adequada e possível contaminação do ambiente, para ajudar a obter as vantagens máximas de utilização das cinzas volantes no solo.

Singh e Pragma (2015), estudaram a cinética e o mecanismo de remoção de fenol a partir de soluções aquosas com cinza volante em diferentes condições experimentais, variando-se o tempo, tamanho das partículas, pH, concentração e temperatura. Os principais mecanismos observados foram a interação entre o par de elétrons presentes no átomo de oxigênio do grupo OH do composto fenol e da sílica e alumina presentes como constituintes principais na superfície das cinzas volantes, onde verificou-se que o baixo custo das cinzas volantes como adsorventes demonstraram boa capacidade de remoção de fenol e, portanto, pode ser utilizado economicamente em larga escala.

Çiçek e Çinçin (2015), mostraram em seu trabalho que a Turquia produz em média 13 milhões de toneladas por ano de cinzas volantes e que apenas uma pequena quantidade desses materiais é utilizada. Associado ao fato de que a cinza volante contém quantidades substanciais de componentes potencialmente nocivos ao meio ambiente, os autores analisaram o uso de cinzas volantes na produção de tijolos de peso leve para ser aplicado no setor da construção. De acordo, com os parâmetros estabelecidos, entre eles a cura à vapor da mistura e a adição de cal, os resultados dos ensaios convencionais sugerem que os tijolos de cinzas volantes/cal podem ser uma alternativa para a produção de concreto celular aerado.

A pesquisa realizada por Yiu Lo *et al.* (2016), apresenta aplicação para a cinza volante de alto teor de carbono na fabricação de agregado leve sinterizado. O trabalho destaca os efeitos dos agregados sobre as propriedades mecânicas e microestruturais do concreto. A investigação microscópica na zona de interface, mostrou que a pasta de cimento infiltrou na superfície do agregado, melhorando a interligação mecânica entre estes e que as medidas das propriedades mecânicas indicam que os agregados podem ser utilizados para aplicações estruturais, resolvendo problemas de eliminação de resíduos que estão associados com as cinzas volantes, reduzindo a poluição no meio ambiente.

No trabalho desenvolvido por Visa (2016), a cinza volante foi utilizada na síntese e caracterização de zeólitas para a remoção de metais pesados no tratamento de efluentes. Os parâmetros experimentais, como o tempo de contato, as quantidades de substrato e da concentração inicial foram otimizados para obter a máxima eficiência durante a remoção dos metais pesados. O processo promoveu a produção de adsorventes eficientes de zeólita, com baixo custo, atuando no tratamento de águas residuais de acordo com o conceito de tratamento de resíduos.

Outras pesquisas também mostram estudos sobre o reaproveitamento das cinzas volantes, como o trabalho de Ng e Justnes (2016), que investigaram a influência de plastificantes sobre a reologia e hidratação de cimentos misturados com elevado teor de cinzas volantes, e Wei *et al.* (2016) que estudaram o efeito da adição de resíduos de vidro em agregados leves preparados a partir de cinzas volantes de classe F.

2.2.2 Pesquisas sobre a utilização de cinzas volantes no estado do Pará

As pesquisas relacionadas a utilização de cinzas volantes no estado do Pará, iniciaram a pouco tempo, e o que observa-se em relação aos trabalhos envolvendo as cinzas volantes, é de que esses estão concentrados na região Sul do País.

No desenvolvimento das pesquisas referentes ao uso dos subprodutos da combustão do carvão mineral proveniente da Hydro Alunorte, pode-se destacar a Universidade Federal do Pará (UFPA) com os seguintes trabalhos:

Silva (2009 *apud* SIQUEIRA, 2011) estudou a influência da cinza volante na pasta de cimento, onde foi analisado a característica da mistura de cimento com a adição de cinzas volantes. Foi determinado um fator a/c de 0,34. Foram feitas misturas de areia, cimento e cinza, em que a cinza substituiu o cimento nos teores de 5%, 10%, 15%, 20%, 25% e 30%. Os resultados mostraram-se interessantes para a utilização da cinza volante como pozolana em mistura com o cimento.

Tancredi (2010) estudou as propriedades do concreto com adição de cinzas em substituição ao cimento Portland. Neste trabalho foi determinado a proporção de 1:3,5, com duas relações água/aglomerante, 0,28 e 0,4. Foram realizadas misturas com areia, seixo, cimento e cinza, onde a cinza substituiu o cimento nos teores de 10%, 20% e 30%. O autor concluiu que “o uso de cinza de carvão mineral para fabricação de concreto é muito desejável, além dos aspectos técnicos discutidos observam-se também os parâmetros econômicos que são fundamentais para viabilidade de qualquer projeto bem

como os aspectos ambientais que hoje são muito exigidos pela legislação vigente e que naturalmente acarretam uma melhoria da qualidade de vida”.

Rocha (2011 *apud* SIQUEIRA, 2011) realizou a caracterização química, física e mineralógica da cinza volante utilizando-a na síntese de zeólitas, bem como a utilização deste material zeolítico na remoção de cobre e cádmio de soluções aquosas. A cinza e os produtos sinterizados foram caracterizados por difração de raios-X, método de Rietveld, fluorescência de raios-X, microscopia eletrônica de varredura, análise Granulométrica, análise térmica diferencial e gravimétrica. Os ensaios de síntese foram realizados a temperaturas de 60, 100, 150 e 190 °C com razões de Na₂O/Al₂O₃ igual a 5 e Si/Al de 2,12 a 15 com tempo de reação de 24h. Segundo o autor, os resultados demonstraram o potencial de utilização da cinza como matéria prima para síntese de zeólitas, pois apresenta 50% de SiO₂ e Al₂O₃ em sua composição, fases mineralógicas bem definidas, baixo teor de umidade e baixa granulometria.

Siqueira (2011) avaliou a possibilidade de reciclagem das cinzas de carvão mineral para produção de argamassas, incorporando as cinzas volantes, como pozolana, em substituição parcial ao cimento Portland CII-E-32. Foram elaborados corpos de prova na proporção 4:1, ou seja, 4 partes de agregado (sílica) e 1 parte de aglomerante (cimento e cinza), com inserção de cinza nos teores de 10, 20, 30, 40 e 50 em porcentagem com relação ao cimento, além de argamassa sem adição e duas relações água/aglomerante, 0,4 e 0,8. Após tempo de cura de 7 e 28 dias, foram feitos testes de resistência a compressão e para corpos de prova com relação água/aglomerante 0,8, foram analisados difração de raios-X, microscopia eletrônica de varredura e as propriedades cerâmicas, onde os resultados mostraram compatíveis aos da literatura, demonstrando viabilidade das cinzas na indústria da construção civil.

Ferreira *et al.* (2014) estudou uma alternativa para empregar o resíduo de construção civil (RCC), como agregado miúdo, o uso da cal hidratada e da cinza volante (CV), como material pozolânico, em substituição parcial ao cimento Portland. Foram determinadas as características físico-químicas do RCC e da cinza volante por fluorescência de raios-X. Formularam-se quatro composições de argamassas, em diferentes proporções de RCC, cal hidratada, cinza volante e cimento Portland CP II Z 32. Após a cura de 28 dias dos corpos de prova foram medidas suas propriedades cerâmicas e a resistência à compressão. Os resultados mostraram que a utilização da cinza volante em substituição parcial ao cimento no traço 3 (nas proporções 5:1:0,6:0,4 de RCC/Cal/CV/CP II) apresentou atividade pozolânica satisfatória.

2.3 INDÚSTRIA CERÂMICA

Os grupos cerâmicos podem ser classificados com base no emprego dos seus produtos, natureza de seus constituintes, características de textura da massa base, além de outras características cerâmicas (MOTTA *et al.*, 2001). Os diversos setores cerâmicos e seus respectivos produtos são apresentados a seguir:

- Cerâmica Vermelha: blocos, lajes, telha e agregado leve de argila expandida;
- Cerâmica Branca: grês sanitário, porcelana mesa; porcelana elétrica e faiança;
- Revestimentos: pisos rústicos, pisos via seca, azulejo, piso gresificado e grês porcelânico;
- Outros setores cerâmicos: refratários, isolantes, especiais, cimento e vidro.

Os grupos cerâmicos mencionados anteriormente, utilizam matérias primas minerais, todavia as indústrias de cerâmica vermelha, branca e de revestimento classificadas como cerâmicas tradicionais de base argilosa, são grandes consumidoras de matérias primas minerais.

O Brasil dispõe de importantes jazidas de minerais industriais de uso cerâmico, cuja produção está concentrada principalmente nas regiões sudeste e sul, onde estão localizados os maiores polos cerâmicos do país. No entanto, outras regiões têm apresentado certo desenvolvimento dessa indústria, em especial o nordeste, devido, principalmente, à existência de matéria prima, energia viável e mercado consumidor em desenvolvimento (ANFACER, 2012).

A seguir serão apresentados os processos de fabricação das cerâmicas tradicionais.

2.3.1 Cerâmica vermelha

Os produtos da cerâmica vermelha caracterizam-se pela cor vermelha de seus produtos. No que se refere à matéria prima, o setor de cerâmica vermelha utiliza basicamente argila comum, em que a massa é tipo monocomponente - só argila - e pode ser denominada de simples ou natural. A massa ideal é obtida, em geral, com base na experiência acumulada, visando uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, facilitando o manuseio e propiciando resistência mecânica durante a queima (MOTTA *et al.*, 2001).

O processo produtivo da indústria de cerâmica vermelha, com excessão dos agregados leves, inicia com a preparação da massa cerâmica através da mistura de uma argila “gorda“ (caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina, e composição essencialmente de argilominerais) com uma argila “magra“ (rica em quartzo e menos

plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade). Em seguida a massa é umidificada acima do limite de plasticidade (geralmente acima de 20%), e processada em misturadores e homogeneizadores, sendo conformadas a seguir em extrusoras, quando adquirem as suas formas finais (blocos, lajes, lajotas, tubos) ou seguem para prensagem (telhas) ou tornearia (vasos). Diferentemente do processo de obtenção de agregado leve manufaturado, em que o material argiloso - com teores adequados de fundentes e de substâncias formadoras de gases - é queimado em fornos rotativos, com temperaturas elevadas (1100-1200 °C), propiciando grande quantidade de fase vítrea. Com exceção do agregado leve, a maioria dos produtos obtidos na indústria de cerâmica vermelha, apresentam alta porosidade aberta, com pouca fase vítrea, em função da baixa temperatura de queima (800 a 900 °C). Mesmo assim, mostram resistência mecânica suficiente para os usos a que são propostos (MOTTA *et al.*, 2001).

2.3.2 Cerâmica branca

O setor de cerâmica branca agrupa uma variedade de produtos, que se diferenciam, entre outros fatores, pela temperatura de queima e pela composição da massa, do tipo composta, constituída de argilas plásticas de queima branca, caulins, quartzo e fundentes (feldspato, filito, rochas feldspáticas, carbonatos). No que se refere a indústria cerâmica, o grupo da cerâmica branca está agrupado em três subsetores: porcelana, grês e faiança que se diferenciam além dos fatores citados anteriormente, em termos de absorção de água pelo corpo cerâmico (MOTTA *et al.*, 2001).

A fabricação das porcelanas é realizada a partir de massas constituídas de argila plástica, caulim, quartzo e feldspato puros, que são queimados a temperaturas superiores a 1250 °C. Os produtos apresentam porosidade próxima a zero (pode admitir até 0,5% de água) e compreendem a porcelana doméstica e de hotelaria (pratos, xícaras, jogos de chá etc.); porcelana elétrica (isoladores e peças para componentes eletroeletrônicos); e porcelana técnica, que apresentam elevada resistência física ou ao ataque químico (MOTTA *et al.*, 2001).

Na produção do grês, inclui-se rochas cerâmicas como granito, pegmatito e filito como fundentes. A temperatura do processamento de queima ocorre em torno de 1250 °C e os produtos obtidos apresentam absorção de água entre 0,5% e 3%. Os principais produtos são os artigos sanitários, que incluem as diversas peças de lavatório e higiene (MOTTA *et al.*, 2001).

Os produtos conhecidos como faiança são compostos de massas semelhantes ao grês, mas usualmente podem incorporar, fundentes carbonáticos, portadores dos minerais calcita e dolomita. As peças são fabricadas a temperaturas inferiores a 1250 °C e caracterizam-se pela maior porosidade, maior que 3% e menor resistência comparado as porcelanas e o grês. Seus produtos incluem aparelhos de jantar, aparelhos de chá, xícaras e canecas, peças decorativas e outros (MOTTA *et al.*, 2001).

2.3.3 Revestimentos

As matérias-primas utilizadas pelo setor de revestimentos são, as argilas fundentes, argilas plásticas, caulim, filito, feldspato, talco carbonatos e quartzo. Nesse grupo cerâmico, vários tipos de placas cerâmicas podem ser produzidas, através de distintas combinações de matérias primas e processos de produção. Os processos principais de produção dos produtos de revestimento são via seca e via úmida (MOTTA *et al.*, 2001).

Nas indústrias de revestimentos via seca é utilizada uma massa de argila que apresenta queima avermelhada. Nesse processo, a massa é seca abaixo de 5% de umidade, cominuída em moinhos de martelo e/ou pendulares, levemente umidificadas, e encaminhadas ao processamento cerâmico (prensagem a seco, secagem, decoração e queima). Quando trata-se dos revestimentos por via úmida, de base clara, a massa é composta de argilas, caulim, filito, rochas feldspáticas, talco, carbonatos e quartzo, que reúnem os materiais fundentes, inertes e formadores de vidro. Essa mistura é moída e homogeneizada em moinhos de bola, em meio aquoso, em seguida seca e granulada em *spray dryer* (atomizador) e conformada por prensagem a seco, para seguir então para a decoração e processo de queima, em temperaturas abaixo de 1200 °C (MOTTA *et al.*, 2001).

Existe um terceiro processo de fabricação, feito por extrusão de massa plástica. Esse tipo de revestimento é voltado para linha de produtos de aspecto mais rústico. Quanto à composição, podem ser formulados por massa simples ou composta, moídas via seca e via úmida, respectivamente (MOTTA *et al.*, 2001).

É possível observar que a indústria cerâmica utiliza uma variedade de recursos minerais, como matéria prima para os setores cerâmicos. Diante dessa perspectiva, esse setor industrial, de acordo com Menezes *et al.* (2002), tem se deparado com a escassez de reservas de matérias primas de boa qualidade em locais economicamente viáveis de

exploração. Assim, a reciclagem de resíduos industriais tornou-se uma alternativa para a indústria cerâmica.

2.3.4 Resíduos na indústria cerâmica

A indústria cerâmica é uma das que mais se destaca na reciclagem de resíduos industriais e urbanos, em virtude de possuir elevado volume de produção que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos e que, aliado às características físico-químicas das matérias primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, faz dessa indústria uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos. Além do mais, é uma das poucas áreas industriais que podem obter vantagens no seu processo produtivo com a incorporação de resíduos entre suas matérias primas, a exemplo da economia de matérias primas de elevada qualidade, cada dia mais escassas e caras, a diversificação da oferta de matérias primas, e a redução do consumo de energia e, por conseguinte, redução de custos (WENDER e BALDO, 1998).

As massas utilizadas na indústria cerâmica tradicional são de natureza heterogênea, geralmente constituídas de materiais plásticos e não plásticos, com um vasto espectro de composições, motivo pelo qual permitem a presença de materiais residuais de vários tipos, mesmo em porcentagens significantes. Desta forma, a reciclagem e a reutilização de resíduos, têm sido objeto de pesquisas em diversas instituições, que buscam soluções que conciliem o custo de disposição, tratamentos, tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de utilização, além do impacto econômico e ambiental da reciclagem (MENEZES *et al.*, 2002).

Existem vários resíduos industriais que são absorvidos pela indústria cerâmica, onde podem ser citados os resíduos de mineração, da indústria do papel e celulose, metalúrgica, energética, entre outros, que independentemente de sua origem, têm utilização cada dia maior como matérias primas alternativas para essa indústria. De acordo com suas características e influência sobre as propriedades das formulações e corpos cerâmicos, pode-se agrupar os resíduos sólidos, quando absorvidos pela indústria cerâmica, em: redutores de plasticidade, fundentes, combustíveis, cinzas volantes, resíduos da incineração de rejeitos urbanos e radioativos (MENEZES *et al.*, 2002).

No contexto das indústrias cerâmicas, a indústria do cimento é uma das que faz uso da reciclagem dos resíduos industriais e de acordo com o trabalho realizado por Jahren (2003), estima-se que em 2020 a produção de cimento mundial chegue a 2,5 bilhões de toneladas, o que alavancaria as emissões de dióxido de carbono e os demais

gases poluentes. Como uma opção para o beneficiamento econômico e redução do impacto ambiental, gerado durante o processo produtivo do cimento, muitos países utilizam subprodutos como adições minerais ao clínquer. O autor cita que os subprodutos como a cinza volante, fíler calcário, escória de alto forno, pozolanas naturais e outras cinzas incorporadas ao clínquer poderia ser uma alternativa, e contribuiria para a destinação de milhões de toneladas desses materiais.

2.4 INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Avaliando o contexto industrial, observa-se que a indústria da construção civil, recebe inúmeros insumos da indústria cerâmica, com destaque a indústria de cerâmica vermelha.

A indústria da construção civil é um setor produtivo que possui considerável papel na economia do Brasil, em 2011 o setor foi responsável pelo crescimento de 3,6% do PIB na atividade da indústria (IBGE, 2011).

Apesar do desenvolvimento proporcionado pelo setor, este provoca grandes impactos ao meio ambiente. A construção civil é um dos maiores consumidores de recursos naturais de qualquer economia, o que pode ser uma das causas de uma problemática já presente na cadeia, a escassez de matéria-prima (JOHN, 2000 *apud* RODRIGUES e FUCALE, 2014).

Segundo Bianchini *et al.* (2005) as atividades de construção demandam uma notável quantidade de materiais inertes, tais como areia e cascalho, que usualmente são fornecidos por meio da extração de sedimentos aluviais. A extração desses sedimentos modifica o perfil dos rios e o seu equilíbrio, além de introduzir problemas ambientais, tais como modificações em sua estrutura hidrológica e hidrogeológica. A extração de material inerte de formações rochosas em áreas acidentadas e montanhosas também é uma danosa atividade ao meio ambiente, uma vez que altera a paisagem e provoca problemas de estabilidade.

No Brasil, existe uma demanda de 210 milhões de toneladas de agregados somente para o uso na construção civil, como na produção de concreto e argamassas, gerando assim aproximadamente 450 milhões de toneladas de entulho por ano (JOHN, 2000 *apud* CAMPOS *et al.*, 2012).

Os agregados mais comuns são a areia, pedra britada e cascalho, caracterizados como as substâncias minerais mais consumidas no Brasil e no mundo, onde em 2014 o

consumo brasileiro atingiu 741 milhões de toneladas, correspondente a 3,7 toneladas per capita (ANEPAC, 2015).

As atividades da indústria da construção civil provocam impactos ambientais, em função da intensa retirada de recursos naturais; no âmbito social, visto que ocorre a geração de resíduos e também no setor econômico, no sentido de dispor as grandes quantidades de entulho. Nesse cenário, estudos realizados por Cabral (2007), apresentam uma solução para esse assunto, a reciclagem do resíduo de construção e demolição (RCD) e sua reutilização na própria construção civil como matéria prima alternativa. O autor, ainda relata que os resíduos de cerâmica vermelha, correspondem em média 30% do entulho produzido pela construção civil no Brasil.

Na próxima seção serão apresentados de forma mais ampla, os agregados e um panorama com relação a produção de agregados a partir de resíduos industriais e da construção civil.

2.5 AGREGADO - UMA VISÃO GERAL

Frazão e Paraguassu (1998), definem os agregados como materiais granulares sem forma e volume definidos que podem ser classificados considerando a origem, a massa específica e o tamanho dos fragmentos.

Segundo Moravia (2007), os agregados são geralmente inertes, de dimensões e propriedades adequadas para o uso em concretos e argamassas. Contudo, o termo inerte, não representa uma forma correta de se referenciar o agregado, pelo fato, de em alguns casos, ocorrerem reações químicas na zona de transição entre o agregado e a argamassa de cimento, areia e água.

No caso particular da aplicação no concreto, os agregados cumprem importantes funções: do ponto de vista técnico, os agregados conferem maior estabilidade dimensional e melhor durabilidade do que a pasta de cimento pura; já do ponto de vista econômico, os agregados reduzem o volume ocupado pela pasta de cimento, o que implica em redução do custo, já que o agregado é, via de regra, mais barato que o cimento (SOUZA, 2010).

A classificação dos agregados quanto ao seu uso na construção civil deve levar em consideração as seguintes informações: a origem do material, as dimensões de suas partículas e a massa específica.

Segundo alguns autores, quanto a sua origem, os agregados são classificados em:

- Agregados naturais: aqueles que se encontram depositados em jazidas nas condições de emprego imediato, como, por exemplo, as areias e os seixos obtidos dos leitos dos rios (SOUZA, 2010);

- Agregados artificiais: aqueles em que ocorrem alterações da maneira como se encontram depositados, sem que, no entanto, se verifique qualquer alteração da composição mineralógica das matérias primas. São exemplos de agregados artificiais, a pedra britada e a argila expandida (SOUZA, 2010);

- Agregados industrializados: aqueles que passam a condição de agregado após intervenções que provocam a alteração da composição mineralógica das matérias primas, como, por exemplo, a escória de alto-forno (SOUZA, 2010);

- Reciclados: são os resíduos industriais granulares que se adequam nas características de agregados a partir das propriedades destes. Os agregados reciclados podem ser obtidos dos rejeitos de construção e demolição que são selecionados para esta determinada finalidade. Exemplos de reciclados têm: entulhos de construção/demolição, resíduos cerâmicos de olarias (ROSÁRIO, 2013).

Quanto às dimensões das partículas, a classificação é estabelecida pela ABNT NBR 7211:1983, onde os agregados podem ser:

- Agregados miúdos: aqueles cujos grãos passam por uma peneira com abertura de 4,8 mm e ficam retidos na peneira de 0,075 mm;

- Agregados graúdos: aqueles cujos grãos passam por uma peneira com abertura de 152 mm e ficam retidos na peneira de 4,8 mm.

Quanto à massa específica, a classificação é estabelecida pela ABNT NBR 9935:2011, onde os agregados podem ser:

- Agregado leve: apresenta massa específica menor que 2.000 kg/m^3 ;

- Agregado normal: apresenta massa específica entre 2.000 kg/m^3 e 3.000 kg/m^3 ;

- Agregado pesado: apresenta massa específica superior a 3.000 kg/m^3 .

Além da classificação dos agregados, esses apresentam propriedades importantes.

A seguir estão algumas propriedades:

1. Forma e textura superficial

A forma das partículas e a textura superficial têm uma influência muito grande nas propriedades do concreto e essa interferência é muito maior no estado fresco do que no estado endurecido. Para a forma das partículas, temos as características geométricas como as achatadas, as arredondadas, as alongadas ou as angulosas (ROSÁRIO, 2013). A Figura 2.1 apresenta as dimensões e as conformações da superfície dos agregados.

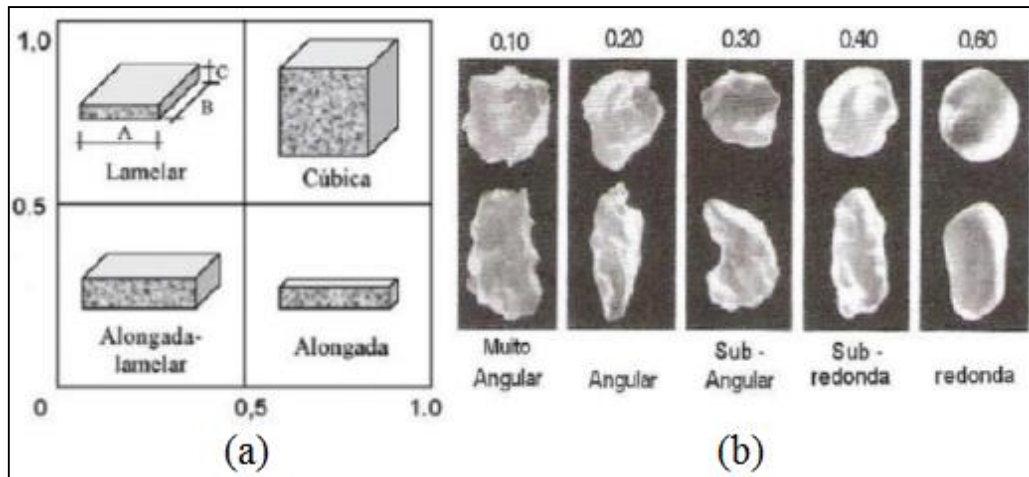


Figura 2.1 – (a) Dimensões e (b) Conformações da superfície.
 Fonte: POWERS, 1953.

A textura superficial que classifica o grau com que a superfície de um agregado seja lisa ou áspera é basicamente uma avaliação visual e está diretamente ligada ao tamanho de grão, a dureza, a porosidade da rocha matriz e a exposição à força de atrito. Comparando partículas com textura alongadas, ásperas e angulosas com as arredondadas e lisas, as primeiras consomem mais pasta de cimento para obter uma mistura mais trabalhável, acarretando um maior custo (ROSÁRIO, 2013).

Um dos aspectos determinantes na resistência do concreto é a compacidade que por sua vez se refere ao volume de vazios decorrente da acomodação dos agregados (SOUZA, 2010).

A forma geométrica também tem influência, pois partículas mais arredondadas em geral tem um espaço intersticial menor o que leva a uma mistura mais compacta e sendo assim um maior potencial de se obter concretos com elevados valores de resistência (ROSÁRIO, 2013).

A ABNT NBR 7389-1:2009, estabelece que é preferível agregados de formas arredondadas e que as formas lamelares e desproporcionais devem ser evitadas.

A aderência do agregado a pasta de cimento sofre influência direta da textura superficial do grão, por exemplo, texturas mais ásperas tem como resultado maiores forças de aderência das partículas com a matriz de cimento resultando em um aumento da resistência mecânica principalmente à flexão (NEVILLE, 1997 *apud* SOUZA, 2010).

Na Figura 2.2 a seguir é ilustrada a forma e a textura superficial característica das jazidas do tipo leito de rio.



Figura 2.2- Forma e textura típica de areia de jazida tipo leito de rio.
Fonte: PASSUELO, 2011 *apud* REIS, 2014.

2. Granulometria

É possível verificar a distribuição de grãos nos agregados por intermédio da granulometria, essa propriedade é expressa em porcentagens individuais ou acumuladas retidas em série de peneiras estabelecidas pela norma NBR 7211 (2009) (ROSÁRIO, 2013).

Dentro do estudo da granulometria se observa que não há distribuição de grão ideal, e sim, uma junção de estudos físicos e econômicos, pois areias muito finas necessitam de um aumento expressivo de consumo de água o que leva a um aumento também no cimento pela relação água/cimento e conseqüentemente um maior custo, já areias muito grossa tornam os concretos muito ásperos e com baixa trabalhabilidade. No equilíbrio da granulometria se produzirão concretos mais econômicos, trabalháveis e misturas mais fechadas que diminuirão o volume de vazios e também reduziram os espaços por onde atacariam os agentes agressivos (PASSUELA, 2011 *apud* REIS, 2014).

De acordo com Mehta e Monteiro (1994), agregados com granulometria contínua apresentam maior trabalhabilidade e menor consumo; aqueles com granulometria descontínua possuem maior resistência e os que são constituídos por granulometria uniforme necessitam de maior consumo de água. Na Figura 2.3 observam-se essas formas granulométricas.

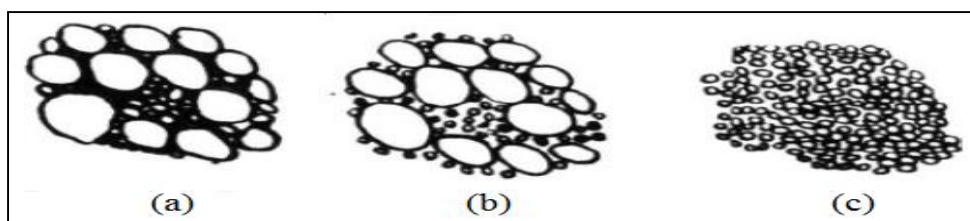


Figura 2.3 – (a) Contínua, (b) descontínua e (c) Uniforme.
Fonte: MEHTA e MONTEIRO, 1994.

As Tabelas 2.3 e 2.4 a seguir mostram os limites das distribuições granulométricas para os agregados graúdos e miúdos estabelecidos pela norma NBR 7211 (2009).

Tabela 2.3 – Limite da distribuição granulométrica do agregado miúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada.			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

NOTA 1 O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

NOTA 2 O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

NOTA 3 O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: ROSÁRIO, 2013.

Tabela 2.4 – Limites da composição granulométrica do agregado graúdo.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISSO 3310-1)	Porcentagem, em massa, retida acumulada.				
	Zona granulométrica				
	d/Da				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	-	-	-	-	0 – 5
63 mm	-	-	-	-	5 – 30
50 mm	-	-	-	-	75 – 100
37,5 mm	-	-	-	0 – 5	90 – 100
31,5 mm	-	-	0 – 5	5 – 30	95 – 100
25 mm	-	0 – 5	4 – 25	75 – 100	-
19 mm	-	2 – 15 ^b	65 ^b – 95	87 – 100	-
12,5 mm	0 – 5	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	95 – 100	-
9,5 mm	2 – 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	-	-
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	-	-	-
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	-	-	-
2,36 mm	95 – 100	-	-	-	-

a Zona granulométrica correspondente à menor (d) e a maior (D) dimensões do agregado graúdo.

b Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com (2). Esta variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

Fonte: ROSÁRIO, 2013.

3. Resistência mecânica

Um dos fatores que limita a resistência do concreto é a resistência mecânica. Como as tensões intersticiais nas partículas podem ser bem maiores do que a tensão nominal aplicada, os agregados precisam obter uma resistência bem mais elevada do que a pretendida pelos concretos (SOUZA, 2010).

4. Resistência ao desgaste

A resistência ao desgaste é uma propriedade importante dos agregados, particularmente daqueles utilizados na produção de concretos para pavimentação e pisos submetidos ao tráfego pesado. A resistência ao desgaste pode ser avaliada a partir de um método que combina abrasão e atrito, denominado ensaio Los Angeles, cujo procedimento é estabelecido pela ABNT NBR 6465:1984 (ABNT, 1984). Basicamente o ensaio consiste em submeter o agregado, juntamente com uma carga de esferas de aço a um determinado número de revoluções em um tambor cilíndrico padronizado, uma espécie de moinho. A ABNT NBR 7211:2005 (ABNT, 2005) estabelece que a abrasão verificada no ensaio Los Angeles deve ser inferior a 50% do material, em peso (SOUZA, 2010).

5. Porosidade, permeabilidade e absorção.

Existe uma interligação nessas propriedades e elas têm influência no desempenho do concreto, principalmente quando se interfere diretamente na resistência a abrasão, na estabilidade química e na aderência entre a pasta de cimento e o agregado. Somado a isso temos a porosidade do agregado que contribui muito na porosidade global do concreto, pois o agregado representa cerca de $\frac{3}{4}$ do volume do concreto. A porosidade superficial da partícula interfere na aderência entre a pasta de cimento e o agregado, isto é, interfere também na resistência mecânica. Para partículas com superfícies polidas podem ocorrer pouca aderência entre o agregado e a pasta de cimento (SOUZA, 2010).

A princípio devido ao fato de se conseguir agregados em abundância e baratos, acreditava-se que estes desempenhavam um papel secundário na fabricação de concretos. Mas com a utilização do concreto em larga escala, logo foi possível perceber o seu verdadeiro papel. A partir de então deu-se real importância técnica, econômica e social a este insumo (ROSÁRIO, 2013).

No sentido de evitar o esgotamento de jazidas naturais, têm-se buscado diversas alternativas, principalmente aquelas ambientalmente corretas visando atender à crescente

demanda de insumos para a indústria da construção civil. Vale ressaltar que a escolha por um determinado tipo de agregado depende da disponibilidade local. Na região norte do Brasil, por exemplo, o agregado graúdo mais utilizado é o seixo (ROSÁRIO, 2013).

2.5.1 Agregado sintético

A utilização de material calcinado como agregado sintético vem sendo alvo de diversos estudos, pois além de ser mais uma alternativa para a indústria da construção civil, tem um papel fundamental no que diz respeito à diminuição dos impactos ambientais causados nos leitos dos rios, provocado pela extração predatória do seixo rolado, que promove assoreamento de suas margens (CABRAL *et al.*, 2008).

Levando-se em consideração diversas experiências com argila calcinada no meio científico, o trabalho de CABRAL *et al.* (2008) apresenta um estudo das características dos solos argilosos proveniente do polo oleiro de Iranduba e Manacapuru no estado do Amazonas e a utilização destas matérias primas na fabricação de agregados sintéticos para uso em concreto estrutural, através de ensaios químicos, físicos e mecânicos.

Cidades como, Manaus e Belém, capitais dos maiores estados da Amazônia, consomem cada cerca de 600.000 m³ de agregado graúdo anualmente, sendo a metade desse total adquirido pelas centrais dosadoras locais. Desse quantitativo, cerca de 90% é de agregado na forma de seixo rolado. Grande parte dos maciços da região Amazônica foi formada no interior de uma bacia intracratônica, gerando sedimentos inconsolidados de pequena textura, tais como areia, silte e argila. Desta forma, as principais capitais amazônicas, Manaus, Belém e Rio Branco, bem como mais da metade da área do estado do Amazonas, não são cobertas por rochas. Destaca-se, nestas áreas o uso de agregados naturais (seixo rolado ou pedra britada), para serem empregados na construção civil (BACELLAR, 2001).

As características dos agregados sintéticos artificiais como resistência satisfatória, são normalmente obtidas por meio da queima destes materiais em altas temperaturas. Vale ressaltar ainda que a qualidade do produto acabado depende fundamentalmente de três fatores: matéria prima utilizada, temperatura de queima e do processo de conformação da massa cerâmica (CABRAL *et al.*, 2008).

De acordo com Souza (2010), a produção dos agregados sintéticos é feita por meio do aquecimento da matéria prima, triturada ou moída, e na maioria das vezes pelotizada, fazendo-se o uso geralmente de um forno rotativo. Desse modo, o material bem

umedecido é transportado em uma esteira, sob queimadores, de modo que o calor atinge gradualmente toda a espessura da camada.

Agregados sintéticos obtidos por meio da queima de argila a partir de 800 °C apresentam características que os tornam interessantes para o uso em obras rodoviárias, na medida em que os ensaios realizados mostram que a argila queimada nesta temperatura se desidroxila, podendo fornecer agregados estáveis e aptos para serem usados em condições mais econômicas que o agregado sintético de argila expandida. Por meio destas experiências, foi possível observar que praticamente qualquer argila que, depois de molhada e moldada em forma de pelotas, venha a formar grãos duros e secos ao ar, pode servir para a fabricação de agregados de “argila queimada” (CABRAL *et al.*, 2008).

2.5.2 Agregado leve

Agregado leve é um material obtido geralmente de argilas, folhetos ou de outros materiais (resíduos industriais) que possuam propriedades peculiares de se expandirem quando submetidos a processos térmicos adequados, geralmente possuem o formato esférico, com estrutura interna formada por uma espuma cerâmica com microporos e superfície rígida e resistente. Possui estabilidade dimensional e propriedades de isolamento térmico e acústico (CABRAL *et al.*, 2008).

Segundo Popovics (1992), o agregado leve apresenta massa específica baixa. Para concretos leves estruturais essa massa é limitada a cerca de um a dois terços da massa específica dos agregados normais, embora essa característica seja diretamente influenciada pela classificação e forma das partículas. Ainda de acordo com o autor, as características de peso e resistência das partículas são as duas propriedades técnicas mais importantes de um agregado leve.

Os agregados com massas específicas menores que 2 g/cm³, portanto menores que os agregados convencionais, e chamados de agregados leves, que normalmente também são conhecidos como argila expandida, é o produto obtido pelo aquecimento de argila ou folhelhos argilosos na temperatura em torno de 1200°C (CABRAL *et al.*, 2008). Próximo desta temperatura, uma parte dos constituintes do material se funde gerando uma massa viscosa, enquanto a outra parte se decompõe quimicamente liberando gases que são incorporados por esta massa sinterizada que é expandida. Esses gases, retidos no interior do agregado de argila, não podem escapar para seu exterior devido à fase líquida, proporcionada pelos elementos fundentes, que envolvem a partícula. A estrutura celular, ou seja, os vazios internos estão isolados entre si por paredes impermeáveis, que se

mantêm após o resfriamento, de modo que a massa específica do agregado resultante torna-se menor do que antes do aquecimento, podendo ser utilizado como agregado graúdo na fabricação de concretos leves, com o objetivo de reduzir o peso próprio das estruturas.

A menor massa específica dos agregados é devida à sua microestrutura celular ou altamente porosa (MEHTA e MONTEIRO, 1994). Os autores ainda ressaltam que materiais orgânicos de estrutura celular não devem ser usados como agregados devido a sua falta de durabilidade no meio alcalino e úmido do concreto de cimento Portland.

Segundo Santos (1989), além da classificação quanto à origem (naturais ou artificiais), ainda classifica os agregados leves, de acordo com o tipo de concreto em que são utilizados, em três grupos:

a) Agregados leves para concreto estrutural (C330-64T): obtidos principalmente por processos industriais de expansão, calcinação ou sinterização de materiais como as argilas, a escória de alto-forno, diatomitos, folhetos argilosos e de ardósia.

b) Agregados leves para fabricação de peças de alvenaria de concreto (C331-64T): da mesma forma que os agregados leves para concreto estrutural, são obtidos através da expansão, calcinação ou sinterização dos mesmos materiais.

c) Agregados leves para fabricação de concreto isolante (C332-61): podem ser preparados pela expansão de materiais, como perlita e vermiculita, para produção de concreto leve de massa específica aparente entre 230 kg/m^3 e 800 kg/m^3 , ou pela expansão, calcinação ou sinterização de escória de alto-forno, argilas, diatomitos, folhetos argilosos e de ardósia para a obtenção de concreto leve de massa específica aparente entre 720 kg/m^3 a 1440 kg/m^3 .

Segundo Popovics (1992), a porosidade interna também é um fator preponderante na escolha do agregado. De acordo com o autor, quanto maior é esse valor, mais leve é o agregado e menor é sua condutividade térmica, todavia, menor é sua resistência. Além desses fatores algumas possíveis disfunções relacionadas ao emprego de agregados leves em matrizes cimentícias, como problemas de trabalhabilidade causados principalmente pela dimensão angular das partículas finas dos agregados leves britados, segregação dos agregados graúdos durante a mistura, lançamento e vibração do concreto, alto valor de absorção da maioria dos agregados.

Os problemas citados acima, contudo, podem ser evitados adotando-se algumas medidas preventivas como, por exemplo, a substituição de parte dos agregados leves por agregados tradicionais e a checagem frequente e contrabalanceada da proporção de água.

Os concretos produzidos com agregados originários de rochas têm massa específica variando entre 2200 kg/m³ e 2600 kg/m³. Concreto com menor massa específica pode resultar em vantagens significativas quanto a elementos estruturais com menor seção transversal e uma correspondente redução das dimensões da fundação. Outra característica importante a ser observada no agregado leve é a boa aderência entre este e a pasta hidratada de cimento que o envolve. Esta aderência ocorre pela textura áspera da superfície do agregado, resultando em um intertravamento mecânico entre o agregado e a pasta (CABRAL *et al.*,2008).

Por possuírem valores comerciais inferiores aos do cimento, os agregados influenciam diretamente no custo final do concreto. Além disso, proporcionam uma menor retração das pastas formadas por cimento e água e aumentam a resistência ao desgaste superficial dos concretos (MORAVIA, 2007).

Segundo Mehta e Monteiro (2008) agregados muito porosos, geralmente são mais frágeis, sendo mais indicados para a produção de concretos isolantes sem função estrutural e os agregados relativamente menos porosos são adequados para a produção de concretos estruturais. Assim, diversas propriedades dos concretos são influenciadas pela substituição de agregados tradicionais por agregados leves, dentre as quais massa específica, trabalhabilidade, resistência mecânica, módulo de elasticidade, propriedades térmicas, retração, fluência e a espessura da zona de transição entre o agregado e a matriz de cimento. O conhecimento das propriedades dos agregados leves é de suma importância para a produção e dosagem adequada dos concretos leves, pois tais propriedades podem variar em função da matéria prima utilizada e do processo de fabricação (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Dessa forma, a escolha correta do agregado leve é fundamental para que o concreto moldado a partir desses materiais atenda às exigências para as quais foi designado. A Figura 2.4 a seguir apresenta a classificação dos concretos leves.

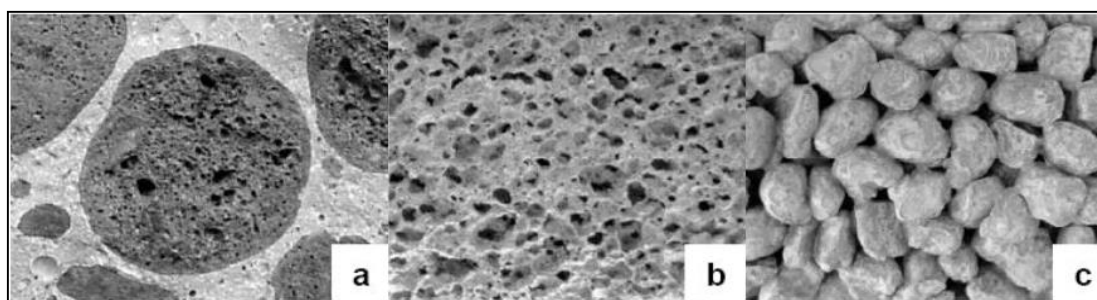


Figura 2.4 – (a) Concreto com agregados leves, (b) Concreto celular e (c) Concreto sem finos.

Fonte: ROSSIGNOLO e AGNESINI, 2005.

2.5.2.1 Processos de produção

Os processos de fabricação de agregados mais utilizados são forno rotativo e sinterização. No processo de sinterização é feita uma mistura da matéria prima com uma quantidade definida de combustível, podendo ser carvão finamente moído ou coque. Em seguida o material é submetido a temperaturas elevadas, que tem como consequência a expansão devido à formação de gases (GOMES,1998).

De acordo com Santos *et al.* (1986), o agregado produzido por meio de sinterização apresenta elevada capacidade de absorção de água, poros abertos, além de não possuir recobrimento. De modo geral apresentam valores de massa específica que variam entre 650 e 900 kg/m³. Vale ressaltar que o cobrimento externo das partículas dos agregados e a distribuição interna de vazios, influenciam consideravelmente as propriedades do agregado.

O processo de forno rotativo aproveita a capacidade que alguns materiais, como por exemplo, algumas argilas possuem de se expandirem quando submetidos a temperaturas elevadas, entre 1000 e 1350 °C, próximos do ponto de fusão insipiente, devido à formação de gases que ficam aprisionados por uma espécie de “capa” externa vítrea da partícula. Esse tratamento térmico é realizado em fornos rotativos (Figura 2.5), semelhante ao processo de obtenção do cimento Portland (SANTOS *et al.*, 1986).



Figura 2.5 – Forno rotativo.
Fonte: MANUTENÇÃO & SUPRIMENTOS, 2012.

O agregado produzido por meio de forno rotativo apresenta granulometria variada, formato regular e âmago formado por uma massa esponjosa, envolvida por uma “casca cerâmica” vitrificada, que apresenta boa resistência e baixa permeabilidade, que confere

ao agregado uma porosidade fechada. O agregado produzido por este processo recebe a denominação de “encapado”, devido possuir uma camada externa vítrea, que é responsável pela redução significativa da absorção de água (ROSSIGNOLO, 2003).

A Figura 2.6 mostra parte da estrutura dos agregados produzidos por esses processos.

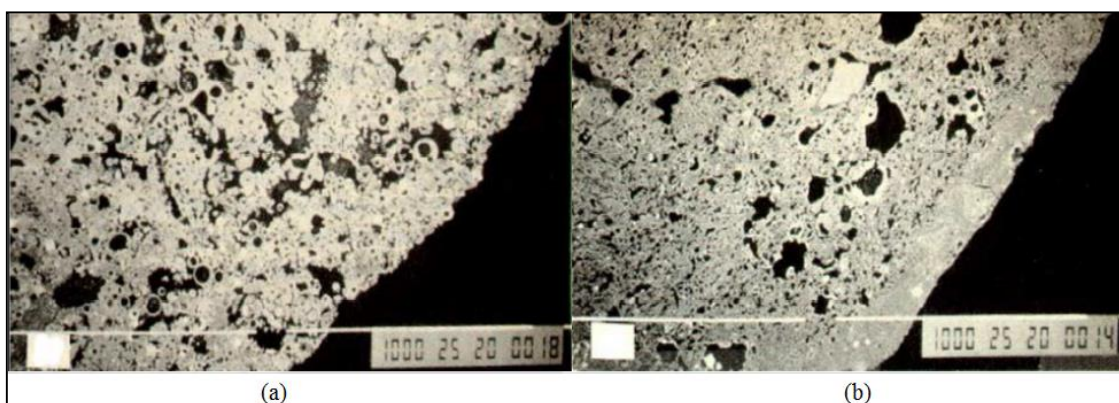


Figura 2.6 – Micrografia dos agregados produzidos pelos processos de (a) sinterização e (b) forno rotativo.

Fonte: ZHANG e GJORV, 1991.

Segundo Zhang e Gjorv (1991), o processo de fabricação dos agregados leves, influencia na forma e textura das partículas destes, no caso do processo de sinterização, por exemplo, produz agregados que possuem alta rugosidade, formas angulares e superfície porosa, em função desses fatores apresentam boa aderência à pasta de cimento.

2.5.3 Agregado a partir de resíduos e suas aplicações

O estudo realizado por Arrivabene *et al.* (2006), utilizou a escória de alto forno nas formas: escória de alto forno bruta britada (EAFBB), escória de alto forno granulada (EAFG) e escória de alto forno granulada moída (EAFGM), que foram utilizadas como agregado graúdo, agregado miúdo e como substituto parcial do cimento, respectivamente. Diferentes dosagens de concretos foram produzidas com as escórias de forma que permitissem uma comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos concretos dosados com agregados convencionais (brita gnáissica e areia de sílica de jazida silicosa). As pesquisas desenvolvidas indicam o potencial de utilização da escória como agregado para concreto que apresentou resistência mecânica, com valores que superam aos do concreto convencional.

No trabalho realizado por Popovics (1992) as cinzas volantes quando sinterizadas podem prover agregados leves de boa qualidade para aplicação em concretos. O processo usual de fabrico passa primeiramente pelo preparo dos grânulos extrudados das cinzas volantes através da adição de água. Posteriormente o material é queimado em esteiras ou sinterizadores a cerca de 1260 °C, temperatura que amolece e aglomera os grânulos transformando-os em partículas maiores. A estrutura interna do material sinterizado é multicelular, onde os vazios do interior das partículas são produzidos pela evaporação da água e eliminação de carbono durante o processo.

O alto potencial de aplicação dos agregados leves constituídos por cinzas volantes está na produção de concretos e seus produtos, e blocos de alvenaria. Concretos com resistência de 41,5 MPa também têm sido produzidos com as variedades mais pesadas do agregado, garantindo o potencial da aplicação (KLOTTEN, 2012).

A pesquisa desenvolvida por Cruz (2002) utilizou a escória de cobre é um agregado miúdo com composição granulométrica compatível para aplicação em argamassas e concretos. Foram elaborados diversos traços de concreto visando a uma resistência mínima à compressão axial após 28 dias em cura saturada de 15 MPa. Os resultados indicam que a escória de cobre pode ser utilizada na fabricação do concreto, com a ressalva de proporcionar ao concreto uma massa específica pouco superior à convencional. A aplicação recomendada é para pré-moldados em concreto.

O mundo todo possui 85 plantas de produção de alumina, com um rendimento em termos de geração de lama vermelha de cerca de 1,2 toneladas de lama por tonelada de alumina produzida (TSAKIRIDIS *et al.*, 2004). Em função da elevada produção do resíduo (lama vermelha) vários estudos tem mostrado o reaproveitamento desse material.

A Universidade Federal do Pará tem contribuído através do Instituto de Tecnologia, com a participação da Faculdade de Engenharia Química de projetos de pesquisas e extensão desde 1986, em algumas micro-regiões, com objetivo de desenvolver tecnologia adequada e melhoria no processo de produção para os centros produtores das indústrias minero-metalúrgicas, em convênio com o SEBRAE/PA e o Governo do Estado (HILDEBRANDO *et al.*, 1999; SOUZA e NEVES, 2000).

Essas contribuições estão fortemente associadas à lama vermelha que pode ser considerada uma matéria prima interessante para diversas aplicações na construção civil (SOUZA, 2010). A seguir alguns trabalhos produzidos sobre agregados sintetizados a partir da lama vermelha.

Souza (2010) estudou a lama vermelha como matéria prima na produção de agregados sintéticos para a construção civil. Neste trabalho foram produzidos agregados graúdos a partir da lama vermelha e utilizados na produção de concretos. O autor concluiu que a lama vermelha usada em misturas com sílica e argila, possui grande potencial para uso na produção de agregados sintéticos. As análises realizadas nos concretos apresentaram resultados satisfatórios, com relação à resistência mecânica, demonstrados por meio dos ensaios de resistência à compressão axial simples, módulo de elasticidade, tração por compressão diametral e ensaio à abrasão.

Albuquerque (2007) investigou as propriedades mecânicas de concretos dosados com agregados a partir de lama vermelha. Para a fabricação dos agregados utilizou-se lama vermelha, sílica ativa, metacaulim, areia fina e areia grossa. Foi adicionado às misturas 10% em peso de óleo e aproximadamente 25% a 30% em peso de água. O processo de moldagem dos agregados foi executado utilizando-se formas metálicas. O autor concluiu que há viabilidade de aplicação desses agregados para a produção de concretos convencionais, pois além de oferecer uma alternativa quanto ao emprego do resíduo, também apresentou propriedades mecânicas satisfatórias.

Rossi (2009) produziu concretos para reparo com agregados de lama vermelha sob abrasão hidráulica, utilizando quatro misturas, todas com 70% de lama vermelha e os 30% restantes de sílica ativa, metacaulim, areia fina e areia grossa. Para a fabricação dos agregados foram utilizadas formas cúbicas metálicas, e após esta etapa, com os agregados ainda maleáveis, iniciou-se o processo de arredondamento de forma manual, para adquirirem formas semelhantes a seixo rolado. Após a moldagem os agregados foram sinterizados a 1200°C (por 3 horas). Em seguida, iniciou-se a produção dos concretos com posterior execução dos ensaios mecânicos e medida das propriedades cerâmicas. Nesse estudo, os concretos apresentaram valores de resistência elevados. Verificou ainda, que nos ensaios de compressão axial e diametral, as rupturas do concreto produzido com seixo rolado, ocorreram no próprio agregado, enquanto que naqueles produzidos com o agregado de lama vermelha, a ruptura ocorreu na pasta de cimento, comprovando assim que o agregado produzido possui elevada resistência.

Santos (2011) propôs a utilização da lama vermelha para produção de agregados leves, juntamente com a argila, sílica e biomassa em 5 composições diferentes, e mostrou através das análises pertinentes a esses materiais, que esses podem produzir agregados com uma resistência mecânica e massa específica apropriada ao uso em concretos. Estes materiais podem ser comparados aos agregados utilizados na indústria da construção

civil, deste modo o produto sintético pode substituir agregados como o seixo rolado e a brita com a vantagem de não ser extraído da natureza, contribuindo para a preservação ambiental e consumindo o passivo armazenado pela indústria da alumina.

Rosário (2013) desenvolveu um concreto com utilização de agregado graúdo sintético produzido a partir da lama vermelha, fazendo um estudo de dosagem, propriedades e microestruturas. A autora abordou a viabilidade de produção de um concreto com características próprias para o uso como insumo na indústria de construção civil utilizando o agregado sintético a partir da mistura de lama vermelha (60%), areia (20%), argila (10%) e biomassa (10%). O concreto e os agregados foram analisados quanto a medidas das propriedades mecânicas e cerâmicas, além da análise de microestrutura da zona de transição pasta/agregado nos concretos produzidos. A autora conclui que os resultados foram satisfatórios, demonstrando um potencial para o uso na indústria da construção civil.

Reis (2014) estudou as características físico-químicas e mineralógicas dos agregados sintetizados a partir da mistura da lama vermelha, argila, areia e carvão vegetal em 4 composições. As matérias primas foram pré-tratadas e analisadas por fluorescência de Raios-X, difração de Raios-X, Análise térmica e granulométrica. As amostras foram calcinadas a 1200 °C por 4 horas. Em seguida submetidas a análises por difratometria de Raios-X, fluorescência de Raios-X, análise térmica diferencial e microscopia eletrônica de varredura para caracterização e testes físicos. O material após a sinterização apresentou, massa específica aparente média abaixo de 2 g/cm³, fases cristalinas de quartzo, hematita e mulita

A pesquisa realizada por Campos *et al.* (2012), avaliou as propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com resíduo sólido de cerâmica vermelha, em diferentes traços. Nesse trabalho, foi observado que os concretos produzidos com agregados reciclados apresentaram menores valores de resistência a compressão em relação ao concreto com agregado natural e quanto as propriedades físicas, tiveram maiores valores de absorção e porosidade. No entanto, apesar dos baixos valores de resistência, estes apresentaram aumento do abatimento devido apresentar formato mais propício para o assentamento dentro do concreto e ao seu peso específico ser bem inferior ao do agregado natural.

Agregados reciclados de resíduo da construção civil para a fabricação de concretos, também foi estudado por Rodrigues e Fucale (2014). No estudo, foram confeccionados concretos em diferentes proporções de substituição do agregado natural

pelo reciclado, onde foi observado que os concretos reciclados apresentaram maior absorção de água e consumo de argamassa, porém ocorreu diminuição do módulo de elasticidade, embora não tenha prejudicado à resistência à compressão, sendo o teor de 50% em massa de substituição do agregado miúdo natural pelo reciclado, a proporção mais adequada.

Na pesquisa realizada por Gomes *et al.* (2015) utilizou-se dois tipos de agregados reciclados, um oriundo de blocos de concreto com poliestireno expandido (ARBCE) e outro de blocos cerâmicos (ARBC), com o propósito de verificar a viabilidade de aplicação deles na obtenção de concretos leves. Os agregados reciclados foram britados por dois diferentes equipamentos (moinho argamassadeira para o ARBC e britador de martelo para o ARBCE). Os agregados reciclados obtidos desses processos distintos, apresentaram distribuição granulométrica e forma diferentes. Com ambos os agregados reciclados foi possível produzir concretos leves, ou seja, com massa específica abaixo de 2,00 g/cm³. As resistências à compressão aos 28 dias entre 9,0 e 13,0 MPa indicam uso em elementos sem função estrutural, mas aplicáveis em componentes construtivos de resistência moderada (p.ex. painéis e blocos).

2.6 SINTERIZAÇÃO

Sinterização é um processo no qual a temperatura de processamento é sempre menor que a sua temperatura de fusão, na qual as pequenas partículas do material se ligam entre si por difusão no estado sólido, transformando o material compacto poroso em um produto resistente e denso. A medida que as partículas se tornam maiores com o tempo de sinterização, a porosidade do compactado diminui com isso atingindo-se um tamanho de grão de equilíbrio (NORTON, 1973).

Os sistemas particulados heterogêneos, utilizados na sinterização de materiais cerâmicos são formados normalmente por partículas, aglomeradas e poros, de diferentes tamanhos, formas e afinidades químicas. As transições entre essas etapas de sinterização ocorrem em taxas variadas, e em diferentes regiões microscópicas do granulado. A redução da área de superfície específica dos grãos é resultado das mudanças ocorridas na sinterização, como interação entre as partículas e diminuição dos poros com o aparecimento da fase amorfa. Em sínteses convencionais, a redução da energia livre do sistema, ocorre devido ao decréscimo da área de superfície específica dos grãos. A identificação do produto cerâmico durante a sinterização ocorre através dos mecanismos de transporte de massa (NORTON, 1973).

Entre os mecanismos de transporte existentes, alguns não causam identificação diretamente. É o caso da difusão de superfície, que é um mecanismo de transporte, que promove modificação na superfície dos grãos, união das partículas e arredondamento dos poros, mas não produz diretamente contração de volume ou identificação. O principal mecanismo que também não causa identificação é o transporte de massa ao longo do volume dos grãos (NORTON, 1973).

Os principais mecanismos de difusão, que causam contração, são difusão de contorno dos grãos e difusão de rede. O mecanismo de difusão ao longo do contorno dos grãos produz o crescimento do pescoço entre as partículas (fase amorfa). Esse crescimento do pescoço reduz o tamanho dos vazios, e desloca-os para regiões côncavas do granulado. O mecanismo de difusão de rede transporta os vazios para a superfície, com um concomitante escoamento de átomos em direção oposta. O efeito combinado destes dois mecanismos de difusão vai provocar a contração dos interstícios, promovendo um empacotamento mais denso e uniforme, do material cerâmico sinterizado (NORTON, 1973).

Os mecanismos de, escoamento viscoso e deformação plástica são efetivos somente quando uma fase líquida estiver presente, e uma pressão for aplicada. Estes últimos mecanismos também causam contração, devido a uma redução do espaçamento interpartículas e decréscimo da quantidade de vazios. As reações termoquímicas, entre os pós componentes da maioria das cerâmicas, são completadas durante o processo original de manufatura do corpo cerâmico desejado, por reações químicas, que ocorrem durante tempos prolongados de queima ou múltiplas queimas (KINGERY, 1976).

Na sinterização de estado sólido, verifica-se a presença de três estágios de sinterização, não simultaneamente exclusivos. As etapas de adesão, rearranjo e re-empacotamento das partículas ocorrem espontaneamente, quando as partículas soltas formam os contatos em orientações aleatórias. Depois de ligadas, as partículas formam um arranjo preferencial com alta densidade de empacotamento e uma estrutura de contornos de grãos de baixa energia (ROCHA e DUAILIBI, 1991).

O primeiro estágio é caracterizado por um crescimento de pescoço gerado pela ligação formada nos contatos entre as partículas, conforme pode ser observado na Figura 2.7, onde consta uma microestrutura com gradiente de curvatura, pequena retração do material (geralmente inferior a 3%), mantendo-se as mesmas dimensões da partícula inicial, apresentando uma pequena densificação como resultado dos eventos de coalescimento.

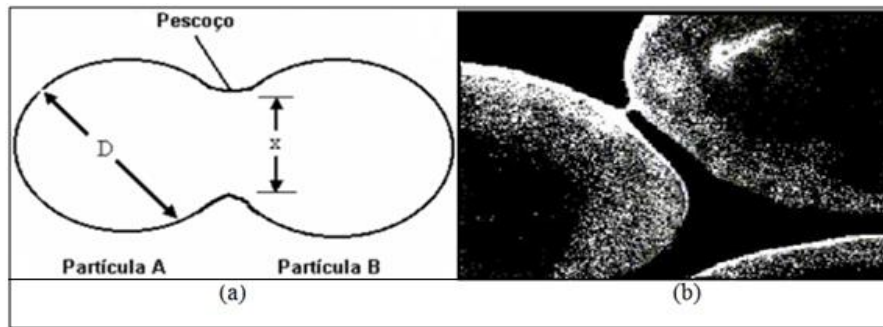


Figura 2.7 – (a) Estágio inicial de sinterização com a formação do “pesçoço”, onde X representa o diâmetro do pesçoço entre partículas e D é o diâmetro das partículas e (b) Micrografia eletrônica de varredura da formação do “pesçoço” entre partículas esféricas induzidas por sinterização.

Fonte: HERCULANO, 2007 *apud* REIS, 2014.

Os poros são abertos e interconectados, em um primeiro momento, mas com o prolongamento do aquecimento, a estrutura de poros se torna mais uniforme, induzindo ao estágio intermediário. O estágio intermediário é caracterizado por uma estrutura de poros conectados entre si e por canais à superfície livre. A porosidade é mais uniforme no contorno de grão e começa a surgir crescimento dos cristalitos. A força motriz é menor e termina quando os poros conectados entre si e com a superfície tornam-se isolados aprisionando o gás do ambiente de sinterização. A densidade neste estágio aumenta até 95% da densidade final, onde é importante ressaltar que as propriedades do compacto são predominantemente desenvolvidas neste estágio (ROCHA e DUAILIBI, 1991).

No estágio final da sinterização, os poros cilíndricos colapsam em poros esféricos (com menor energia superficial), isolados entre si. É caracterizado por uma baixa força motriz necessária ao processo de difusão e pelo evidente crescimento de grão. Para se conseguir um material de alta densidade é importante reduzir a mobilidade dos contornos de grãos e o crescimento de grão, de maneira que os poros localizados próximos aos contornos possam ser eliminados. Os contornos de grão não podem se afastar de poros, evitando a obtenção de um sinterizado com porosidade residual (ROCHA e DUAILIBI, 1991). Nesse estágio, o efeito da atmosfera de sinterização se faz sentir de maneira bastante acentuada, pois o processo de eliminação da porosidade só ocorre até que a pressão (P_g) do gás aprisionado nos poros seja contrabalançada pela tensão de superfície (γ), segundo a relação: $P_g = 2\gamma/R$, onde R é o raio efetivo da curvatura da superfície do poro. Para que a densidade teórica seja alcançada é necessário que o gás, aprisionado nos poros, se difunda pela rede do cristal para uma superfície livre (ROCHA e DUAILIBI, 1991).

2.6.1 Reações de sinterização em materiais cerâmicos

Os mecanismos da sinterização na maioria dos materiais cerâmicos derivados de sílico-aluminatos correspondem a uma transformação estável que acontece em várias etapas intermediárias com a nucleação e crescimento de fases metaestáveis intermediárias, das quais dependerá a estabilidade das fases finais (BRINDLEY e NAKAHIRA, 1959).

Mörtel (1978 *apud* SOUZA, 2010) mostrou que estas fases estáveis têm sua nucleação e crescimento em grande parte ligada ainda às impurezas presentes na matéria prima sílico-aluminosa, cujas concentrações de ferro, titânio, cálcio e outros seriam capazes de promover a nucleação e crescimento de fases cerâmicas em temperaturas abaixo da temperatura prevista no diagrama de equilíbrio convencional.

MÖRTEL e BOUBACAR (1977 *apud* SOUZA, 2010) mostraram que a nucleação e crescimento de fases importantes como a mulita necessitam de uma redução de viscosidade da fase amorfa para nuclear e crescer. Embora esteja de acordo com a proposta de Brindley e Nakahira (1959), os autores acrescentavam mais uma importante observação nos seus artigos, a qual explica o aparecimento de fases como a mulita em temperaturas abaixo de 1200°C, que é o previsto nos diagramas convencionais de equilíbrio para os sílico-aluminatos.

A grande maioria dos materiais cerâmicos à base de sílico-aluminatos após a sinterização apresenta uma microestrutura característica, conforme a Figura 2.8.

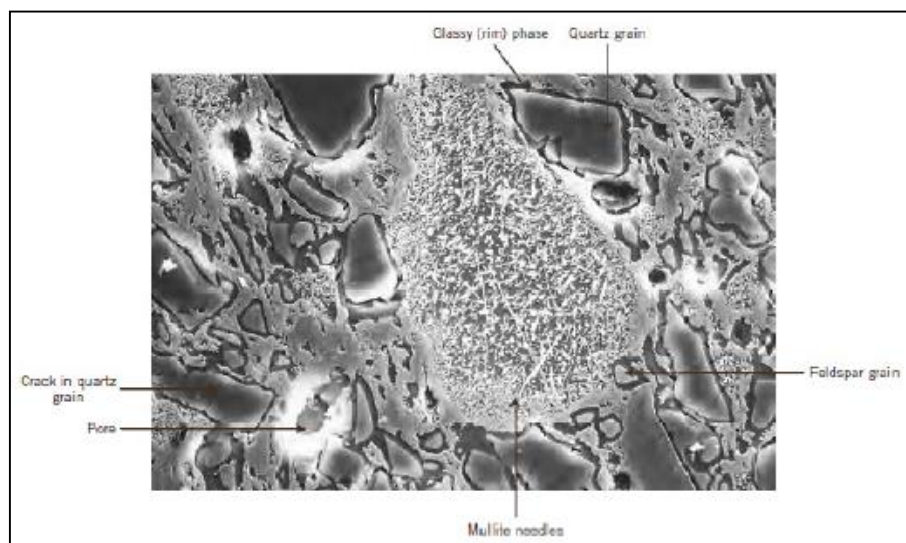


Figura 2.8 - Microestrutura de um material cerâmico sinterizado após a retirada da camada amorfa, evidenciando fases como a mulita e o quartzo.

Fonte: CALLISTER, 2008.

A Figura 2.9 apresenta um modelo das etapas relativas às reações de formação de fase amorfa na sinterização de materiais cerâmicos em temperaturas crescentes de (a) a (d), com conseqüente redução de volume. Neste modelo, a redução de volume é acompanhada pela tendência esférica da porosidade com representativa redução de vazios e um conseqüente aumento da massa específica. Este é o comportamento natural da maioria dos materiais cerâmicos derivados de sílico-aluminatos durante a sinterização (NORTON, 1973).

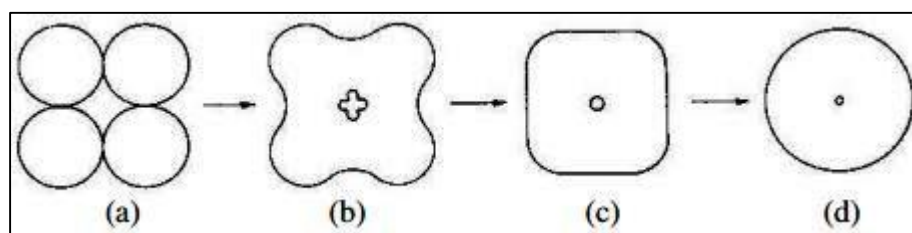


Figura 2.9 - (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final.

Fonte: SOUZA e NEVES, 1995.

Alguns autores associam as condições necessárias para a sinterização (fechamento dos poros) juntamente com o aumento na resistência mecânica, no caso dos materiais cerâmicos, com a eficiência das reações de estado sólido, que acontecem no interior do material responsável pela formação de mulita e pela fase amorfa (vidro). Estas transformações podem ser controladas de quatro formas: pela composição da mistura, pela granulometria da matéria prima, pela temperatura de queima e pelo tempo de exposição a esta temperatura. O material pode ainda apresentar piroexpansão, ou seja, na temperatura de queima, a expansão deste material sintético produz uma estrutura celular, essencial para a fabricação de agregado leve de alta qualidade com massa específica inferior a $1,5\text{g/cm}^3$ (OEL, 1985).

2.6.2 Reações de estado sólido para sílico-aluminatos em material cerâmico

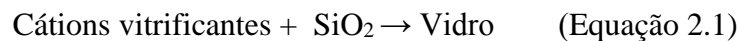
A microestrutura dos materiais cerâmicos sintetizados a partir de sílico-aluminatos, como as porcelanas, cerâmica vermelha, e outros, caracteriza-se pela presença de fases cristalinas, onde se podem distinguir os contornos das partículas mais refratárias, envolvidas por uma matriz vítrea, que atua como um ligante aglutinando todas as partículas. Não raro, nota-se também a presença de poros e bolhas de gás aprisionadas na fase vítrea. Essa microestrutura vai ser fortemente influenciada pela temperatura de

queima, pelo diâmetro de partícula e pela natureza das matérias primas, como a sua composição química, por exemplo, o teor de óxidos alcalinos e o teor de sílica livre. Alguns autores como MÖRTEL *et al.* (2000 *apud* SOUZA, 2010), sugerem que a maior influência para a resistência destes materiais é a presença de fases tipo quartzo, mulita e a fase vítrea.

2.6.2.1 Reações de vitrificação

O material na sinterização deve possuir um teor de vidro (fase amorfa) suficiente em baixa viscosidade na temperatura de formação, com o intuito de preencher a maioria dos poros e reter os gases formados (BRINDLEY e NAKAHIRA, 1959).

Para que ocorra as reações de vitrificação conforme descrito anteriormente, é necessário a presença de metais alcalinos como sódio e potássio (MÖRTEL e HEIMSTADT, 1994 *apud* SOUZA, 2010). Quimicamente, a reação de vitrificação pode ser descrita pela Equação 2.1:



A Figura 2.10 ilustra um modelo representativo das etapas de sinterização, com a formação da fase vítrea e consequente redução da viscosidade da mesma, a qual é responsável pela ocupação do vazio da estrutura.

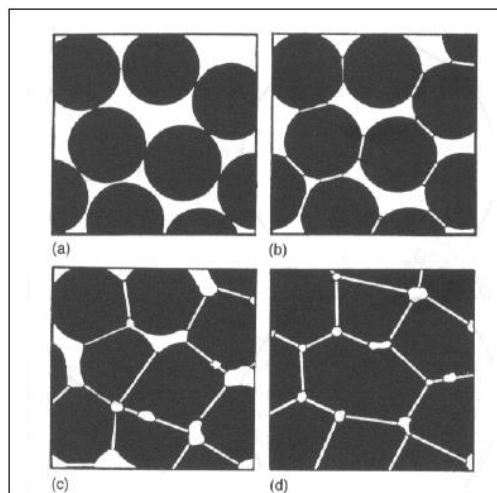


Figura 2.10 - Modelo representativo das etapas relativas às reações de vitrificação na sinterização de materiais cerâmicos em temperaturas elevadas de (a) a (d), com consequente redução de volume: (a) partículas soltas de pó; (b) estágio inicial; (c) estágio intermediário; (d) estágio final.

Fonte: NORTON, 1973.

O modelo de sinterização utilizado possui como mecanismo principal a transferência de massa como função da difusão no estado sólido, que pode ocorrer através de diferentes mecanismos, como mostra o modelo na Figura 2.11. Este modelo resume a questão, através de um mecanismo clássico de transferência de massa onde a temperatura é fator preponderante para a difusão. Tal mecanismo pode ser estendido para a sinterização de materiais cerâmicos.

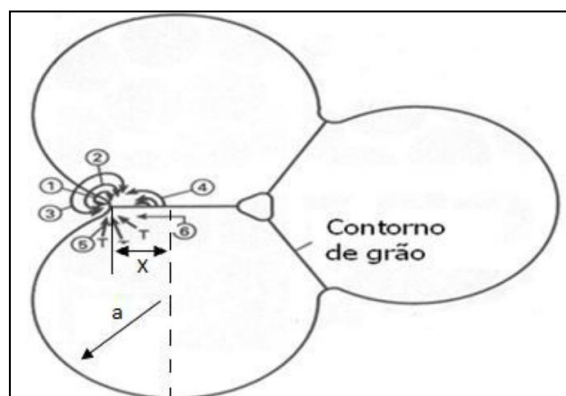
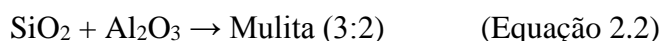


Figura 2.11- Modelo de sinterização destacando o mecanismo de difusão em material policristalino: (1) difusão superficial; (2) difusão volumétrica; (3) evaporação condensação; (4) difusão volumétrica; (5) difusão volumétrica na fronteira de grão; (6) difusão no contorno de grão.

Fonte: NORTON, 1973.

2.6.2.2 Reações de formação de mulita

A reação de formação da mulita pode ser observada na Equação 2.2:



A mulita secundária (de morfologia acicular), é a grande responsável pela melhoria nas propriedades mecânicas do material cerâmico que juntamente com a fase amorfa irão determinar as características mecânicas do mesmo (SOUZA, 2010).

A nucleação e crescimento da mulita dependem diretamente da viscosidade da fase vítrea para ser finalizada, também mostra pela viscosidade, diferentes fases amorfas produzidas com vários cátions vitrificantes como o ferro e cálcio, que tem influência direta no crescimento e nucleação da mulita secundária de morfologia acicular presentes em grande parte dos processos de sinterizações de silico-aluminatos a partir de 1200 °C (MÖRTEL, 1978 *apud* SOUZA, 2010). Todavia essa transformação ocorre em sistemas

primários chamados de metacaulita, ou em sistemas metaestáveis, conforme a Figura 2.12, que podem influenciar na formação da síntese de vidro com baixa viscosidade, sendo possível a nucleação e o crescimento da mulita secundária a partir da primária (MÖRTEL *et al.*, 1977 *apud* SOUZA, 2010).

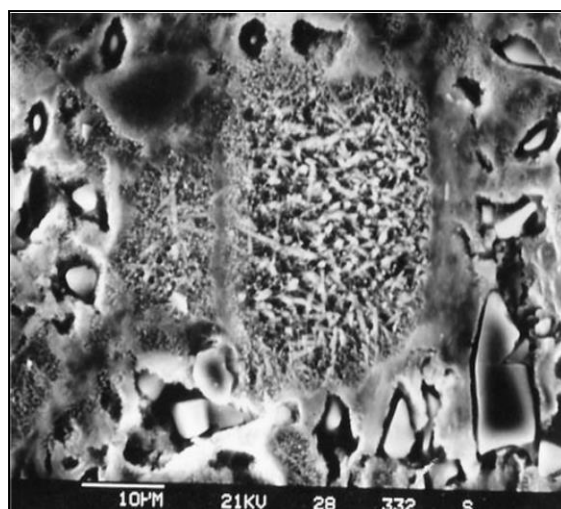


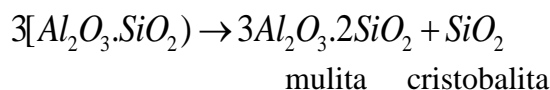
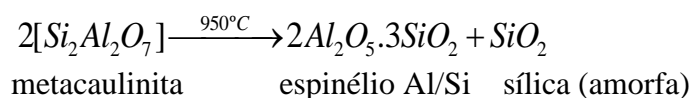
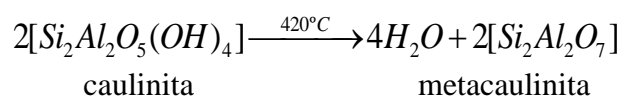
Figura 2.12 – Transformação de mulita primária (metacaulinita) em mulita secundária de morfologia acicular.

Fonte: MORTEL, 1978 *apud* SOUZA, 2010.

Em seus estudos Borlini *et al.* (2006) evidenciam a presença de mulita para temperaturas mais baixas a partir de 1050°C. A presença de mulita é responsável pela resistência mecânica apresentada pelos materiais cerâmicos e aumenta com a elevação da temperatura, a qual está ligada diretamente à nucleação e crescimento de maior quantidade de mulita secundária de morfologia acicular.

Devido à presença principalmente de íons como ferro, sódio e cálcio, a formação de mulita pode ocorrer em temperaturas abaixo de 1250°C, a partir de sílico-aluminatos, como argilas ou misturas de sílica e alumina (MÖRTEL, 1978 e SCHÜLLER, 1979 *apud* SOUZA, 2010).

Na sucessão de reações que podem dar origem à formação de mulita juntamente com cristobalita, ocorre a formação intermediária de metacaulinita, conforme as reações a seguir (SANTOS, 1989):



2.7 REATORES DE LEITO FIXO

Os reatores de leito fixo consistem de colunas com base perfurada, visando a aeração do sistema, podendo ter uma camisa com circulação de água, para promover o controle de temperatura (LAURENTINO, 2007).

Estudos sobre escoamento e transporte de calor em meios porosos vêm sendo realizados desde o século passado, visando caracterizar o comportamento térmico e fluidodinâmico do escoamento. A fluidodinâmica do escoamento, e o comportamento do transporte de calor num leito compactado são influenciados principalmente pela técnica empregada no empacotamento das partículas na coluna de recheio e pela forma de medida dos dados experimentais. Esse tipo de estudo está presente na maioria das operações unitárias na indústria, como destilação, adsorção em colunas recheadas, secagem e reações catalíticas em leitos fixos e fluidizados (OLIVEIRA, 2011).

A transferência de calor em leito fixo pode ser realizado tanto em regime transiente quanto em regime permanente, porém em cada caso, o requisito considerado de importância capital, que deve sempre ser obedecido, é a obtenção da forma mais fidedigna possível dos perfis de temperatura no interior do leito. Embora, a rigor, as técnicas utilizadas para a obtenção dos perfis de temperatura independam do regime em questão, no caso do regime transiente as coisas se complicam um pouco mais, pois existe a necessidade de uma aquisição frequente e contínua dos perfis de temperatura ao longo do tempo, que podem ser influenciadas pela inércia térmica do tipo de sensor usado no sistema de aquisição de dados (OLIVEIRA, 2011).

Para as medições de temperatura no leito em diferentes posições podem ser adotadas as seguintes técnicas (THOMÉO, 1995):

1. Poço axial de termopares: consiste na inserção longitudinal de um tubo no interior do meio poroso, contendo vários termopares posicionados em diferentes posições radiais e axiais. Desta forma, os perfis radiais e axiais de temperatura são obtidos simultaneamente. Porém, este método apresenta a desvantagem de ocorrer condução de calor ao longo do tubo, bem como a perturbação do meio pela inserção deste dispositivo;

2. Inserção radial de termopares: os sensores podem adentrar no leito em diferentes posições radiais e axiais, atravessando a parede do tubo e cruzando a camisa de refrigeração ou aquecimento. Desta forma, pode haver efeito de aleta, com transferência de calor da parede do leito para os termopares, mascarando a medida. Esta técnica pode fornecer perfis radiais, longitudinais e angulares simultaneamente;

3. Armação com termopares: consiste em uma armação inserida no leito, com vários sensores posicionados em diversas posições axiais, radiais e angulares. Tal dispositivo fornece perfis completos de temperatura, entretanto apresenta como principal inconveniência uma grande perturbação do meio;

4. Termopares acima do leito de partículas: um conjunto de sensores é colocado no topo do leito, em diferentes posições radiais e angulares. Esta técnica não perturba o meio e não introduz nenhum mecanismo de transferência de calor no sistema. Todavia, a distância dos termopares à superfície do leito influencia na medição, pois o escoamento peculiar do fluido percolante muda ao deixar a matriz porosa. O posicionamento dos sensores deve ser a uma distância de poucos milímetros da superfície, sendo 5mm um valor satisfatório. Para a obtenção de perfis longitudinais de temperatura é necessário utilizar leitos com alturas distintas.

Estudos recentes mostram que existem flutuações significativas, mas aparentemente aleatórias, de temperatura em leitos fixos. Tais flutuações são devido às não-uniformidades locais de empacotamento, inerentes ao próprio leito, e parecem ser mais pronunciadas quanto menor for a relação diâmetro do leito por diâmetro da partícula. No entanto, no projeto de reatores catalíticos gás sólido e trocadores de calor de leito compactado, os modelos normalmente utilizados, assumem que o perfil de temperatura é do tipo pistonado na entrada do reator e a distribuição de velocidade é uniforme ao longo do diâmetro do leito (DIXON, 1996).

2.7.1 Combustão em meio poroso

Meio poroso é um material que consiste em uma matriz sólida com espaços vazios interligados. Suponha-se que a matriz sólida é rígida, a situação normal, ou se submete a pequena deformação. A interligação dos espaços vazios ou poros, permite que o fluxo de um ou mais fluidos ocorra através do material. Como exemplos de meios porosos naturais pode-se citar areia da praia, arenito, calcário, madeira, e o pulmão humano (BEJAN, 2006).

Diversos estudos experimentais e teóricos de combustão de partículas de carvão ou madeira em um leito fixo foram realizados a fim de compreender os fenômenos que ocorrem durante o processo de combustão em meios porosos, tais como transferência de calor e massa. No entanto, os parâmetros que governam a combustão de sólidos no leito, tais como os efeitos do tamanho de partícula, de calor e transferência de massa em meios porosos, e a interferência entre as reações de sólidos e em fase gasosa, não estão totalmente compreendidos (KAVIANY, 1995).

A combustão lenta é um problema essencial de combustão envolvendo reações químicas heterogêneas e o transporte de calor, massa e força nas fases gás e sólido. A diferença fundamental entre a combustão sem chama e a flamejante é que, no primeiro caso, a reação de oxidação e a libertação de calor ocorrem na superfície do combustível sólido ou matriz porosa e, no último caso, essas reações ocorrem na fase gasosa em torno do combustível (REIN, 2005).

Os trabalhos de Fatehi e Kaviany (1994 *apud* MARTINS, 2008) enfocam a propagação de uma frente de combustão em um meio poroso reativo. Nesse tipo de problema, a fase sólida reage com a fase gasosa, onde ocorrem diversas reações químicas: pirólise, combustão do residual de carbono e reações de estado sólido. Essas reações de transformação são acompanhadas por mudanças bruscas na estrutura física da fase sólida. No estudo de Hallett (2005 *apud* MARTINS, 2008) apresenta-se um esquema para ilustrar esses processos complexos, ver Figura 2.13.

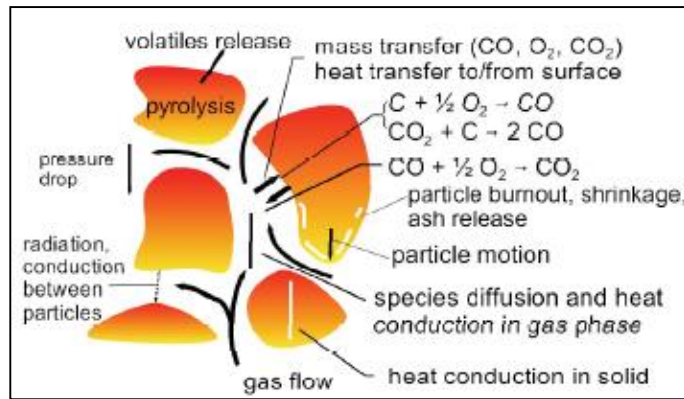


Figura 2.13 - Fenômenos acoplados de transferência de calor e massa, fluxo e reação química em um meio poroso reativo.

Fonte: HALLETT, 2005 *apud* MARTINS, 2008.

Dentro do contexto da combustão em um meio poroso reativo, existem processos que ocorrem sob o comportamento *smouldering* e *flaming*. O comportamento *smouldering* é uma forma de combustão sem chama, derivando seu calor de reações heterogêneas que ocorrem na superfície de um combustível sólido, quando aquecido num ambiente oxidante. Esse fenômeno é de interesse tanto como um problema fundamental de combustão como para prevenções de incêndios (OHLEMILLER, 2002).

De acordo com Rein (2005), a combustão *flaming* corresponde à uma combustão com chama, em que a oxidação das espécies reagentes ocorre na fase gasosa. No que se refere a temperatura característica e o calor liberado durante a combustão *smouldering* de um sólido são relativamente baixos em comparação com aqueles da combustão *flaming*. Estas características fazem a combustão *smouldering* se propagar a baixas velocidades, tipicamente cerca de 0,1 mm/s, o que é cerca de duas ordens de grandeza menor do que a velocidade de propagação da combustão *flaming* ao longo de um sólido. Uma vez que a ignição ocorre, a reação de combustão *smouldering* se propaga através do material de uma forma lenta.

Segundo o trabalho realizado por Ohlemiller (1985), a oxidação do carbono fixo é a fonte de calor principal da maioria dos processos de propagação de combustão *smouldering* autossustentadas. O potencial de combustão *smouldering* existe, assim, com qualquer material que forme uma quantidade significativa de carvão (carbono fixo) durante a decomposição térmica. Há relatos ainda de que, para a maioria dos materiais e condições típicas, os dois fatores limitantes em combustão *smouldering* são o fluxo de meio oxidante e as perdas de calor a partir da zona de reação. Apesar das características de pequenas energias liberadas, comportamento *smouldering* é um perigo significativo

pois pode ser iniciada por pequenas fontes de calor; produz altos teores de produtos tóxicos por unidade de massa oxidada (particularmente CO e moléculas pesadas); é difícil de detectar e extinguir; e pode a qual quer momento fazer a transição para a combustão *flaming*. Essa transição é uma ignição espontânea em fase gasosa (reação homogênea) induzida pela reação *smouldering* que atua tanto como fonte de combustível gasoso (pirolisados, CO, etc.) como fonte de calor para iniciar a reação homogênea. Esta situação quando persistida caracteriza a chamada combustão *flaming*.

Ohlemiller (2002) relatou em seu trabalho que, dependendo do material, a transição de *smouldering* para *flaming* no leito ocorre a velocidades de fluxo de ar acima de cerca de 0,9 - 1,7 m/s. O estudo da propagação da frente de combustão em um meio poroso reativo, têm se intensificado a partir de modelos teóricos, numéricos e experimentais de acordo com o trabalho realizado por Anjos (2015).

2.7.2 Propagação da frente de combustão

O estudo da propagação da frente de combustão inicia com o processo de ignição, uma etapa primordial de um processo de combustão bem sucedido. Ela é geralmente considerada como o processo de início do fenômeno de combustão. Na prática, é importante compreender o comportamento da ignição dos mais diferentes tipos de combustíveis a fim de identificar um ponto ótimo para a sua injeção em combustores industriais (JIA *et al.*, 2006).

De acordo com o trabalho de Monhol (2015), a literatura mostra que existem várias formas de identificar o momento em que ocorre a ignição de um combustível, os quais podem ser: aumento de temperatura da partícula, a inflexão do perfil temperatura vs. Tempo, análise da composição do gás produzido, taxa de aquecimento (dT/dt) das partículas, aumento da pressão no leito, observação visual, visual assessorado e pirometria. Foi observado também, que no momento da ignição a taxa de aquecimento do combustível, a pressão no leito de combustível e a porcentagem de CO₂ nos gases de saída aumentam subitamente, enquanto que a quantidade de O₂ diminui (MONHOL e MARTINS, 2015). No que se refere a ignição de um combustível a granel em leito fixo, composto por várias partículas, o processo de ignição depende de diversos parâmetros, como densidade, concentração das partículas, distribuição granulométrica, entre outros (ESSENHIGH *et al.*, 1989).

Estudos tem mostrado que outro fator está relacionado ao processo de combustão, a influência da composição do combustível, pois realizando uma mudança na composição

do combustível, seja por adição de determinadas substâncias ou pela realização de um algum tratamento térmico ou químico, pode-se melhorar a eficiência de combustão em combustores industriais (MONHOL, 2015).

A propagação de uma frente de combustão ocorre em uma variedade de situações e para diferentes fins, como a incineração de resíduos, gaseificação, combustão in-situ, sinterização, processos metalúrgicos, na combustão ou queima de combustíveis sólidos em leito fixo nas industriais e outras aplicações. A descrição da frente em um meio poroso reativo continua sendo um desafio para a ciência em termos dos processos físico-químicos envolvidos, da transferência de calor e massa e da propagação da frente de combustão (MATINS *et al.*, 2010).

De acordo com Hobbs *et al.* (1993), o primeiro esforço de pesquisa em combustão que trata de frente de propagação data de 1977 a 1979. Desde então, a maior parte das pesquisas em combustão em meios porosos foram realizadas no campo da ciência e engenharia de incêndio de segurança contra incêndio. Problemas ambientais e a busca de fontes alternativas de energia também têm motivado pesquisas sobre o assunto.

Os esforços se concentraram em determinar quais parâmetros que influenciam a evolução e a estrutura de uma frente de combustão. Para isto, alguns autores desenvolveram modelos numéricos e dispositivos experimentais (MATINS *et al.*, 2010).

Segundo Martins (2008) em todas as aplicações da propagação da frente de combustão, é possível distinguir três zonas globais. Cada zona é caracterizada por um passo importante no processo de conversão do combustível, comentadas a seguir:

a) Zona de secagem: combustível sólido é introduzido no reator. Como resultado da transferência de calor a partir das partes do reator, a secagem do combustível sólido ocorre.

b) Zona de pirólise: ocorre a temperaturas acima de 250°C, onde o combustível sólido começa a pirólise. Nesse processo as moléculas grandes decompõem-se em moléculas de tamanho médio e carbono.

c) Zona de Oxidação: a zona de queima (oxidação) é formada no nível onde o oxigênio (ar) é introduzido. Reações com oxigênio são altamente exotérmicas e resultam em um aumento acentuado da temperatura de até 1200 – 1500 °C.

Na propagação da frente de combustão, duas situações de combustão primária podem ser observadas: combustão em contra-corrente, onde a alimentação de ar primário está em oposição à frente de combustão. Nessa combustão o suprimento de ar é normalmente encontrado em processos de incineração de resíduos sólidos urbanos. O

segundo caso, combustão em co-corrente, tanto a frente de combustão como a alimentação de ar primário ocorrem no mesmo lado da célula de combustão. O melhor exemplo de combustão em co-corrente pode ser encontrado em combustão para recuperação de petróleo. Os arranjos da frente de combustão podem ser observados na Figura 2.14 (MARTINS, 2008).

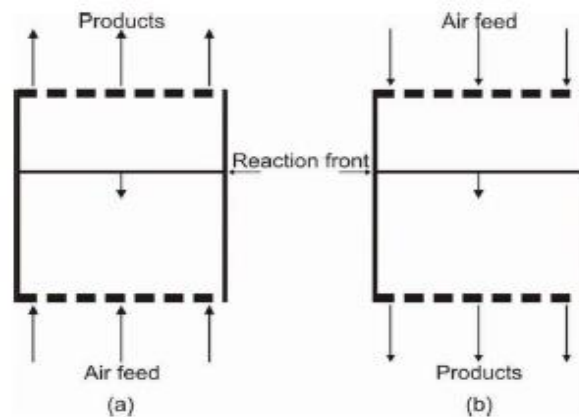


Figura 2.14 - Arranjo contra-corrente (a) e co-corrente (b).
Fonte: MARTINS, 2008.

A pesquisa de Hobbs *et al.* (1993) relata a descrição da interação de transferência de calor e massa entre as fases gás e sólido, e entre as partículas em si:

1. Condução através de partículas sólidas;
2. A condução entre as partículas sólidas em contato;
3. A radiação entre as partículas sólidas;
4. Convecção a partir de partículas sólidas para o fluido;
5. A radiação do que as partículas sólidas para o fluido;
6. Condução através de fluidos;
7. A radiação através de fluidos;
8. Fluido de mistura;
9. A condução da partícula sólida à parede do reator;
10. A radiação a partir da partícula sólida à parede do reator;
11. Convecção a partir da partícula sólida à parede do reator;
12. A radiação de fluido para a parede do reator;

Observa-se na literatura que alguns trabalhos estão voltados para o estudo do comportamento da propagação da frente de combustão dependendo de alguns parâmetros

envolvidos no processo, nesse aspecto alguns regimes de combustão foram definidos para caracterizar a propagação da frente de combustão. Especificamente para os casos em que existe a disponibilidade de oxigênio, Shin e Choi (2000) propuseram um conceito para a propagação em contra-corrente, que também pode ser utilizado em co-corrente. Dessa forma, a combustão de combustível sólido em um leito fixo foi investigada usando experimentos unidimensionais e dois regimes de combustão em leito fixo puderam ser distinguidos:

- Combustão limitada pelo oxigênio: em baixas taxas de fornecimento de ar o oxigênio é completamente consumido pelo carvão produzido e pela reação do material volátil. Neste caso, a taxa de reação do combustível é determinada pela taxa de fornecimento de oxigênio.

- Combustão limitada pela reação: se a taxa de fornecimento de ar aumenta, a taxa de reação é aumentada, mas devido à existência do limite da taxa de reação do material no interior do leito, ocorre um aumento da concentração de oxigênio na saída. Neste caso, a taxa de reação não pode aumentar mais devido à taxa limite de reação, e portanto, pode-se observar o arrefecimento do leito pela convecção do ar.

De acordo com as pesquisas realizadas por Kumar *et al.* (2006), além de outros autores, o relato de que durante o processo de conversão térmica de determinado combustível sólido, como por exemplo aqueles constituídos de materiais carbonosos, à medida que esse vai sendo aquecido há um fenômeno de perda de massa e volume devido aos processos de secagem, pirólise ou combustão desse material. Nesse sentido, estudos têm se objetivado quantificar essa retração sofrida pelo sólido, o que segundo Monhol (2015) nota-se que existem poucos trabalhos realizados até o presente momento.

No trabalho de Martins *et al.* (2010), observa-se a quantificação dessa característica de propagação da frente, realizada empiricamente para o arranjo co-corrente de propagação, de forma superficial. A retração do leito foi obtida no processo de combustão do xisto betuminoso e de uma mistura de areia e carvão. No estudo, o xisto betuminoso apresentou uma retração de 3,5% após o processo, enquanto que a mistura de areia e carvão a retração foi de 16%. Os autores obtiveram esses valores através de medidas diretas, observando o volume de combustível que permaneceu no reator após o término do processo. Os autores concluíram, que a retração do leito influencia a propagação da frente, uma vez que a distribuição do fluxo de ar não permanecerá uniforme devido a irregularidades superficiais provocadas pela retração do sólido.

No que se refere ao arranjo contra-corrente, a pesquisa desenvolvida por Gómez *et al.* (2014), foi voltada para um estudo numérico, onde foi utilizado um dispositivo para medir a altura do leito a medida que a frente se propagava. Nesse estudo, os autores observaram a influência do fluxo de ar na velocidade de retração do leito e que um aumento no fluxo de ar acelera a retração do leito.

Outras pesquisas têm abordado sobre a fonte de ignição da propagação da frente de combustão, a qual pode gerar certa influência no comportamento da frente. Essa característica na propagação da frente de combustão é um campo em aberto a ser explorado, e que o trabalho de Martins *et al.* (2010) é a única pesquisa empírica que aborda esse tema de forma mais direta, demonstrando o estudo da geometria da frente de propagação em um leito contendo xisto betuminoso, através das medidas de temperatura e velocidade da frente, onde os autores inferiram se de fato ocorre a influência da fonte de ignição no comportamento da frente, em relação a sua distribuição de temperatura e geometria e quais parâmetros podem afetar essa influência (MONHOL, 2015).

O trabalho realizado por Monhol (2015), investigou as características da propagação da frente de combustão, influência da composição do combustível no comportamento da ignição e a influência da ignição do combustível na propagação da frente, a partir da utilização de combustíveis simulados em um reator de leito fixo. O autor verificou em seu estudo a ocorrência de três estágios de combustão, referentes a ignição, propagação e oxidação do carbono fixo remanescente e a existência dos regimes de combustão limitados pela reação e pelo oxigênio. Uma das observações do autor, foi de que ocorreu uma maior influência da característica de composição do leito no comportamento da ignição, para os leitos constituídos com elevada porcentagem de material inerte.

Outro trabalho utilizando um reator de leito fixo também foi observado na literatura, como a pesquisa realizada por Melo *et al.* (2015), em que os autores estudaram a evolução da temperatura de combustão, a partir da composição de uma mistura contendo cinzas volantes de carvão mineral, argila e carvão vegetal, com o propósito de avaliar se as temperaturas durante a combustão seriam suficientes para iniciar o processo de sinterização da mistura pelletizada. Para a realização dos experimentos, parâmetros como velocidade de entrada do fluido (ar), diâmetros das pelotas e do carvão granulado em moinho de disco, foram variados e os efeitos desses parâmetros analisados. Os autores observaram que as temperaturas variavam na faixa de 800 a 1200 °C, concluindo que e esses valores são suficientes para iniciar o processo de sinterização das pelotas.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO

Nesta tese foram utilizadas como matérias primas na produção do agregado sintético: a cinza volante de carvão mineral, visto que é um resíduo rico em sílico-aluminatos, a argila por apresentar plasticidade e o carvão vegetal posto ser uma biomassa economicamente viável. As matérias primas estão apresentadas na Figura 3.1.

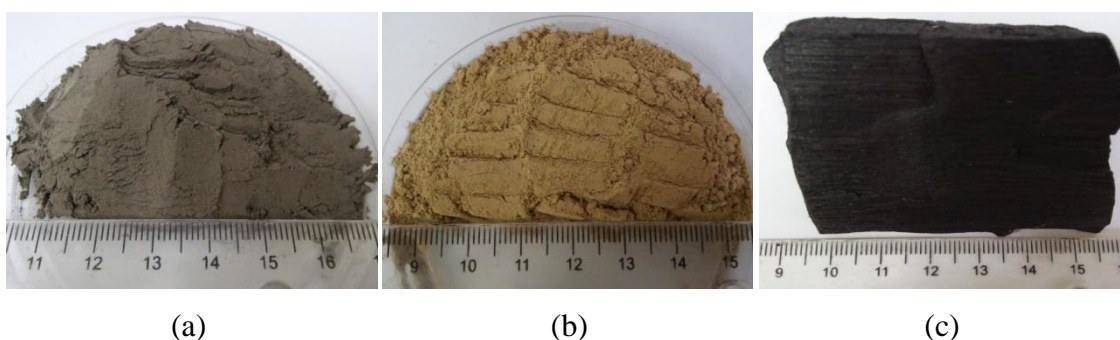


Figura 3.1 – (a) Cinza volante, (b) Argila e (c) Carvão vegetal.

A cinza volante foi cedida pela refinaria de alumina, HYDRO ALUNORTE, localizada no município de Barcarena no estado do Pará e trata-se de um rejeito do processo de queima do carvão mineral em caldeiras de leito fluidizado circulante empregada na produção de energia. A argila empregada nesta pesquisa é do tipo caulínica, proveniente das margens do Rio Guamá no entorno da Universidade Federal do Pará e o carvão vegetal utilizado neste estudo foi obtido comercialmente.

3.2 PRÉ-TRATAMENTO DAS MATÉRIAS PRIMAS

Após o recebimento das matérias primas, as mesmas foram submetidas a um pré-tratamento, além das caracterizações físicas e químicas, conforme as necessidades experimentais.

3.2.1 Cinza volante

A cinza, resíduo industrial desta pesquisa, por apresentar uma granulometria fina, o que contribuiu para uma boa conformação dos materiais, não necessitou de nenhum

tratamento prévio referente à cominuição para desagregação de suas partículas, assim foi utilizada de forma direta nos ensaios experimentais.

3.2.2 Argila

A argila por apresentar plasticidade quando umedecida com água, proporciona boa trabalhabilidade ao material. Para os experimentos, a argila passou por um processo de secagem a 105 °C em estufa com recirculação de ar (Figura 3.2 a) durante 24 h e posteriormente desagregada em moinho de bolas (Figura 3.2 b) por 30 minutos.

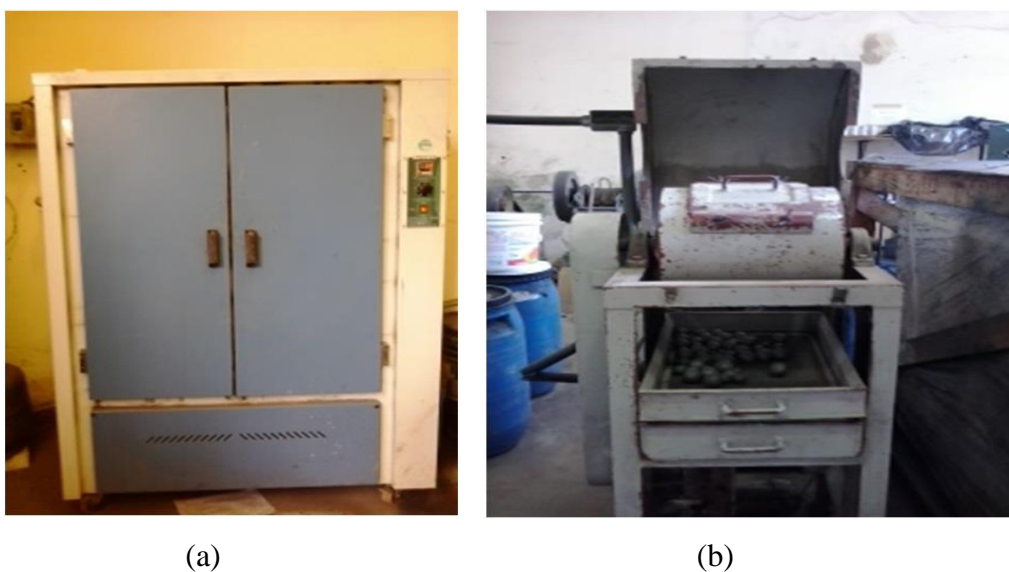


Figura 3.2 – (a) Estufa, (b) Moinho de bolas.

3.2.3 Carvão vegetal

O Carvão vegetal (resíduo e biomassa deste trabalho) funciona como combustível sólido no processo de sinterização e foi utilizado nos ensaios experimentais de duas formas: tanto na mistura de composição das pelotas quanto no preenchimento do leito do reator de sinterização (correspondendo a 80% do volume do reator) para a produção do agregado sintético. No âmbito da mistura de composição das pelotas o carvão passou por secagem a 105 °C, em seguida foi britado em britador de mandíbulas (Figura 3.3 a) e posteriormente moído em moinho de bolas até que sua granulometria fosse inferior a 100 Mesh (Figura 3.3 b). O preparo do carvão para compor 80% do volume do reator será abordado na próxima seção.



(a) Britador de mandíbulas, (b) Carvão pulverizado

Figura 3.3 – (a) Britador de mandíbulas, (b) Carvão pulverizado

Após o pré-tratamento das matérias primas às mesmas foram caracterizadas quanto sua composição química por fluorescência de raios-X e identificação das fases mineralógicas por difração de raios-X, utilizando o sistema difratométrico *Empyrean* com material anódico de cobalto e os resultados interpretados no programa *X'Pert HighScore*. Para essas análises realizadas no Laboratório de Geociências da UFPA os materiais foram pulverizados em geral e classificados para uma granulometria abaixo de 200 Mesh em peneira Tyler.

A caracterização referente à distribuição granulométrica da cinza volante e argila foi realizada pelo método de peneiramento utilizando Ro-Tap por via úmida e o diâmetro médio das partículas calculado através da Equação 3.1. Para o carvão de forma específica realizou-se sua análise imediata de acordo com a ABNT NBR 8112 e sua granulometria, após processo de cominuição, apresentou partículas inferiores a 100 Mesh. As respectivas análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia Química da UFPA.

$$D_{i_{\text{médio}}} = \sum X_i \cdot \bar{D} \quad (\text{Equação 3.1})$$

Onde:

$D_{i_{\text{médio}}}$: Diâmetro médio da amostra

X_i : Fração de massa retida;

\bar{D} : Diâmetro médio das malhas.

3.3 PROCESSO DE PRODUÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO

Observou-se no trabalho realizado por Monhol (2015), a utilização de combustíveis simulados em diferentes composições com o objetivo de analisar a influência da composição do leito no comportamento da ignição e propagação da frente de combustão, mediante ajustes na granulometria de cada material para garantir a homogeneidade da mistura das partículas. O autor também abordou de forma mais ampla, as características da propagação da frente utilizando o leito fixo composto por carvão.

Diante destas observações e análise da caracterização do carvão vegetal utilizado como combustível sólido, economicamente viável neste trabalho, a obtenção do agregado sintético foi definida a partir de uma mistura com 20% do volume do reator de pelotas (constituída a partir das matérias primas) e 80% de carvão vegetal.

As proporções fixas de carvão vegetal para preencher 80% do volume do reator em todos os experimentos, além da adição de 30% deste material na composição das pelotas, foram estabelecidas para garantir a existência de combustível sólido suficiente para sinterizar as mesmas. Dessa forma, foram realizados três experimentos para a obtenção do agregado sintético variando-se a velocidade do ar (Darcy a 20 °C) que contém o comburente das reações de combustão, que irão promover a sinterização ao longo do reator, ver Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Velocidade de ar (Darcy 20 °C)

Experimento	Velocidade [m.s ⁻¹]
1	0,0059
2	0,0098
3	0,017

A escolha das velocidades a serem trabalhadas, foi estabelecida a partir de testes anteriores, com o objetivo de obter temperaturas mais elevadas. Os experimentos foram realizados em triplicata, a metodologia e os equipamentos necessários para a fabricação do material foram desenvolvidos na Usina de Materiais.

3.3.1 Fabricação das pelotas

A Tabela 3.2 abaixo exhibe o valor percentual de cada matéria prima utilizada na composição da mistura das pelotas para os três experimentos.

Tabela 3.2 - Composição das matérias primas

Matéria prima	(% em peso)
Cinza volante	40
Carvão vegetal	30
Argila	30

Após a definição da composição das matérias primas, iniciou-se a preparação da mistura das pelotas. Com o auxílio de uma balança semi-analítica (Figura 3.4 a) verificou-se a massa de cada material constituinte da mistura previamente seca, para em seguida serem adicionadas em moinho de bolas para promover a homogeneização durante 1 h.

Após essa etapa, a mistura é colocada em um tambor rotativo (Figura 3.4 b), onde as pelotas formavam-se com adição de 40% de água em peso apresentando tamanhos variados, conforme mostra a Figura 3.5.

Para que se estabelecesse o percentual de água no valor de 40% em peso, foram realizados inúmeros testes com base em trabalhos anteriores como os de Souza (2010) e Rosário (2013) que utilizaram em seus trabalhos teores de 25 a 30% de água. Dessa forma a partir deste intervalo foi estabelecida uma faixa de teores de 23 a 50% de água, para verificação da resistência mecânica manual das pelotas, visto que a cinza volante apresenta atividade pozolânica em função de seus constituintes químicos (sílica, cal e alumina) que ao entrar em contato com a água à temperatura ambiente formam compostos com propriedades aglomerantes, segundo a norma ABNT NBR 12653:1992. Portanto o percentual de 40% de água em peso foi o resultado mais satisfatório para conformação das pelotas.



(a)



(b)

Figura 3.4 – (a) Balança, (b) Tambor rotativo



Figura 3.5 - Pelotas confeccionadas

Após a pelletização da mistura das matérias primas, as pelotas seguiram para o processo de secagem por 24 h e posteriormente classificadas para uma granulometria inferior a 6,35 mm e maior ou igual a 4 mm (Figura 3.6). A definição dessa faixa granulométrica em todos os experimentos teve por objetivo deixar o leito poroso o suficiente, para permitir o fluxo do ar e a consequente propagação da frente de combustão, e assim garantir a sinterização das pelotas, durante as reações de combustão do carvão.



Figura 3.6 – Pelotas classificadas

Após a classificação realizou-se manualmente a análise granulométrica via peneiramento e determinação da massa específica de acordo com a EMBRAPA (1997) para cada experimento.

3.3.2 Fabricação do carvão vegetal granulado

O preparo do carvão para compor os 80% do volume do reator passou por secagem e britagem, em seguida foi triturado em moinho de discos (Figura 3.7 a) e classificado

para uma granulometria inferior a 3,36 mm e maior ou igual a 1,70 mm, ver Figura 3.7 b. Esta faixa granulométrica foi estabelecida para auxiliar na permeabilidade do leito, e os finos gerados durante a classificação foram aproveitados na composição das pelotas mediante ajuste da granulometria, conforme explicado anteriormente. Após a classificação fez-se a caracterização quanto a granulometria para cada ensaio experimental em Ro-Tap por via seca (Figura 3.7 c) e análise quanto sua massa específica utilizando o mesmo método aplicado para as pelotas.



(a)

(b)



(c)

Figura 3.7 – (a) Moinho de discos, (b) Carvão Classificado, (c) Ro-tap por via seca

3.3.3 Medida dos percentuais em volume de pelotas e carvão vegetal

Após a classificação e caracterização dos materiais utilizou-se um recipiente similar ao volume do reator ($12548275,04 \text{ mm}^3$) para a realização das medidas referentes

aos 20% de pelotas e 80% de carvão vegetal, com o auxílio de um tubo de PVC de 190 mm de diâmetro interno.

Dessa forma primeiramente determinou-se o volume do leito de sinterização (câmara de combustão) que apresenta 158 mm de diâmetro interno e 700 mm de altura. No entanto a mistura a ser sinterizada não preenche a altura total do leito, pois existe uma grelha que é inserida na região inferior do leito com 50 mm de altura e uma camada de seixo de 10 mm adicionada como proteção da grelha a elevadas temperaturas, logo o volume do leito é calculado para uma altura de 640 mm.

Realizada as medidas dos percentuais em volume de pelotas e carvão pesavam-se esses materiais para a verificação das massas que vão alimentar o reator.

3.3.4 Mistura de alimentação do reator

Após a classificação, análises, medições dos percentuais em volume e de massa das pelotas e do carvão, esses materiais foram homogeneizados manualmente em um recipiente plástico. A mistura devidamente preparada foi submetida a secagem por 24 horas a 105 °C, em estufa com recirculação de ar e em seguida introduzida em um reator de leito fixo para ser sinterizada. Com o leito preenchido, foi determinada a massa específica, bem como a porosidade do leito para cada experimento de acordo com a Equação 3.2.

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\rho_p A H} \quad (\text{Equação 3.2})$$

Onde:

ε : Porosidade

m_p : massa da partícula

ρ_p : massa específica da partícula

A: área

H: altura

3.3.5 Reator de leito fixo

O reator de leito fixo, dispositivo experimental adaptado a partir do trabalho desenvolvido na Universidade de Toulouse por Martins (2008), foi construído para obtenção do agregado sintético deste estudo.

O equipamento foi projetado para permitir um processo de combustão em corrente unidimensional, sendo constituído por uma câmara de combustão cilíndrica vertical de 158 mm de diâmetro interno e uma altura de 700 mm. O diâmetro foi escolhido para ser grande o suficiente para limitar as perdas de calor através das paredes, mas estreito o suficiente para evitar o uso de grandes quantidades de material a ser sinterizado.

O leito fixo foi produzido em aço carbono de 1/8" de espessura, entre a câmara de combustão e o cilindro vertical externo de 164 mm de diâmetro, foi adicionado lã de rocha com a finalidade de ser utilizado como isolante térmico (Figura 3.8). Uma grelha de aço carbono foi localizada na parte inferior da câmara.



Figura 3.8 – Lã de rocha contida no reator

Ao longo da região vertical do reator, sete termopares (os dois primeiros a partir da parte superior do reator do tipo K e os demais do tipo S) foram introduzidos nos furos localizados em diferentes alturas, sendo possível medir a temperatura ao longo do eixo da célula de combustão (Figura 3.9 a e b). Um termopar do tipo K foi adicionado para medir a temperatura da parede do cilindro externo e outro também do Tipo K foi colocado no tubo interno na região inferior ao reator para medir a temperatura dos gases de combustão. Os termopares do tipo S foram introduzidos nas regiões onde possivelmente detectavam-se temperaturas mais elevadas em função do acúmulo de energia na forma de calor.

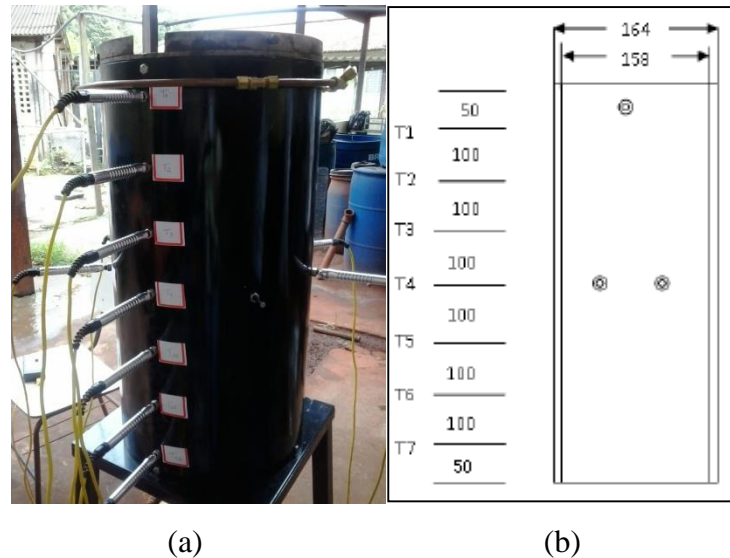


Figura 3.9 – Distribuição dos termopares

3.3.6 Protocolo dos experimentos

A realização dos experimentos seguiu um protocolo inicial referente à preparação do dispositivo experimental, alimentação da mistura ao reator, ajuste do diferencial de pressão entre a entrada e a saída do reator e ignição do processo de combustão.

I. Preparação do dispositivo experimental:

O preparo do dispositivo experimental realizado 24 horas antes do experimento, para promover de forma eficaz os ajustes necessários ao equipamento, iniciava com a adição de uma grelha de aço carbono na parte inferior da câmara de combustão do reator, a qual se acoplava a um tubo de aço zincado de 100 mm de diâmetro conectado a um exaustor, utilizado para succionar o ar que contém o comburente da reação e transportar os gases de combustão. Nesta primeira fase é importante que o leito de sinterização, a grelha e o tubo de aço zincado estejam limpos, não apresentando resquícios de materiais dos experimentos anteriores, para evitar a obstrução da passagem de ar, podendo a vir prejudicar o processo de combustão e consequentemente sinterização.

Após a etapa anterior colocavam-se os termopares em diferentes regiões do reator e na saída do mesmo, conforme descrito no tópico 3.3.5. Para promover a vedação nas folgas formadas em torno dos termopares e da região entre o reator e a grelha, utilizava-se uma massa de argila previamente umedecida com água até que apresentasse uma textura de massa de modelar, e posteriormente para garantir um bloqueio completo adicionava-se sobre essa massa um selante para motor que resiste até 315 °C.

Em seguida na saída do reator, próximo ao transmissor de temperatura dos gases de combustão, conectava-se um manômetro em U para constatar a passagem do fluxo de ar no início do experimento, utilizando a água como fluido manométrico. Da mesma forma para os termopares fez-se a vedação na conexão entre a saída do reator e o manômetro. Esse parâmetro (diferencial de pressão) foi utilizado para calcular a velocidade de Darcy a 20 °C em cada experimento.

Após as 24 horas do término da vedação do equipamento, conectavam-se os termopares ao equipamento *Paperless Recorder* do tipo PHL (Figura 3.10), no qual se programava cada termopar disponível e o tempo para a aquisição dos dados de temperatura, estabelecido para este estudo a cada 5 segundos.



Figura 3.10 – *Paperless Recorder* do tipo PHL

II. Alimentação da mistura ao reator:

Após a secagem da mistura que compõe a corrente de alimentação do reator foi realizado o preenchimento do leito de sinterização, com o auxílio de um Becker de 1000 ml, onde se adicionava a mistura de forma gradativa garantindo a acomodação do leito.

III. Ajuste do diferencial de pressão:

Com o leito preenchido, a variação de pressão foi medida através de um manômetro em U utilizando água como fluido manométrico, com o auxílio de uma válvula globo localizada próxima ao exaustor, antes de iniciar cada experimento.

IV. Ignição do processo de combustão:

A ignição do combustível foi induzida pelo fluxo de calor proveniente de um maçarico, localizado na parte superior do reator, conectado ao gás GLP que proporciona uma chama regulável, dando início ao experimento (Figura 3.11).



Figura 3.11– Sistema de ignição

Ao registrar 700 °C pelo primeiro termopar do reator, obtida em torno de 30 minutos oscilando para mais em função de cada experimento, a chama regulável era cessada e a partir desta temperatura o processo de combustão ocorria de forma autônoma ao longo do leito reacional. A temperatura de ignição foi adaptada de Martins (2008). A Figura 3.12 apresenta o desenho esquemático do dispositivo experimental.

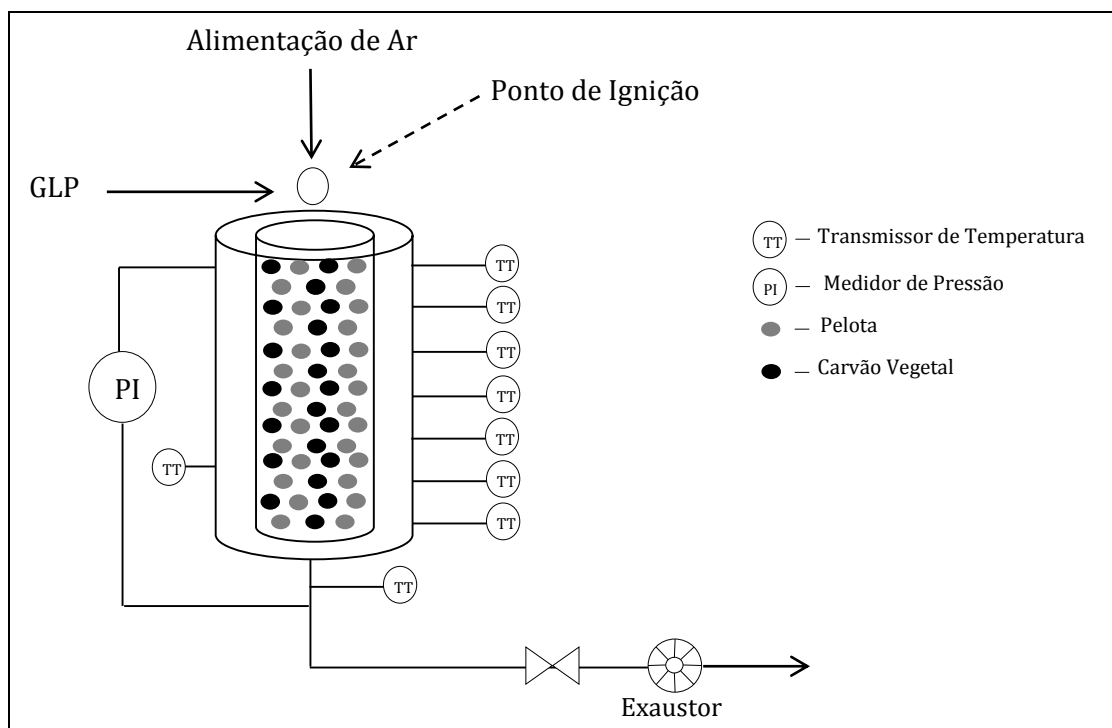


Figura 3.12 - Desenho esquemático do dispositivo experimental

3.3.7 Agregado sintético produzido

Após a sinterização no dispositivo experimental obteve-se os agregados sintéticos de tamanhos variados, conforme pode ser observado na Figura 3.13 (a) e (b).

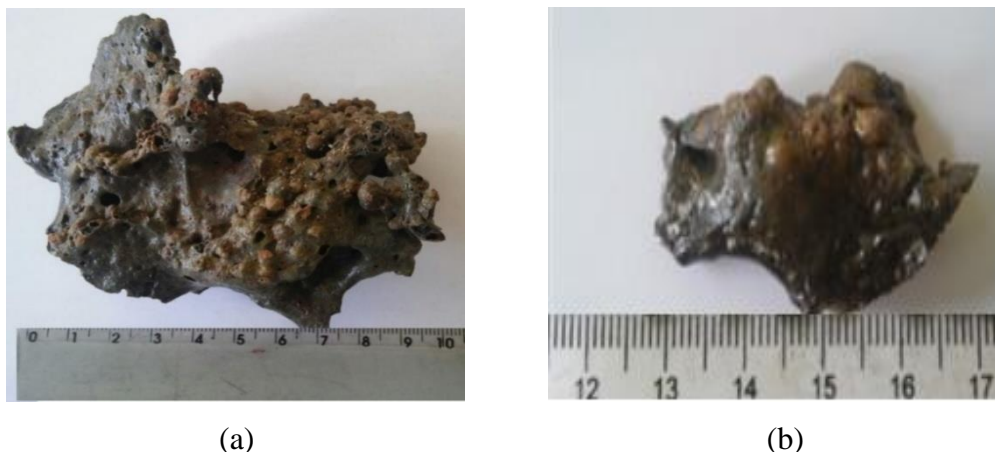


Figura 3.13 – Agregados produzidos

No produto obtido fez-se uma britagem primária e posteriormente a distribuição granulométrica segundo a ABNT NBR 7211:2009, determinação das propriedades cerâmicas, segundo Santos (1989), microscopia eletrônica de varredura e difração de raios-X, conforme a metodologia descrita anteriormente para esta última análise.

A identificação da morfologia microestrutural de uma amostra do material sinterizado, foi realizada no laboratório de engenharia química da UFPA e consistiu em: embutimento do material com resina acrílica e líquido acrílico autopolimerizável (Figura 3.14), tratamento da superfície com o uso de lixas d'água e politriz seguida de ataque químico com ácido fluorídrico a 10% (v/v) durante 5 segundos para retirar a camada vítrea do material e auxiliar na visualização dos elementos microestruturais. Esta última etapa foi realizada segundo Callister (2008).

As micrografias dessa análise, foram obtidas por elétron retroespalhado utilizando microscópio eletrônico de varredura da marca Hitachi, cujo o modelo é TM3000 tabletop microscope.



Figura 3.14 – Embutimento do agregado sintético

Na determinação das propriedades cerâmicas, amostras do material sinterizado foram pesadas para definir a massa de sólido seco. Em seguida mergulharam-se as amostras em um recipiente contendo água (em certos casos, algumas flutuavam na água, em vista disso, foi utilizado álcool comum como alternativa) por 24 horas. Decorrido este período, foi determinada a massa úmida. Em seguida, colocou-se a balança em um aparato de madeira acoplado a uma haste de aço, conforme a Figura 3.15, para obter a massa imersa, uma vez que este está mergulhado em um recipiente com água suficiente para cobrir a amostra a ser analisada.



Figura 3.15 - Aparato para obter a massa imersa

Após a medida das massas, determinavam-se as propriedades cerâmicas: Porosidade Aparente (PA), Absorção de Água (AA) e Massa Específica Aparente (MEA), utilizando as Equações 3.3, 3.4 e 3.5, respectivamente.

$$PA(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_u - M_i} \cdot 100$$

(Equação 3.3)

$$AA(\%) = \frac{M_u - M_s}{M_s} \cdot 100$$

(Equação 3.4)

$$MEA[g.cm^{-3}] = \frac{M_s}{M_u - M_i} \cdot \rho_{H_2O}$$

(Equação 3.5)

Onde:

M_s : Massa da amostra seca em gramas;

M_u : Massa da amostra úmida em gramas;

M_i : Massa da amostra imersa em gramas;

$\rho_{padrão}$: Massa específica da substância padrão em $kg.m^{-3}$.

A Figura 3.16 a seguir apresenta o fluxograma do processo de produção do agregado sintético.

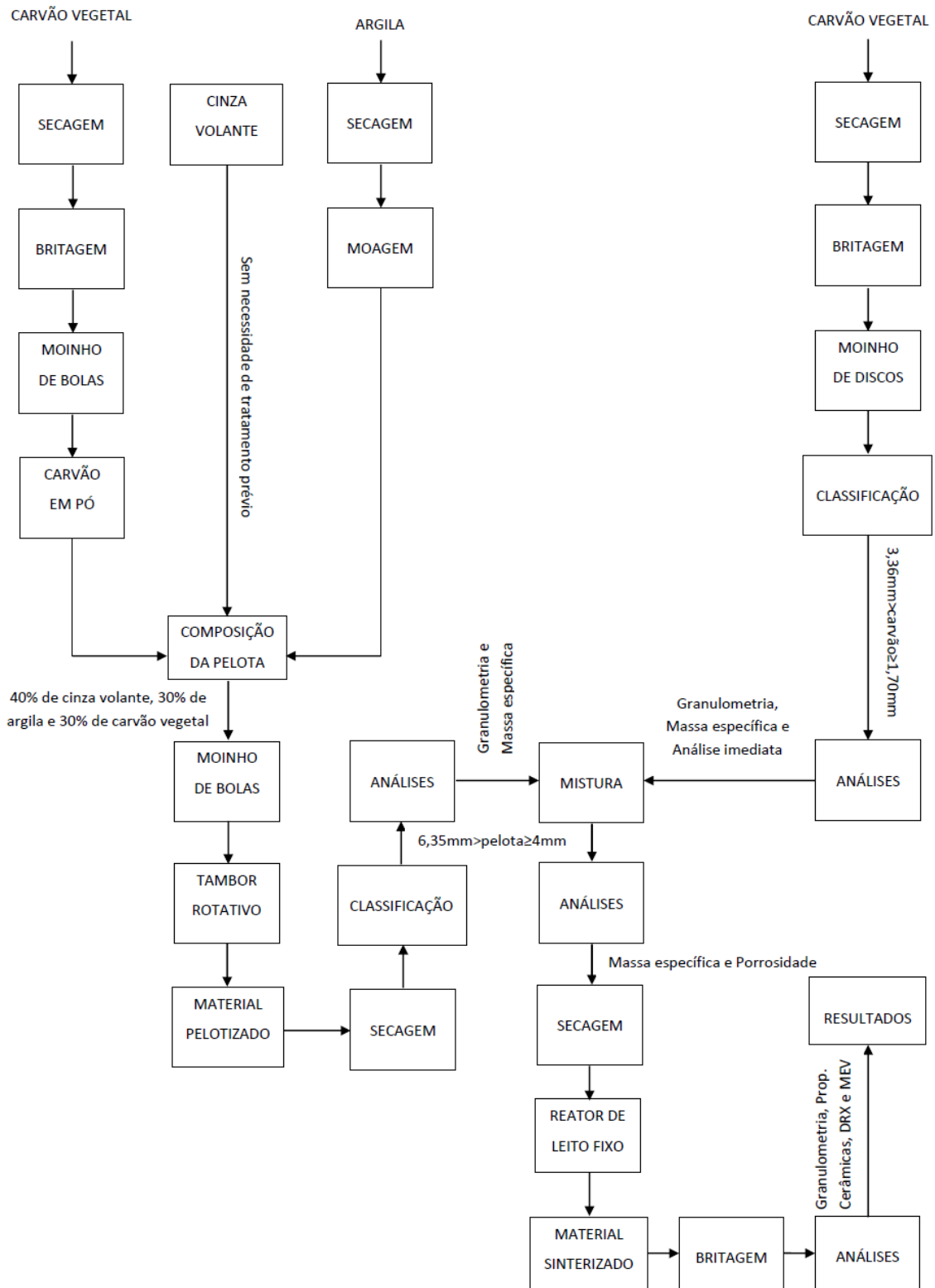


Figura 3.16 – Fluxograma do processo de produção do agregado sintético.

3.4 PROCESSO DE PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

Nesta etapa do trabalho, apresenta-se a metodologia aplicada para a produção dos concretos utilizando os agregados sintéticos obtidos em cada experimento e o agregado convencional (seixo rolado), respectivamente. Os materiais empregados neste processo estão apresentados na Figura 3.17.

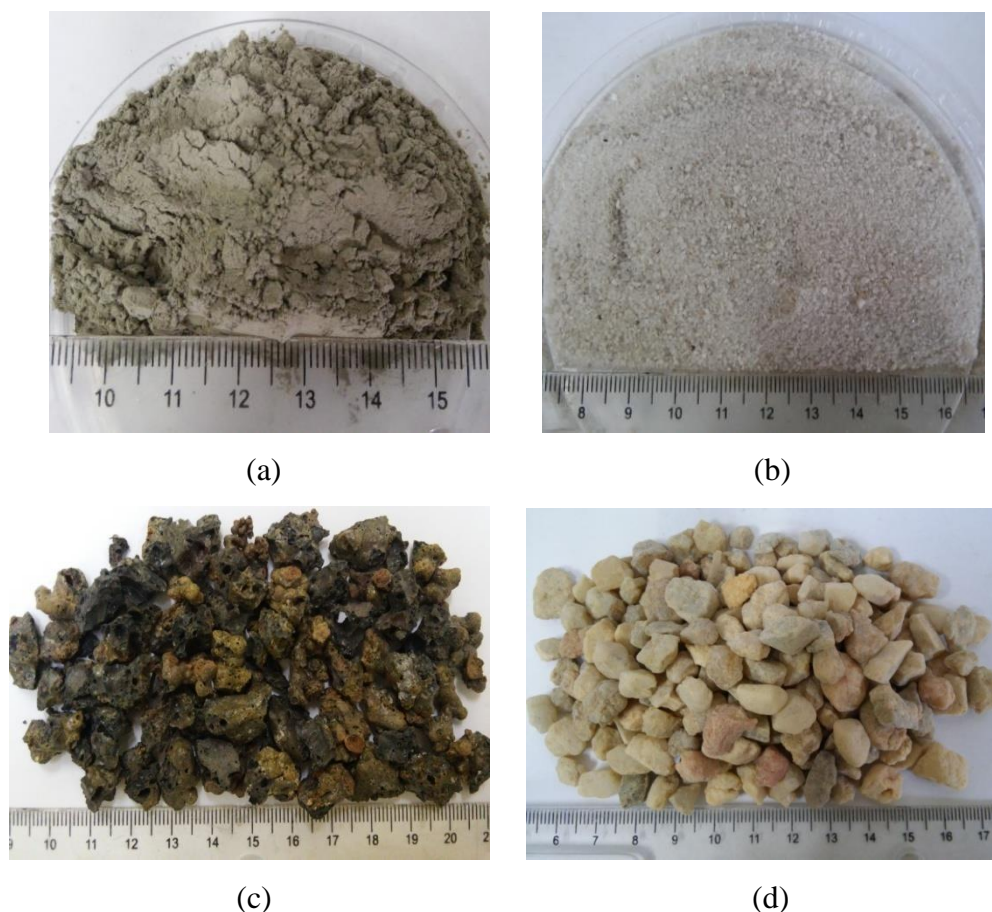


Figura 3.17 – (a) Cimento, (b) Areia, (c) Agregado sintético e (d) Seixo rolado.

O cimento Portland CP II-E-32 e a areia, encontravam-se disponíveis no Laboratório em que os concretos foram produzidos. O seixo rolado foi cedido pelo Laboratório de Engenharia Civil da Universidade Federal do Pará e o agregado sintético obtido por sinterização em reator de leito fixo neste trabalho.

A produção dos concretos foi realizada no Laboratório de Engenharia Química da UFPA, onde primeiramente fez-se a caracterização quanto ao tamanho de partículas da areia, agregado sintético e seixo rolado, mediante análises granulométricas de acordo com a normatização referente a ABNT NBR 7211:2009. No seixo rolado também realizou-se as medidas de suas propriedades cerâmicas e o agregado sintético de forma específica foi

britado para adequar seus tamanhos às dimensões do molde dos corpos de prova de concreto para em seguida ser caracterizado.

Após essas análises realizou-se a produção dos concretos utilizando 100% de agregado sintético, formando os seguintes grupos: 1º Experimento (CAS1ºEXP), 2º Experimento (CAS2ºEXP) e 3º Experimento (CAS3ºEXP). Outro grupo foi produzido com 100% de seixo rolado (CSR), para servir como referência.

Nesta pesquisa o traço definido de 1:1,20:1,24:0,70 em massa para todos os grupos, foi adaptado do Método Brasileiro para dosagem de concretos, onde a relação água/cimento (a/c) foi estabelecida em 0,70.

A partir do traço estabelecido fez-se a mistura dos materiais em um recipiente e posteriormente foram moldados corpos de prova com dimensões de 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, conforme a ABNT NBR 5738:2003.

Após 24 horas da etapa de moldagem iniciaram a desforma dos corpos de prova, os quais foram submetidos à processo de cura em temperatura ambiente, onde borrifos de água eram adicionados aos corpos de prova, duas vezes ao dia até completar a idade de 7 e 28 dias para a realização das análises. A Tabela 3.3 mostra a quantidade dos corpos de prova (CP) moldados para cada grupo de concreto.

Tabela 3.3 – Número de corpos de prova moldados

Grupos de concretos	Nº de corpos de prova	
	7 dias	28 dias
CSR	5	5
CAS1ºEXP	5	5
CAS2ºEXP	5	5
CAS3ºEXP	5	5

Nos concretos, foram realizadas análises de resistência a compressão axial simples com idade de 7 e 28 dias, no laboratório de engenharia civil da UFPA, enquanto que as propriedades cerâmicas e microscopia eletrônica de varredura foram feitas nos concretos com 28 dias, no laboratório de engenharia química da UFPA.

A Figura 3.18 mostra o fluxograma do processo de produção dos concretos.

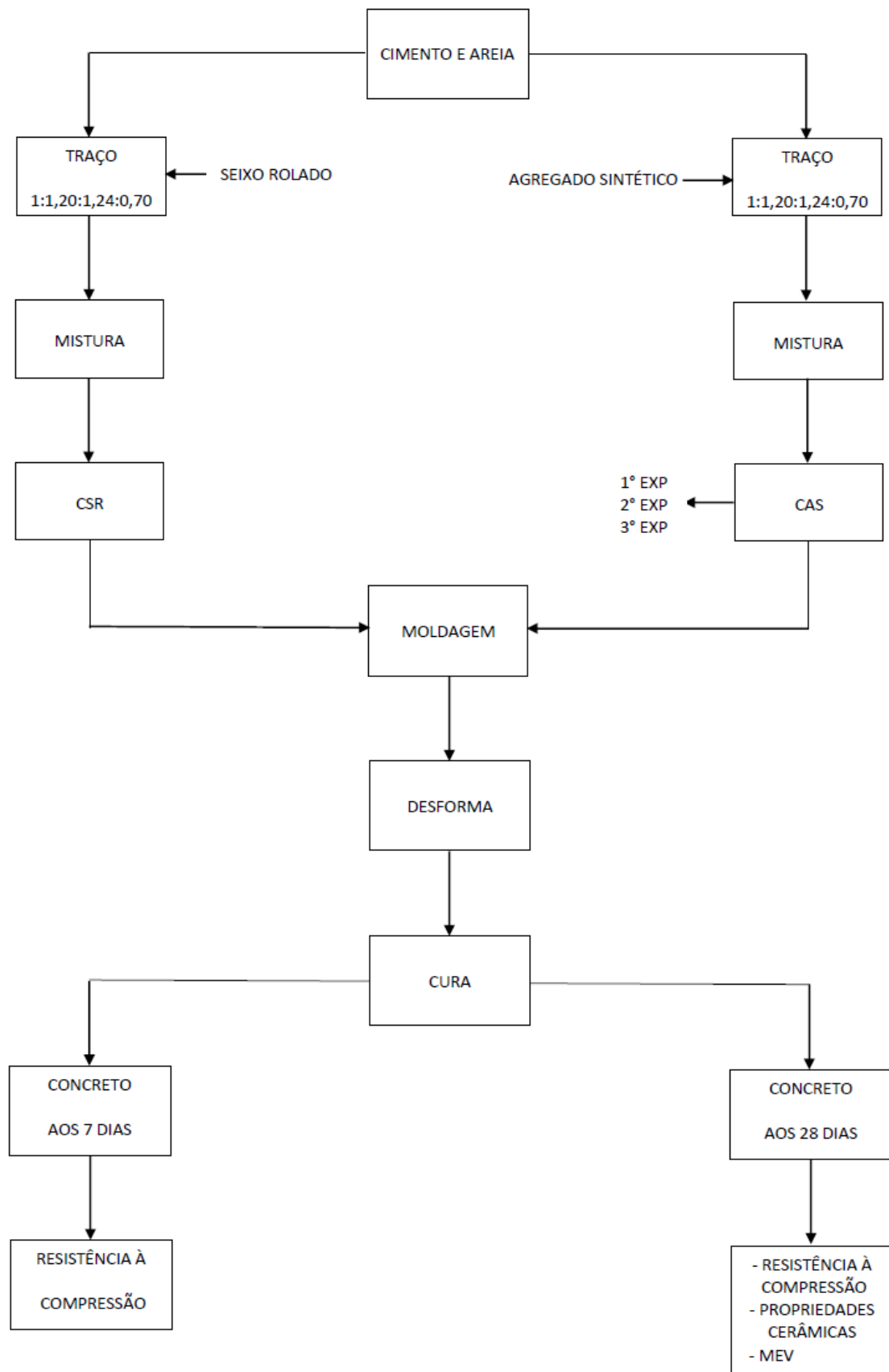


Figura 3.18 – Fluxograma do processo de produção dos concretos

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO DAS MATÉRIAS PRIMAS

O capítulo 4 apresenta os resultados de caracterização das matérias primas para a produção do agregado sintético e dos concretos.

4.1 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DO AGREGADO SINTÉTICO

4.1.1 Cinza volante

A Tabela 4.1 apresenta a composição química por fluorescência de raios-X. Observa-se que às concentrações dos óxidos de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 classificam a cinza volante como classe C, uma vez que a soma de suas concentrações é maior que 50%, evidenciando propriedades cimentantes e pozzolânicas, de acordo com a ASTM C618. Verifica-se ainda na composição química da cinza volante a presença de cátions vitrificantes (potássio e sódio) que auxiliam nas reações de estado sólido, como as reações de formação do vidro e mulita, de acordo com (MÖRTEL e HEIMSTADT, 1994 *apud* SOUZA, 2010).

Tabela 4.1 - Composição química da cinza volante

Elementos	Teor (%)
Na_2O	0,941
MgO	1,836
Al_2O_3	16,399
SiO_2	42,53
P_2O_5	0,194
S	-
K_2O	1,61
CaO	19,005
TiO_2	0,897
MnO	0,073
Fe_2O_3	7,081
SO_3	9,208

Na Figura 4.1 consta o difratograma de raios-X, o qual evidencia a presença das fases calcita, quartzo e alumina. A presença da calcita está ligada ao processo de dessulfuração interna durante a combustão do carvão mineral, onde calcário (CaCO_3) é inserido para reduzir as emissões de gases como o enxofre (SO_2) na atmosfera, segundo Siqueira *et al* (2012); a formação de quartzo é justificada pela presença de sílica em temperaturas acima de $500\text{ }^\circ\text{C}$ segundo o diagrama de fases. Outro aspecto que justifica tanto a presença de quartzo (SiO_2) quanto a formação de alumina (Al_2O_3), está vinculada ao fato de que estas fases presentes originalmente no carvão se mantêm durante todo o processo, uma vez que a temperatura de processamento de produção de carvão normalmente inferior a $1.000\text{ }^\circ\text{C}$, não é suficiente para destruir essas estruturas (ROCHA *et al.*, 2012).

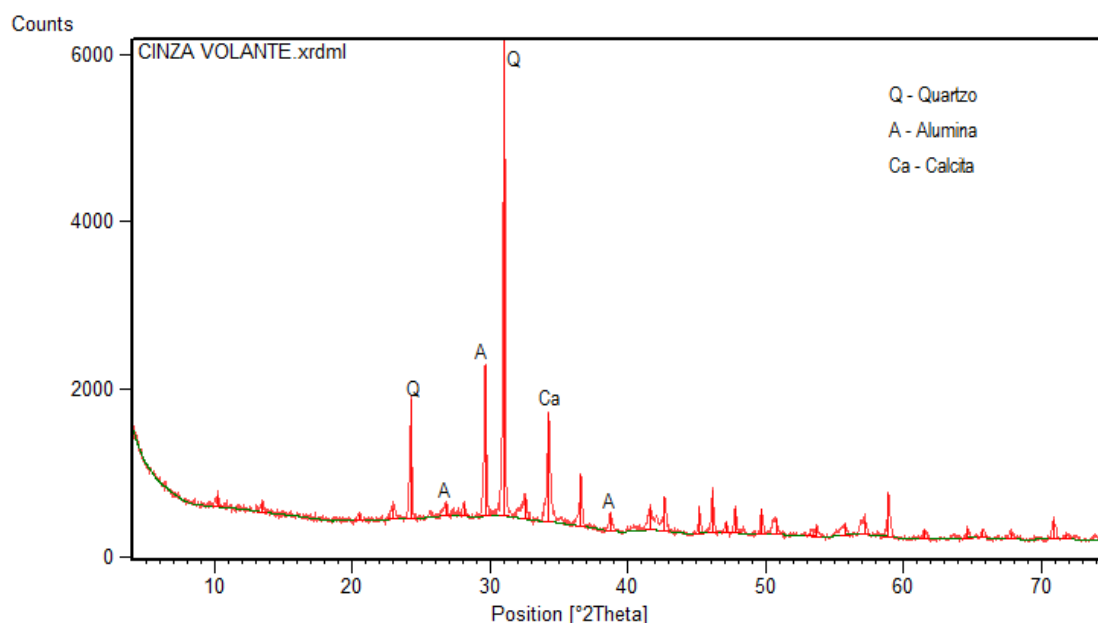


Figura 4.1 – Difratograma de raios-X da cinza volante

A Figura 4.2 mostra o resultado da análise granulométrica desta matéria prima. Aplicando os valores obtidos a partir desta análise na Equação 3.1, obteve-se um diâmetro médio de $0,01087\text{ mm}$.

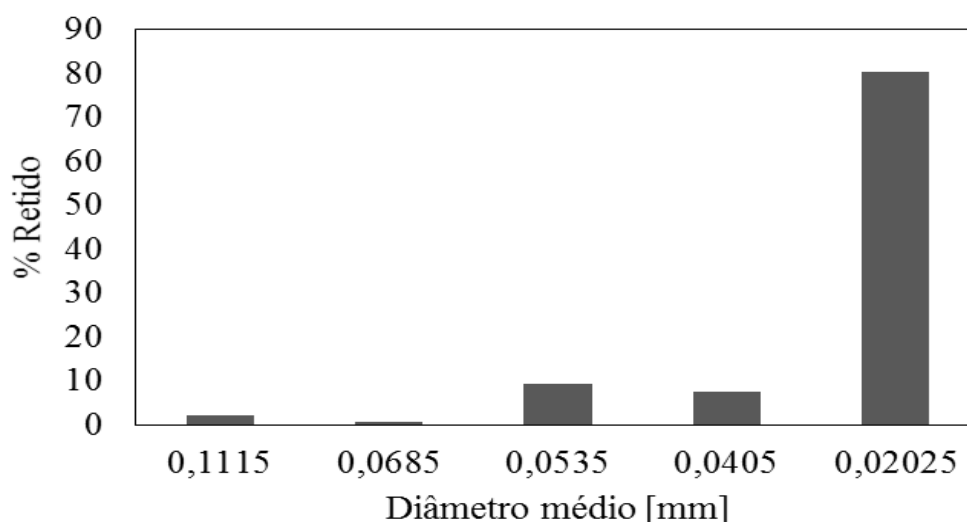


Figura 4.2- Distribuição granulométrica da cinza volante

4.1.2 Argila

A Tabela 4.2 é constituída pela análise química da argila, onde verifica-se um material com elevado teor relativo de alumina (Al_2O_3) e sílica (SiO_2). Observa-se também na análise química da argila a presença dos cátions vitrificantes, sódio e potássio, que auxiliam nas reações de vitrificação e formação de mulita (MÖRTEL e HEIMSTADT, 1994 *apud* SOUZA, 2010).

Tabela 4.2 - Composição química da argila

Constituintes	(% peso)
SiO_2	48,18
Al_2O_3	19,56
TiO_2	2,02
Fe_2O_3	9,38
CaO	0,73
MgO	1,24
K_2O	2,79
Na_2O	1,6
P.F (perda ao fogo)	14,50

No difratograma de raios-X presente na Figura 4.3, observa-se uma predominância de picos de difração das fases cristalinas de quartzo e picos de caulinita

com baixa cristalinidade, caracterizando este resultado consistente com os dados da análise química por fluorescência de raios-X, que mostra uma alta concentração de sílica.

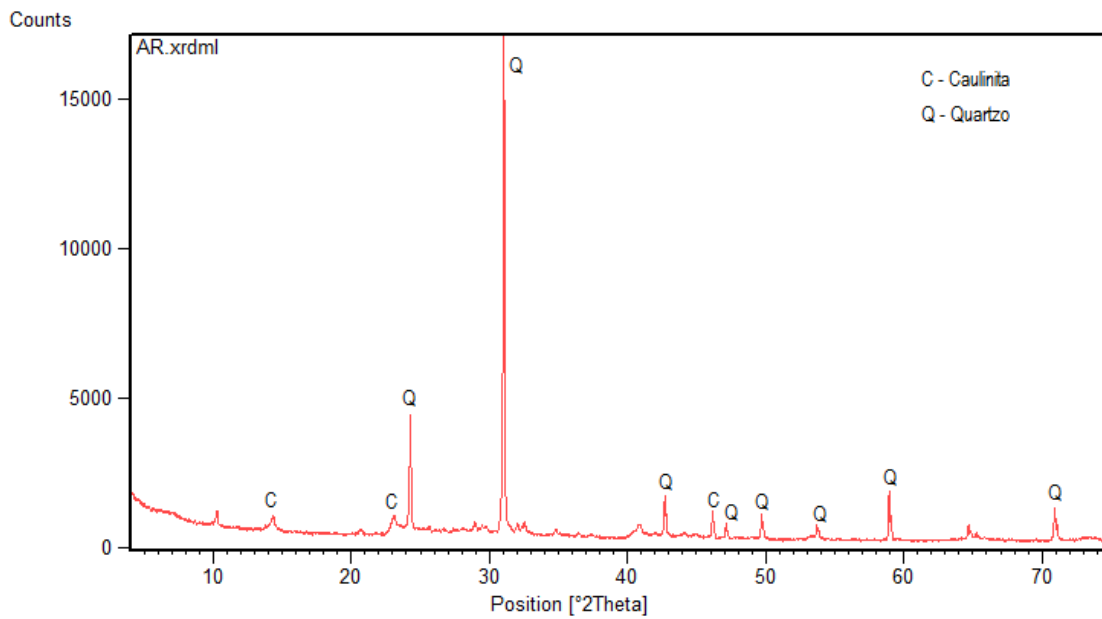


Figura 4.3- Difratograma de raios-X da argila

Observa-se na análise granulométrica que 98,17% do material tem tamanho de partículas abaixo da malha de 400 Mesh em peneira Tyler com diâmetro médio de 0,0210 mm, conforme a Figura 4.4.

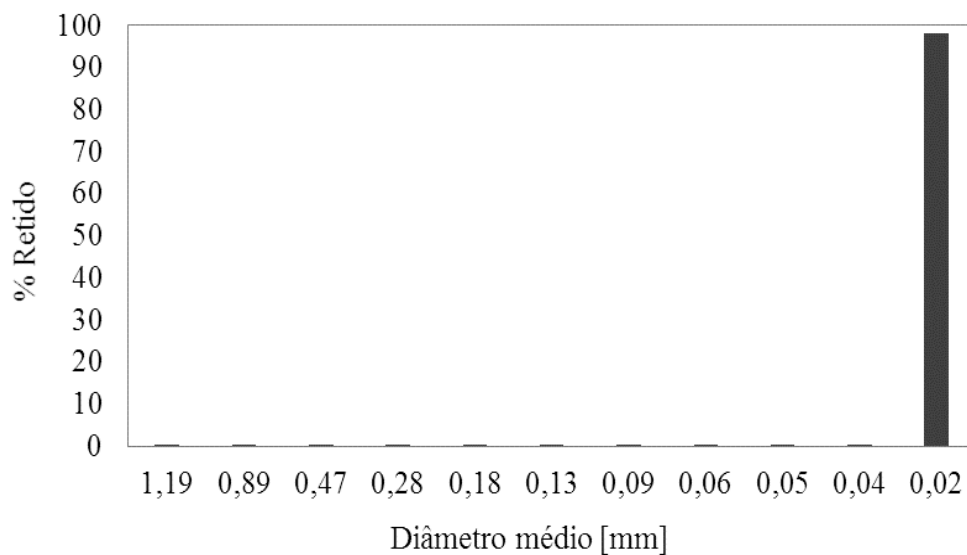


Figura 4.4 – Distribuição granulométrica da argila

4.1.3 Carvão vegetal

A caracterização do carvão vegetal, com relação ao difratograma de raios-X visualizado na Figura 4.5, evidenciou a formação das respectivas fases mineralógicas grafite e calcita. A presença da primeira fase relaciona-se com a constituição característica da matéria prima enquanto que a presença de calcita está relacionada ao processo de fabricação do carvão apresentando-se como contaminante neste material.

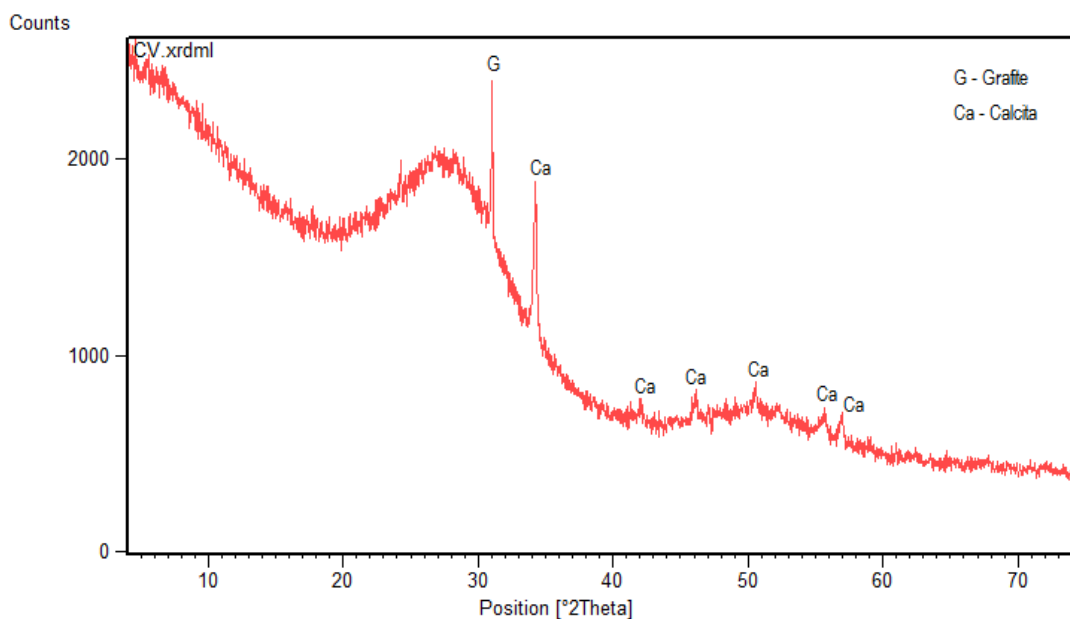


Figura 4.5 – Difratograma de raios-X do carvão vegetal

Quanto a análise imediata deste material referente a determinação do teor de umidade (%U), matérias voláteis (%MV), cinzas (%Z) e carbono fixo (%CF), apresentou um elevado teor de carbono como pode ser observado na Tabela 4.3.

Valores	%U	%MV	%Z	%CF
	4,71	15,24	19,48	65,28

4.2 MATÉRIAS PRIMAS PARA A PRODUÇÃO DOS CONCRETOS

4.2.1 Cimento

A Tabela 4.4 apresenta algumas exigências físicas e mecânicas do cimento Portland CP II-E-32.

Características e propriedades	Limites
Finura: resíduo na peneira 75 μm	$\leq 12,0 \%$
Tempo de início de pega	$\geq 1 \text{ h}$
Tempo de fim de pega	$\leq 10 \text{ h}$
Resistência à compressão aos 28 dias	$\geq 32 \text{ MPa}$

Fonte: ABNT NBR 11578, 1991.

4.2.2 Areia

A Figura 4.6 mostra a distribuição granulométrica da areia apresentando um diâmetro médio de 0,37 mm, o que permite classificar a areia como agregado miúdo segundo a ABNT NBR 7211:2009.

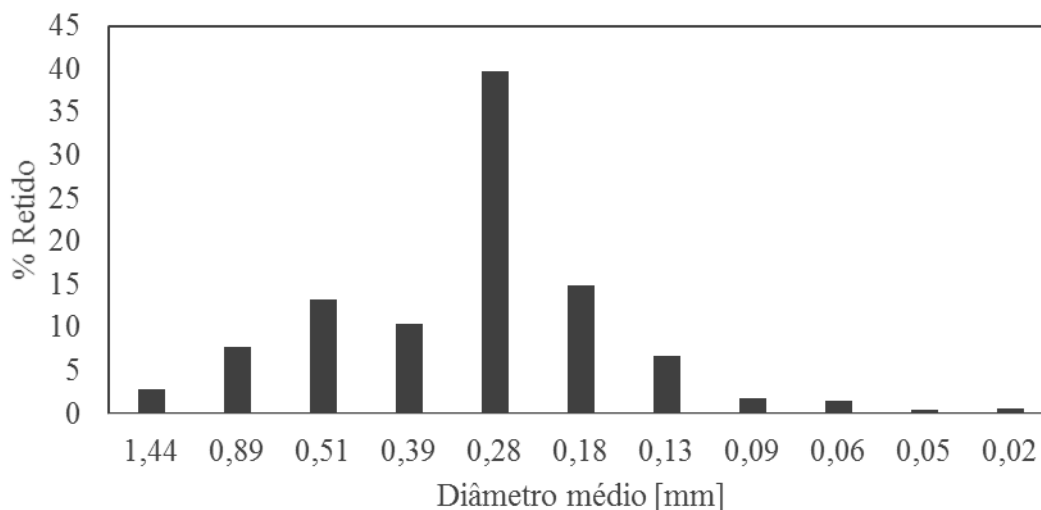


Figura 4.6 – Distribuição granulométrica da areia

4.2.3 Seixo rolado

Observa-se na Figura 4.7 a distribuição granulométrica do seixo rolado com diâmetro médio de 7,07 mm, o que permite classificar este agregado quanto ao seu tamanho, como agregado graúdo segundo a ABNT NBR 7211:2009. Observa-se que a curva de distribuição do seixo rolado não apresentou uma curva Gaussiana, característico

desse material, pois o seixo já havia passado por peneiramento antes de ser utilizado neste trabalho, onde a maioria das partículas estavam retidas na malha de abertura 6,5 mm.

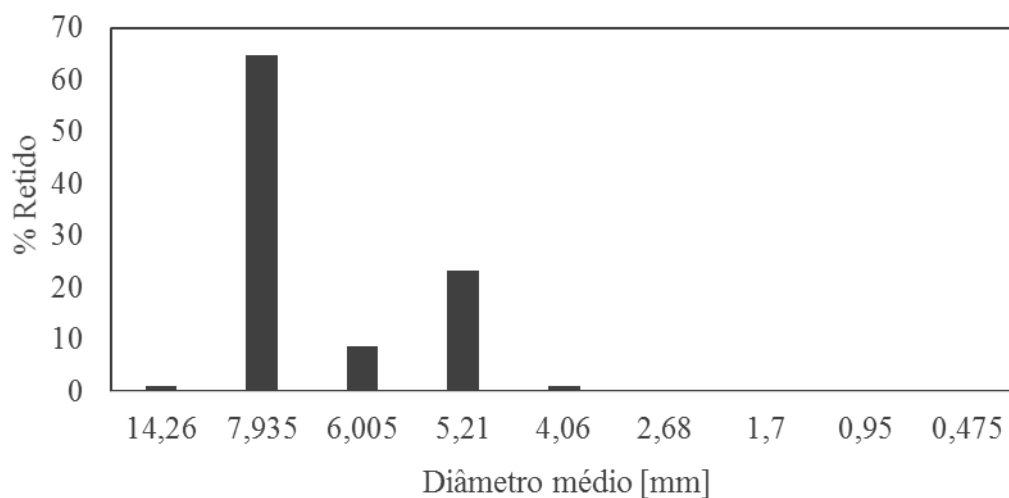


Figura 4.7 – Distribuição granulométrica do seixo rolado

A Tabela 4.5 apresenta os resultados das medidas das propriedades cerâmicas do agregado natural (seixo rolado), onde as abreviaturas PA é a Porosidade Aparente, AA corresponde a Absorção de Água e MEA a Massa Específica Aparente. Observa-se por meio do resultado de massa específica aparente que este agregado é classificado como normal, pois apresentou massa específica superior a 2 g.cm^{-3} , de acordo com a ABNT NBR 9935:2011.

Tabela 4.5 – Medida das propriedades cerâmicas do seixo rolado

Propriedades	PA (%)	AA (%)	MEA [g.cm^{-3}]
Seixo rolado	1,94	0,75	2,60

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O quinto capítulo está dividido em quatro seções, onde são apresentados os resultados obtidos e as respectivas discussões. A primeira seção refere-se às análises de caracterização dos materiais preparados (pelotas e carvão granulado) para a produção do agregado sintético. A segunda seção refere-se aos dados obtidos durante o processo de sinterização, neste são apresentados as características da evolução da temperatura, perfil de temperatura e velocidade da frente de combustão, analisados em cada experimento. A terceira seção mostra os resultados das análises realizadas no agregado sintético produzido após o processo de sinterização utilizando o dispositivo experimental, reator vertical de leito fixo. A quarta e última seção, estende-se à aplicação do produto obtido, agregado sintético, na produção de concretos, com a finalidade de avaliar a influência dos agregados no comportamento mecânico destes materiais.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS PELOTAS E DO CARVÃO GRANULADO

5.1.1 Análise de distribuição granulométrica

5.1.1.1 Pelotas

As Figuras 5.1 a 5.3 mostram as curvas de distribuição granulométrica das pelotas preparadas para o 1º, 2º e 3º experimento. O diâmetro médio destes materiais foi de 5,25 mm, 5,23 mm e 5,25 mm, respectivamente, garantindo de modo satisfatório a porosidade do leito para permitir o fluxo do ar e a consequente propagação da frente de combustão.

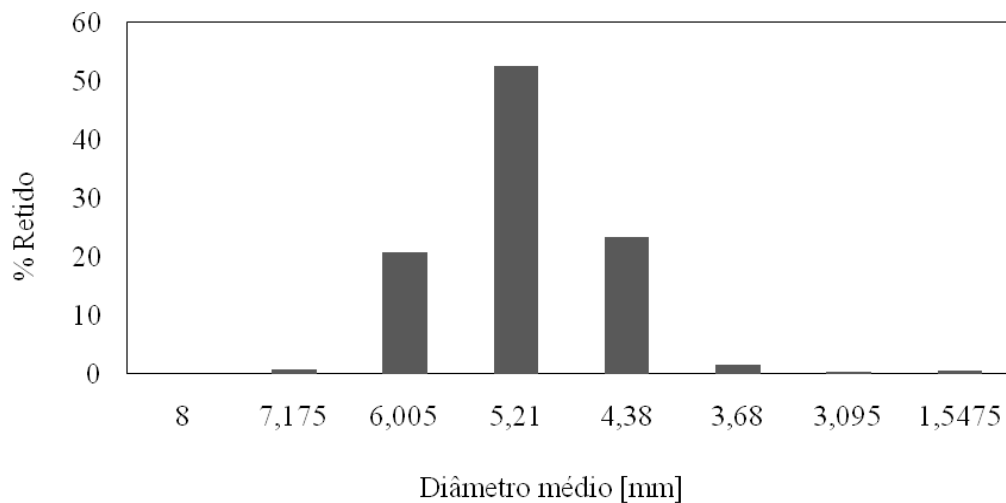


Figura 5.1 – Distribuição granulométrica das pelotas para o 1º Experimento

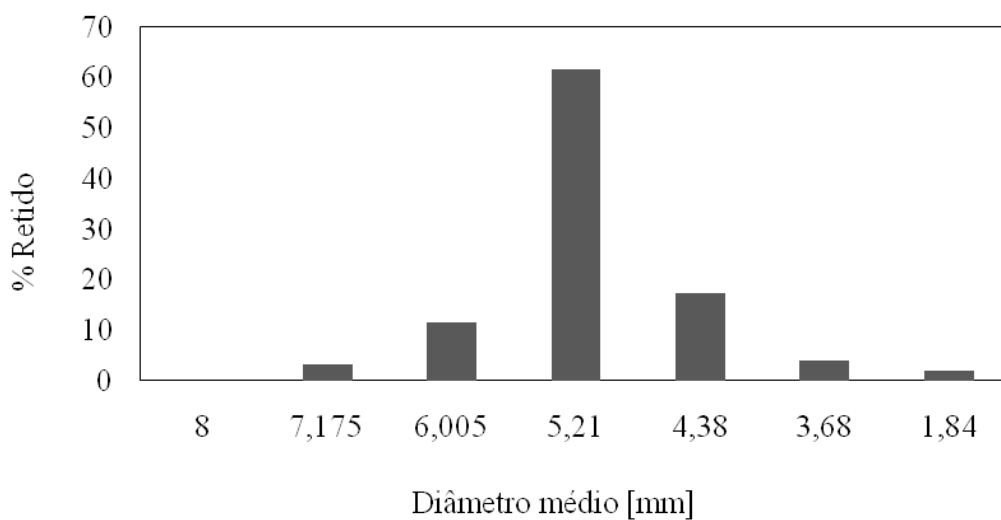


Figura 5.2 – Distribuição granulométrica das pelotas para o 2º Experimento

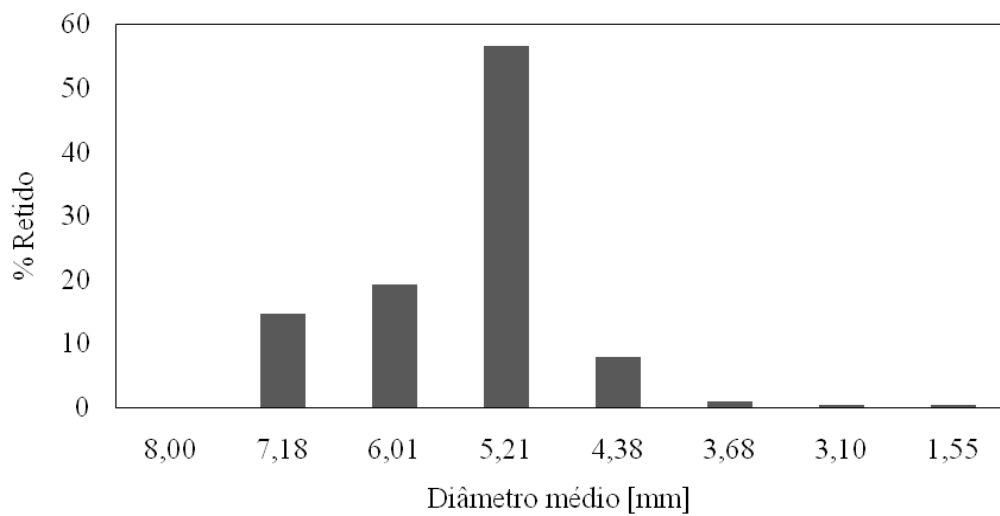


Figura 5.3 – Distribuição granulométrica das pelotas para o 3º Experimento

As distribuições granulométricas das pelotas apresentaram resultados semelhantes no que tange ao diâmetro médio das mesmas, para cada experimento, pois os valores não distaram de modo significativo, o que mostra a reprodutibilidade da utilização da metodologia experimental.

5.1.1.2 Carvão vegetal granulado

Os resultados das análises granulométricas do carvão granulado que preencheu 80% do leito de sinterização em cada experimento, estão expostos nas Figuras 5.4 a 5.6, com diâmetro médio de 2,07 mm 2,17 mm, 2,15 mm, respectivamente. Os resultados apresentaram boa reprodutibilidade.

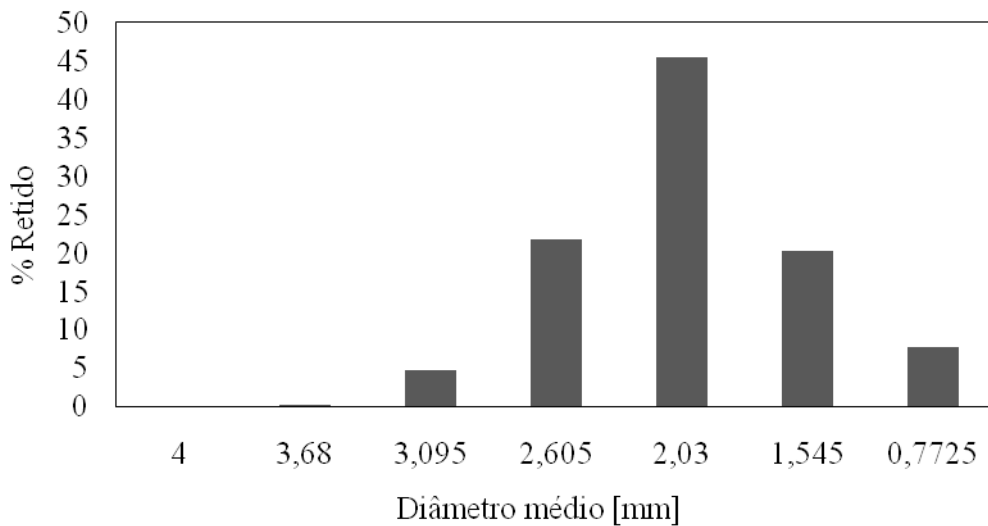


Figura 5.4 – Distribuição granulométrica do carvão granulado para o 1º Experimento

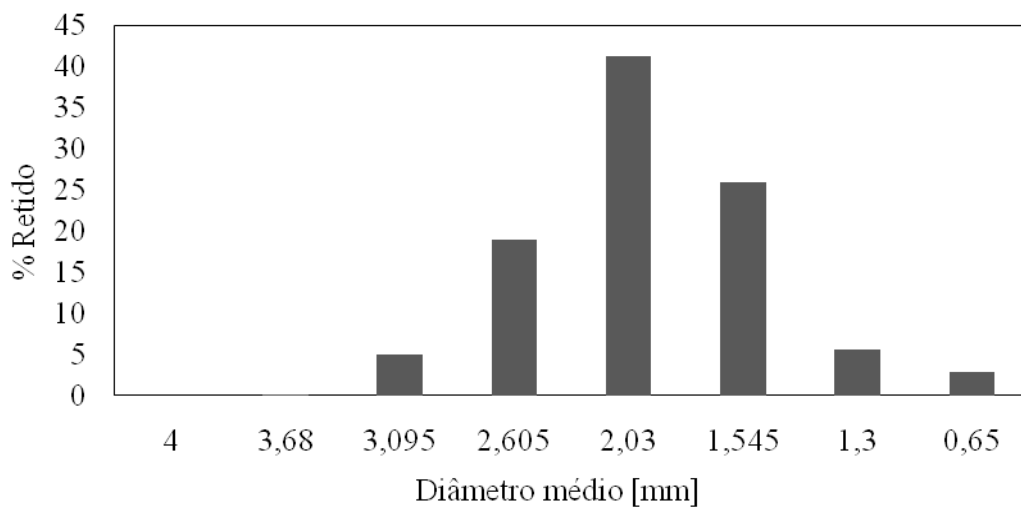


Figura 5.5 – Distribuição granulométrica do carvão granulado para o 2º Experimento

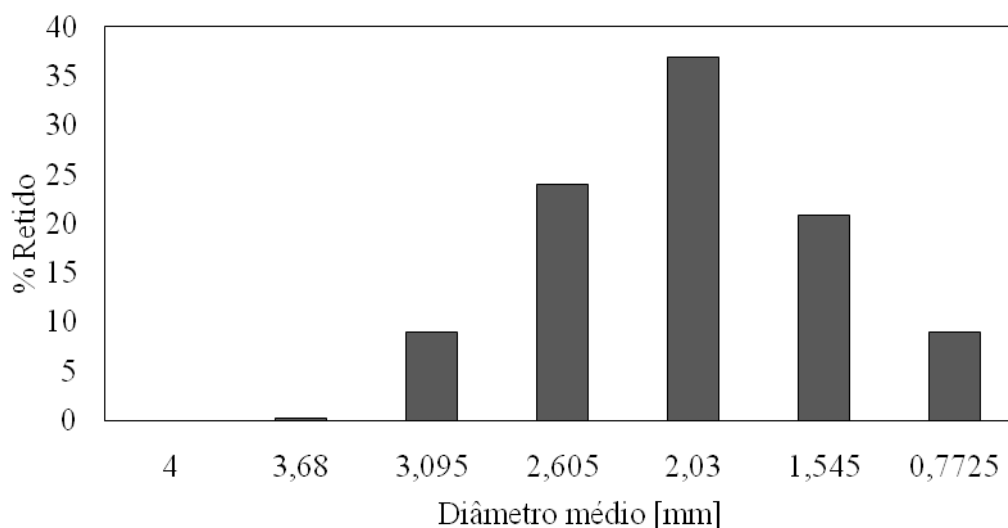


Figura 5.6 – Distribuição granulométrica do carvão granulado para o 3º Experimento

5.1.2 Medida de massa das correntes de alimentação do reator

Os resultados das medidas de massa dos percentuais em volume das pelotas e carvão granulado que formam a corrente de alimentação do reator, estão apresentados na Tabela 5.1.

Observa-se na Tabela 5.1 e nos resultados posteriores apenas a duplicata do 2º Experimento, em virtude de um dos ensaios ter sido realizado em uma composição (35% de cinza volante, 40% de carvão vegetal, 20% de argila e 5% de cimento) diferente dos demais, com o objetivo de que a adição de cimento promovesse resistência mecânica satisfatória as pelotas produzidas em função da elevada atividade pozolânica que esse material apresenta. No entanto, este fato não interferiu na confecção das pelotas com a composição sem adição de cimento, onde se verificou que a resistência mecânica era semelhante, dessa forma optou-se na escolha dos ensaios realizados com a composição estabelecida na Tabela 3.2 para os experimentos.

Tabela 5.1 – Massas obtidas a partir dos 20% de pelotas e 80% de carvão vegetal

Experimento	1º 0,0059 m.s ⁻¹			2º 0,0098 m.s ⁻¹		3º 0,017 m.s ⁻¹		
	1	2	3	1	2	1	2	3
Pelotas [g]	1.631,8	1.795	1.460	1.680	1.685	1.603,2	1.645	1.445
Carvão vegetal [g]	2.250	2.060	2.325	1.963	2.100	2.530,6	2.235	2.275

5.1.3 Análise de massa específica

A Tabela 5.2 apresenta os valores obtidos com a média das análises de massa específica para as pelotas, carvão granulado e do leito constituído pela mistura (pelota + carvão vegetal).

Tabela 5.2 – Massa específica dos materiais preparados

Material	Massa específica [g.cm ⁻³]		
	1º Experimento	2º Experimento	3º Experimento
Carvão vegetal	0,25	0,24	0,24
Pelota	0,57	0,55	0,56
Leito	0,31	0,30	0,31

Na Tabela 5.2 pode ser observado que a massa específica do leito apresentou um valor que pode ser considerado próximo ao obtido para o carvão vegetal, fato que é explicado em função do leito ser preenchido com 80% de carvão vegetal o que favorece o empacotamento do leito de tal forma que o fluxo do ar possa percorrer os espaços vazios que estão entre os grãos da mistura, permitindo que a combustão ocorra de forma gradativa, garantindo o processo de sinterização do material.

5.1.4 Porosidade

Com os dados de massa específica das pelotas e do carvão vegetal, volume do reator e das massas de mistura (pelota + carvão vegetal), foi determinada a porosidade do leito cujo os resultados estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Porosidade do leito

Leito	Porosidade
1º Experimento	0,63
2º Experimento	0,63
3º Experimento	0,61

Observa-se por meio dos resultados de porosidade que estes apresentaram similaridade, mostrando que a granulometria do leito manteve boa reprodutibilidade em cada experimento, visto que os valores não distaram de modo significativo, permitindo a permeabilidade do fluxo de ar e propagação da frente de combustão.

5.2 DADOS OBTIDOS DURANTE O PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO

5.2.1 Evolução da temperatura

Observa-se na Figura 5.7 a evolução da temperatura ao longo do leito de sinterização para o 1º Experimento com uma velocidade do ar de $0,0059 \text{ m.s}^{-1}$. Pode ser verificado em alguns experimentos a ausência de termopares, fato justificado, por em determinadas situações ocorrer problemas técnicos nesses instrumentos em função de elevações bruscas de temperatura, danificando os mesmos. A linha tracejada nos gráficos de evolução da temperatura em cada experimento, indicam o instante do corte da ignição.

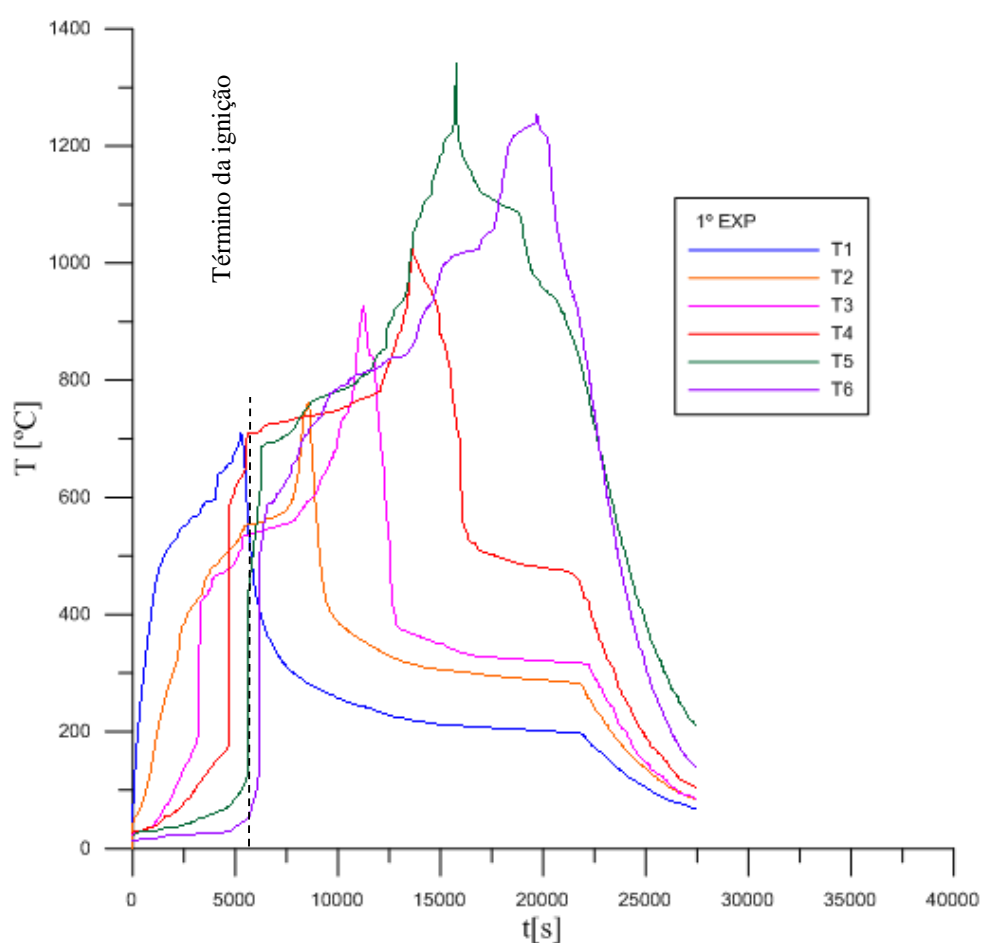


Figura 5.7 – Evolução da temperatura do 1º Experimento

A Figura 5.7 apresenta o registro de temperatura em cada termopar localizado na região vertical do reator. Constatam-se nessa figura, que as curvas representativas da evolução de temperatura possuem aspectos semelhantes em que a temperatura atingiu um valor máximo seguido de uma redução gradual, caracterizando o avanço da frente de

combustão. Neste ensaio experimental o máximo valor de temperatura registrado foi de 1.339,7 °C.

A evolução da temperatura para o 2º Experimento realizado com uma velocidade de 0,0098 m.s⁻¹, está representada na Figura 5.8.

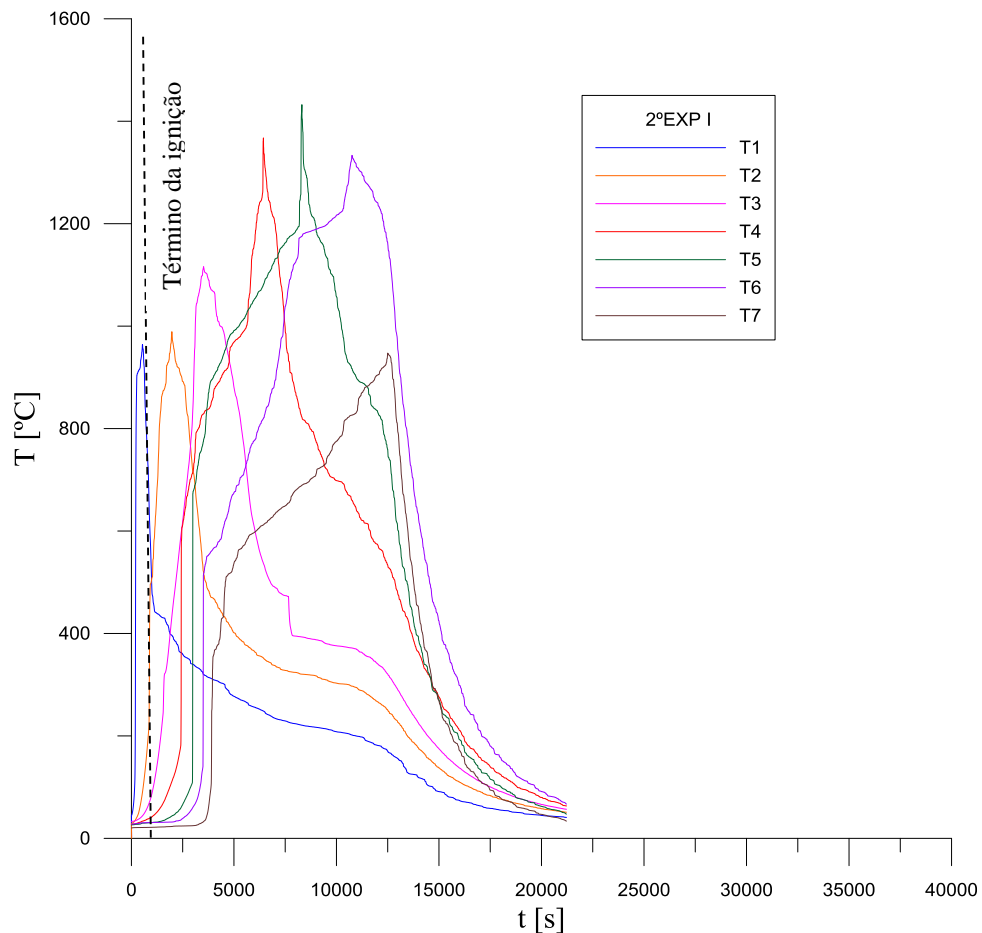


Figura 5.8 – Evolução da temperatura do 2º Experimento

A evolução da temperatura para o 2º Experimento ocorreu de forma similar ao 1º Experimento com relação ao comportamento semelhante das curvas de temperatura a medida que avança a frente de combustão. Neste experimento o valor máximo de temperatura foi de 1.432,3 °C.

A Figura 5.9 mostra a evolução da temperatura para o 3º Experimento com velocidade de 0,017 m.s⁻¹.

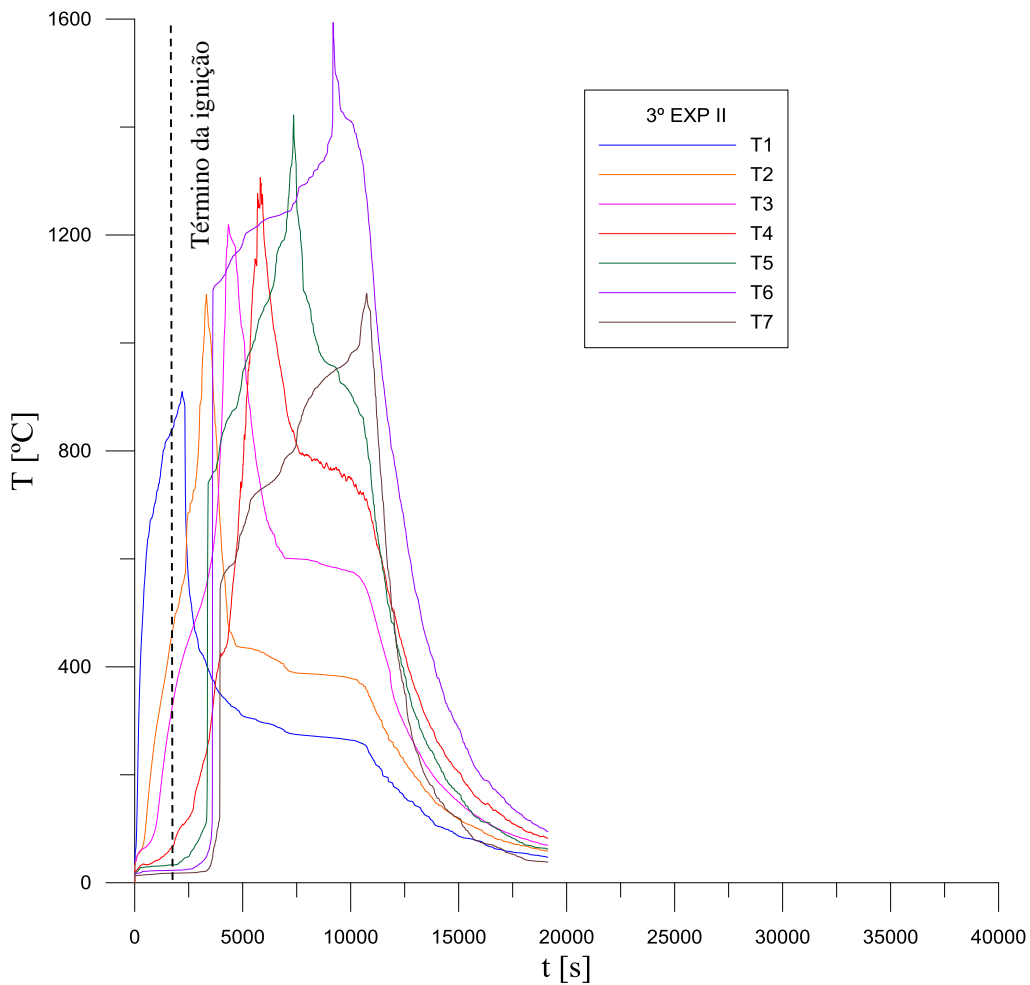


Figura 5.9 – Evolução da temperatura do 3º Experimento

A evolução da temperatura para o 3º Experimento apresentou novamente uma similaridade com os ensaios realizados para o 1º e 2º experimento, no que se refere ao avanço da frente de combustão. Para o 3º Experimento, o máximo valor de temperatura registrado foi de 1.593,4 °C. Esse valor máximo de temperatura está associado a depósito de material sinterizado na extremidade do termopar provocando elevações acentuadas de temperatura.

Durante a propagação da frente de combustão evidenciada nos dados anteriormente apresentados, Monhol (2015) em seu trabalho relata que a propagação de uma frente em meio poroso ocorrem três estágios de combustão no leito, em que o primeiro deles é o estágio de ignição do combustível, o segundo é o de propagação da frente sob altas taxas de retração do leito, onde ocorre a evaporação da água, volatilização e a oxidação do carbono fixo bem como a possível oxidação de parte do material volátil que é liberado pelas altas temperaturas, onde provavelmente há um regime de combustão limitada pelo oxigênio e o terceiro é o de oxidação do carbono fixo remanescente, onde

toda a umidade e o material volátil do combustível já foram varridos e apenas o carbono fixo, provavelmente sob o regime de combustão limitada pela reação, sofre oxidação resultando em maiores temperaturas.

5.2.1.1 Comportamento do fenômeno da ignição

Observa-se a partir dos dados de evolução da temperatura de cada experimento que a temperatura de ignição estabelecida garantiu de forma satisfatória a combustão do combustível sólido, a qual manteve-se autossustentável ao longo do leito, após o término da ignição. Segundo Monhol (2015) no momento da ignição ocorre um aumento na taxa de aquecimento do combustível, indicando que estão ocorrendo no leito reações exotérmicas que provocam um aumento súbito da temperatura do leito e logo após essa taxa estabiliza-se em um valor menor, devido às reações endotérmicas que se iniciam e absorvem a energia liberada pela reação do combustível com o ar, conforme verifica-se nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 que apresentam o comportamento do fenômeno da ignição do combustível para os experimentos realizados, por meio da taxa de aquecimento do combustível (derivada da temperatura do combustível (dT/dt)), a qual fornece uma maior sensibilidade dos dados registrados.

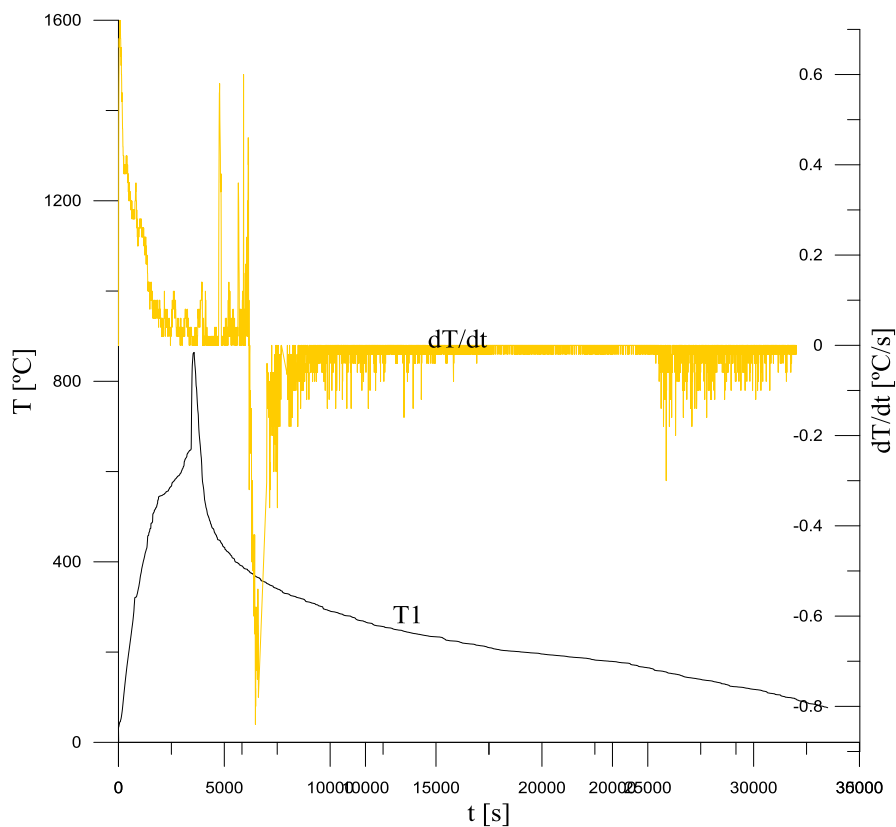


Figura 5.10 – Comportamento da ignição do combustível para o 1º Experimento

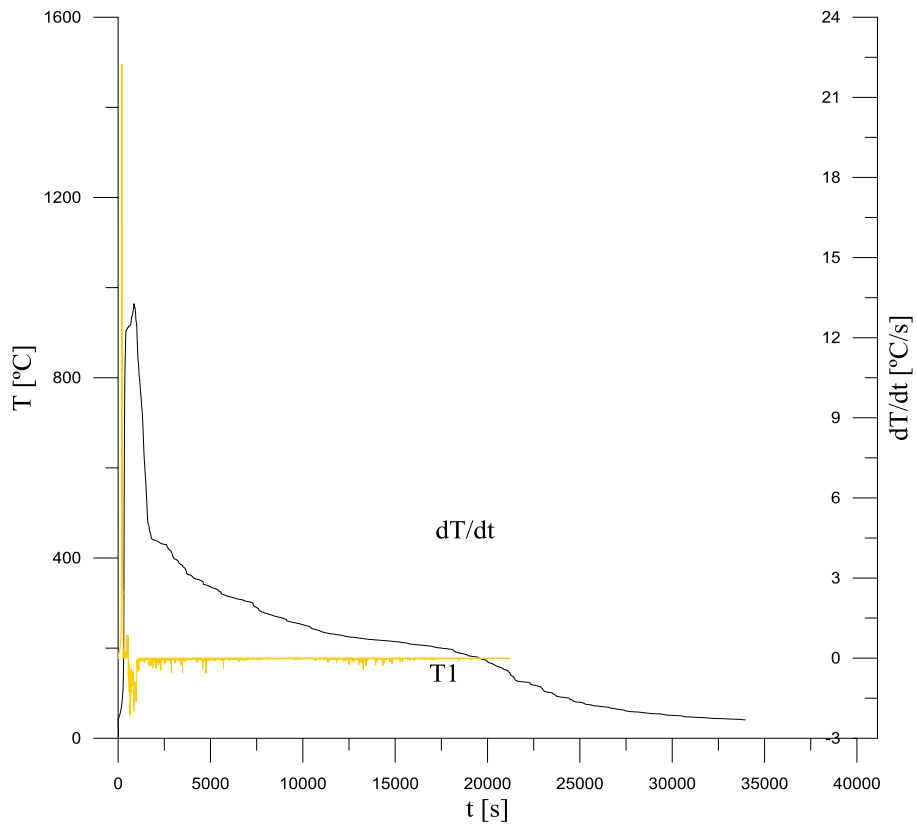


Figura 5.11 – Comportamento da ignição do combustível para o 2º Experimento

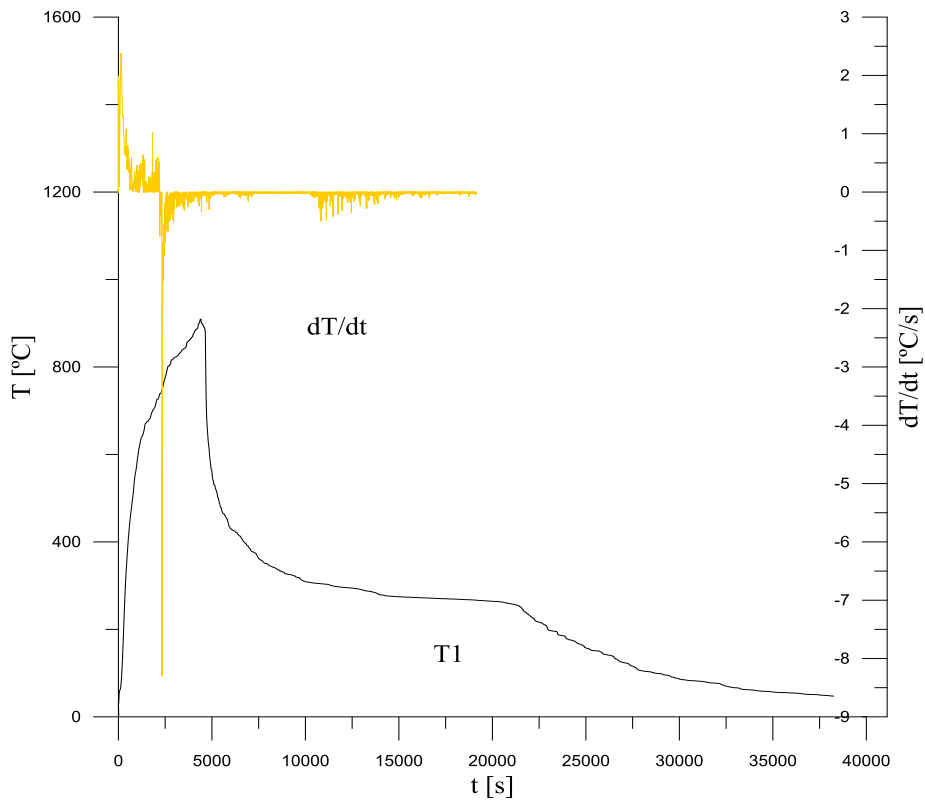


Figura 5.12 – Comportamento da ignição do combustível para o 3º Experimento

Os valores máximos de taxa de aquecimento do combustível em relação aos dados obtidos de T1 foram: $0,72\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ para o 1º Experimento, $22,4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ no 2º Experimento e $2,38\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ para o 3º Experimento.

Ao analisar o tempo de exposição ao fluxo de calor, o que caracteriza o tempo de ignição, pode ser verificado que os experimentos realizados com uma velocidade de $0,0098\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e $0,017\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ apresentaram tempo de ignição de 30 e 35 minutos, respectivamente e quando se reduziu a velocidade de ar para $0,0059\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ o tempo de ignição foi em média de 1 hora e 28 minutos. É possível observar por meio do elevado tempo de ignição obtido para o 1º Experimento em relação aos demais, que a composição do leito em termos de materiais voláteis e carbono fixo, granulometria e preenchimento do leito não influenciaram neste parâmetro, evidenciando apenas a influência da redução na velocidade de ar.

Para dar continuidade ao estudo da propagação da frente de combustão destes experimentos, serão apresentadas a seguir outras características referentes ao perfil de temperatura e velocidade da frente.

5.2.2 Perfil de temperatura

Com os dados obtidos referente à evolução da temperatura no tempo para os termopares, construiu-se os gráficos representados nas Figuras 5.13, 5.14 e 5.15, onde mostram o comportamento do perfil de temperatura axial de uma forma geral para os experimentos desenvolvidos com as velocidades de $0,0059\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (1º Experimento), $0,0098\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (2º Experimento) e $0,017\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (3º Experimento). O perfil de temperatura apresenta as temperaturas máximas registradas nos termopares em suas respectivas posições no reator, do topo para a base.

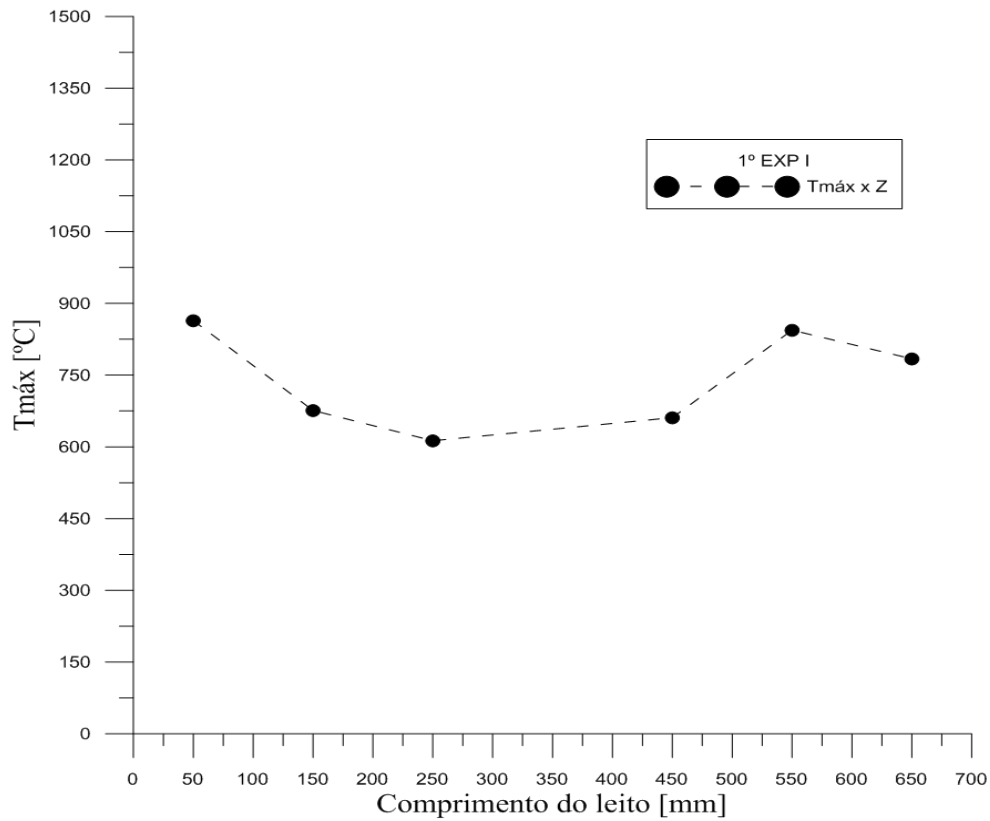


Figura 5.13 – Comportamento do perfil de temperatura do 1º Experimento

Após a análise do perfil de temperatura, constata-se que as maiores temperaturas estão registradas nos termopares T_3 , T_4 , T_5 , T_6 e T_7 que estão localizados a 250, 350, 450, 550 e 650 mm, respectivamente, e tende a aumentar à medida que caminha para o final do experimento. Segundo Hobbs *et al* (1993), ocorre uma interação de transferência de calor e massa entre as fases gás e sólido em reatores de leito fixo, gerando um maior acúmulo de energia na forma de calor a medida que ocorre o avanço da frente de combustão, acreditasse que essa interação ocorre de forma mais acentuada para este estudo nestas regiões.

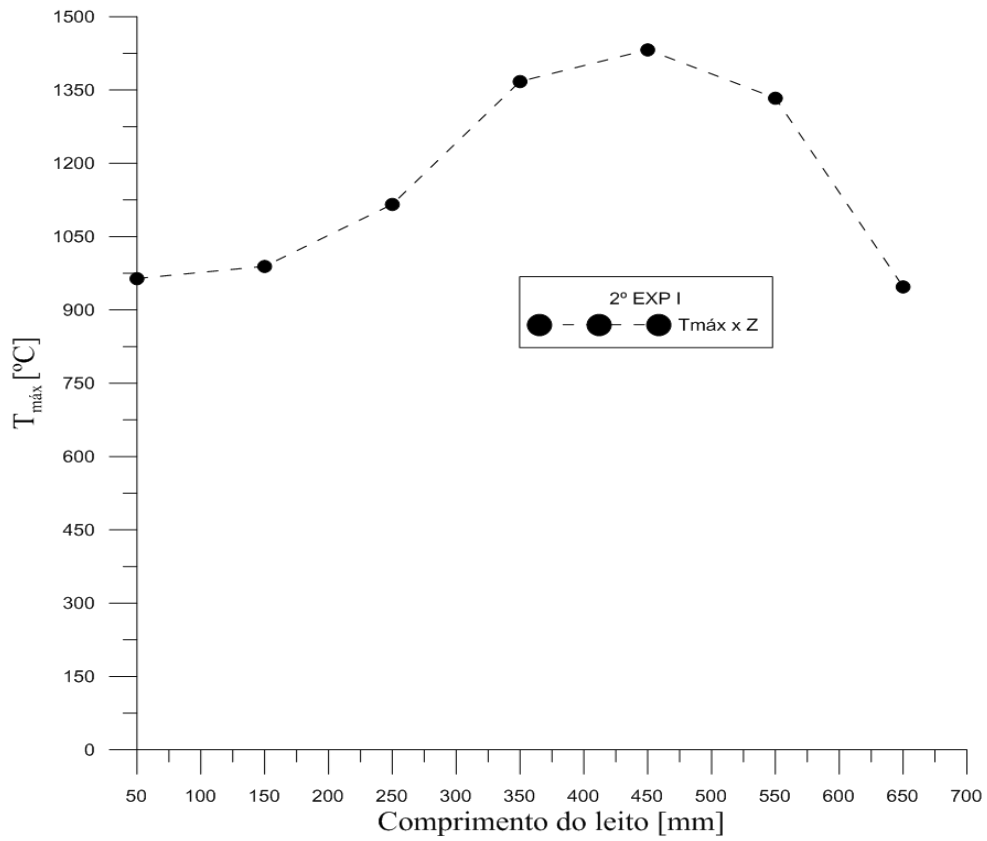


Figura 5.14 – Comportamento do perfil de temperatura do 2º Experimento

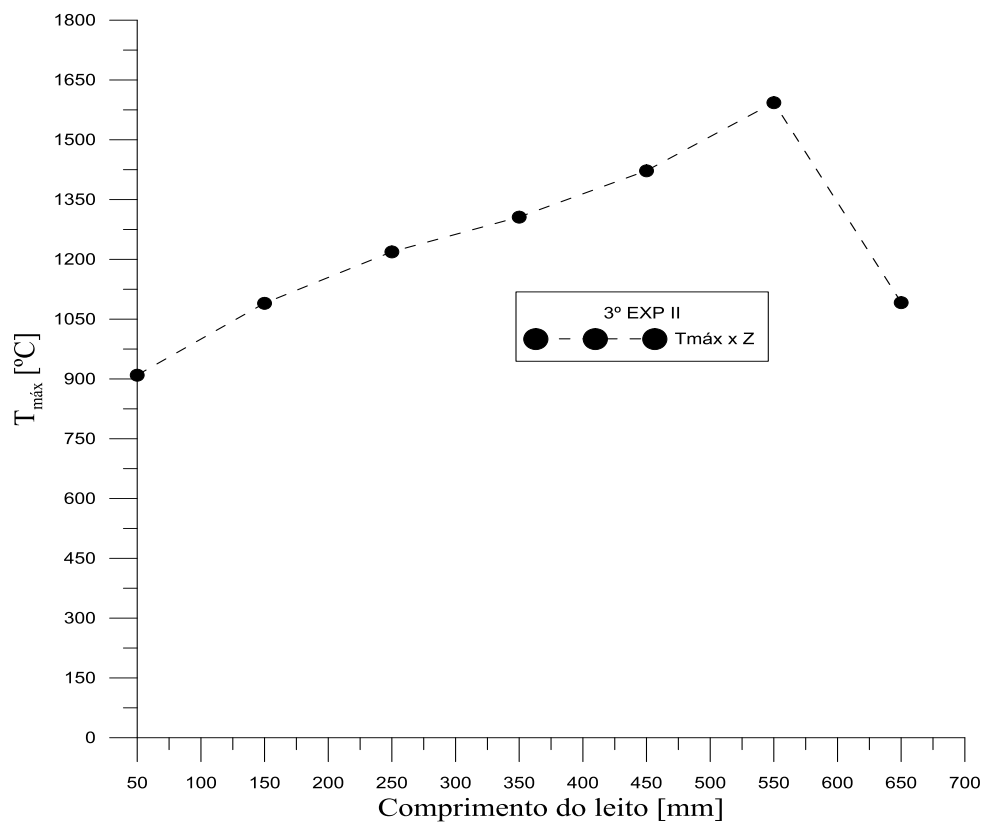


Figura 5.15 – Comportamento do perfil de temperatura do 3º Experimento

Os dados obtidos durante o processo de sinterização, referentes a evolução da temperatura, taxa de aquecimento e perfil de temperatura, que completam a duplicata e triplicata dos experimentos estão expostos no Apêndice A.

Como todos os experimentos foram realizados com o reator completamente preenchido, foi possível observar a característica citada anteriormente no segundo estágio de combustão, a retração do leito durante a propagação da frente.

A partir da temperatura máxima de cada termopar, conforme o perfil de temperatura, e o decréscimo da mesma como evidenciado nos gráficos de evolução da temperatura, acompanhava-se a localização da frente de combustão e a altura do leito por meio da observação visual na parte superior do reator. A Figura 5.16 mostra a retração sofrida pelo leito verificada em todos os experimentos.



Figura 5.16 – Retração sofrida pelo leito

A Figura 5.16 descreve a retração sofrida pelo leito ao longo dos experimentos, onde são apresentadas na situação (a) o início do experimento com o leito completamente preenchido, em (b) apresenta a retração do leito após o processo de ignição nas regiões onde ocorreram maiores temperaturas, na situação (c) mostra a frente de combustão próxima a base do reator, a 650 mm do topo, onde está posicionado o termopar T₇ e na

imagem representativa da situação (d) têm-se o término do experimento. Nesta Figura, observa-se outra característica do leito, a sua não uniformidade ao longo do processo de sinterização, pois para todos os experimentos o leito sofreu um decréscimo significativo não linear, em função da tendência natural do carvão em se acumular em uma dada região e além deste fator, Monhol (2015) descreve que essa perda de volume está relacionada a volatilização do combustível, em que o material volátil abandona o leito e causa sua acelerada retração. Para os experimentos realizados, esse decréscimo não linear resultou na existência de caminhos preferenciais para passagem do ar e conseqüentemente da propagação da frente de combustão, o que pode ser observado no próximo item.

5.2.3 Velocidade da frente de combustão

As Figuras 5.17, 5.18 e 5.19 apresentam a velocidade da frente de combustão para os respectivos experimentos.

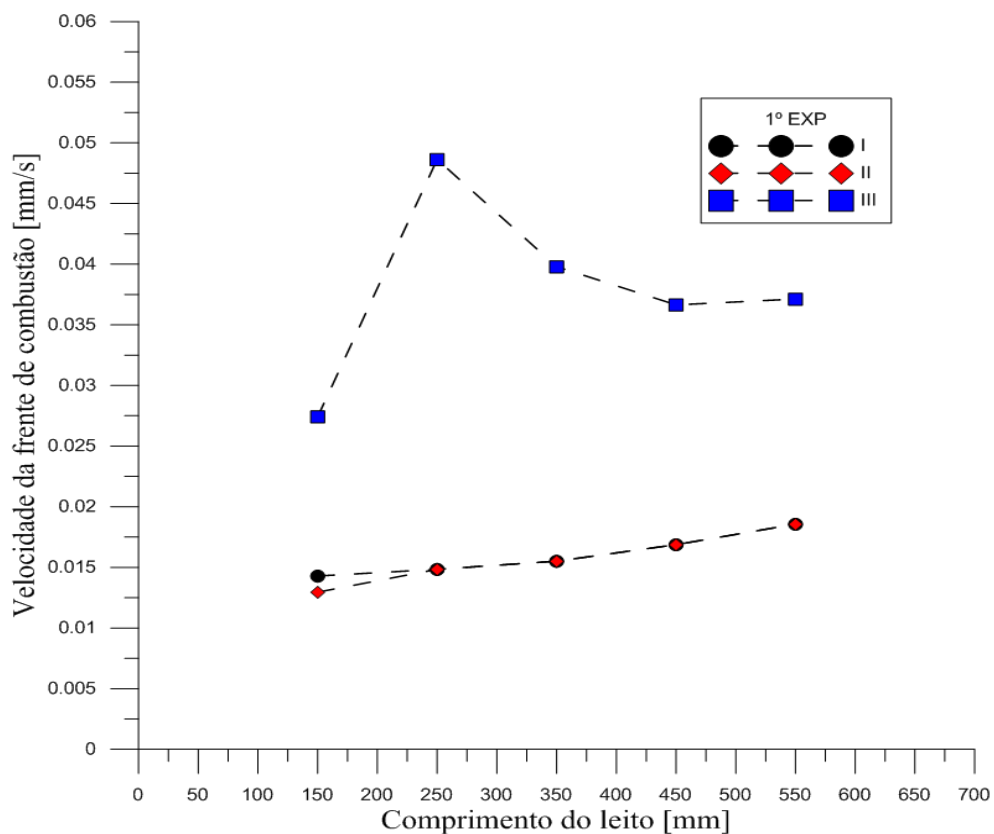


Figura 5.17 – Velocidade da frente de combustão para o 1º Experimento

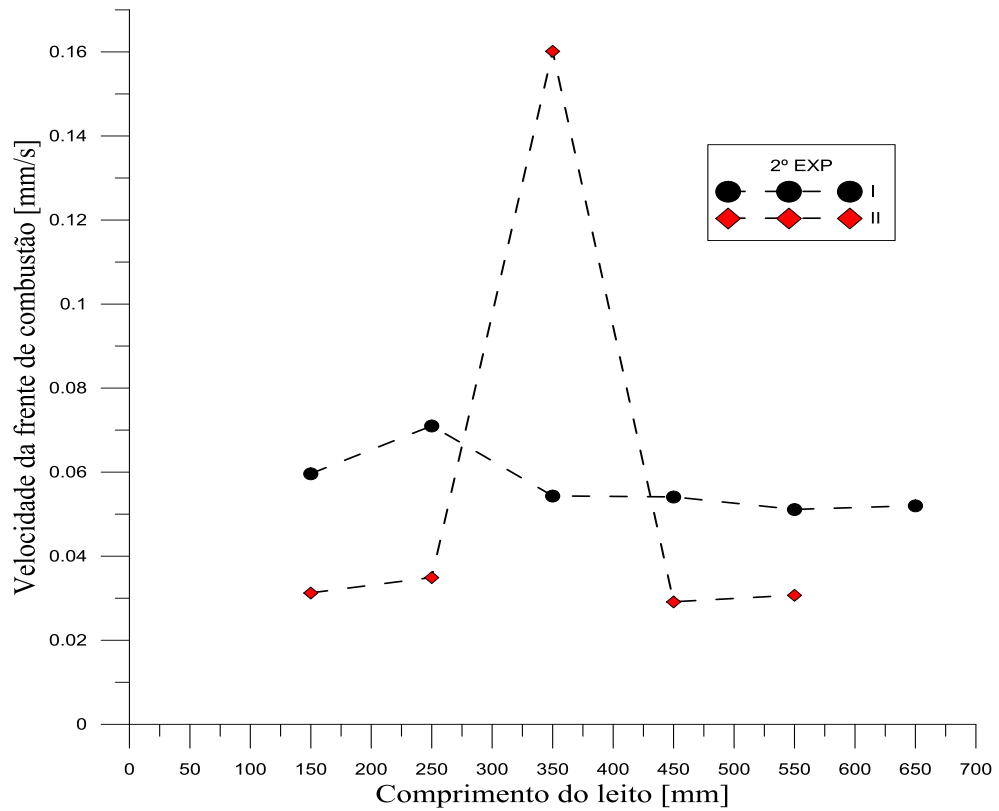


Figura 5.18 – Velocidade da frente de combustão para o 2º Experimento

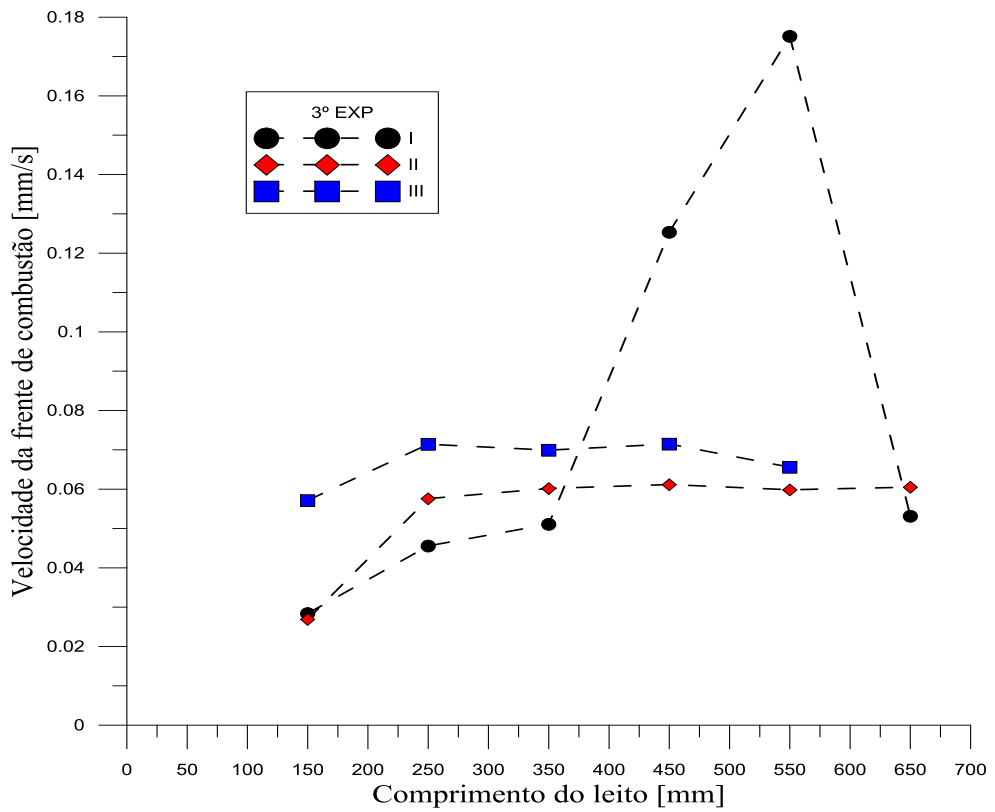


Figura 5.19 – Velocidade da frente de combustão para o 3º Experimento

A velocidade da frente foi obtida a partir das posições de cada termopar distribuídos ao longo do leito (do topo para a base), e os respectivos tempos em que se registrava as temperaturas máximas. Observa-se no gráfico das figuras mostradas anteriormente como a velocidade de ar e a retração sofrida pelo leito influencia no comportamento da velocidade da frente, e que a mesma não é constante em todos os experimentos justificado pela não linearidade da disposição dos pontos experimentais em cada curva analisada, visto que ocorre um decréscimo não linear do leito de sinterização provocando a existência de caminhos preferenciais.

Observa-se no comportamento da velocidade que a medida que se aumenta a velocidade de ar tem-se um conseqüente aumento da velocidade de propagação da frente de combustão e conseqüentemente da retração do leito reacional, fato que se explica também em alguns trabalhos realizados por Gómez *et al.* (2014) e Monhol (2015), onde os autores relatam que para maiores valores de suprimento de ar a retração é mais acelerada devido à maior disponibilidade de oxigênio, à maior velocidade das reações e à maior dimensão da frente de combustão que consome uma porção muito maior do leito. Além disso, outros trabalhos na literatura descrevem que a velocidade de retração do leito varia ao longo do tempo, possivelmente pela maior retração do leito em certos momentos quando ocorrem colapsos no interior do leito devido ao aparecimento de vazios, fazendo a retração ser ainda mais acelerada em certos momentos (Duque, 2013; Monhol e Martins, 2015).

As observações anteriormente citadas, também podem ser comprovadas pelo período de duração dos experimentos, onde para o 1º Experimento ($0,0059 \text{ m.s}^{-1}$) a velocidade de propagação da frente de combustão precisou de aproximadamente 8,11 horas para percorrer todo o reator. No 2º Experimento ($0,0098 \text{ m.s}^{-1}$) a frente de combustão percorreu o leito reacional em 6,58 horas enquanto que no 3º Experimento ($0,017 \text{ m.s}^{-1}$) o processo ocorreu em 5,45 horas.

A velocidade de propagação da frente de combustão está intrinsecamente relacionada ao processo de sinterização do agregado sintético, resultando nas características de qualidade do produto final obtido, conforme pode ser observado nos resultados das análises realizadas no agregado.

5.3 ANÁLISES REALIZADAS NO AGREGADO SINTÉTICO PRODUZIDO

5.3.1 Distribuição granulométrica

Após a medida das massas dos agregados sintéticos produzidos, conforme mostra a Tabela 5.4 realizou-se as análises granulométricas desses materiais.

Tabela 5.4 – Massa dos agregados produzidos

Experimento	1° 0,0059 m.s ⁻¹			2° 0,0098 m.s ⁻¹		3° 0,017 m.s ⁻¹		
	1	2	3	1	2	1	2	3
Ensaio								
Massa [Kg]	0,597	0,615	0,585	0,460	0,640	0,576	0,455	0,555

As Figuras 5.20 a 5.22 apresentam os resultados das análises granulométricas realizadas nos agregados sintéticos produzidos no 1° (0,0059 m.s⁻¹), 2° (0,0098 m.s⁻¹) e 3° (0,017 m.s⁻¹) experimento, utilizando o reator vertical de leito fixo. O diâmetro médio de destes materiais sinterizados foram 27,73 mm, 26,02 mm e 24,19 mm, respectivamente, o que caracteriza os agregados sintéticos, quanto ao seu tamanho, como agregado graúdo segundo a ABNT NBR 7211:2009.

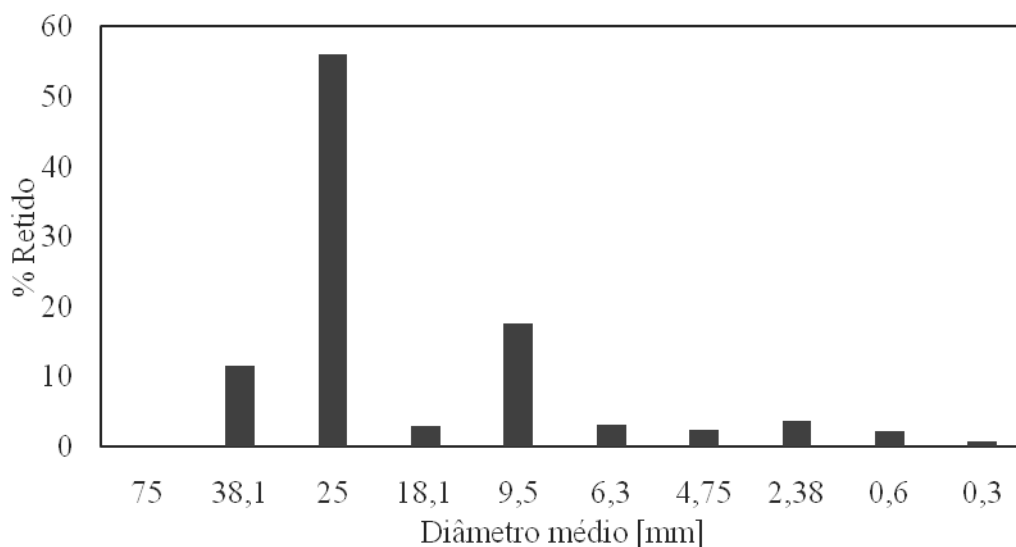


Figura 5.20 – Distribuição granulométrica dos agregados produzidos no 1º Experimento

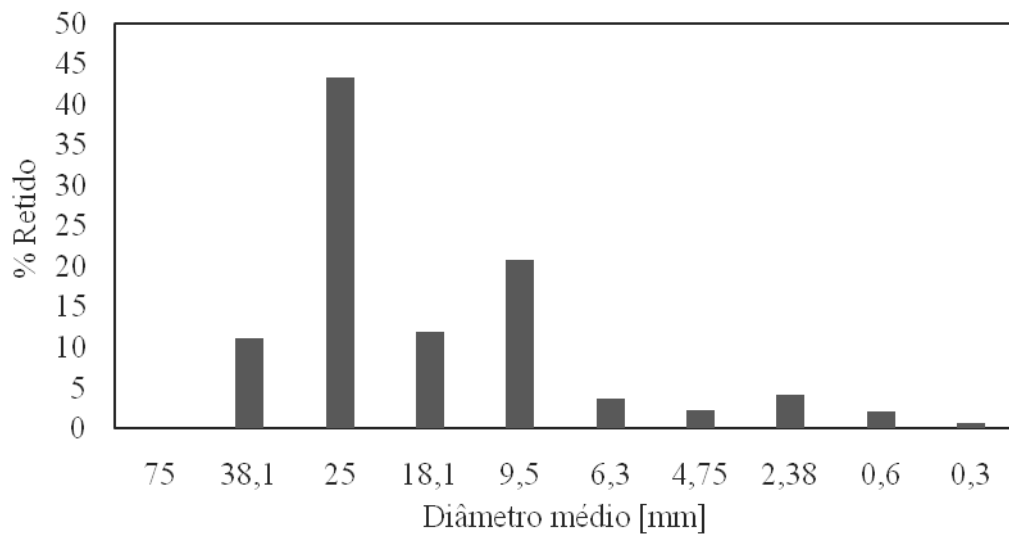


Figura 5.21 – Distribuição granulométrica dos agregados produzidos no 2º Experimento

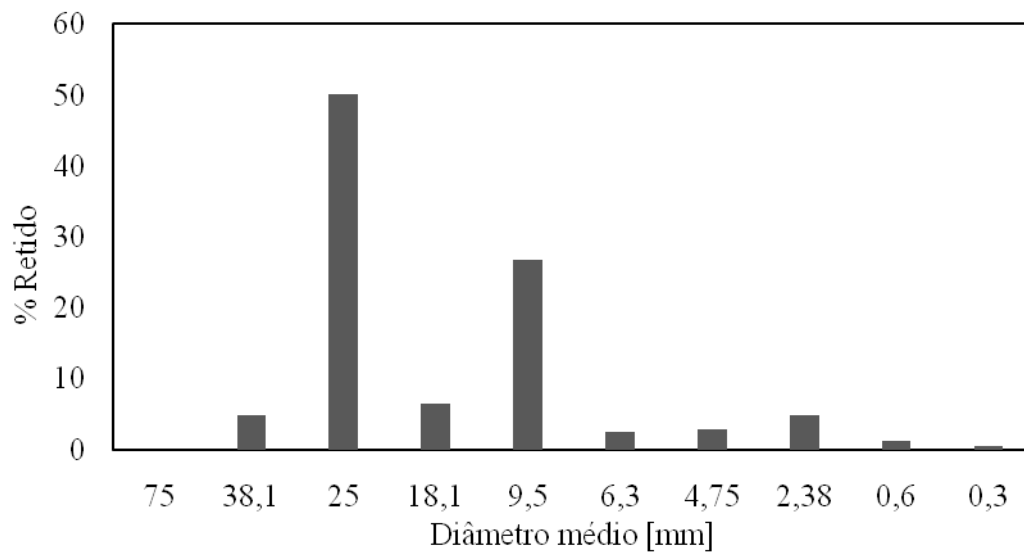


Figura 5.22 – Distribuição granulométrica dos agregados produzidos no 3º Experimento

5.3.2 Propriedades cerâmicas

Os resultados referentes à medida das propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos produzidos em cada experimento estão apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Medida das propriedades cerâmicas

Propriedades	1º Experimento	2º Experimento	3º Experimento
	0,0059 m.s ⁻¹	0,0098 m.s ⁻¹	0,017 m.s ⁻¹
PA (%)	10,03	7,26	7,90
AA (%)	9,91	6,81	7,62
MEA [g.cm ⁻³]	0,99	1,06	1,03

Segundo a ABNT NBR 9935:2011, os resultados obtidos permitem classificar os agregados sintéticos produzidos em todos os experimentos, como agregado leve, pois os resultados obtidos para a massa específica aparente (MEA) apresentaram valores abaixo de 2 g.cm⁻³, portanto menores que os agregados convencionais de acordo com Cabral *et al.* (2008).

Os resultados das propriedades cerâmicas dos agregados sintéticos evidenciam que com o aumento da porosidade aparente tem-se um aumento gradativo da absorção de água e conseqüente diminuição da massa específica aparente, fato que pode ser explicado por Santos *et al.* (1986) quando se refere a produção de agregado leve por meio de sinterização, mostrando que estes apresentam elevada capacidade de absorção de água, poros abertos além de não possuir recobrimento.

Diante das observações anteriormente citadas, pode-se inferir que os valores de porosidade aparente mostram que a formação de fase amorfa (vidro) foi reduzida, o que de certa forma é interessante para o agregado pela capacidade de aderência ao concreto. No entanto, comparando os experimentos observa-se que o 1º Experimento, onde se reduziu a velocidade de ar, apresentou menor valor de massa específica aparente.

De acordo com a literatura, as reações de vitrificação são responsáveis pela redução dos poros de materiais cerâmicos sinterizados, onde a camada vítrea forma-se com viscosidade suficientemente baixa, de modo a reter os gases de combustão (MÖRTEL e HEIMSTADT, 1994 *apud* SOUZA, 2010). Assim, observa-se que ocorreu uma variação no grau de sinterização dos experimentos, onde para o 1º experimento as temperaturas registradas e o tempo de exposição a essas temperaturas, promoveram uma redução menos significativa na viscosidade da fase amorfa, favorecendo o aumento da

porosidade aparente (PA) e absorção de água (AA). Para o 2º e 3º experimento, onde ocorreu aumento nas velocidades do ar, o grau de sinterização foi maior associado aos fatores de temperaturas e tempo, onde as reações de vitrificação resultaram na redução da porosidade aparente e absorção de água, o que provocou aumento da massa específica, nesses experimentos.

5.3.3 Microscopia eletrônica de varredura

As Figuras 5.23 e 5.24 mostram a morfologia microestrutural do agregado sintético obtido no 1º Experimento ($0,0059 \text{ m.s}^{-1}$).

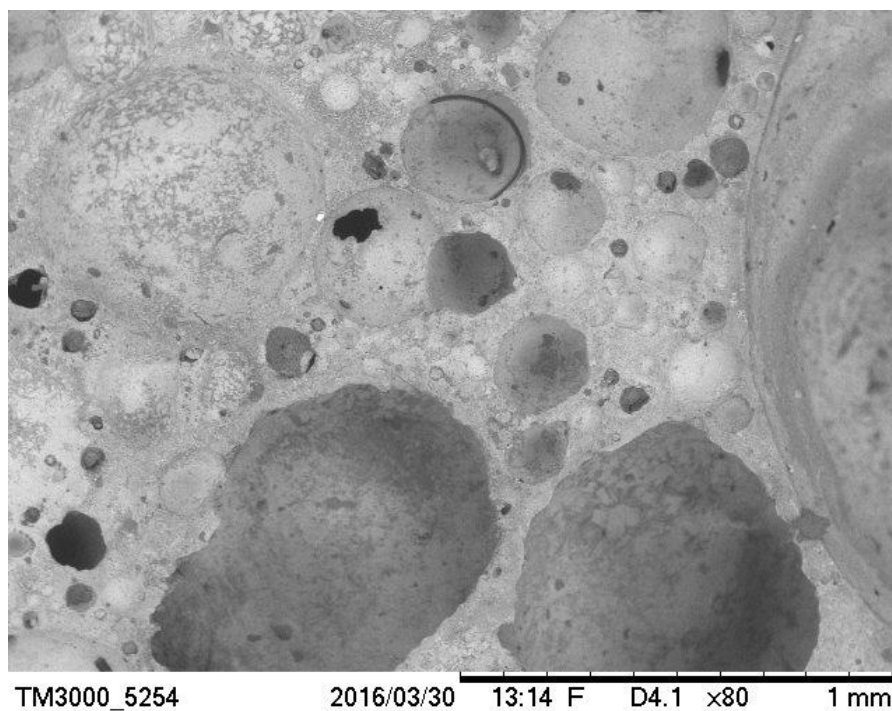


Figura 5.23 – Micrografia do agregado sintético do 1º experimento com ampliação de 80x

Observa-se nesta estrutura maior incidência de poros, quando comparados aos demais experimentos, o que pode ser verificado através da maior medida de porosidade aparente e menor massa específica para este material.

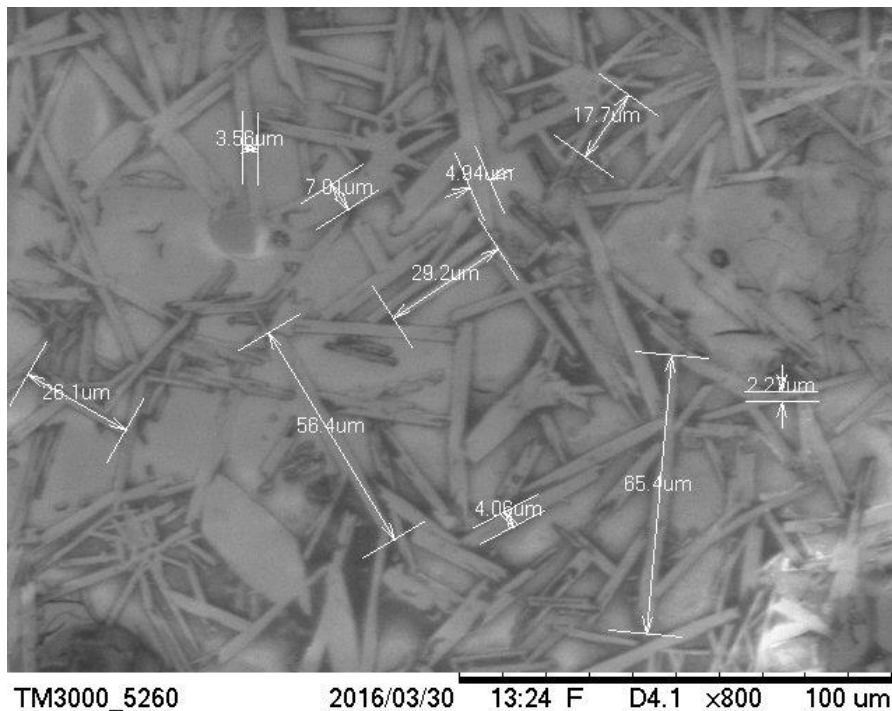


Figura 5.24 – Micrografia do agregado sintético do 1º experimento com ampliação de 800x

A micrografia, obtida com ampliação de 800x, revela uma estrutura constituída em sua maioria de mulitas primárias (aquelas na forma de cristais lamelares) e nucleação e crescimento de mulita secundária (monocristais na forma de agulhas) a partir da estrutura de mulitas primárias em algumas regiões. Segundo Brindley e Nakahira (1959), a formação de mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) está vinculada a eficiência das reações de estado sólido que são funções de elevadas temperaturas e composição do material. Para estes autores, a formação de mulita secundária ocorre em temperaturas abaixo ou superiores a 1200°C e para outros autores como BORLINI *et al.* (2006) evidenciam a presença de mulita para temperaturas ainda mais baixas a partir de 1050°C . Assim, a mulita evidenciada no material sinterizado está de acordo com a literatura, visto que a produção do agregado sintético neste experimento ocorreu nas faixas de temperaturas necessárias para esta formação, associado ao fato da composição da mistura ser constituída majoritariamente por sílico-aluminatos.

Observou-se através da medida das propriedades cerâmicas do agregado sintético produzido no 1º experimento, que este apresentou menor massa específica em relação aos demais experimentos, o que pode ser justificado pela presença de poucas mulitas secundárias, visto que as mesmas provocam aumento na massa específica do material,

associado ao menor grau de sinterização obtido neste experimento quando se fez a redução na velocidade de ar.

As mulitas detectadas no 1º Experimento tiveram maior facilidade durante a medida de suas dimensões, apresentando em média 39 μm de comprimento e 4,35 μm de espessura.

As Figuras 5.25 e 5.26 apresentam a morfologia encontrada na microestrutura do agregado sintético produzido no 2º Experimento ($0,0098 \text{ m.s}^{-1}$).

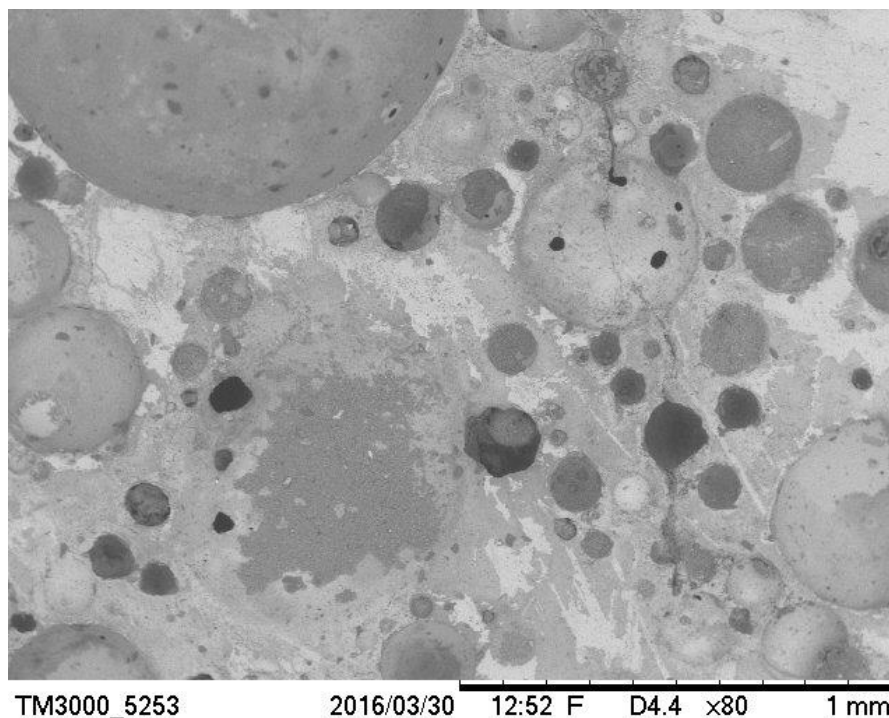


Figura 5.25 –Micrografia do agregado sintético do 2º experimento com ampliação de 80x

Observa-se na Figura 5.25 uma estrutura, em sua maioria porosa, comprovada nos resultados das medidas das propriedades cerâmicas, onde este material apresentou elevada porosidade aparente e conseqüentemente baixa massa específica.

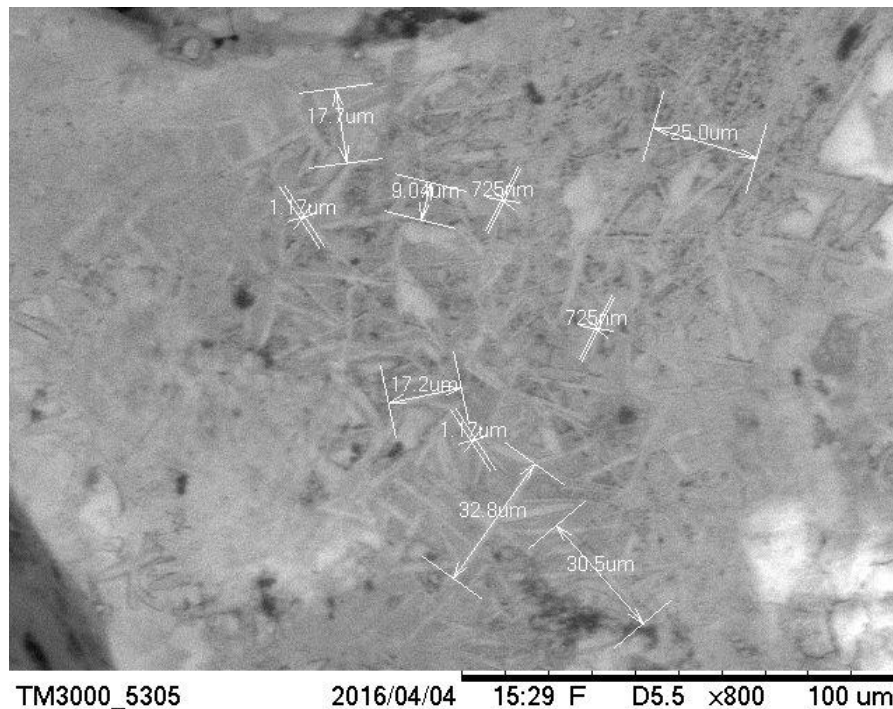


Figura 5.26 – Micrografia do agregado sintético do 2º experimento com ampliação de 800x

A micrografia presente na Figura 5.26 revela uma microestrutura formada em sua maioria por mulitas secundárias e a presença pouco significativa de nucleação e crescimento de mulitas secundárias a partir de mulitas primárias.

Além dos fatores citados anteriormente, a presença de cátions vitrificantes (K, Ca, Fe e Na) na mistura a ser sinterizada facilitam a nucleação e crescimento de mulita a partir da redução de viscosidade da fase amorfa (MÖRTEL e BOUBACAR, 1997 *apud* SOUZA, 2010). A partir destas informações verifica-se por meio na análise química da mistura a ser sinterizada, rica em sílico-aluminatos, a presença destes cátions vitrificantes, mostrando que a nucleação e crescimento de mulita constatada em todos os experimentos estão de acordo com os dados da literatura.

O aumento da massa específica sugere como consequência, um maior grau de sinterização, ou seja, mais formação de massa vítrea associada à formação de mulita secundária (MÖRTEL e HEIMSTADT, 1994 *apud* SOUZA, 2010). Nesse contexto, observa-se por meio do resultado de massa específica aparente do agregado sintético do 2º experimento, que ocorreu um aumento em relação a esta propriedade cerâmica, quando se compara aos demais experimentos e que na microestrutura do material constatou-se a morfologia de mulita secundária, o que está de acordo com a literatura.

Foi possível medir o comprimento e espessura das mulitas formadas, conforme mostra a micrografia, que apresentaram em média 22,04 μm e 0,95 μm , respectivamente. Os autores Monteiro *et al.* (2004) relatam a respeito de algumas das dimensões da mulita na forma de agulhas, que devido ao diâmetro pequeno e à perfeição cristalina, possuem resistência extremamente alta e podem ser empregadas como reforços em compósitos cerâmicos.

As Figuras 5.27 e 5.28 apresentam as micrografias do agregado sintético produzido no 3º Experimento ($0,017 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$).

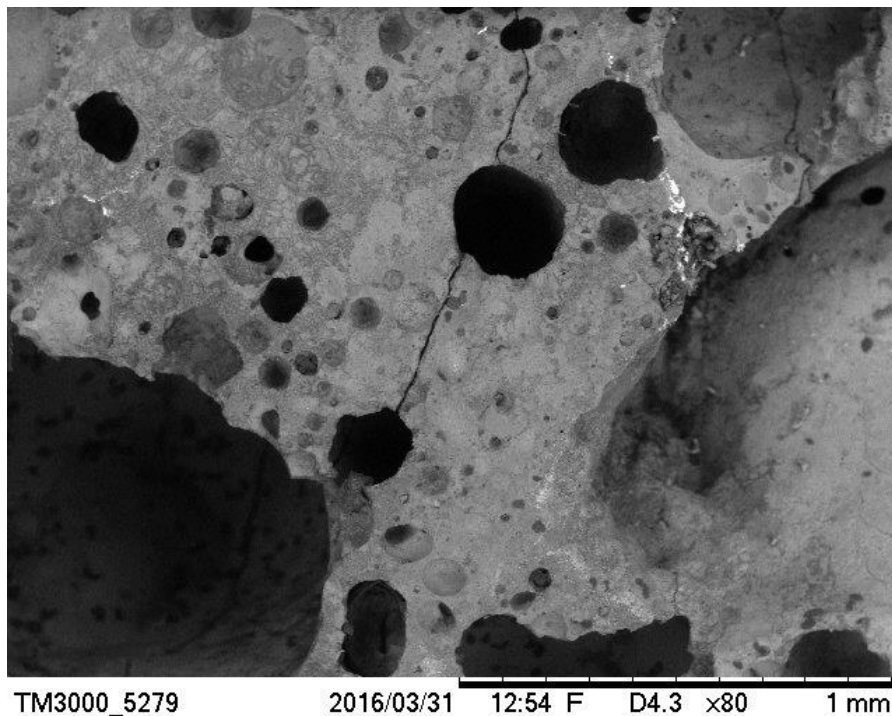


Figura 5.27 – Micrografia do agregado sintético do 3º experimento com ampliação de 80x

A micrografia observada na Figura 5.27 mostra uma estrutura semelhante à dos agregados dos demais experimentos, constatando a presença de poros, comprovados também pela elevada porosidade aparente deste material e baixa massa específica.



Figura 5.28 – Micrografia do agregado sintético do 3º experimento com ampliação de 800x

Observam-se nesta micrografia, a presença de uma estrutura constituída de partículas de quartzo, regiões de nucleação e crescimento de mulitas secundárias a partir da estrutura de mulitas primárias, mulitas secundárias totalmente desenvolvidas e mulitas primárias. A formação das mulitas está associada às condições estabelecidas na literatura descrita anteriormente.

Neste agregado produzido, também pode ser observado com relação aos resultados de massa específica aparente, que ocorreu uma redução para esta propriedade quando comparado ao 2º experimento, comprovando que o aumento da massa específica está associado à formação de mulita secundária, a qual se apresenta em muitas regiões do material em fase de transformação.

As mulitas evidenciadas no 3º Experimento apresentaram em média um comprimento de 9,32 μm e 1,27 μm de espessura.

5.3.4 Difração de raios-X

As Figuras 5.29 a 5.31 apresentam os resultados de difração de raios-X realizados nos agregados sintéticos produzidos no 1º, 2º e 3º Experimento, respectivamente. As análises foram realizadas no sistema difratométrico *Empyrean* com material anódico de cobalto e os resultados foram analisados no programa *X'Pert HighScore*.

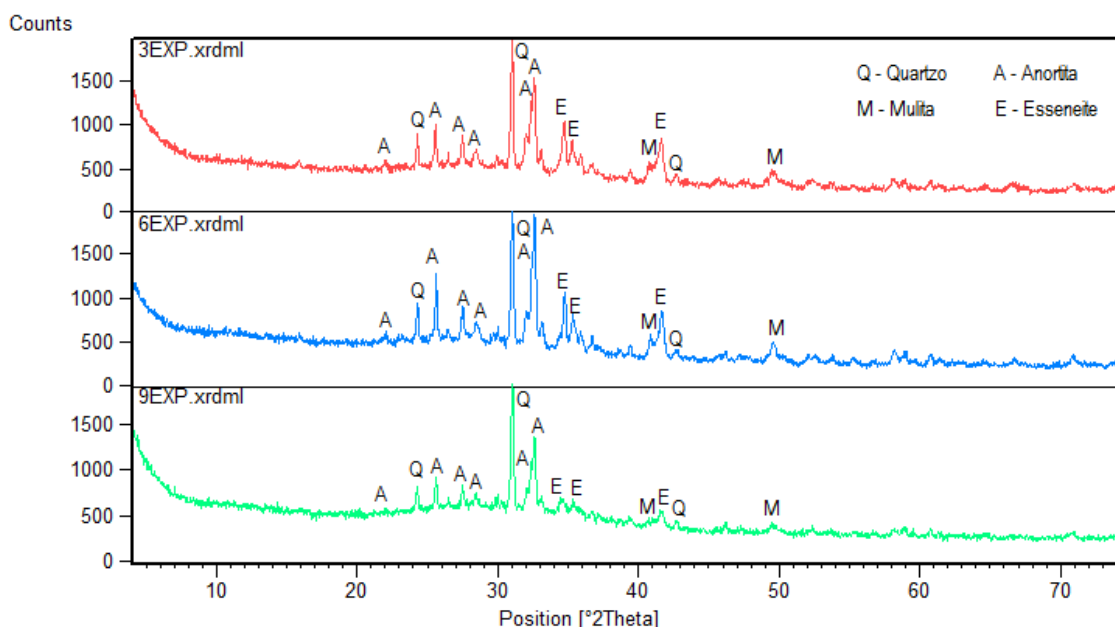


Figura 5.29 – Difratoograma do agregado sintético produzido no 1º Experimento

Entende-se por 3 EXP, 6 EXP e 9 EXP no difratograma referente a Figura 5.29, o 1º, 2º e 3º ensaio, respectivamente, realizados para o 1º Experimento. Observa-se nestes resultados a presença de quatro fases mineralógicas: quartzo (SiO_2), mulita ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) e esseneite ($\text{CaFe}^{3+}\text{AlSiO}_6$). A formação de quartzo pode ser justificada pela presença de sílica em temperaturas acima de 500 °C segundo o diagrama de fases da sílica. A formação de mulita está relacionada a presença de sílico-aluminatos em temperaturas a partir de 1050 °C, abaixo ou superiores a 1200 °C, conforme a literatura utilizada para explicar a morfologia desta fase nos resultados de microscopia eletrônica de varredura. A constatação das fases anortita e esseneite está vinculada também a presença de sílico-aluminatos, além de cálcio e ferro disponível em temperaturas favoráveis a formação destas fases, superior a 1000 °C.

As fases mineralógicas formadas no 2º e 3º Experimento, foram as mesmas evidenciadas no 1º Experimento, onde ocorreram também a formação durante o processo de sinterização das fases quartzo, mulita, anortita e esseneite pelas mesmas razões acima

citadas, caracterizando qualitativamente o mesmo comportamento independente do grau de sinterização.

Para o 2º Experimento lê-se 4 e 7 EXP, os ensaios realizados em duplicata para este experimento e para o 3º Experimento entende-se por 2 EXP, 5 EXP e 8 EXP, o 1º, 2º e 3º ensaio, respectivamente.

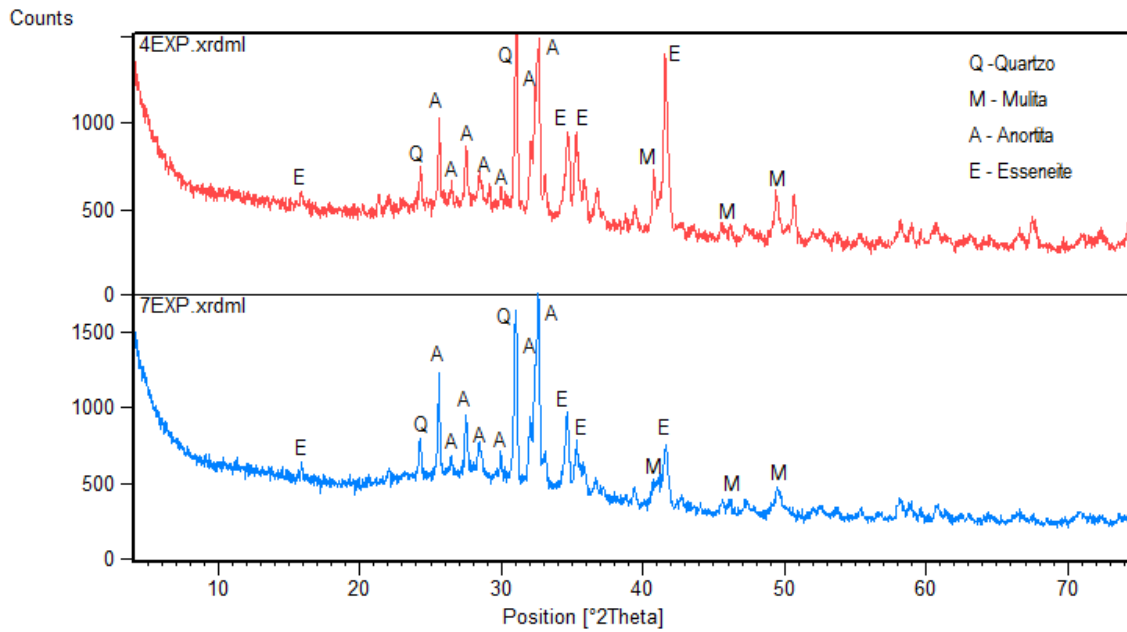


Figura 5.30 – Difratoograma do agregado sintético produzido no 2º Experimento

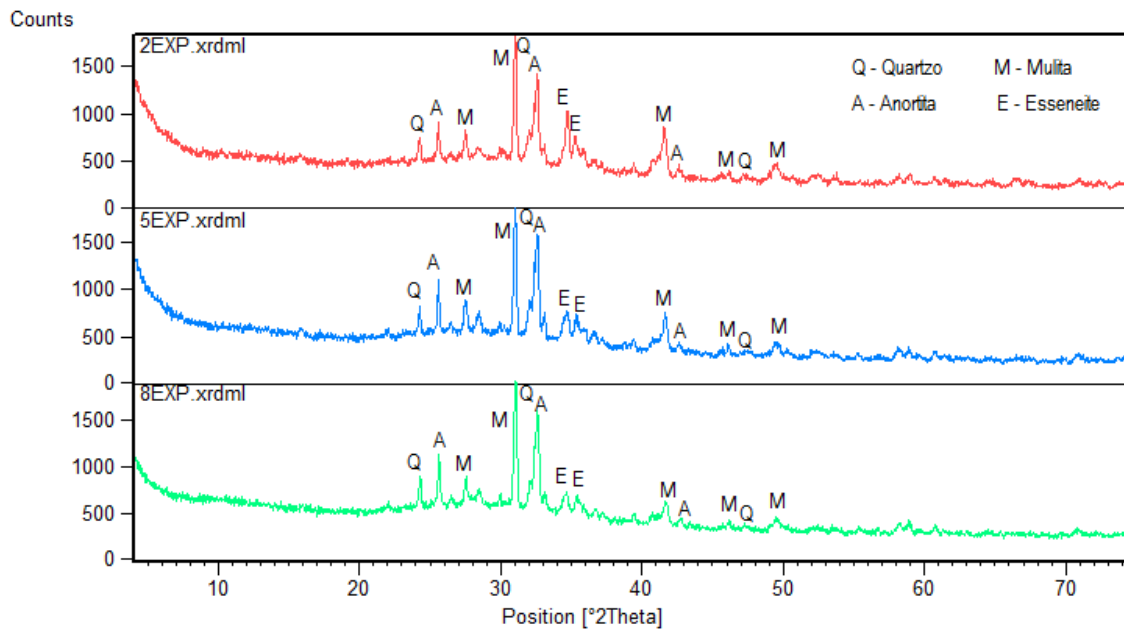


Figura 5.31 – Difratoograma do agregado sintético produzido no 3º Experimento

5.4 ANÁLISES REALIZADAS NOS CONCRETOS PRODUZIDOS

5.4.1 Análise granulométrica do agregado sintético para ser utilizado no concreto

As Figuras 5.32 a 5.34 mostram a caracterização quanto à distribuição granulométrica dos agregados produzidos no 1º (0,0059 m.s⁻¹), 2º (0,0098 m.s⁻¹) e 3º (0,017 m.s⁻¹) experimento, após britagem para adequar seus tamanhos as dimensões do molde dos corpos de prova de concreto. O diâmetro médio desses agregados foram 7,54 mm, 6,84 mm e 7,20 mm, respectivamente, o que os caracteriza quanto ao seu tamanho, como agregado graúdo segundo a ABNT NBR 7211:2009.

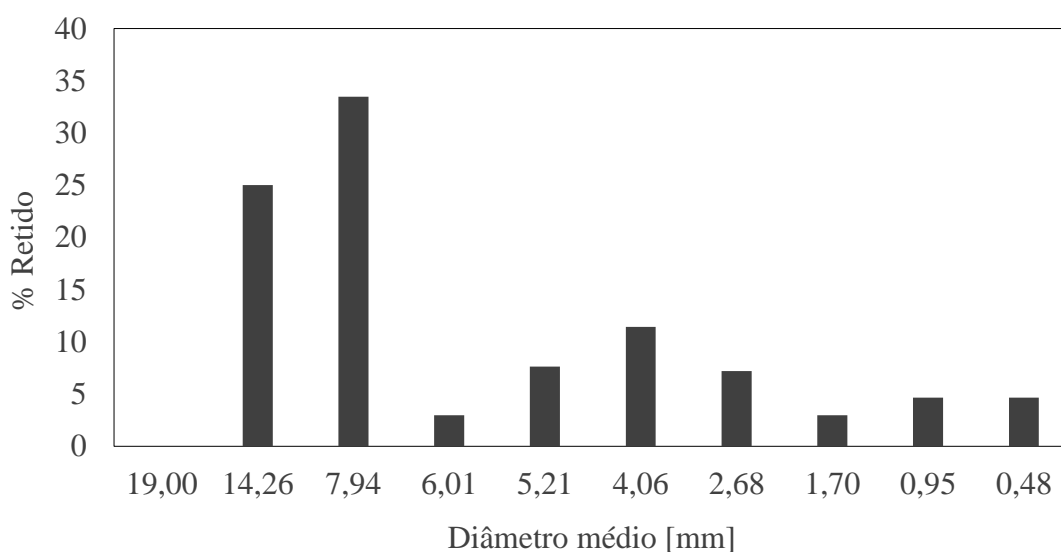


Figura 5.32 – Distribuição granulométrica dos agregados do 1º Experimento

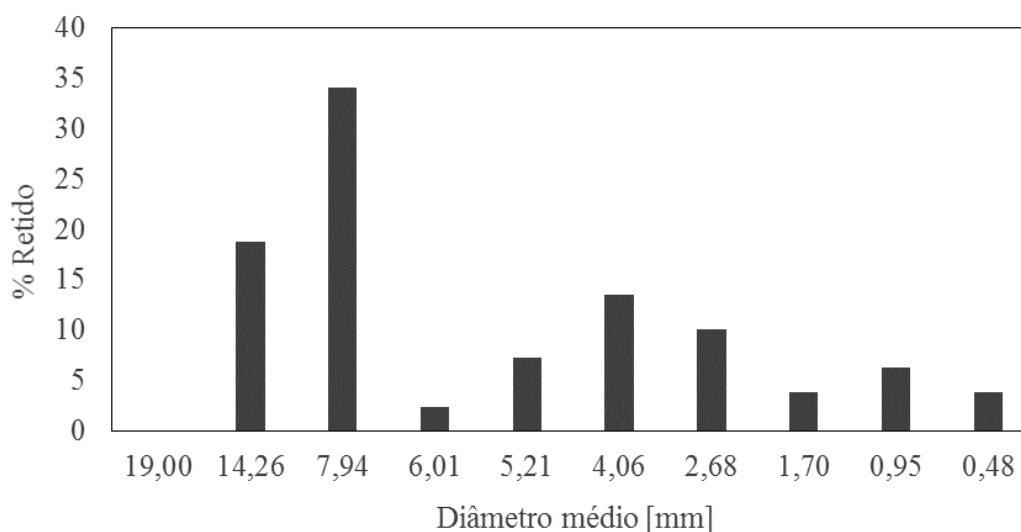


Figura 5.33 – Distribuição granulométrica dos agregados do 2º Experimento

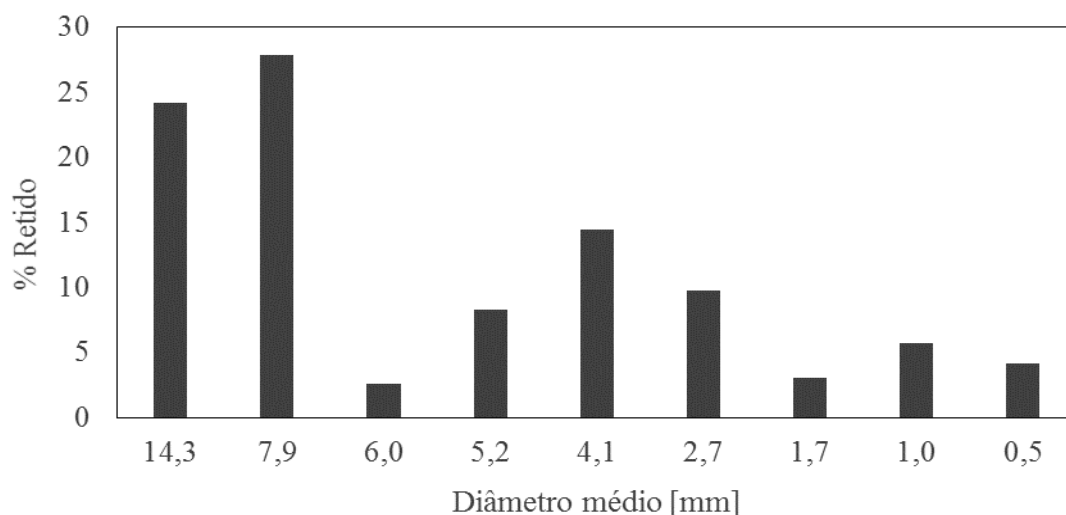


Figura 5.34 – Distribuição granulométrica dos agregados do 3º Experimento

5.4.2 Resistência à compressão axial simples e medida das propriedades cerâmicas

A Tabela 5.6 apresenta os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão para cada grupo de concreto com idade de 7 e 28 dias, de acordo com a norma ABNT NBR 5739:2007. Os dados foram obtidos na Máquina Emic SSH300, Célula Trd 30 e no Programa Tesc versão 3.04.

Tabela 5.6 – Resistência à compressão

Resistência a compressão (MPa)								
Concreto	7 dias							
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
CSR	23,49	20,02	22,50	24,00	23,02	22,60	1,30	6,35
CAS1ºEXP	4,13	3,05	3,00	4,37	5,90	4,09	1,18	29,01
CAS2ºEXP	4,13	4,62	5,85	3,37	4,49	5,50	1,82	33,20
CAS3ºEXP	4,96	4,18	4,72	4,96	5,75	4,91	0,56	11,53
Concreto	28 dias							
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	Média	Desvio Padrão	Coefficiente de Variação (%)
CSR	31,30	30,90	32,50	31,00	30,50	31,24	1,80	5,5
CAS1ºEXP	4,57	5,01	5,11	3,93	4,70	4,66	1,16	20,97
CAS2ºEXP	6,88	6,19	5,65	6,59	8,35	6,73	1,16	20,97
CAS3ºEXP	4,82	5,45	5,21	5,41	4,28	5,03	1,16	20,97

Observa-se por meio dos dados de resistência a compressão que os concretos de referência produzidos com seixo rolado (CSR) com idade de 7 e 28 dias apresentaram valores de resistência superiores aos concretos confeccionados a partir de agregados sintéticos (CAS). A redução dos valores de resistência a compressão para estes concretos está associado ao fato de que os agregados sintéticos apresentaram valores de massa específica inferiores aos do agregado natural (seixo rolado), em função da elevada porosidade destes agregados, o que está de acordo com os trabalhos de Rosário (2013), Souza (2010) e Gomes et al. (2015), em cujos estudos a resistência à compressão dos concretos se reduz à medida que a massa específica dos agregados diminui.

A afirmativa descrita anteriormente é também comprovada quando compara-se os resultados obtidos de resistência à compressão dos concretos produzidos apenas com agregados sintéticos, ou seja, aqueles que apresentaram maior massa específica tiveram maior resistência, onde podemos citar os concretos produzidos com os agregados sintéticos do 2º Experimento (CAS2º Experimento) e os que mostraram menor massa específica resultaram em concretos com menor resistência a compressão, o que foi verificado nos concretos confeccionados a partir dos agregados do 1º Experimento (CAS1º Experimento).

Além da menor massa específica e elevada porosidade dos agregados sintéticos, os quais provocaram baixa resistência dos concretos produzidos com estes agregados, outros fatores estão associados à redução dos valores de resistência a compressão, como: o tipo de ruptura do concreto e os vazios formados após a desforma nos corpos de prova.

Para tratar a respeito do tipo de ruptura ocorrida no concreto, é importante visualizar a Figura 5.35 que mostra a ruptura de um corpo de prova ensaiado com idade de 28 dias.



Figura 5.35 – Ruptura ocorrida no concreto

Observa-se na Figura 5.35 a ruptura ocorrida nos concretos produzidos com os agregados sintéticos em todos os experimentos, onde se verifica que a ruptura ocorreu no agregado. Segundo Zhang e Gjorv (1991), os concretos produzidos com agregados leves, que caracteristicamente são menos resistentes que a matriz de cimento, a propagação das fissuras ocorre geralmente nos agregados, fazendo com que ocorra um acúmulo de tensões na matriz de cimento, ocasionando desse modo, uma ruptura brusca no concreto. Estes dados da literatura, estão de acordo com os obtidos para os concretos com agregados sintéticos, uma vez que estes foram classificados como agregados leves e apresentaram ruptura mais frágil, típica deste tipo de material quando comparado aos concretos produzidos com agregados naturais, seixo rolado.

De acordo com Rosário (2013), os concretos formados a partir de agregados com massa específica normal, a exemplo o seixo rolado, quando submetidos à tensão de compressão, a propagação das fissuras, de modo geral, ocorre na matriz de cimento ou na interface agregado-matriz, pois, geralmente, o agregado mostrar-se mais resistente do que a matriz de cimento.

Os vazios formados após a desforma nos corpos de prova, conforme a Figura 5.36 (a e b) foi outro fator que contribuiu para a redução da resistência à compressão dos concretos formados pelos agregados sintéticos.

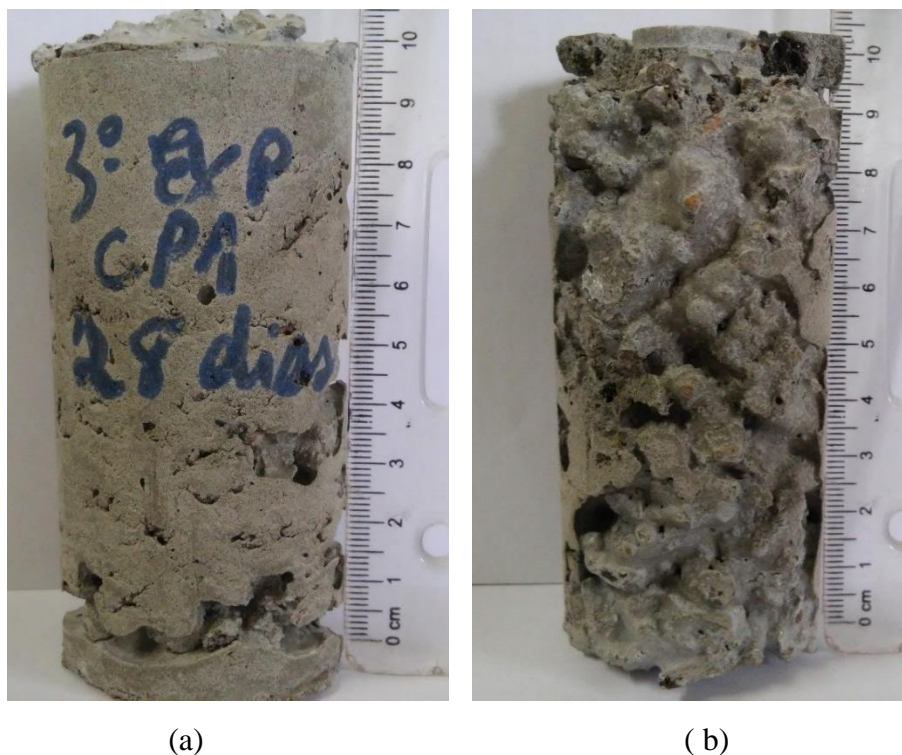


Figura 5.36 – Formação de vazios no corpo de prova

A Figura 5.36 evidencia a formação de vazios nos corpos de prova após a desforma, nos concretos produzidos com agregado sintético. O que se observou diante do aspecto dos corpos de prova moldados, que mesmo aplicando a normatização estabelecida para a produção de concretos, estes apresentaram vazios que resultaram em baixas resistências à compressão axial, em função da pasta de cimento não ter envolvido suficientemente os agregados. A característica observada está intrinsecamente relacionada a elevada porosidade que os agregados apresentaram, onde esta propriedade provocou maior absorção de água e conseqüentemente da pasta hidratada de cimento.

As características observadas anteriormente foram encontradas na literatura por alguns autores como Rossignolo (2003), o qual relatou em seu trabalho que a porosidade e a elevada absorção de água afetam significativamente a trabalhabilidade, a zona de transição (pasta-agregado) e a resistência do concreto. Para este autor e Gomes et al. (2015), agregados leves com valores elevados de absorção de água é recomendado realizar uma pré-umidificação, para evitar prejuízos na trabalhabilidade do concreto fresco. Assim, concluiu-se que para os valores de porosidade determinados para os agregados sintéticos produzidos neste trabalho, existe a necessidade de realizar uma pré-umidificação destes tipos de agregados antes de realizar o preparo do concreto, com a finalidade de evitar a formação de vazios.

Após a análise dos dados de resistência a compressão, é possível relacionar o quanto que o grau de sinterização obtido em cada experimento, variando-se a velocidade de ar, interferiu nas propriedades e características dos agregados, além dos concretos produzidos a partir destes, pois conforme as literaturas citadas anteriormente com relação a formação de mulita, a qual está associada ao aumento na resistência mecânica do material, constatou-se de fato, que os agregados constituídos com maior formação de mulita secundária, evidenciada no 2º Experimento, tiveram maior resistência mecânica, seguido do 3º e 1º Experimento, respectivamente.

A Tabela 5.7 mostra a relação entre a medida das propriedades cerâmicas dos concretos produzidos e o comportamento da resistência à compressão destes materiais, com idade de 28 dias. As medidas de massa específica, porosidade e absorção de água, que caracterizam as propriedades cerâmicas, foram determinadas de acordo com a ABNT NBR 9778:2005 que especifica o método de ensaio para concretos endurecidos.

Tabela 5.7 – Propriedades cerâmicas e resistência à compressão dos concretos

Concreto	Massa específica (g.cm ⁻³)	Porosidade (%)	Absorção de água (%)	Resistência à compressão(MPa)
CSR	2,17	17,65	8,14	31,24
CAS1ºEXP	1,54	19,92	12,95	4,66
CAS2ºEXP	1,58	20,16	12,75	6,73
CAS3ºEXP	1,55	21,13	13,69	5,03

Os resultados apresentados na Tabela 5.7 inferem que quanto maior a massa específica do concreto maior a resistência à compressão deste material, comprovando que estas propriedades são grandezas diretamente proporcionais, ou seja, quanto maior o valor da massa específica dos agregados, maior resistência estes terão, e conseqüentemente essas características serão transmitidas aos concretos produzidos, de acordo com as literaturas apresentadas sobre estas propriedades no início das discussões destes resultados. Segundo a ABNT NBR 12655:2006, os resultados obtidos permitem classificar os concretos produzidos a partir dos agregados sintéticos, como concreto leve, pois os resultados obtidos para a massa específica apresentaram valores abaixo de 2 g.cm⁻³, portanto menores que os concretos produzidos com o seixo rolado, classificados como concretos normais com massa específica maior que 2 g.cm⁻³.

Segundo a ABNT NBR NM 35:1995, a partir dos dados de resistência à compressão, os concretos produzidos com agregados sintéticos são classificados como não estruturais, pois apresentaram resistências inferiores ao limite especificado de 17 MPa, para concretos leves estruturais, podendo ser classificados como concretos leves isolantes ou de resistência moderada. Para os resultados de resistência a compressão dos concretos produzidos com seixo rolado, estes são classificados como estruturais, de acordo com a ABNT NBR 8953:1992, a qual descreve para concretos normais, aqueles que fazem parte dos grupos de resistência que apresentam de 10 a 80 MPa.

As resistências à compressão aos 28 dias dos concretos com agregados sintéticos produzidos em todos os experimentos, indicam que estes agregados podem ser usados em concretos sem função estrutural, como por exemplo em contrapiso.

5.4.3 Microscopia eletrônica de varredura nos grupos de concretos produzidos

As micrografias a seguir apresentam a microestrutura dos concretos produzidos com seixo rolado e com agregados sintéticos. Nestas, foram identificadas três regiões na microestrutura: matriz de cimento, agregado e a zona de transição que serão discutidas a seguir. A Figura 5.37 mostra a microestrutura do concreto produzido com seixo rolado.

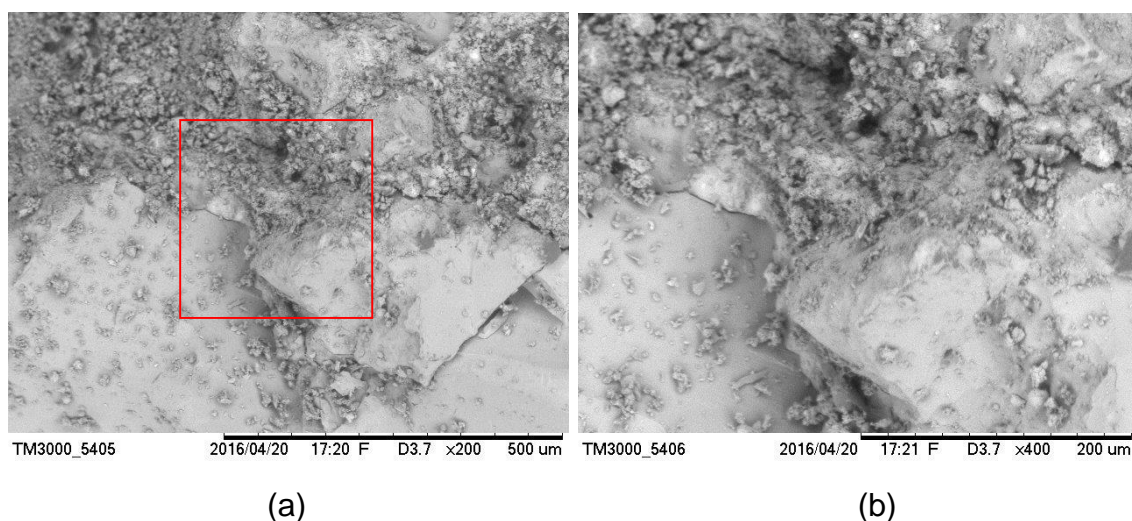


Figura 5.37 – Micrografia do concreto com seixo rolado (CSR)

Observa-se na Figura 5.37 e, nas demais micrografias dos concretos, uma área delimitada (Figura a) para indicar que foi nessa região que se fez um aumento para visualizar melhor as regiões mencionadas anteriormente (Figura b).

Na microestrutura representada na Figura 5.37, a área mais clara é identificada pelo agregado (seixo rolado); a região mais escura encontra-se a matriz de cimento e entre essas duas regiões está situada a zona de transição. Verificou-se através da interface (zona de transição) a interação da matriz de cimento com o agregado, evidenciando que ocorreu uma boa aderência nesta região. Além deste fator, observou-se que o concreto de referência se apresenta mais compacto e com menos poros perceptíveis. As Figuras 5.38 a 5.40 apresentam as micrografias dos concretos produzidos com os agregados sintéticos obtidos no 1º, 2º e 3º experimento, respectivamente. Nestas micrografias a região mais clara é identificada pela matriz de cimento, a mais escura pelo agregado e entre estas a zona de transição.

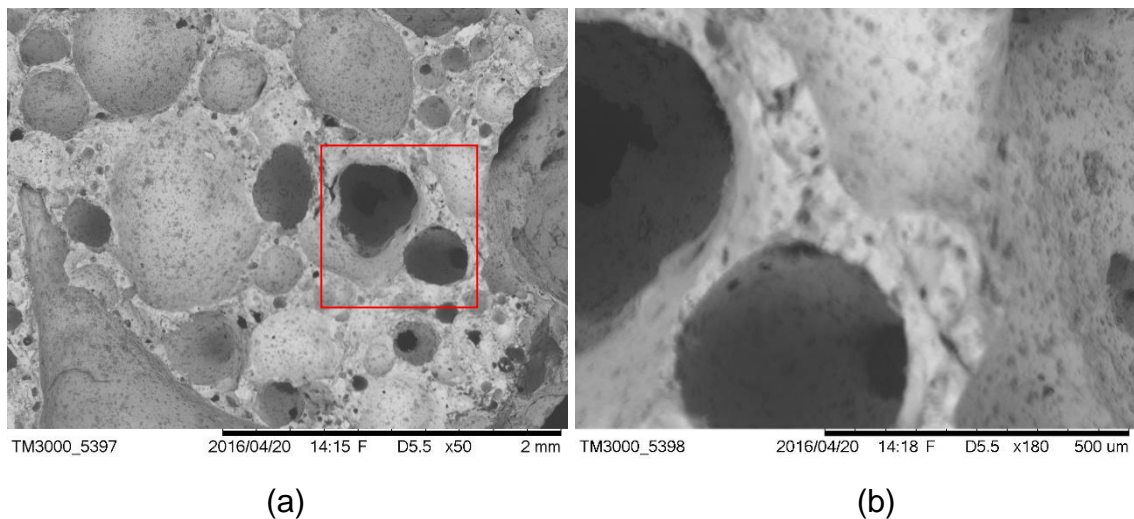


Figura 5.38 – Micrografia do concreto com agregados do 1º experimento (CAS1°EXP)

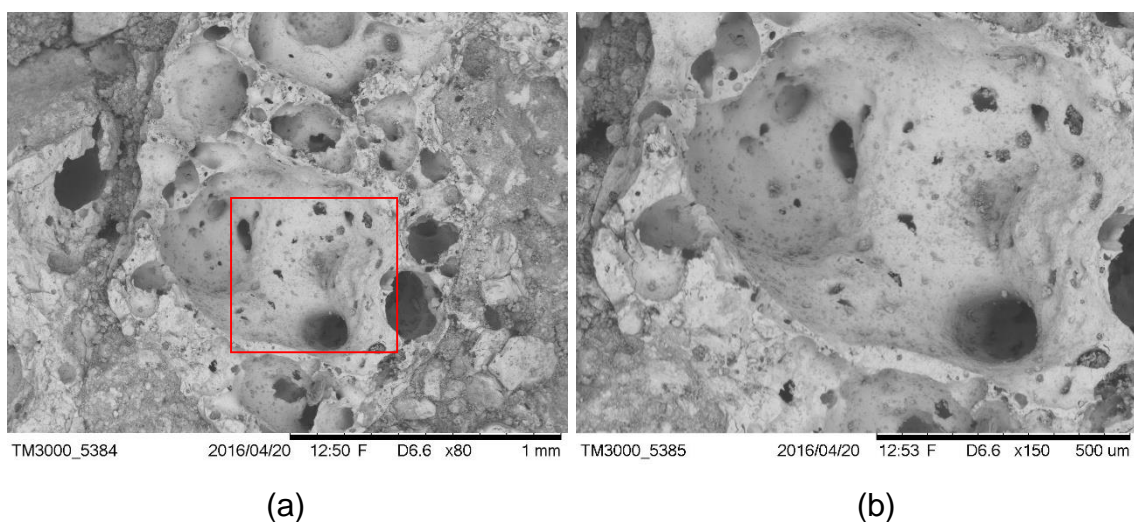


Figura 5.39 – Micrografia do concreto com agregados do 2º experimento (CAS2°EXP)

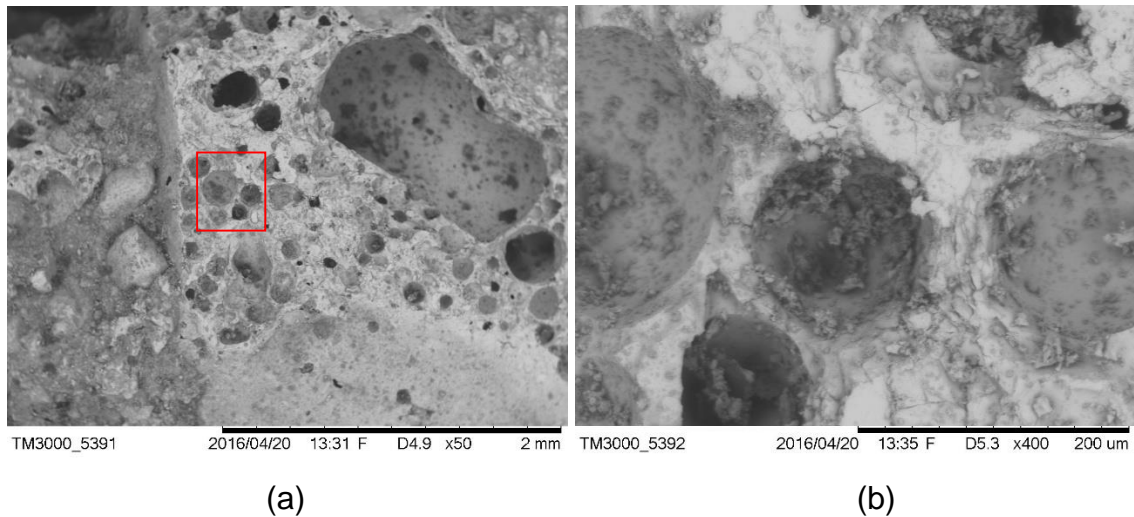


Figura 5.40 – Micrografia do concreto com agregados do 3º experimento (CAS3ºEXP)

Observa-se nos grupos de concreto com agregado sintético, quando comparados aos que foram produzidos com seixo rolado, uma maior quantidade de poros na estrutura. Ao analisar a interface da matriz de cimento com o agregado sintético, observou-se que ocorreu também interação nesta região, indicando uma boa aderência no material, o que está de acordo com a literatura relacionada à produção de agregados leves, pois no trabalho de Cabral *et al.* (2008) uma característica importante a ser observada nesses agregados é a boa aderência entre estes e a pasta hidratada de cimento que envolve esses materiais, devido a textura áspera da superfície desses agregados, resultando em um intertravamento mecânico entre o agregado e a pasta de cimento.

Observa-se também que a porosidade evidenciada nos agregados sintéticos produzidos permitiu a boa aderência verificada nas microestruturas dos concretos produzidos com estes materiais, visto que esta propriedade influencia diretamente na aderência entre os agregados e a pasta de cimento.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

O reator vertical de leito fixo projetado para uma combustão co-corrente unidimensional, permitiu um satisfatório processo de sinterização para obtenção do agregado sintético, por meio do controle de alguns parâmetros como composição, granulometria das matérias primas, gradiente de temperatura e fluxo de ar, pois de acordo com as evoluções e perfis de temperatura, o processo de sinterização ocorreu em temperaturas elevadas, acima de 1.000 °C, em todos os experimentos, fato que garante a eficiência das reações de estado sólido.

Por meio da análise dos resultados é possível inferir com relação a caracterização das matérias primas, que a cinza volante e argila apresentam potencial para serem utilizadas como constituintes da mistura juntamente com o carvão vegetal, na produção de agregado sintético. Isto deve-se ao fato de que a cinza e a argila são ricas em silico-aluminatos e que o carvão vegetal apresentou eficiência durante o processo de combustão nas velocidades de ar estabelecidas, onde a faixa de temperatura obtida em todos os experimentos garantiu um bom desempenho das reações de estado sólido durante a sinterização da mistura, formando produtos com diferentes massas específicas, conforme o grau de sinterização.

Os resultados das propriedades cerâmicas classificaram os materiais sinterizados como agregado leve, segundo a normatização em todos os experimentos, pois estes apresentaram massa específica abaixo de 2 g.cm⁻³. Assim, observou-se para o 2º Experimento realizado com velocidade de ar de 0,0098 m.s⁻¹ que o grau de sinterização foi maior, onde o agregado sintético apresentou massa específica de 1,06 g.cm⁻³, seguido do 3º Experimento (0,017 m.s⁻¹) com 1,03 g.cm⁻³ e 1º Experimento (0,0059 m.s⁻¹) com 0,99 g.cm⁻³. Em conjunto com os resultados para massa específica, os agregados produzidos apresentaram elevada porosidade e absorção aparente, característicos do processo de sinterização de agregado leve.

As transformações de fases no material ocorreram a partir das reações de estado sólido nos sílico-aluminatos, responsáveis pela nucleação e crescimento de mulita acicular, fase mineralógica que conferiu resistência mecânica ao agregado produzido comprovada através das análises de microscopia eletrônica de varredura e difração de

raios-X. Assim, verificou-se através destas análises, que a formação de mulita secundária está diretamente ligada a qualidade do produto obtido em cada experimento realizado.

Diante deste contexto, os resultados de resistência mecânica dos concretos fabricados com o agregado sintético, mostraram a influência do teor de mulita secundária nesta propriedade, onde verificou-se que os concretos produzidos com idade de 28 dias, a partir dos agregados sintéticos do 2º Experimento, os quais evidenciaram maior formação de mulita secundária, estes apresentaram maiores valores de resistência à compressão, quando comparados aos concretos produzidos no 3º Experimento, em que os agregados apresentaram mulitas primárias, secundárias e regiões de nucleação e crescimento de mulitas secundárias a partir de estruturas primárias e para os concretos fabricados no 1º Experimento, tiveram menor resistência à compressão, pois nestes os agregados mostraram maior incidência de mulitas primárias e poucas regiões de formação de mulita secundária.

O processo desenvolvido para a produção de agregado sintético, caracterizado como leve neste estudo em função de sua elevada porosidade, apresentaram baixos valores de massa específica e resistência a compressão nos concretos produzidos com estes materiais em relação aos concretos produzidos com seixo rolado. No entanto, a porosidade dos agregados produzidos é um fator importante que auxilia na aderência da interface matriz de cimento e agregado, conforme observado na microscopia eletrônica de varredura dos concretos.

De acordo com as condições experimentais estabelecidas neste trabalho, os agregados sintéticos apresentam potencial para utilização em concretos sem função estrutural na construção civil, mas com aplicações de resistência moderada, e podem ser utilizados em contrapiso. Desta forma a contribuição desse trabalho está relacionada a formulação de um processo de caráter ambiental e autossustentável do ponto de vista energético para produção de agregado sintético, com capacidade de substituir agregados naturais, com controle das propriedades cerâmicas e resistência mecânica, melhorando a qualidade do concreto, utilizando como base a reciclagem de resíduos industriais, neste caso a cinza volante e biomassas.

CAPÍTULO 7

MELHORIAS FUTURAS

Neste capítulo são apresentadas algumas melhorias para trabalhos futuros, por meio da utilização do reator vertical de leito fixo:

- Estudar a sinterização em diferentes percentuais, em relação ao volume do reator, referente aos materiais de preenchimento do leito: pelotas e carvão granulado.

- Avaliar a sinterização da mistura pelletizada em diferentes composições das matérias primas.

- Substituir a argila na composição das pelotas por resíduo de caulim, uma vez que esse apresenta elevados teores de sílico-aluminatos, constituintes favoráveis a formação de mulita, auxiliando na reciclagem dos resíduos industriais e melhorando a resistência mecânica.

- Utilizar outros resíduos a base de carbono como combustíveis sólidos.

- Estudar as características da propagação da frente de combustão ao longo do processo de sinterização, variando-se a composição da mistura pelletizada.

- Verificar a influência da pré-umidificação na trabalhabilidade e resistência de concretos produzidos com agregado sintético leve.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1983, “NBR 7211: *Agregado para concreto*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1984, “NBR 6465: *Agregados - Determinação da abrasão Los Angeles*”, Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1986, “NBR 8112: *Carvão vegetal – análise imediata*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1991, “NBR 11578: *Cimento Portland comum: Especificação*”, Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, “NBR 12653: *Materiais Pozolânicos*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1992, “NBR 8953: *Concreto para fins estruturais - Classificação por grupos de resistência*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1995, “NBR NM 35: *agregados leves para concreto estrutural: especificação*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003, “NBR 5738: *Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, “NBR 10007: *Amostragem de resíduos sólidos*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004a, “NBR 10004: *Resíduos sólidos - Classificação*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004c, “NBR 10006: *Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, “NBR 7211: *Agregados para concreto - Especificação*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2005, “NBR 9778: *Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2006, “NBR 12655: *Concreto de cimento Portland – Preparo, controle e recebimento - Procedimento*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2007, “NBR 5739: *Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*”, Rio de Janeiro.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “NBR 7211: *Agregados para concreto – Especificação*”, Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2009, “NBR 7389-1: *Apreciação petrográfica de materiais naturais, para utilização como agregado em concreto*”, Rio de Janeiro.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011, “NBR 9935: *Agregados – Terminologia*”, Rio de Janeiro.

ACIJ, NÚCLEO DE MEIO AMBIENTE, *Resíduos Industriais*. Disponível em: <<http://www.meioambienteacij.com.br>>. Acesso em: 05 nov. 2009.

AHMARUZZAMAN, M. A., “Review on the Utilization of Fly Ash”. *Progress in Energy and Combustion Science*, p. 327-363, 2010.

ALBUQUERQUE, N. G., *Estudo das Propriedades Mecânicas de Concretos Dosados com Agregados Produzidos a partir de Lama Vermelha*. Trabalho de conclusão de curso de Especialização em Engenharia Civil., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM C618: *Standart specification for coal fly ash and raw of calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete*, Philadelphia, 1995.

ANEPAC, ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS ENTIDADES DE PRODUTORES DE AGREGADOS PARA CONSTRUÇÃO, *Panorama e perspectivas para o setor de agregados para construção*. Nov. 2015. 6 p. Disponível em: <http://www.anepac.org.br/agregados/mercado/item/8-mercado-de-agregados-no-brasil>. Acesso em: 15 Dez. 2015.

ANFACER - Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimento, 2012. *Panorama da indústria cerâmica brasileira*, SP: ANFACER, 24p.

ANJOS, A. C. S., *Modelagem Computacional do Processo de Ignição na Combustão de um Meio Poroso Reativo*. Dissertação de M. Sc., UFES, Vitória, ES, Brasil, 2015.

ARRIVABENE, L. F., CALMON, J. I., SOUZA, F. L. S., *et al.* “Escória de alto forno em concretos: propriedades mecânicas e análise petrográfica”. Anais do 61º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, Brasil, 24-27 Julho, 2006.

BACELLAR, A. A., *Competitividade da Alvenaria Estrutural na Cidade de Manaus*. Dissertação de M.Sc., CPG-FT/UFAM, Manaus, AM, Brasil, 2001.

BEJAN, A., DONALD, A. N., 2006, *Convection in Porous Media*, Third Edition, New York, Springer.

BIANCHINI, G., MARROCCHINO, E., TASSINARI, R., VACCARO, C., 2005, “Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal”, *Waste Manag*, v. 25, n. 2, pp. 149-59.

BORLINI, M. C., COSTA MENDONÇA, J. L. C., VIEIRA, C. M. F., *et al.*, 2006, “Influência da temperatura de sinterização nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais de cerâmica vermelha incorporada com cinza de bagaço de cana de açúcar”, *Revista Matéria*, v. 11, n. 4, pp. 435-443.

BRINDLEY, G. W., NAKAHIRA, M., 1959, “The kaolinite-mullite reaction series: I, a survey of outstanding problems”, *Journal of the American Ceramic Society*, v. 42, n. 7, pp. 311- 313.

CABRAL, A. E. B., SCHALCH, V., DAL MOLIN, D. C. C, RIBEIRO, J. L. D., 2007, “Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD”, *Minerva*, v. 4, n. 1, pp. 75-84.

CABRAL, E. M., SÁ, R. J., VIEIRA, R. K., VASCONCELOS, R. P., 2008, “Utilização de massas cerâmicas na produção de agregado sintético de argila calcinada para uso em concreto”, *Cerâmica*, v. 54, pp. 404-410.

CALDERONI, S., 1999, *Os Bilhões Perdidos no Lixo*. São Paulo, 3ª edição, Editora Humanitas.

CALLISTER, W. D., 2008, *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th Ed., New York, John Wiley.

CAMPOS, C. F. S., MAZINI, G. B., SILVA, G. A. N., 2012, “Análise das propriedades físicas e mecânicas do concreto produzido com resíduo sólido de cerâmica vermelha”, *Colloquium Exactarum*, v. 4, n. 2, pp. 01-11.

ÇIÇEK, T., ÇINÇIN, Y., 2015, “Use of fly ash in production of light-weight building bricks”, *Construction and Building Materials*, v. 94, pp. 521-527.

CRUZ, A. A. F., *Estudo sobre a Utilização do Resíduo da Queima da Biomassa em Argamassas*. Dissertação de M. Sc., UDESC, Joinville, SC, Brasil, 2002.

DIXON, A., “An improved equation for the overall heat transfer coefficient in packed beds” , *Chemical Engineering and Processing*, V.35, p.323-331. 1996.

DOU, DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, *Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010*.

DUQUE, J. V. F. Um Novo Processo para Craqueamento Térmico: Produção de Hidrocarbonetos Com Alto Valor Agregado a Partir de Resíduos de Polietileno. [Tese de Mestrado] UFES, 2013.

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. Manual de métodos de análise de solo, Rio de Janeiro, 212p.

EROL, M.; GENÇ, A.; ÖVECOĞLU, M. L.; YÜCELEN, E., *et al.*, “Characterization of a glass-ceramic produced from thermal power plant fly ash”. *Journal of the European Ceramic Society*, Amsterdam, v.20, p.2209-2214, 2000.

ESSENHIGH, R. H.; MISRA, M. K.; SHAW, D. W. “Ignition of coal particles: A review”. *Combustion and Flame*, v. 77, n. 1, p. 3–30, jul. 1989.

FARIA, K. C. P., *Avaliação da Adição de resíduo de Cinzas de Bagaço de Cana-de-Açúcar nas Propriedades e Microestruturas de Cerâmica Vermelha*. Dissertação de M.Sc., UENF, Goytacazes, RJ, Brasil, 2011.

FERREIRA, K. C., CARDOSO, D. N. P., GONÇALVES, S. G., “Estudo do Efeito Pozolânico da Cinza Volante na Produção de Argamassas Mistas: Cal Hidratada, Rejeito de Construção Civil e Cimento Portland”. *XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, COBEQ-2014*, Florianópolis, Brasil, 19-22 Outubro, 2014.

FRAZÃO, E. B.; PARAGUASSU, A. B. *Materiais Rochosos para Construção*. Geologia de Engenharia. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, v. único, p. 331-342, 1998.

FREIRE, J. W., BERALDO, L. A., “Tecnologia e materiais alternativos de construção”, Editora UNICAMP, 2003.

GOMES, D. P. N, *Dosagem de Microconcretos Leves de Alto Desempenho para a Produção de Pré-Fabricados de Pequena Espessura – Estudo de Caso*. Dissertação de M.Sc., EESC/USP, São Carlos, SP, Brasil, 1998.

GOMES, P. C. C., ALENCAR, T. F. F., SILVA, N. V., MORAES, K. A. M., ÂNGULO, S. C., 2015, “Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados”, *Ambiente Construído*, v. 15, n. 3, pp. 31-46.

GÓMEZ, M. A. et al. “CFD modelling of thermal conversion and packed bed compaction in biomass combustion”. *Fuel*, v. 117, p. 716–732, 2014.

GÜNEYISI, E., GESOGLU, M., AZEZ, O. A., ÖZ, H. Ö., 2015, “Physico-mechanical properties of self-compacting concrete containing treated cold-bonded fly ash lightweight aggregates and SiO₂ nano-particles”, *Construction and Building Materials*, v. 101, Part 1, pp. 1142-1153.

HILDEBRANDO, E. A., SOUZA, J. A. S., NEVES, R. F., 1999, “Aplicação do Rejeito do Processo Bayer (Lama Vermelha) como Matéria prima na Indústria de Cerâmica Estrutural”. In: *Anais do 43º Congresso Brasileiro de Cerâmica e 4º Congresso de Cerâmica do Mercosul*, pp. 28101-28111, Florianópolis, SC, Brasil.

HOBBS, M. L., RADULOVIC, PT., SMOOT, L. D. “Combustion and gasification of coals in fixed-beds”, *Prog Energy Combust Sci*, 1993;19(6):505–86.

HOPPE, J. F. *Sistemas Cimento, Cinza Volante e Cal Hidratada: Mecanismo de Hidratação, Microestrutura e Carbonatação de Concreto*. Tese de D.Sc., USP, São Paulo, SP, Brasil, 2008.

IBGE, INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, *Contas Nacionais Trimestrais*: indicadores de volume e valores correntes. Out./dez. 2011. 42 p. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Contas_Nacionais/Contas_Nacionais_Trimestrais/F

asciculo_Indicadores_IBGE/2011/pib-vol-val_201104caderno.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2014.

ITSKOS, G., KOUTSIANOS, A., KOUKOUZAS, N., VASILATOS, C., 2015, “Zeolite development from fly ash and utilization in lignite mine-water treatment”, *International Journal of Mineral Processing*, v. 139, pp. 43-50.

JAHREN, P. **Greener Concrete – What are the Options ?** SINTEF Report n. STF-A03610, 2003.

JIA, L. et al. “Study of coal and coke ignition in fluidized beds”. *Fuel*, v. 85, n. 5-6, p. 635–642, 2006.

KAVIANY, M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. Edited by Springer. Vol. 1. New York: Mechanical Engineering Series, 1995.

KINGERY, W. D.; BOWEN, H. K.; UHLMANN, D. R., *Introduction to Ceramics, 2nd Edition*. 1976. 1017p. il.

KLOTTEN, R. *Manufacture of Lightweight Aggregate (LWA) from Fly Ash*. Disponível em: <<http://ccsenet.org/journal/index.php/mas/article/view/6024/4859>>. Acesso em 31 jul. 2012.

KUMAR, R. R.; KOLAR, A. K.; LECKNER, B. “Shrinkage characteristics of Casuarina wood during devolatilization in a fluidized bed combustor”. *Biomass and Bioenergy*, v. 30, n. 2, p. 153–165, 2006.

LACÔRTE, P. M. R., *Aproveitamento de Resíduos da Construção Civil*. Monografia, UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2013.

LAURENTINO, C. L., *Transferência de calor em leitos fixos com aplicação em reatores de fermentação em estado sólido*. Dissertação de M.Sc., UNESP, São Paulo, SP, Brasil, 2007.

MANUTENÇÃO & SUPRIMENTOS, *Uso do Forno Rotativo*. Disponível em: <<http://www.manutencaoesuprimentos.com.br>>. Acesso em: 04 Jul. 2015.

MARTINS, M. F., SALVADOR, S., THOVERT, J. F., *et al.*, “Co-current combustion of oil shale Part 1: Characterization of the solid and gaseous products”. *Fuel (Guildford)*, v. 89, p. 144-151, 2010.

MARTINS, M. F., ZANONI, M. A. B., MACÊDO, E. N., “Modeling the Thermochemical Conversion of Single Wood particle”. In: *23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Lausanne-Suisse, 2010.

MARTINS, M.F., *The Structure of a Combustion front Propagating in a Fixed Bed of Crushed Oil Shale: Co-Current Configuration*. Ph.D. thesis, Université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2008.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. 3. ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

MEHTA, P.K., MONTEIRO, P.J.M. *Concreto: estrutura, propriedades e materiais*. 1 ed. São Paulo: Pini, 1994. 573 p.

MEIRELLES, J. F., 2007, *O Livro de Ouro da Amazônia*. São Paulo, Editora Geral Livros.

MELO, A. O., MACÊDO, E. N., QUARESMA, D. S., *et al.* “Sintering of clay pellets, charcoal and fly ash in a combustion cell in fixed bed: analysis of propagation of a combustion reaction front through a porous material”. *Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, COBEM-2015*, Rio de Janeiro, Brazil, 6-11 December, 2015.

MENEZES, R. R., NEVES, G. A., FERREIRA, H. C., 2002, “O estado da arte sobre o uso de resíduos como matérias primas cerâmicas alternativas”, *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, n. 2, pp. 303-313.

MISSIAGGIA, R. R., *Gestão de Resíduos Sólidos Industriais: Caso Springer Carrier*. Dissertação de M.Sc., UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil, 2002.

MONHOL, F. A. F., *Uma Contribuição Experimental aos Fundamentos da Propagação de uma Frente de Combustão em Meio Poroso*. Dissertação de M.Sc., UFES, Vitória, ES, Brasil, 2015.

MONHOL, F. A. F.; MARTINS, M. F. “Cocurrent Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste”. *Waste and Biomass Valorization*, v. 6, n. 3, p. 425–432, 2015.

MONTEIRO, R. R., SABIONI, A. C. S., COSTA, G. M., 2004, “Preparação de mulita a partir do mineral topázio”, *Cerâmica*, v. 50, pp. 318-323.

MORAVIA, W.G. *Influência dos Parâmetros Microestruturais na Durabilidade do Concreto Leve Produzido com Argila Expandida*. Tese de D.Sc., UFMG, Belo Horizonte, MG, Brasil, 2007.

MOTTA, J. F. M., ZANARDO, A., CABRAL, M. J., 2001, “As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos”, *Cerâmica Industrial*, v. 6, n. 2 pp. 28-39.

NG, S., JUSTNES, H., 2016, “Influence of plasticizers on the rheology and early heat of hydration of blended cements with high content of fly ash”, *Cement and Concrete Composites*, v. 65, pp. 41-54.

NORTON, F. H., *Introdução a Tecnologia Cerâmica*. São Paulo, Edgard Blucher, 1973.

OEL, H. J., 1985, “Sintering of crystalline ceramics”, *Fortschritte der Mineralogie*, v. 63, Supplement 1, pp. 167-167.

OHLEMILLER, T. J. Smoldering Combustion. In: DINENNO, P. J. (Ed.). **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering (3rd Ed.)**. Quincy, Massachusetts: National Fire Protection Association, 2002. p. 200–210.

OHLEMILLER, T. J., 1985, “Modeling of smoldering combustion propagation”, *Progress in Energy and Combustion Science*, v. 11, n. 4, p. 277–310.

OLIVEIRA, L. G., LIMA, W. C. P. B., LIMA, A. G. B., “Transporte de calor em regime permanente em um reator cilíndrico circular de leito fixo: um estudo experimental”, *Revista Eletrônica de Materiais e Processos*, v.6.1, 48-58, 2011.

PAPROCKI, A., CARDOSO, A.M., LIGAVUE, R.A., *et al.* “Caracterização de cinzas leves oriundas da combustão de carvão pulverizado visando sua aplicação na síntese de zeólitas”. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais*, CBECIMAT, Porto de Galinhas, Brasil, p.676, 2008.

PIRES, M., QUEROL, X., TEIXEIRA, E. C., 2002, “Caracterização do carvão de Candiota e de suas cinzas”, *Geochimica Brasiliensis*, v. 15, n. 1/2, pp. 113-130.

POON, C. S., WONG, Y. L. & LAM, L., “The Influence of Different Curing Conditions on the Pore Structure and Related Properties of Fly-Ash Cement Pastes and Mortars”, *Construction and Building Materials*, vol. 11. Great Britain, p. 383-393, 1997.

POPOVICS, S. *Concrete materials: properties, specifications and testing*. 2 ed. New Jersey: Noyes Publications, 1992. 661 p.

POWERS, M. C., 1953, “A New Roundness Scale for Sedimentary Particles”, *Journal of Sedimentary Petrology*, v. 23, pp. 117-119.

REIN, G. *Computational Model of Forward and Opposed Smoldering Combustion With Improved Chemical Kinetics*. Tese de D.Sc, Berkeley, U C, 2005.

REIN, G. et al.” Modeling of one-dimensional smoldering of Polyurethane in microgravity conditions”. *Proceedings of the Combustion Institute*, v. 30 II, n. 2, p. 2327–2334, 2005.

REIS, A. W. C., *Caracterização Mineralógica do Agregado obtido a partir da Lama Vermelha do Processo Bayer*. Dissertação de M.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2014.

ROCHA, C. A. F. J., SANTOS, S. C. A., SOUZA, C. A. G., ANGÉLICA, R. S., NEVES, R. F., 2012, “Síntese de zeólitas a partir de cinza volante de caldeiras: caracterização física, química e mineralógica”, *Cerâmica*, v. 58, pp. 43-52.

ROCHA, J. C., DUAILIBI, J. F., 1991, “Avaliação do efeito do sistema ligante PVA/PEG na microestrutura do compacto a verde, sinterabilidade e resistência mecânica da alumina”. In: *Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Cerâmica e III Iberoamericano de Cerâmica, Vidro e Refratário*, pp. 515-521, Belo Horizonte, MG, Brasil, Maio.

RODRIGUES, C. R. S., FUCALE, S., 2014, “Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil”, *Ambiente Construído*, v. 14, n. 1, pp. 99-111.

ROSÁRIO, K. A., *Concreto com Utilização de Agregado Graúdo Sintético Produzido a partir da Lama Vermelha: Estudos de Dosagem, Propriedade e Microestrutura*. Dissertação de M.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2013.

ROSSI, C. R. C., *Concretos para Reparo com Agregados de Lama Vermelha sob Abrasão Hidráulica*. Trabalho de conclusão de curso de Especialização em Engenharia Civil., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2009.

ROSSIGNOLO, J. A.; AGNESINI, M. V. C. *Concreto Estrutural Leve*. In: ISAIA, G. C. *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: Ibracon, 2005.

ROSSIGNOLO, J.A., *Concreto Leve de Alto Desempenho Modificado com SB para Pré-Fabricados Esbeltos: Dosagem, Produção, Propriedades e Microestrutura*. Tese de D.Sc., USP, São Carlos, SP, Brasil, 2003.

SANTOS, D. H., *Utilização do Rejeito do Processo Bayer como Matéria – Prima na Produção de Agregados Leves*. Dissertação de M.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2011.

SANTOS, M.E. *et. al. Argila expandida como agregado para concreto leve*. Tema livre –Apresentado à reunião anual do IBRACON de 1986.

SANTOS, P. S., 1989, *Ciência e Tecnologia de Argilas*. 2ª edição, São Paulo, Edgard Blucher.

SHAHEEN, S. M., HOODA, P. S., TSADILAS, C. D., 2014, “Opportunities and challenges in the use of coal fly ash for soil improvements – A review”, *Journal of Environmental Management*, v. 145, n. 2, pp. 249-267.

SHIN, D.; CHOI, S. “The combustion of simulated waste particles in a fixed bed”. *Combustion and Flame*, v. 121, n. 1-2, p. 167–180, 2000.

SILVA, N. I. W., CHIES, F. & ZWONOK, O. “Usos de cinzas de carvão na construção civil”. *I Encontro nacional sobre edificações e comunidades sustentáveis*. Anais. Canela: ANTAC, 1997. p. 15-20.

SINGH, B. K., PRAGYA, N., 2015, “Kinetics and Mechanism of removal of Phenol from Aqueous Solutions with Fly ash”, *Research Journal of Chemical Sciences*, v. 5, n. 1, pp. 78-82.

SIQUEIRA, J. S., *Reciclagem de Resíduo a partir de Cinzas de Carvão Mineral: Produção de Argamassas*. Dissertação de M.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2011.

SIQUEIRA, J. S., SOUZA, C. A. G., SOUZA, J. A. S., *et al.*, 2012, “Reaproveitamento de cinzas de carvão mineral na formulação de argamassas”, *Cerâmica*, v. 58, pp. 275-279.

SOUZA, J. A. S. *Estudo e Avaliação do Uso de Resíduos do Processo Bayer como Matéria prima na Produção de Agregados Sintéticos para a Construção Civil*. Tese de D.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2010.

SOUZA, J. A. S., NEVES, R. F., 1995, “Possibilidade de remoção dos compostos de Fe e Ti em caulins sedimentares procedentes do Morro do Felipe no Amapá”. In: XXXV Congresso Brasileiro de Química, v. 1, pp. 23-32, Salvador, BA, Brasil.

SOUZA, J. A., NEVES, R. F., “Características do Resíduo de Lavagem de Bauxita de Porto Trombetas-Norte do Pará para utilização na Indústria Cerâmica”. In:44º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Águas de São Pedro, SP, Brasil, 31 de maio a 4 de Junho, 2000.

SOUZA, R. M. G. L., RODRIGUES, A. C., SANCHES, S., *et al.*, *Gerenciamento dos Resíduos de Serviços de Saúde*. Brasília, 2006.

TAKENAKA, E. M. M., SILVA, B. A. P., ROCHA, S. R. D., *et al.*, *A Destinação dos Resíduos Industriais: Alternativas para um Meio Ambiente Saudável*. Presidente Prudente, 2011.

TANCREDI, G. A. H., *Estudo das Propriedades do Concreto com Adição de Cinza de Carvão Mineral*. Dissertação de M.Sc., UFPA, Belém, PA, Brasil, 2010.

THOMÉO, J. C., *Transferência de Calor em Leito Fixo: O Modelo a Dois Parâmetros Tradicional Revisitado*. Tese de D.Sc., UFS Car, São Carlos, SP, Brasil, 1995.

TSAKIRIDIS, P. E., AGATZINI-LEONARDOU, S., OUSTADAKIS, P., 2004, “Red mud addition in the raw meal for the production of portland cement clinker”, *Journal of Hazardous Materials*, v. 116, pp. 103-110.

UKWATTAGE, N. L., RANJITH, P. G., BOUAZZA, M., 2013, “The use of coal combustion fly ash as a soil amendment in agricultural lands (with comments on its potential to improve food security and sequester carbon)”, *Fuel*, v. 109, pp. 400-408.

VISA, M., 2016, “Synthesis and characterization of new zeolite materials obtained from fly ash for heavy metals removal in advanced wastewater treatment”, *Powder Technology*, v. 294, pp. 338-347.

WANG, S., BOYJOO, Y., CHOUEIB, A., ZHU, Z. H. “Removal of dyes from aqueous solution using fly ash and red mud”, 129-138, 2005.

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

WENDER, A. A.; BALDO, B.B. *O potencial da utilização de um resíduo argiloso na fabricação de revestimento cerâmico – Parte II*. Cerâmica Industrial, São Paulo, v.3, n.1-2, p.34-36, 1998.

YEOLE, K., KADAM, P., MHASKE, S., 2014, “Synthesis and characterization of fly ash-zinc oxide nanocomposite”, *Journal of Materials Research and Technology*, v. 3, n. 2, pp. 186-190.

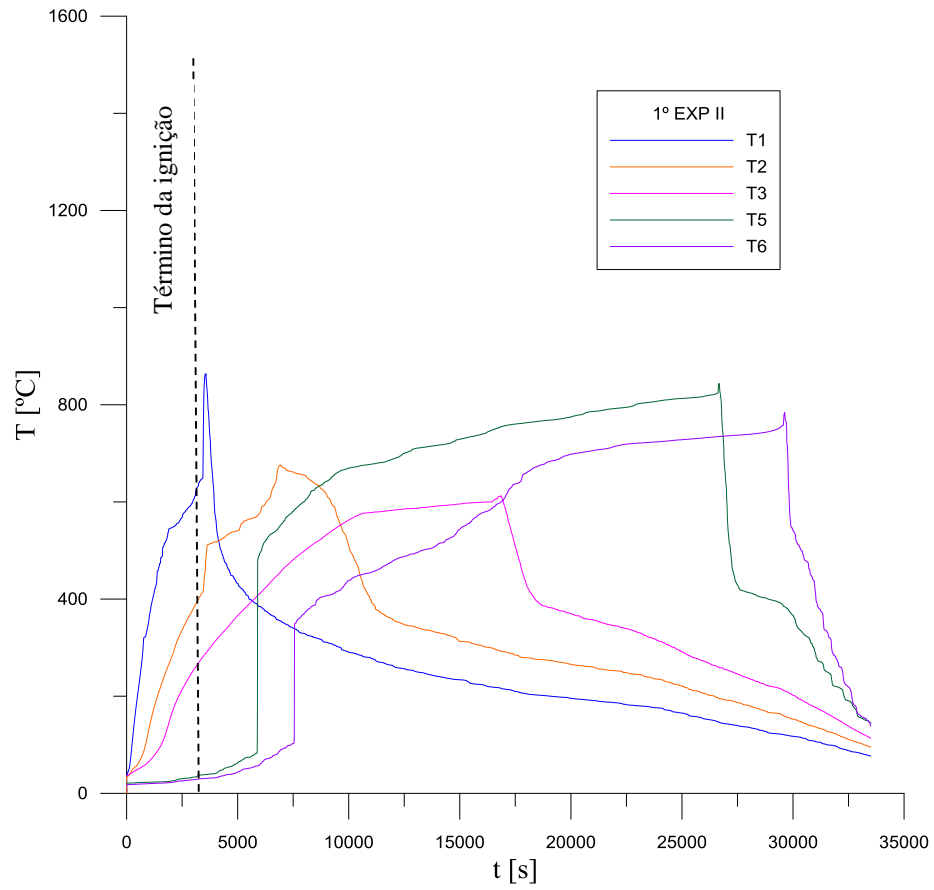
YIU LO, T., CUI, H., MEMON, S. A., NOGUCHI, T., 2016, “Manufacturing of sintered lightweight aggregate using high-carbon fly ash and its effect on the mechanical properties and microstructure of concrete”, *Journal of Cleaner Production*, v. 112, Part 1, pp. 753-762.

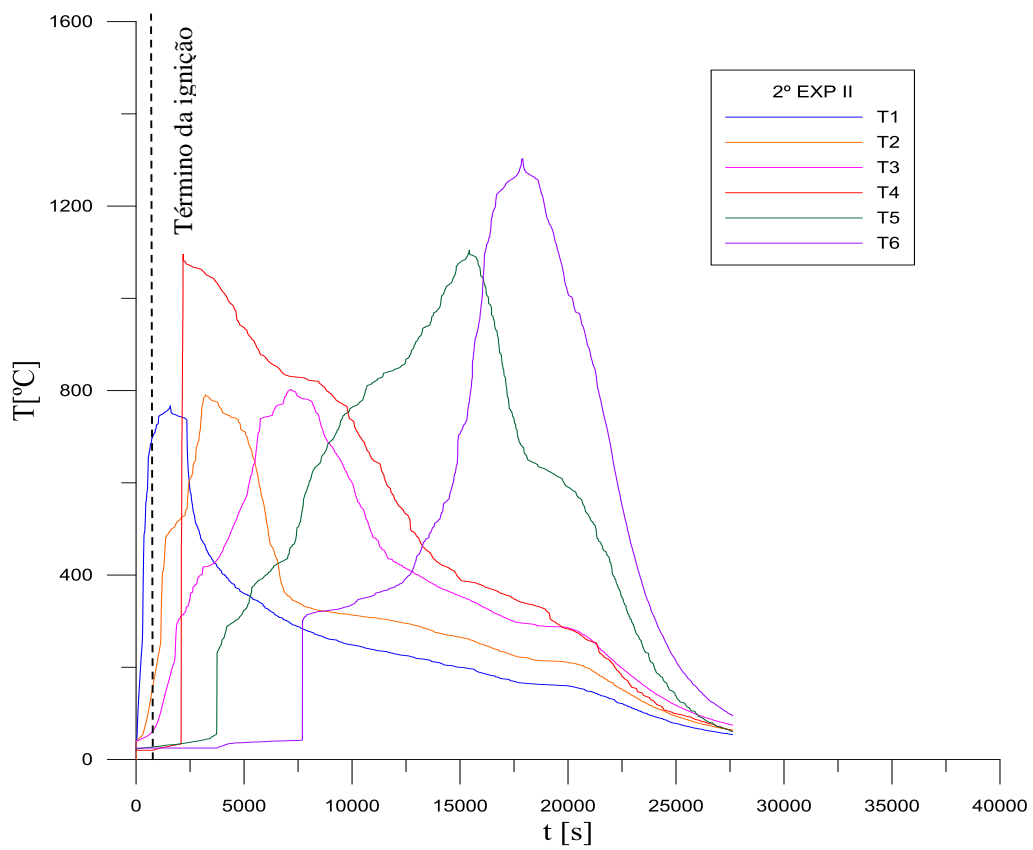
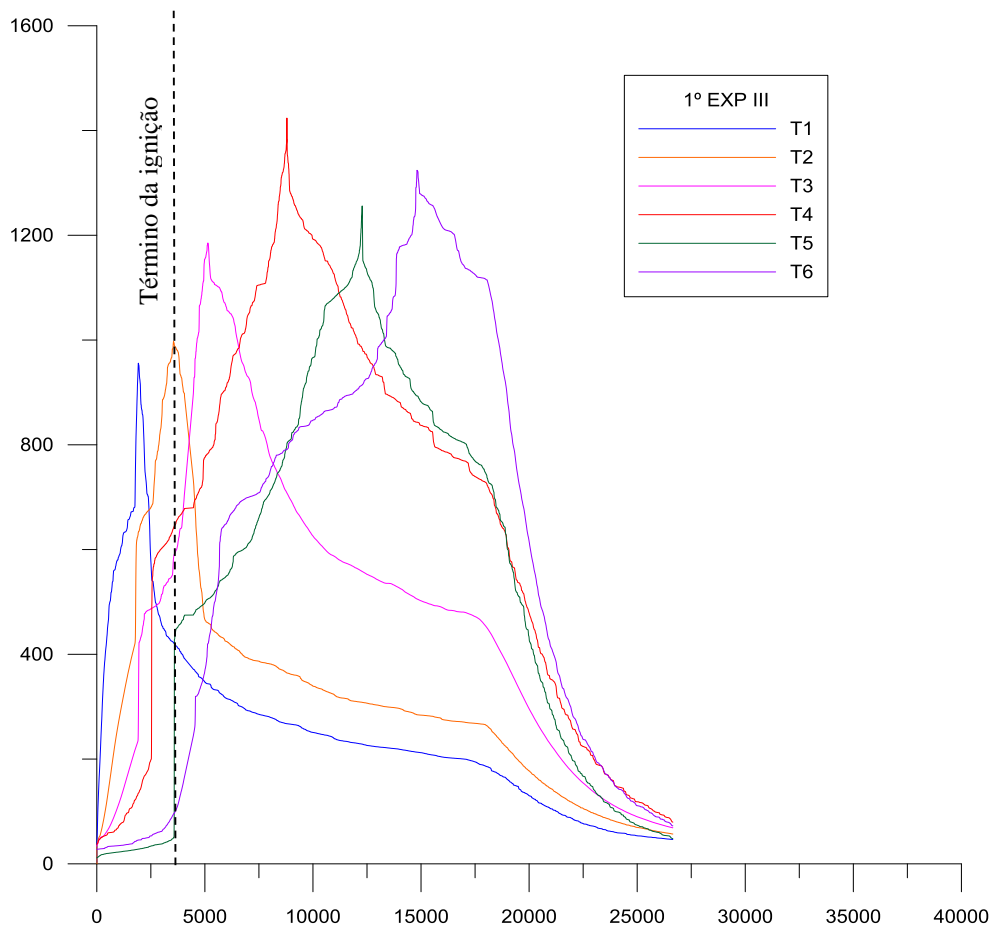
ZHANG, M. H., GJORV, O. E. “Characteristics os lightweight aggregates for high-strenght concrete”. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 2, p. 150-158, 1991.

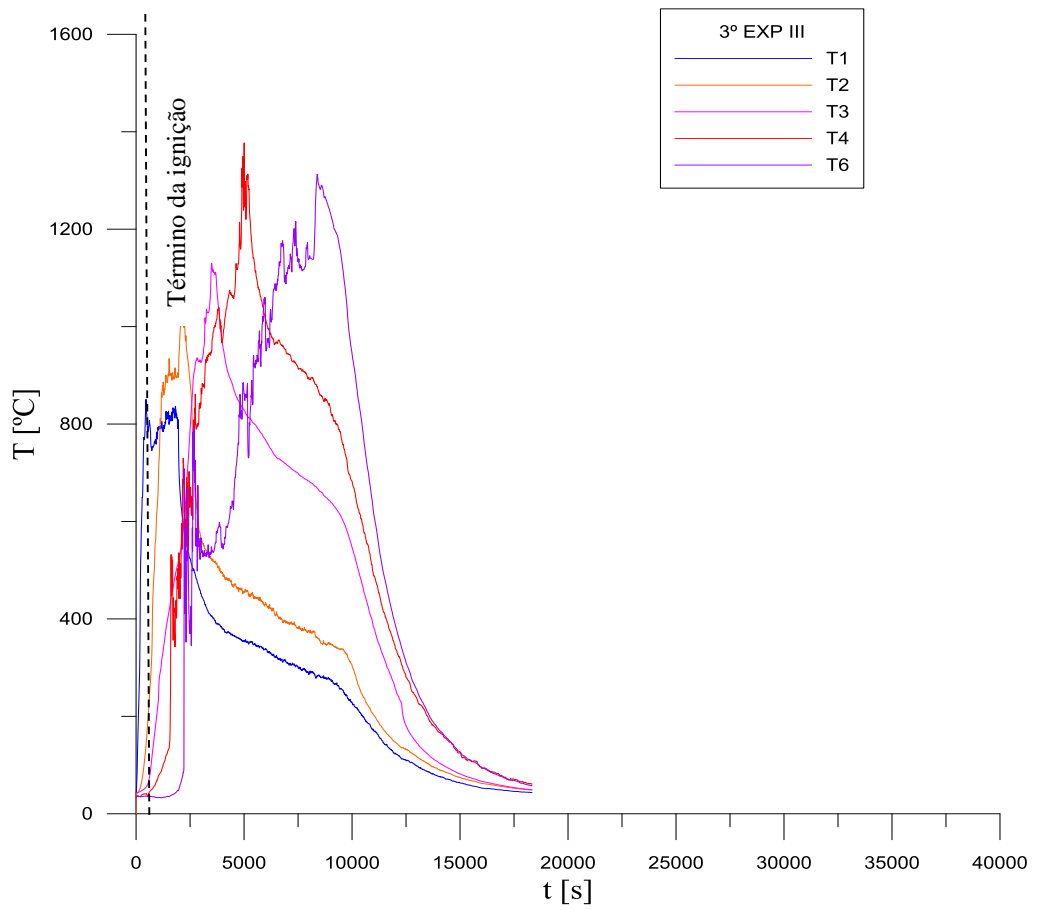
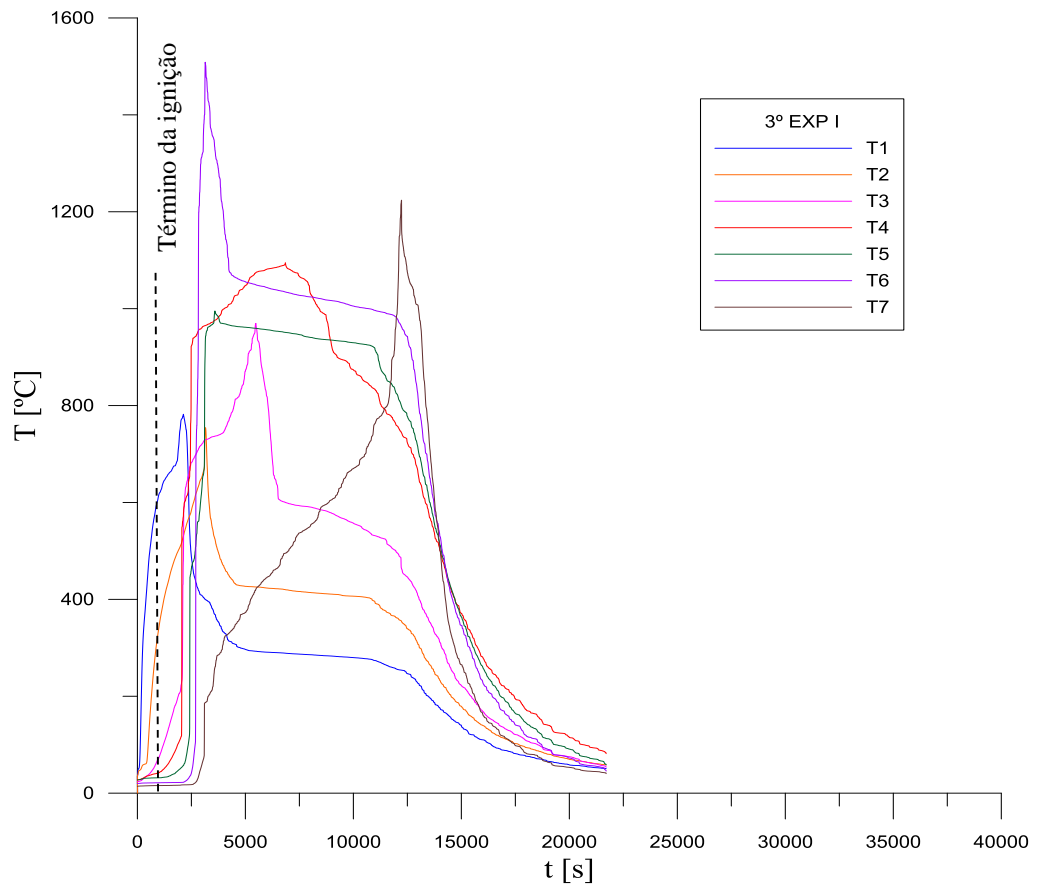
APÊNDICE A

A seguir estão apresentados os gráficos de evolução da temperatura, taxa de aquecimento e perfil de temperatura, que completam a duplicata e triplicata dos experimentos.

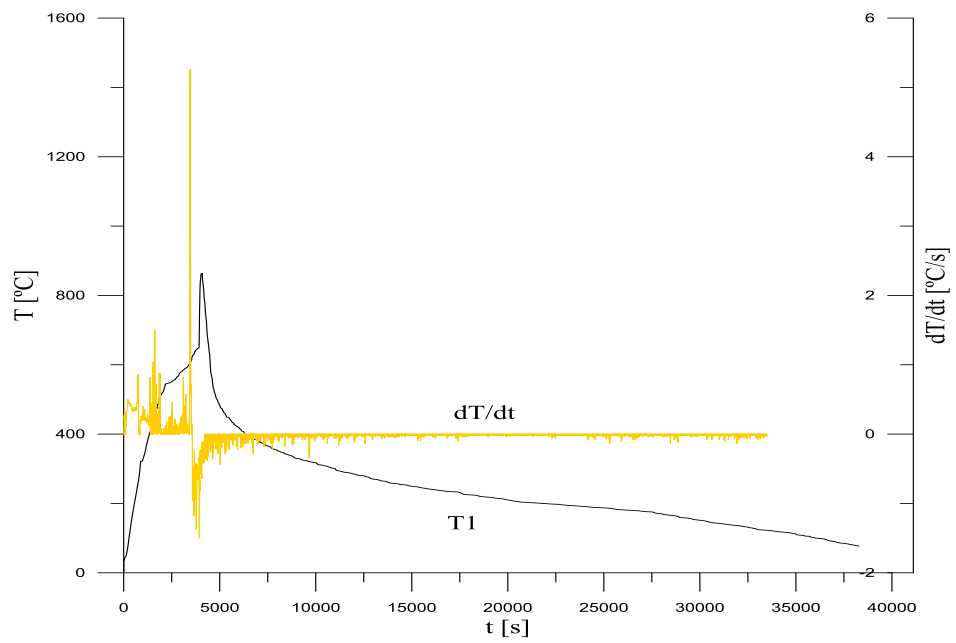
- Evolução da temperatura:



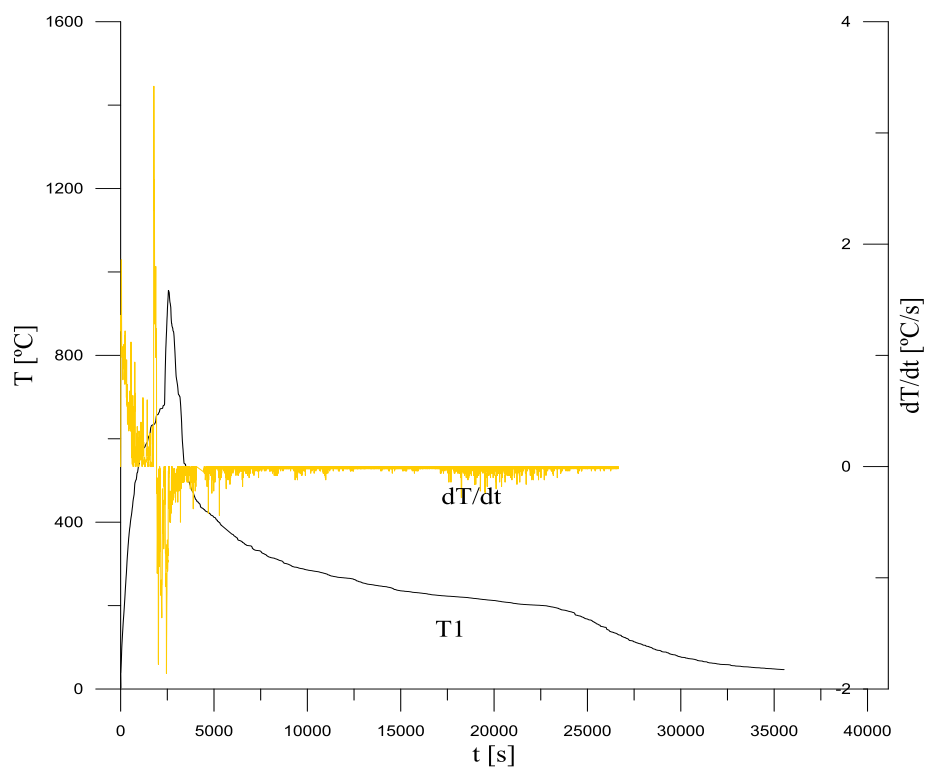




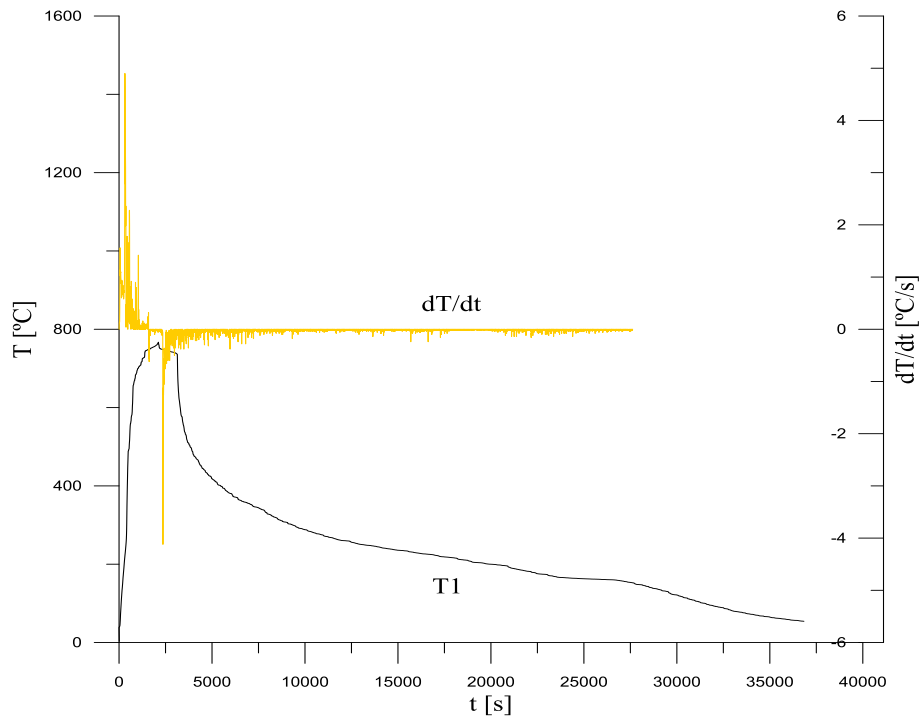
- Taxa de aquecimento:



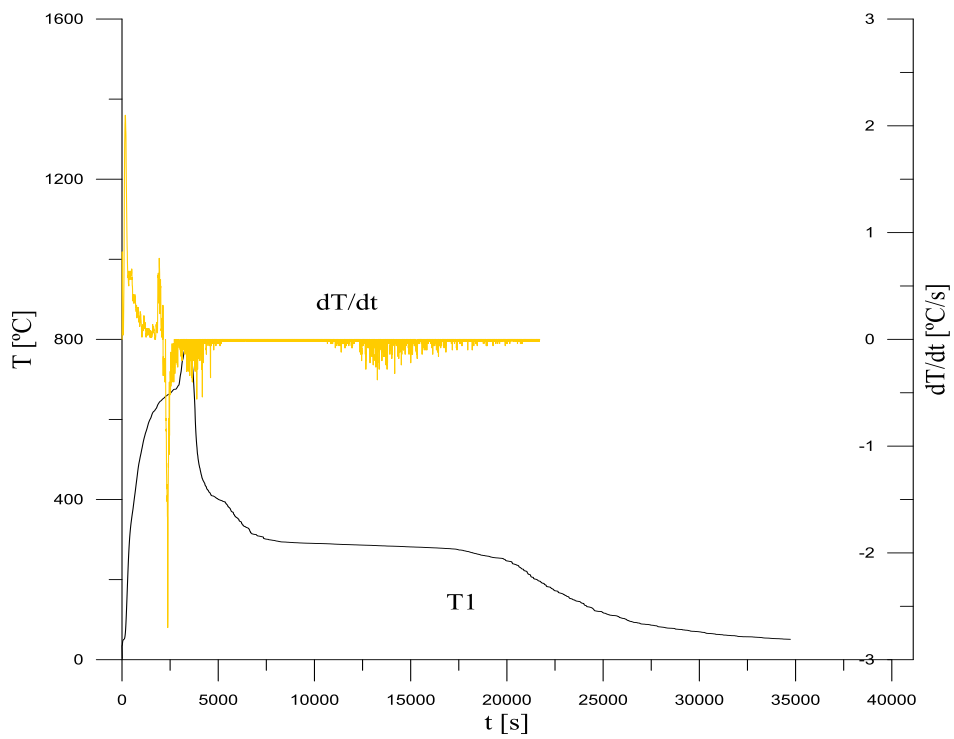
1° EXP II



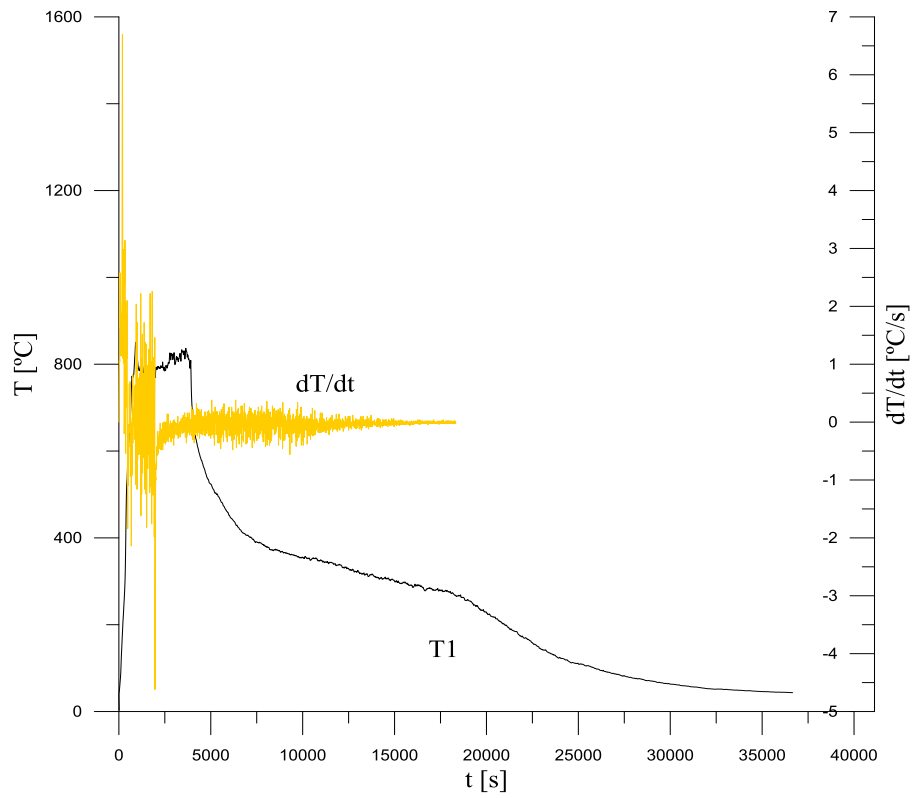
1° EXP III



2° EXP II

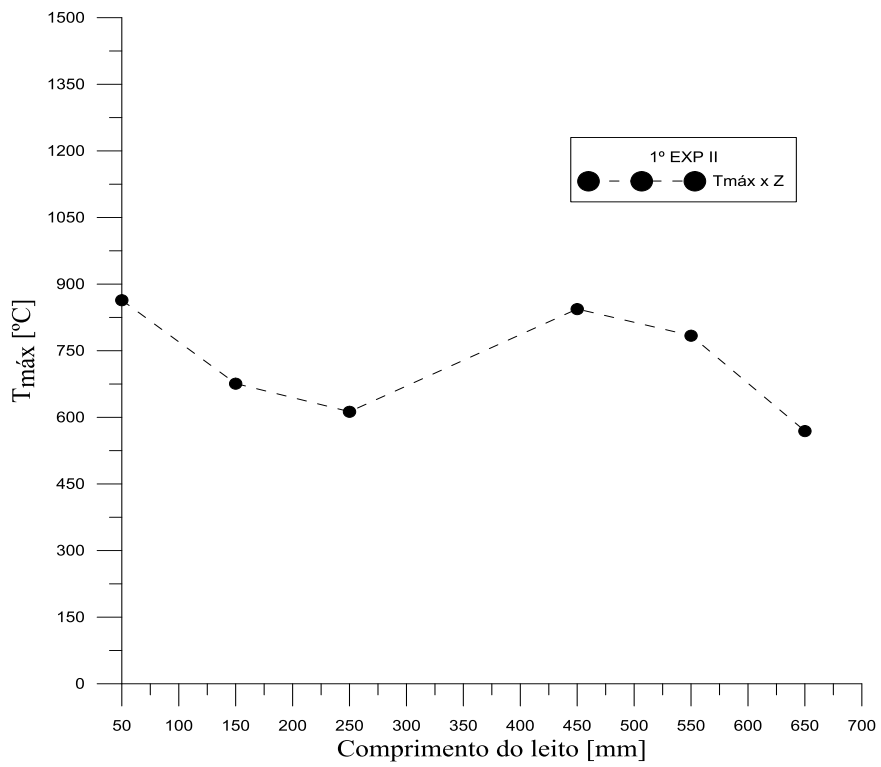


3° EXP I

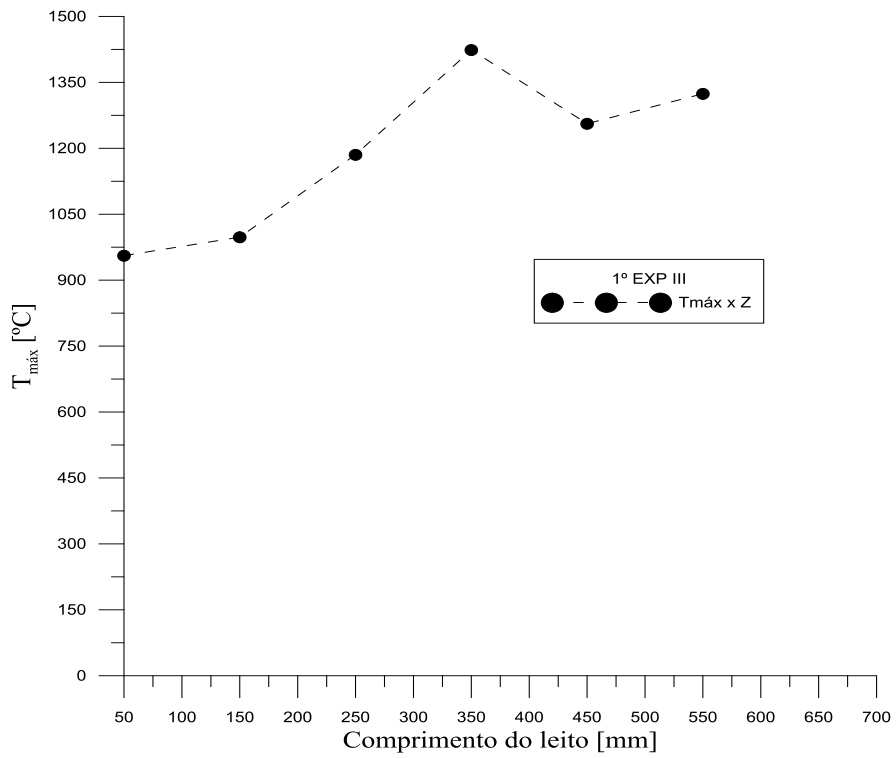


3° EXP III

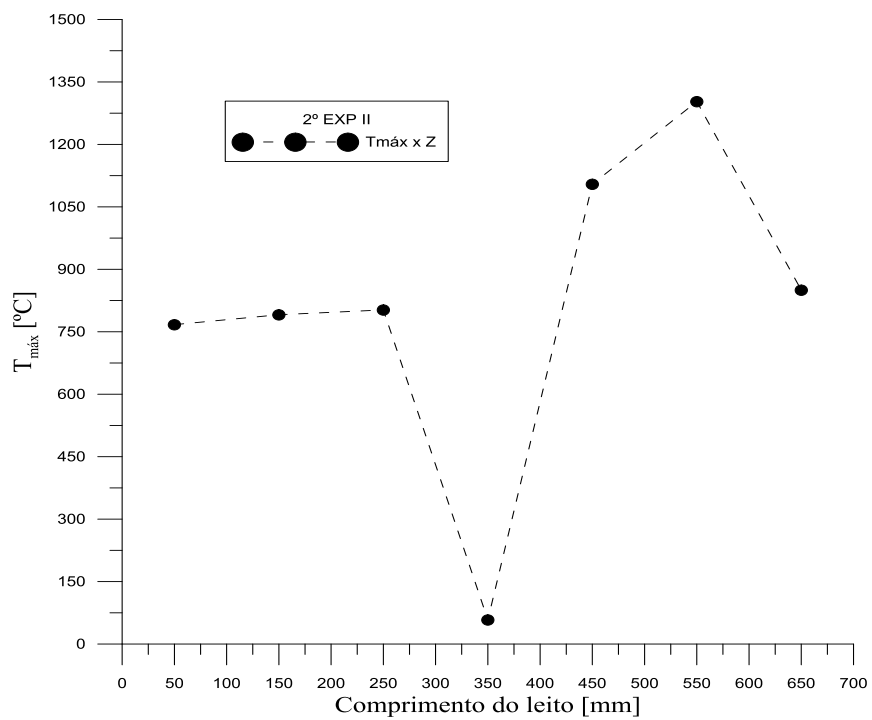
- Perfil de temperatura:



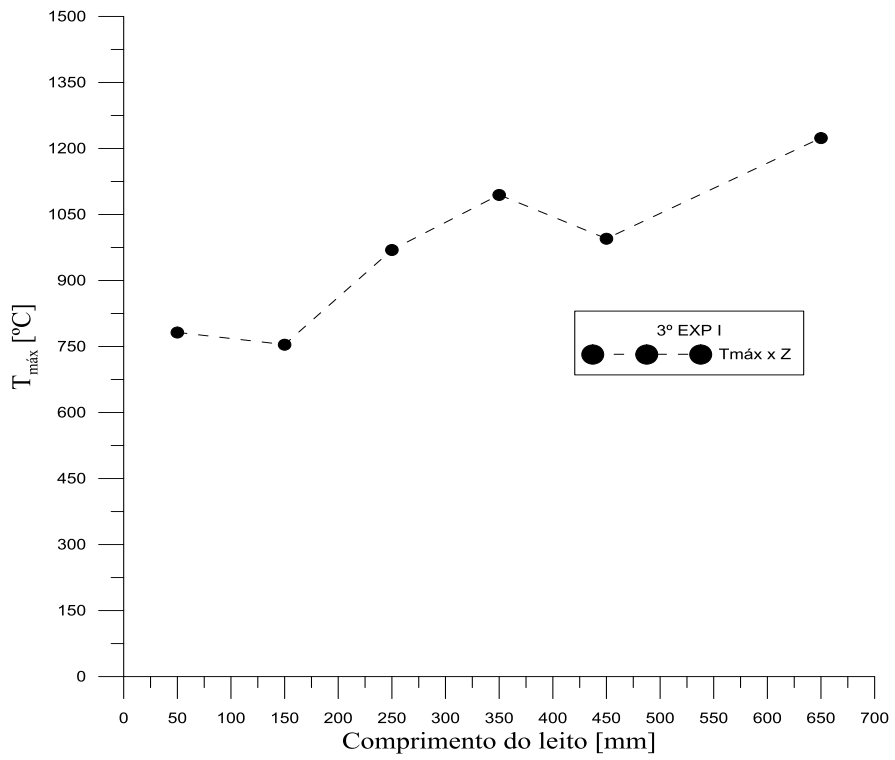
1° EXP II



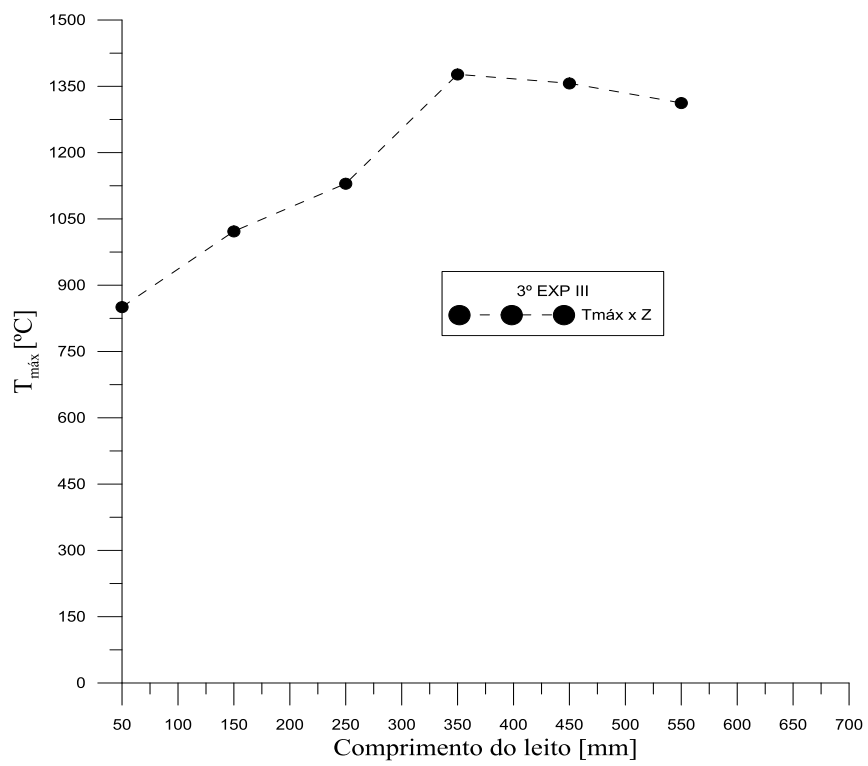
1º EXP III



2º EXP II



3° EXP I



3° EXP III