



UNIVERSIDADE
EDUARDO
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**Produção de tijolos a partir da matriz polimérica, usando
resíduos de plástico, cinzas pesadas do carvão mineral, areia e
pó de pedra**

Autor:

Salomão Nosta Nuvunga

Supervisores

Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe Eng^o.

Maputo, Dezembro de 2022



FACULDADE DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

**Produção de tijolos a partir da matriz polimérica, usando
resíduos de plástico, cinzas pesadas do carvão mineral, areia e
pó de pedra**

Autor:

Salomão Nosta Nuvunga

Supervisores

Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe Eng^o.

Maputo, Dezembro de 2022

TERMO DE ENTREGA DE RELATÓRIO DE TRABALHO DE LICENCIATURA

Declaro que o estudante finalista **Salomão Nosta Nuvunga** entregou no dia ____/____/2022 as ____ cópias do relatório do seu trabalho de licenciatura com referência: _____ intitulado:

Produção de tijolos a partir da matriz polimérica, usando resíduos de plástico, cinzas pesadas do carvão mineral, areia e pó de pedra.

Maputo, ____ de _____ de 2022

A Chefe da Secretaria

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Salomão Nosta Nuvunga, declaro por minha honra, que o presente relatório académico foi elaborado por mim próprio. Não se recorreu a quaisquer outras fontes, para além das indicadas, e todas as formulações e conceitos usados, quer adoptados literalmente ou adaptados a partir das ocorrências originais (em fontes impressas, não impressas ou na internet), se encontram adequadamente identificados e citados em conformidade com as convenções e normas do regulamento de culminação de cursos de engenharia da Universidade Eduardo Mondlane.

Declaro ainda, que este relatório não foi apresentado a qualquer outra entidade ou instituição, para além da directamente envolvida na sua elaboração, para efeitos de avaliação, apreciação ou recurso de suporte em outras pesquisas.

Declaro finalmente, encontrar-me ciente de que a inclusão, neste relatório, de qualquer falsa declaração ou manipulação de informação terá consequências legais.

Maputo, Dezembro de 2022

O Autor

(Salomão Nosta Nuvunga)

DEDICATÓRIA

Dedico o presente trabalho em memória dos meus pais, Nosta João Nuvunga e Vasco Panguene.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela força de boa vontade, que dá-me a cada dia e pelo dom da vida para prosseguir nesse maravilhoso caminho, que é academia.

Aos meus pais pela concepção, amor, caminho e pelos preciosos ensinamentos.

À minha família em especial as minhas irmãs Laura Vasco Panguene e Isabel Salomão Maposse, pelo apoio, amor e carinho.

Ao meu supervisor Prof. Doutor Jonas Valente Matsinhe Eng^o. pelo apoio na realização do trabalho, pelo encorajamento e pelas dicas.

A minha parceira Marta Jaime Julião Chihosse pelo companheirismo, amor, carinho, paciência e apoio ao longo da minha vida académica.

Aos meus colegas de turma e de grupo de estudos, em especial ao Santos Morgado, Hélio Matsinhe, Aleid Galaze, Eugénia da Gloria, Fenias Mathe, Francisco Mathe, Mércio Macucule, Guilhermina Tivane e Alexandre Francisco pelo apoio, conhecimento partilhado e companheirismo ao longo do curso.

Aos meus amigos em especial ao Julbino Guambe, Fernando Carlos Nhamposse Júnior, Jobe Mavaieie, Dércio Tendai Macura, Antoninho Fernando Melice, Gideon Américo Muiambo, Samir Rosário e Dolácio.

EPÍGRAFE

Já não há meio ambiente...

Mas preservemos o terço de ambiente que nos resta.

Veríssimo Andrade

RESUMO

A preocupação com o meio ambiente e com as leis ambientais obrigam as empresas a encontrar alternativas de reciclagem ou mudanças de materiais para substituir e desenvolver novos produtos para manter a competitividade no mercado. Com esta exigência, o compósito a base de resíduos sólidos pode constituir um meio alternativo de destinar as cinzas provenientes das termoelétricas e indústrias, e o plástico usado no nosso dia-a-dia. Este trabalho propõe utilizar a areia, cinzas pesadas e pó de pedra como agregado, adicionado ao plástico polietileno como ligante, para produzir compósito. O presente trabalho tem como objectivo, desenvolver tijolo a partir do plástico polietileno (ligante), cinzas pesadas do carvão mineral, areia e pó de pedra (agregados), bem como, avaliar as propriedades mecânicas e físicas decorrentes da adição de diferentes agregados ao polietileno e identificar os gases libertados no processo de produção. A metodologia usada baseou-se no planeamento estatístico de misturas, onde foram produzidos blocos com composição mássica diferente, sendo a composição do polietileno constante e sempre presente de 35% e sete (7) diferentes composições de agregados: areia 65%; cinzas 65%; pó de pedra 65%; areia 32.5% + cinzas 32.5%; areia 32.5% + pó de pedra 32.5%; cinzas 32.5% + pó de pedra 32.5% e areia 21.7% + cinzas 21.7% + pó de pedra 21.7%, tendo sido tratados com o *software* Statistica 8. Os resultados mostram que a mistura binária (cinzas + pó de pedra) e pura (cinzas 65% e pó de pedra 65%) apresenta valores óptimos de resistência a compressão, tendo 8.13 MPa para pó de pedra (65%) e 7,96 MPa para cinzas pesadas (65%). Os tijolos resultantes das misturas ternárias (areia 21.7% + cinzas 21.7% + pó de pedra 21.7%) favorecem maior compactação e conseqüentemente maior densidade. Em Todos os blocos observou-se que a absorção de água é muito inferior a 1%. Feita a análise, a mistura óptima mantém-se suficiente para a formulação de compósito, sendo a mistura óptima observada é a mistura pura (pó de pedra 65%) e (cinzas 65%), por possuir maior resistência a compressão, menor densidade e baixo índice de absorção de água, evidentemente pode ser aplicado na construção civil e conseqüentemente reduzir o impacto negativo das cinzas pesadas do carvão mineral e do plástico no meio ambiente.

Palavras-chave: Resíduos sólidos, Cinzas do carvão mineral, Plástico, Compósito.

ÍNDICE

RESUMO.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. PROBLEMA	1
1.2. JUSTIFICATIVA	1
1.3. OBJECTIVOS.....	2
1.3.1. Objectivo Geral	2
1.3.2. Objectivos Específicos	2
1.4. METODOLOGIA.....	2
2. REVISÃO DA LITERATURA	4
2.1. DEFINIÇÕES.....	4
2.1.1. Agregados.....	4
2.1.2. Ligante	4
2.1.3. Materiais Compósitos	4
2.1.4. Molde	4
2.1.5. Planeamento de mistura	5
2.2. DEFINIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUAS CARACTERÍSTICAS.....	6
2.2.1. Classificação dos resíduos sólidos	6
2.2.2. Características dos resíduos sólidos	8
2.3. PLÁSTICOS	10
2.3.1. Origem e Definição	10
2.3.2. Tipos de Plásticos.....	11
2.3.3. Características do plástico polietileno (PE).....	11
2.3.4. Reciclagem dos plásticos	15
2.4. CINZAS DO CARVÃO MINERAL.....	19
2.4.1. Cinzas leves.....	20
2.4.2. Cinzas de fundo	20
2.5. BLOCOS PERFURADOS.....	24
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
3.1. MATERIAIS USADOS	30

3.1.1.	Agregados.....	30
3.1.2.	Ligante	30
3.1.3.	Molde	31
3.2.	PROCESSAMENTO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS	33
3.2.1.	Classificação das cinzas Quanto a granulometria	33
3.2.2.	Classificação da areia e de pó de pedra quanto a granulometria	34
3.2.3.	Preparação do Plástico PE	34
3.2.4.	Preparação e Planeamento das Misturas	35
3.3.	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	36
3.3.1.	Absorção de Água	36
3.3.2.	Massa específica	37
3.3.3.	Resistência à Compreensão.....	37
3.4.	DETERMINAÇÃO DOS GASES EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO PE	38
3.4.1.	Produção de Blocos Perfurados	39
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1.	ABSORÇÃO DE ÁGUA.....	40
4.2.	MASSA ESPECÍFICA.....	42
4.3.	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO.....	44
4.4.	ANÁLISE DE GASES EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO PE.....	46
5.	CONCLUSÃO.....	50
6.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	52
7.	BIBLIOGRAFIA.....	xii

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Al	Alumínio
Al ₂ O ₃	Alumina ou óxido de alumínio
As	Arsénio
B	Boro
Ca	Cálcio
CaO	Óxido de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CCRs	Resíduos de Combustão de Carvão
C:N	Relação carbono/nitrogénio
CO ₂	Dióxido de carbono
Cu	Cobre
Cu ²⁺	Ião cobre
DQO	Demanda Química de Oxigénio
EPS	Poliestireno Expandido
Fe	Ferro
Fe ³⁺	Ião ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
HCl	Ácido clorídrico
HCOOH	Ácido fórmico
HF	Ácido fluorídrico
HNO ₃	Ácido nítrico
H ₃ PO ₄	Ácido fosfórico
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
K	Potássio
Kg/m ³	Quilograma por metro cúbico
KOH	Hidróxido de potássio

LEM	Laboratórios de Engenharia de Moçambique
mm	Miliméto
Mn ²⁺	Ião manganês
Mo	Molibdénio
N ₂	Nitrogénio
Na	Sódio
NH ₃	Amoníaco
NaOH	Hidróxido de sódio
nm	Nanóméto
O ₂	Oxigénio
O ₃	Ozono
P	Fósforo
PEBDL	Polietileno de Baixa Densidade Linear
pH	Potencial hidrogeniónico
PMMA	Polimetacrilato de metilo
PPVC	Policloreto de Vinilo Rígido
PU	Poliuretano
S	Enxofre
SAN	Copolímero Acrilonitrilo / Estireno de metilo
Se	Selénio
Si	Silício
SiO ₂	Sílica ou dióxido de silício
UPVC	Policloreto de Vinilo Flexível
Zn ²⁺	Ião zinco
%	Porcento
°C	Graus Celsius
µm	Micrómeto

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Sistema de coordenadas simplex para três componentes..	6
Figura 2: Fórmula química do PE..	12
Figura 3: Diferentes tipos de Polietileno..	13
Figura 4: Obtenção do PE (polimerização do etileno)..	14
Figura 5: Esquema das características morfológicas do PE.....	14
Figura 6: Modelo macroscópico para degradação termoquímica de polímeros.	17
Figura 7: Diagrama esquemático do Reactor de Bach fechado.	18
Figura 8: Processo de queima do carvão mineral em centrais termoeléctricas.	21
Figura 9: Cinzas pesadas de carvão mineral original A e moída B..	22
Figura 10: Forma de partícula da cinza pesada (medida em mm), cinza pesada grossa A e cinza pesada fina B..	23
Figura 11: Imagens microscópicas da superfície das partículas de cinza pesada: nível de 50 µm (A) e nível de 5 µm (B)..	23
Figura 12: Variedades dos blocos perfurados..	25
Figura 13: Utilização de “Brise Soleil” para sombreamento de fachada num edifício projectado pelo Arq. Pancho Guedes, em Maputo.....	26
Figura 14: Novas adaptações e funções dos blocos perfurados.	27
Figura 15: Árvore funcional do bloco perfurado.....	27
Figura 16: O esquema A - represente o molde usado para o fabrico de B - blocos perfurados decorativos com respectivas dimensões..	31
Figura 17: Processo de Corte de chapas e sua respectiva preparação A-Corte, B-Polimento e C - Configuração..	32
Figura 18: Máquina de solda A, processo de solda B e produto acabado (C – Macho e D - Fêmea..	32
Figura 19: Equipamento usado para moer as cinzas – Moinho de Bolas.....	33
Figura 20: A - cinzas pesadas antes do processo da moagem, B - cinzas mais grosseiras contendo algumas impurezas (resíduo) e C - cinzas já prontas para o uso (que passaram da grelha da peneira).....	34
Figura 21: A - areia antes da peneiração, B – areia já peneirada e C - pó de pedra fina..	34
Figura 22: A - Plástico PE antes de corte e B - Plástico já cortados..	35

Figura 23: Prensa utilizada no ensaio de compressão: A - Pratos da prensa para colocar o material a ensaiar, B - Cubo da prensa com um accionador para carregar e descarregar e C - painel de controlo.....	38
Figura 24: Analisador multigás portátil S360 A e Montagem do Analisador B.....	39
Figura 25: Fluxograma de processo de produção dos tijolos..	39
Figura 26: Absorção de Água (%) vs Componentes da Mistura.....	42
Figura 27: Massa específica em função dos componentes da Mistura..	43
Figura 28: Gráfico da Resistência a Compressão. .	44
Figura 29: Amostras de tijolos perfurados decorativos a base de PE + Agregado antes a) e depois do ensaio da resistência a compressão (b) mostrando as fissuras desenvolvidas após o ensaio.....	46
Figura 30: Concentração de CO ₂ emitidos em função do tempo.....	47
Figura 31: Concentrações de gases emitidos em função do tempo..	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificações dos plásticos..	11
Tabela 2: Comparação das propriedades do PEAD com o PEBD..	13
Tabela 3: Características físicas das cinzas pesadas..	22
Tabela 4: Composição química da cinza pesada.	24
Tabela 5: Propriedades químicas do pó de pedreira e Areia natural..	29
Tabela 6: Formulação das amostras no planejamento estatístico de mistura para três (3) componentes.	35
Tabela 7: Classificação e constituição de argamassa de blocos de alvenaria de cimento..	45
Tabela 8: Limites de emissão de poluentes e qualidade do ar.	48

1. INTRODUÇÃO

Desde a muito que a questão que envolve os resíduos industriais e urbanos ultrapassou as fronteiras das discussões ecológicas entre biólogos, geógrafos e entidades ambientais e assumiu carácter interdisciplinar. Assim, os economistas, sociólogos, engenheiros e outros, também são integrados nessa discussão, contribuindo com conhecimentos e sugestões para equacionar os problemas de ordem ambiental (GARLET, 1998) apud (SANTOS, 1995). Um dos principais problemas da sociedade actual é a gestão e disposição de resíduos sólidos, entre os quais o plástico e as cinzas pesadas do carvão mineral.

Todo processo industrial gera resíduos, muitas vezes tóxicos e perigosos, não sendo possível, simplesmente, descartar esses materiais na natureza sem causar danos à saúde e ao meio ambiente. Uma das formas para a solução desse problema consiste na reciclagem ou na reutilização dos resíduos (SILVA, 2011).

Segundo Monteiro, et al. (2001), a indústria da construção civil é a que mais explora recursos naturais é a indústria que mais gera resíduos. Essa indústria tem elevado potencial de aproveitar os resíduos industriais para o fabrico de materiais usados na construção como é o caso da produção do cimento.

1.1. PROBLEMA

O principal problema é a poluição ambiental, ocasionada pela expansão demográfica e pelo desenvolvimento industrial. O acentuado aumento populacional dá lugar a necessidade de novas construções, sejam de casas e de infra-estruturas. A indústria por sua vez, em prol de satisfazer as necessidades da população, explora muito mais os recursos naturais não renováveis, devido ao aumento da produção e do consumo, gerando emissões de gases de efeito estufa.

1.2. JUSTIFICATIVA

O nosso país possui diversas empresas que actuam na área de produção. Algumas usam o carvão mineral para gerar energia, que posteriormente é usado em seus processos, como é o caso da fábrica de cerveja-CDM.

O uso desse carvão culmina com as cinzas leves e pesadas, após sua combustão, as quais necessitam de melhores alternativas de gestão no que tange a reciclagem e aplicação na construção civil. Algumas dessas indústrias produzem plástico e embalagens plásticas, e

outras importam. A compra e o uso diário do plástico fazem com que estes sejam um dos materiais mais utilizados na actualidade.

Os tijolos produzidos a base de cinza-plástico para a vedação e outros fins, constituem um meio estratégico para reduzir os impactos ambientais negativos causados pelo plástico e pelas cinzas pesadas do carvão mineral, pois são ambientalmente e economicamente viáveis, no sentido de gerar renda para as indústrias e para os utilizadores, uma vez que o custo de compra será menor do que os blocos produzidos a base do cimento-areia.

1.3. OBJECTIVOS

Este trabalho, dentro do contexto descrito e pela relevância observada com relação às preocupações ambientais, tem por objectivo:

1.3.1. Objectivo Geral

Desenvolver compósito a partir da mistura de areia, cinzas de carvão mineral pó de pedra e plástico PE.

1.3.2. Objectivos Específicos

Para alcançar o objectivo geral, foram definidos os seguintes objectivos específicos:

- ❖ Descrever as características físicas e químicas do plástico;
- ❖ Descrever as características físicas e químicas das cinzas;
- ❖ Verificar a composição da mistura óptima para os blocos produzidos;
- ❖ Verificar as propriedades físicas e mecânicas dos blocos produzidos.

1.4. METODOLOGIA

Com vista a alcançar os objectivos definidos, a realização deste trabalho obedeceu a seguinte metodologia:

- ❖ Pesquisa bibliográfica de modo a obter informações sobre os resíduos sólidos, plástico PE, cinzas pesadas do carvão mineral, blocos perfurados decorativos, pirólise do plástico, produção de blocos a base do plástico e areia e instrumentos legais que regem a qualidade dos blocos;
- ❖ Parte experimental, que constitui em determinar as proporções da matéria-prima e desenvolver blocos perfurados decorativos a base do PE (como ligante) + Agregado (areia, cinzas e pó de pedra,) e fazer posteriores ensaios das

propriedades mecânicas e físicas e identificar os gases emitidos durante o processo de produção dos blocos perfurados decorativos;

- ❖ Fazer o tratamento e análise de dados, apresentar e discutir dos resultados.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. DEFINIÇÕES

2.1.1. Agregados

Os agregados são fragmentos de rochas popularmente conhecidos como “areias” e “pedras”, inertes com propriedades e dimensões adequadas para serem utilizados em obras de engenharia civil.

2.1.2. Ligante

Um ligante é um produto que ganha presa e endurece, podendo aglomerar outros materiais, tais como agregado grosso e areia e possuem propriedades aglomerantes (COUTINHO, 2006). Os ligantes podem ser de dois tipos principais, os **hidrófilos** (aéreos que não resistem à água e endurece ao ar, ex.: a cal aérea e gesso; e hidráulicos que resistem à água e endurece ao ar ou dentro da água, ex.: o cimento e a cal hidráulica) ou **hidrófobos** que endurecem por arrefecimento, por evaporação dos seus dissolventes ou por reacção química entre diferentes componentes, podendo ser, betumes naturais e artificiais asfaltos (destilação de petróleo) resinas (materiais plásticos ou sintéticos) ex.: o alcatrão (COUTINHO, 2006) (GOMES, 2015) (FONTES, 2013).

2.1.3. Materiais Compósitos

Os materiais compósitos são misturas (ao nível macroscópico) não solúveis de dois ou mais constituintes com distintas composições, estruturas e propriedades que se combinam e em que um dos materiais garante a ligação (matriz) e o outro a resistência (reforço) (MOREIRA, 2008). Para o presente trabalho o compósito produzido é o bloco perfurado decorativo.

2.1.4. Molde

Um molde é um utensílio oco composto por placas de aço, madeira, plástico ou outros materiais, nas quais o formato da peça é feita à máquina para ser preenchido posteriormente, dando assim as peças sua forma.

2.1.5. Planejamento de mistura

Um planejamento de mistura é um tipo especial de experiência de superfície de resposta em que os factores são os componentes de uma mistura, e a resposta é uma função das proporções de cada componente (MYERS, MONTGOMERY, & ANDERSON-COOK, 2009).

Nessa mistura, os componentes devem ser combinados em proporção adequada para obter o melhor desempenho de custo enquanto satisfazendo os requisitos de propriedade físicas, estabilidade e especificação requerida (BOX, HUNTER, & HUNTER, 1978).

Sabendo que x_i são as variáveis que representam as proporções dos q componentes da mistura, temos a equação 1 (MYERS, MONTGOMERY, & ANDERSON-COOK, 2009):

$$x_i \geq 0 \ (i = 1, 2, \dots, q) \quad x_1 + x_2 + \dots + x_q = 1 \quad (1)$$

Para o caso em estudo temos três componentes, deste modo passamos a ter a equação 2:

$$x_1 + x_2 + x_3 = 1, \text{ ou seja, } X + Y + Z = 1 \quad (2)$$

A condição de dependência entre os componentes, neste caso ($q=3$) conduz ao triângulo equilátero. Em geral, a região experimental para um problema de mistura com q componentes é um *simplex*, que é uma figura com lados regulares com q vértices em $q - 1$ dimensões, conforme a figura 1.

Cada lado do triângulo da figura 1 corresponde a uma mistura binária e os vértices dos triângulos correspondem às formulações de componentes puros. No interior do triângulo, estão situadas as possíveis misturas ternárias. Neste caso, são necessárias apenas duas dimensões para representar graficamente as experiências. Como cada componente é representado por um vértice, uma figura geométrica com três vértices e duas dimensões, ou seja, um triângulo equilátero, representa o espaço factorial restrito de uma mistura ternária (QUEDA, 2017).

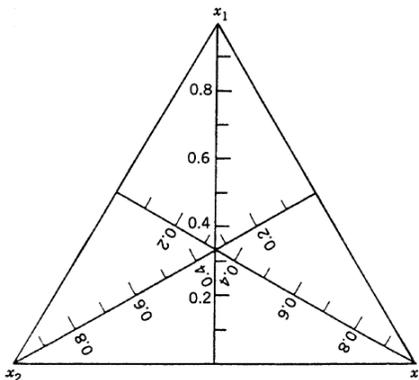


Figura 1: Sistema de coordenadas simplex para três componentes. Fonte: (MYERS, MONTGOMERY, & ANDERSON-COOK, 2009).

2.2. DEFINIÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SUAS CARACTERÍSTICAS

Geralmente, os termos “lixo” e “resíduos sólidos” são utilizados indistintamente (MONTEIRO, et al., 2001). Por um lado, o dicionário de língua portuguesa Novo Dicionário Electrónico Aurélio versão 5.0 (2004) define lixo como “Tudo o que não presta e se joga fora por ser inútil, velhas ou sem valor”.

Por outro lado, resíduo sólido (ou lixo) é todo material sólido ou semi-sólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta, em qualquer recipiente destinado a este acto (MONTEIRO, et al., 2001), (KREITH, 2002).

Segundo o Regulamento sobre a Gestão de Resíduos (Decreto n.º 13 /2006), os resíduos são as substâncias ou objectos que se eliminam, que se tem a intenção de eliminar ou que se é obrigado por lei a eliminar, também designados por lixos.

2.2.1. Classificação dos resíduos sólidos

Segundo Monteiro, et al. (2001), os resíduos sólidos podem ser classificados de diversas maneiras, mas as principais são, quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem.

2.2.1.1. Quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio ambiente

Quanto aos riscos potenciais de contaminação do meio os resíduos sólidos podem ser distinguidos em duas classes principais, classe I ou perigosos e classe II resíduos não

perigosos (resíduos inertes e não-inertes) (MONTEIRO, et al., 2001) (ANDREOLI, et al., 2014) (Decreto n.º 13 /2006):

❖ Classe I ou perigosos: aqueles que, em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reactividade, toxicidade ou patogenicidade, apresentam riscos à saúde pública através do aumento da mortalidade, ou ainda provocam efeitos adversos ao meio ambiente quando manuseados ou dispostos de forma inadequada (MONTEIRO, et al., 2001), (Decreto n.º 13 /2006);

Exemplo: lixo hospitalar, produtos químicos industriais, óleos, cinzas de metais preciosos, pilhas, baterias e pesticidas (DGEDGE, 2017) apud (MONTEIRO, et al., 2001).

❖ Classe II ou não-inertes: resíduos que podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade, com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente, não se enquadrando nas classificações de resíduos Classe I – Perigosos – ou Classe III – Inertes;

Exemplo: resíduo orgânico, papel, palha-de-aço, agulhas, latas e fiação eléctrica (DGEDGE, 2017) apud (MONTEIRO, et al., 2001).

❖ Classe III ou Inertes: aqueles que, por suas características intrínsecas, não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente;

Exemplo: Tijolo, plástico, borracha, entulhos de obras ou de demolição, pedras e areias retiradas de escavações (DGEDGE, 2017) apud (MONTEIRO, et al., 2001).

2.2.1.2. Quanto à natureza ou origem

A origem é o principal elemento para a caracterização dos resíduos sólidos. Segundo este critério, os diferentes tipos de resíduos podem ser agrupados em cinco classes:

❖ Resíduos domésticos ou residenciais: provenientes das actividades diárias em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais (MONTEIRO, et al., 2001), (Decreto n.º 13 /2006);

❖ Resíduos comerciais: provenientes dos estabelecimentos comerciais (escritórios, restaurantes e outros similares) nos quais as características dependem da

actividade lá desenvolvida (MONTEIRO et al., 2001), cujo volume diário não exceda 1.100 litros, que são depositados em recipientes em condições semelhantes aos resíduos domésticos (Decreto n.º 13 /2006);

- ❖ Resíduos públicos: presentes nos espaços públicos (praças, jardins, parques, entre outros) e resultantes da natureza (folhas, galhadas, poeira, areia, e também aqueles descartados irregularmente pela população, como entulho, papéis, restos de embalagens e alimentos);

- ❖ Resíduos domésticos (domiciliares) especiais: compreende os entulhos de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes e pneus.

- ❖ Resíduos de fontes especiais: são resíduos que, em função de suas características peculiares, passam a merecer cuidados especiais em seu manuseio, acondicionamento, armazenamento, transporte ou deposição final. Dentro da classe de resíduos de fontes especiais, merecem destaque:

- Resíduos industriais - produzidas pelas actividades industriais e podem ser de Classe I (Perigosos), Classe II (Não-Inertes) e Classe III (Inertes);

- Resíduos radioactivos - que emitem radiações acima dos limites permitidos pelas normas ambientais.

- Resíduos de portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários - nos terminais, como dentro dos navios, aviões e veículos de transporte. Os resíduos dos portos e aeroportos são decorrentes do consumo de passageiros em veículos e aeronaves e sua periculosidade está no risco de transmissão de doenças já diagnosticadas no país.

- Resíduos agrícolas - restos de embalagens impregnados com pesticidas e fertilizantes químicos, utilizados na agricultura, que são perigosos.

2.2.2. Características dos resíduos sólidos

As características dos resíduos variam em função dos factores demográficos, socioeconómicos e climáticos.

Segundo Monteiro et al., (2001) e Mota et al., (2009) as características dos resíduos sólidos podem ser físicas, químicas e biológicas.

2.2.2.1. Características físicas

As características físicas podem ser:

- ❖ Produção per-capita (Capitação) - relaciona a quantidade de resíduos sólidos urbanos gerada diariamente e o número de habitantes de determinada região;
- ❖ Composição gravimétrica - que traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra do resíduo analisado que podem ser: papel, alumínio, borracha, cerâmica, etc.;
- ❖ Peso específico aparente - é o peso do resíduo sem qualquer compactação que é expresso em kg do resíduo/m³ do volume ocupado;
- ❖ Teor de humidade - representa a quantidade de água presente no resíduo;
- ❖ Compressibilidade - grau de compactação ou a redução de seu volume que pode chegar até um quarto de seu volume original.

2.2.2.2. Características químicas

- ❖ Poder calorífico - capacidade potencial de um material libertar determinada quantidade de calor quando submetido a combustão;
- ❖ pH - indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos;
- ❖ Composição química - consiste na determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogénio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras;
- ❖ C:N - indica o grau de decomposição da matéria orgânica do resíduo nos processos de tratamento/deposição final.

2.2.2.3. Características biológicas

As características biológicas dos resíduos sólidos são determinadas pela população microbiana e dos agentes patogénicos presentes nos resíduos.

2.3. PLÁSTICOS

2.3.1. Origem e Definição

Actualmente, a indústria de plásticos está ligada à indústria petrolífera. Antes de 1945, a classe mais importante de termoplásticos eram os plásticos celulósicos, produzidos a partir fontes vegetais e só depois do mesmo ano até 1973, houve um acentuado crescimento da utilização dos plásticos (VASCONCELOS, 2008).

O primeiro plástico a ser sintetizado, no final do século XIX, foi a película de filme fotográfico utilizada em fotos e, depois, no cinema. O uso comercial de plásticos para produtos domésticos desenvolveu-se entre os anos de 1950 e 1960, identificando uma nova tecnologia e uma alternativa de material sintético substituto dos metais antes usados, durante a Segunda Guerra Mundial (COELHO, 2005).

Segundo Costa (2006), os plásticos são todos polímeros de uso geral, que fazem parte integrante do dia-a-dia das sociedades com aplicações por demais conhecidas como materiais rígidos e flexíveis, em todas as áreas de actividade económica.

Esses materiais orgânicos são materiais formados por macromoléculas, sintetizados principalmente de derivados de petróleo e possuem baixa densidade, baixa condutividade térmica e eléctrica, alta resistência à corrosão e baixa taxa de degradação (ANDRADY, 2003).

Actualmente o plástico representa a forma mais fácil de se reproduzir peças e componentes, além de oferecer economia reactiva aos mesmos produtos quando industrializados com madeira, alumínio, aço, ferro, vidro, dentre outros materiais. Os plásticos são utilizados em quase todos os sectores da economia: construção civil, agricultura, fabricação de calçados, móveis, alimentos, têxtil, lazer, telecomunicações, electroeletrónicos, automobilísticos, médico-hospitalar, energético, dentre outros (COELHO, 2005).

2.3.2. Tipos de Plásticos

A variedade dos polímeros ultrapassa 50 tipos de plásticos, dos quais encontram-se agrupados em dois grandes grupos: os termofixos e os *termoplásticos* (STRONG, 2006), (COELHO, 2005), (SMITH & HASHEMI, 2012).

- ❖ **Termofixos** são aqueles que não se fundem com o aquecimento: resinas fenólicas, epóxi, poliuretanos etc. (COELHO, 2005), (SMITH & HASHEMI, 2012).
- ❖ **Termoplásticos** – os que não sofrem alterações em suas estruturas químicas durante o aquecimento e, após o resfriamento, podem ser novamente fundidos: polietileno de alta densidade (PEAD), polietileno de baixa densidade (PEBD), politereftalato de etileno (PET/PETE), entre outros, que são os mais utilizados em processos de reciclagem (COELHO, 2005). A tabela 1 apresenta os principais polímeros e famílias que integram cada uma das classificações dos plásticos.

Tabela 1: Classificações dos plásticos. Fonte: (COSTA, 2006).

Termoplásticos	Termofixos
PET ou PETE	PU
PEAD	Resinas alquílicas
PEBD	Poliâmidas
UPVC	Resinas
PPVC	Epoxídicas
PP	Poliésteres
PS	Resinas fenólicas
EPS	
ABS	
SAN	
PMMA	
Acrílicos	
Acetais	
Policarbonatos	

2.3.3. Características do plástico polietileno (PE)

O PE é um termoplástico abundante e barato, caracterizando-se pela excelente resistência química e eléctrica, baixo coeficiente de fricção, elevada resistência à humidade e fácil processamento (Islabão, 2005) e possui um poder calorífico de 44 MJ/kg.

Segundo Andrady (2003), o PE é o plástico mais usado no mundo. Este foi descoberto nos laboratórios de pesquisa *Imperial Chemical Industries* (ICI) em 1933, mas a empresa entrou

com a patente sobre o processo de polimerização relevante apenas em 1936. Esta rota de polimerização de alta pressão foi usada exclusivamente para produzir comercialmente o PEBD por quase duas décadas até a baixa pressão, processos para PEAD que foram desenvolvidos em 1954. Mais tarde na década de 1970 foi desenvolvido o PEBDL, intermediário na estrutura e propriedades entre o PEAD e o PEBD.

O polietileno é quimicamente o polímero mais simples e pode ser representado pelo monómero destacado na figura 1, onde n é grau de polimerização. (NOGUEIRA I. B., 2012), (MELO, 2015) apud (KOTZ, TREICHEL, & WEAVER, 2005).

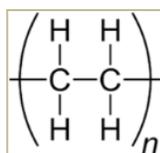


Figura 2: Fórmula química do PE. Fonte: (MELO, 2015).

Segundo Andrady (2003), Strong (2006) e ASTM D4976 (2006), os polietilenos podem ser classificados em diferentes classes de acordo com a densidade.

O PEAD possui um elevado peso molecular e suficiente (e a ramificação da cadeia mínima) para obter um grau de cristalização elevado na ordem de 70-95% (e uma densidade alta na faixa de 0,941 – 0,965 g/cm³). O PEBD possui ampla ramificação da cadeia em sua estrutura. Possui cadeia longa e ramificações curtas, que geralmente estão presentes, e isso resulta em um material comparativamente mais baixo, com densidade de 0,910 – 0,930 g/cm³ e cristalização de apenas 40 – 60%. O PEBDL tem uma faixa de temperatura de fusão de 110-115° C. Quando os ramos da cadeia do polímero são principalmente cadeias curtas, um PEBDL com uma densidade faixa de 0,915-0,940 g/cm³ e um maior grau de cristalização de 40 - 60% é obtido (ANDRADY, 2003). Esses diferentes tipos de PE são apresentados na figura 2.

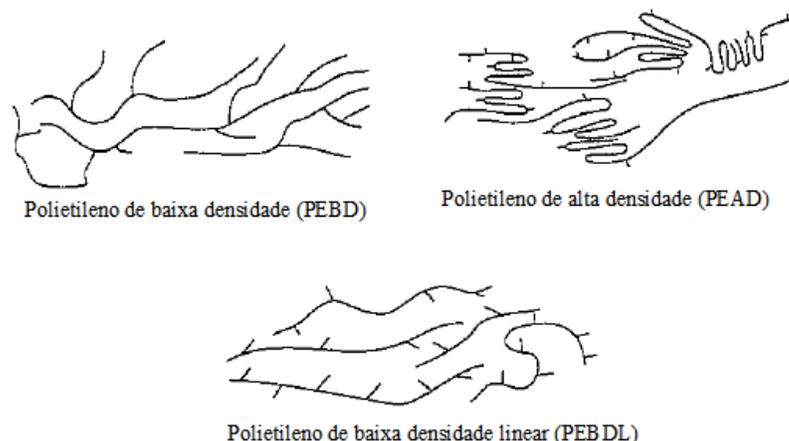


Figura 3: Diferentes tipos de Polietileno. Fonte: (STRONG, 2006). Adaptado.

O PEAD e o PEBD têm maior relevância no mercado das resinas plásticas, visto que diversas pesquisas incidem sobre estes, desde sua caracterização bem como sua utilização como matéria-prima (NOGUEIRA, 2012). As propriedades do PEBD e PEAD são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2: Comparação das propriedades do PEAD com o PEBD. Fonte: (NOGUEIRA, 2012).

Propriedades	PEBD	PEAD
Densidade g/cm ³	0.915 – 0.935	0.941 – 0.967
Temperatura de fusão (°C)	102 – 112	130 – 133
Tensão de ruptura (MPa)	6.9 – 17.2	18 – 30
Elongação máxima até a ruptura (%)	100 – 700	100 – 1000
Módulo de flexão (MPa)	415 – 795	689 – 1654

2.3.3.1. Características físicas

O PE é um polímero parcialmente cristalino, flexível, cujas propriedades são acentuadamente influenciadas pela quantidade relativa das fases amorfa e cristalina (PIVA, 2014), (LESTER, 2010).

O ponto de fusão do PE é definido como a temperatura na qual o plástico passa para o estado completamente amorfo (LESTER, 2010). O processo de polimerização do etileno (eteno) é representado através da figura 3.

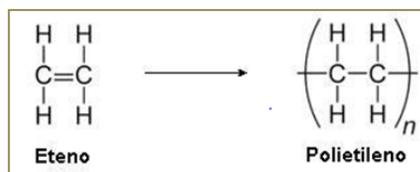


Figura 4: Obtenção do PE (polimerização do etileno). Fonte: (MELO, 2015) apud (KOTZ, et al., 2005).

Os polietilenos são polímeros produzidos a partir do monómero etileno e parte de sua cadeia polimérica (polimerização em cadeia) pode apresentar uma organização espacial, sendo esta a zona cristalina e outra parte desordenada, a zona amorfa (NOGUEIRA I. B., 2012), (LESTER, 2010).

A cristalização confere aos polímeros maior densidade, maior resistência e menor dureza, devido ao empacotamento das macromoléculas que se verificam nestas zonas. Apesar da composição química manter-se constante, o PE pode apresentar diferenças nas suas propriedades devido à polimerização, densidade, reticulação, entre outros (PIVA, 2014). As características morfológicas do PE são apresentadas na figura 4.

Devido à energia térmica, quando as cadeias são resfriadas abaixo da temperatura de cristalização, estas tendem a girar em torno das ligações C-C e criar cadeias dobradas. Estas cadeias dobradas permitem a ordenação de moléculas em determinados locais, constituindo-se nas lamelas cristalinas microscópicas. O grau de cristalinidade e a orientação das regiões cristalinas dependem da massa molar e das condições de processamento, entre outros factores (Islabão, 2005).

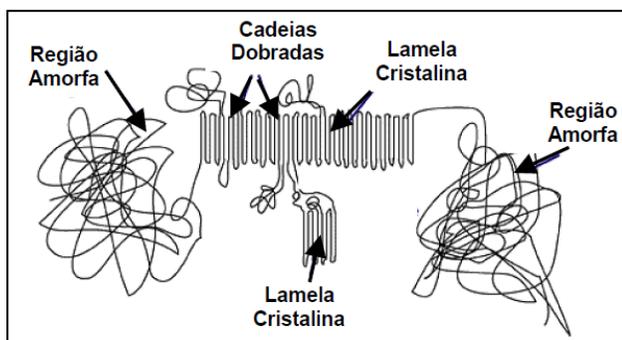


Figura 5: Esquema das características morfológicas do PE. Fonte: (Islabão, 2005).

2.3.3.2. Características químicas

O PE é resistente a soluções ácidas e básicas, como HCl, HF, H₃PO₄, HCOOH, aminas, NaOH e KOH à temperatura ambiente. No entanto, o HNO₃ e o H₂SO₄ têm um efeito destrutivo mais forte para o PE. O PE é susceptível a foto-oxidação, oxidação térmica e decomposição do O₃. Sob a acção da luz ultravioleta, está sujeito à degradação. Possui excelentes propriedades de isolamento eléctrico, mas pode ser facilmente clorado e reticulado (reticulação química e reticulação por irradiação modificada). Carbono presente no PE tem um excelente efeito de protecção contra a luz (ZHONG et al., 2018).

2.3.3.3. Características Mecânicas

Segundo Zhong, et al. (2018), a característica mecânica mais importante do PE é a moldagem. A região ordenada do polímero confere, baixa absorção de humidade, sem necessidade de secagem completa, excelente mobilidade, sensibilidade à pressão, uso de alta pressão na moldagem por injeção, uniformidade de temperatura e elevada velocidade de enchimento. Possui elevados valores de retracção, sujeitos a empenamento por deformação. O resfriamento deve ser lento, um sistema de resfriamento necessário. O tempo de aquecimento não deve ser muito longo, caso contrário, ele irá quebrar. As peças de plástico macio têm um lado raso da ranhura e podem apresentar fugas quando forçadas. Podem derreter e, portanto, não deve ser usado como solventes orgânicos para evitar rachaduras.

2.3.4. Reciclagem dos plásticos

A reciclagem é uma das acções mais importantes actualmente disponíveis para reduzir os impactos negativos causados pelo descarte do plástico. Representa uma das áreas mais dinâmicas da indústria de plásticos hoje. A reciclagem oferece oportunidades para reduzir o uso de óleo, as emissões de CO₂ e as quantidades de resíduos que precisam ser descartados. Aqui, contextualizamos a reciclagem com outras estratégias de redução de resíduos, nomeadamente a redução da utilização de materiais através da redução ou reutilização de produtos, a utilização de materiais biodegradáveis alternativos e a recuperação de energia como combustível (HOPEWELL, DVORAK, & KOSIOR, 2009).

A reciclagem com a finalidade de recomposição, reutilização ou geração de energia pode ser uma excelente oportunidade de negócio para as empresas e para o meio ambiente, num

processo no qual se não ganharem todos, ao menos, todos perdem menos sob o ponto de vista socioeconómico e ambiental. Diversas pesquisas apontam para 100 a 500 anos para que o plástico se decomponha (COELHO, 2005).

A reciclagem de resíduos plásticos pode ser dividida em duas categorias, os resíduos pós-indústria e os resíduos pós-consumo. Os resíduos pós-indústria são aqueles gerados pelas empresas de transformação de resinas em aplicações plásticas, e que são facilmente reaproveitados na produção, enquanto os resíduos pós-consumo são gerados diariamente pela população consumidora (ARIMATÉIA JÚNIOR, 2017).

A recolha selectiva dos resíduos constitui um meio estratégico na reciclagem, visto que pode reduzir os custos de separação dos resíduos (recicláveis e não recicláveis) e evita com que os materiais recicláveis estejam contaminados.

Visto que a recolha selectiva ainda constitui um grande desafio no nosso país, o processo de separação dos plásticos tem início durante a recolha. A forma com que os materiais descartados são recuperados tem influência em todo o processo de reciclagem, uma vez que diferentes métodos de recolha rendem diferentes graus de pureza para os materiais recolhidos, e tem custos diferentes (ARIMATÉIA JÚNIOR, 2017).

2.3.4.1. Pirólise do PE

Segundo Braga, et al. (2012), a pirólise é um processo de degradação termoquímica, ilustrada na figura 5, que ocorre quando se aplica calor a uma substância ou material, em ausência total de oxidante. Neste sentido, a pirólise é um processo endotérmico que precisa de uma fonte externa de calor para seu desenvolvimento.

Os mecanismos distintos de degradação térmica de polímeros são dois. O primeiro é uma cisão aleatória de ligações poliméricas, que causa uma redução no peso molecular das macromoléculas e um aumento de número de moléculas fragmentárias; e o outro é uma cisão da extremidade da cadeia causada por uma transferência radical intramolecular (uma mordida nas costas) que posteriormente gera produtos voláteis (GRIMBLEY & LEHRLE, 1995) apud (MURATA et al., 2002).

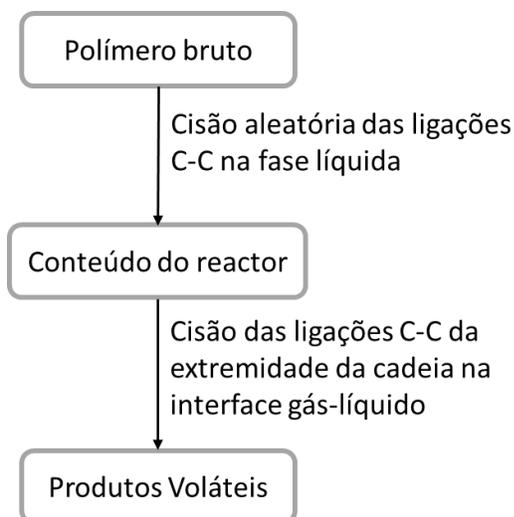


Figura 6: Modelo macroscópico para degradação termoquímica de polímeros. Fonte: (MURATA et al., 2002). Adaptado

Segundo Murata et al. (2002), a maioria das pesquisas anteriores sobre a degradação térmica de polímeros estudaram sistemas de reactores batch principalmente com o objectivo de investigar a estabilidade e/ou o mecanismo de degradação de polímeros sintetizados.

Segundo Onwudili et al. (2009), num estudo que visava identificar os componentes dos produtos da pirólise de PEBD, através de experimentos realizados num reactor batch (figura 6) e avaliar os efeitos da temperatura e do tempo de residência e sob atmosfera de N_2 inerte. O PEBD foi termicamente degradado em óleo em $425^\circ C$ no entanto, a proporção de produto de petróleo diminuiu como resultado de sua conversão sólidos e gás hidrocarboneto. Os principais componentes do óleo são os hidrocarbonetos alifáticos, mas a proporção de compostos aromáticos aumentou em temperaturas e tempos de residência mais elevados.

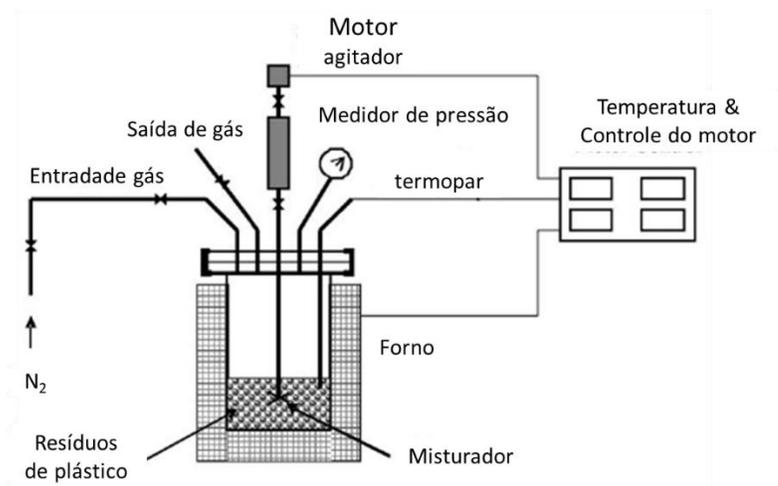


Figura 7: Diagrama esquemático do Reactor de Bach fechado. Fonte: (ONWUDILI, INSURA, & WILLIAMS, 2009). Adaptado

Esse reactor possui um eixo agitador com lâminas de rotor na base, foi anexado a um rotor de accionamento magnético interno alimentado através de um rotor magnético externo. O reactor foi aquecido usando um tipo de manto externo, que contactou as laterais e o fundo da reacção. A temperatura interna do aquecedor e do reactor foi monitorado por termopares tipo J. Uma taxa de aquecimento de 10°C /min foi utilizado. O vaso do reactor foi equipado com uma válvula de gás de entrada, uma válvula de saída de gás que serviu para amostragem de gás, e uma terceira válvula de saída para amostragem de líquido quando pressurizado. O reactor foi equipado com um manómetro para medir sua pressão durante os experimentos. O gás N₂ foi usado como reacção atmosfera para todos os experimentos para garantir a condição de pirólise inerte (ONWUDILI, INSURA, & WILLIAMS, 2009).

Segundo Agyeman, et Al. (2019), no estudo que visava estudar os resíduos de plástico reciclado (RPW) como um aglutinante alternativo para produção de blocos de pavimentação, concluíram que, a resistência à compressão da amostra de concreto de cimento usada como controle antes de substituir o cimento por plástico resíduo teve uma resistência à compressão média de 5,12 N/mm² após a secagem por 7 dias e aumentou para 6,07 N/mm² em 21 dias (um aumento de cerca de 18% na força). Os resultados para o elevado teor (40%) em plástico (HP) e baixo (25%) em plástico (LP) mostraram-se semelhantes tendências. Ou seja, de 5,96 N/mm² para LP e 8,39 N/mm² para HP aos 7 dias de idade para 7,31 N/mm² e 8,53 N/mm² em 21 dias, respectivamente. Isso corresponde a

um aumento de cerca de 25% na resistência à compressão para blocos LP e um aumento de cerca de 2% para os blocos HP.

No entanto, a resistência à compressão da amostra de HP foi cerca de 17% maior do que o bloco LP. A resistência à compressão dos corpos de prova aumentou quando o resíduo de plástico foi usado para substituir o cimento, este mostra claramente que blocos de pavimentação de concreto são inferiores em compressão do que blocos de pavimentação RPW usando a mesma proporção de mistura de 1: 1: 2, o que pode ser devido ao aumento da resistência adesiva entre a área de superfície do plástico residual e as partículas agregadas vizinhas. A taxa de absorção de água após 72 h para o controle após a cura foi de 4,9% (175 g), LP 2,7% (116 g) e HP 0,5% (23 g). Esses resultados indicam que os blocos de pavimentação de concreto absorveram mais água (hidrofílica) do que os blocos de pavimentação RPW conforme foram medidos para serem hidrofóbicos.

A pirólise do PE é uma das alternativas estudadas para a redução dos resíduos plásticos em aterro, utilizando assim estes de uma maneira útil de modo a resolver dois problemas a eliminação de resíduos plásticos e também uma melhor utilização dos recursos valiosos de petróleo (recursos não renováveis), protegendo assim mais o ambiente. O PE é um dos materiais plásticos presentes em quantidades significativas nos resíduos sólidos urbanos e que diversos estudos têm sido desenvolvidos. No entanto apesar de muitos estudos, a degradação térmica dos resíduos plásticos requer altas temperaturas e a qualidade dos produtos obtidos ainda é reduzida, o que leva a que este processo seja pouco viável. Este método é melhorado com a presença de catalisadores, nomeadamente, zeólitas. Esses têm uma grande influência na degradação térmica do PE devido as suas características de forte acidez e capacidade de quebrar hidrocarbonetos, reduzem a temperatura do processo, obtendo-se também produtos de melhor qualidade (AFONSO, 2013).

2.4. CINZAS DO CARVÃO MINERAL

As cinzas são materiais granulares finamente divididos, resíduos da combustão de certas substâncias, as mais comuns são as cinzas geradas pela combustão do carvão (NOGUEIRA, 2011).

As centrais termoelétricas são consideradas uma das maiores fontes de poluição no mundo, devido a geração significativa de cinzas (MATSINHE et al., 2017).

Da queima do carvão em termoelétricas, são gerados dois principais resíduos, que são (KREUZ, 2002):

- ❖ **Cinzas leves:** constituída por partículas extremamente finas;
- ❖ **Cinzas pesadas:** granulometria mais grossa que a cinza leve, são originadas na queima ou gaseificação do carvão granulado em grelhas móveis. Retirada pelo fundo da fornalha após ser resfriada com água. Apresenta granulometria grosseira, tendo teores de carbono não queimado entre 10 e 20%.

A actividade pozolânica do material está ligada ao tipo de cinza, a qual é directamente proporcional ao potencial das propriedades cimentantes. Por outro lado, o crescimento da actividade pozolânica de cinza dependerá do aumento da superfície específica das partículas que está ligado à velocidade da reacção pozolânica, aumento da percentagem de SiO_2 e alumina Al_2O_3 , elementos que reagem com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre, aumento da percentagem de estruturas amorfas, que está ligada à velocidade de solubilidade da sílica e do acréscimo do conteúdo de Carbono orgânico (MALLMANN, 1996).

As cinzas são classificadas de acordo com a recolha (devido as diferentes zonas de temperatura na caldeira durante o processo de queima do carvão pulverizado nas centrais termoelétricas) e podem ser, cinzas secas (volantes/leves) ou cinzas húmidas (pesadas/de fundo). (KNISS, KUHNEN, & RIELLA, 2002).

Os elementos predominantes das cinzas são Al, Si, O_2 , Fe, Ca, K e Na. Elementos traços como As, B, Ca, Mo, S e Se podem ser encontrados nas partículas menores (SILVA, 2011).

2.4.1. Cinzas leves

As cinzas leves são constituídas por partículas extremamente finas com dimensão inferior a 0,15 mm, transportadas pneumáticamente até os silos de armazenagem através dos precipitadores electrostáticos, para posterior transporte aos consumidores finais, a indústria de cimento (KREUZ, 2002), (KNISS, KUHNEN, & RIELLA, 2002).

2.4.2. Cinzas de fundo

As cinzas de fundo ou pesadas são mais pesadas e de granulometria mais grossa do que as das cinzas leves, caindo no fundo das fornalhas e gaseificadores, sendo frequentemente retirada por um fluxo de água (KREUZ, 2002).

As cinzas pesadas são colectadas na base da fornalha/caldeira, caindo dentro de tanques com água de resfriamento, como mostra a figura 7. Depois de passar por um sistema de redução do tamanho das partículas, ainda dentro da central, são enviadas hidráulicamente para tanques de decantação onde depois de sedimentadas, são removidas e aptas para o uso (MATSINHE, et al., 2017).

Segundo Hansson (2017), uma possível área de uso para as cinzas pesadas é a sua incorporação na produção de concreto (como agregados).

2.4.2.1. Características Físicas e Químicas das cinzas pesadas

A figura 7 apresenta um diagrama de utilização do carvão mineral em plantas termoeléctricas.

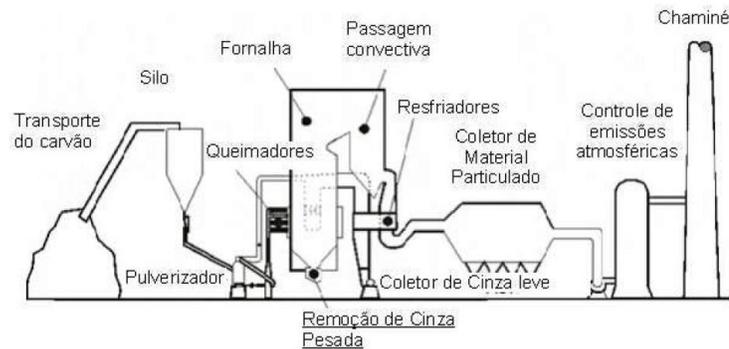


Figura 8: Processo de queima do carvão mineral em centrais termoeléctricas. Fonte: (FARIAS, 2005).

A aplicação das cinzas pesadas para substituir o cimento é muito limitada, devido ao seu maior tamanho de partículas em relação às cinzas volantes, no entanto as cinzas do carvão mineral possuem boas propriedades pozolânicas. (MANGI, et al , 2019). A figura 8 mostra as partículas das cinzas pesadas de carvão mineral original e moída.

As cinzas pesadas podem ser incorporadas em materiais de cimento como um ligante para substituir o cimento ou como um agregado, para a substituição de areia natural, de acordo com a distribuição da granulometria do material para utilização em argamassa ou em concreto estrutural (GHAFOORI & BUCHOLC, 1996).

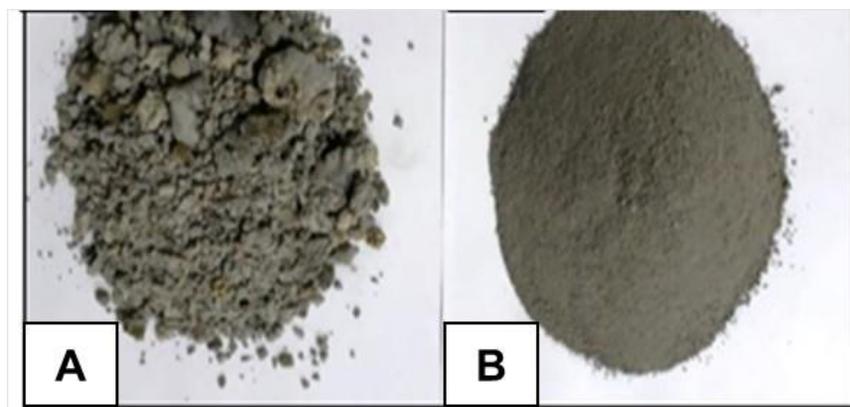


Figura 9: Cinzas pesadas de carvão mineral original A e moída B. Fonte: (MANGI, et al., 2019).

2.4.2.1.1. Características físicas das cinzas pesadas

As características físicas da cinza pesada variam de acordo com os seguintes factores: tipo e qualidade da fonte de carvão, pulverização e pelas condições de operação da central (KIM & LEE, 2015). As características físicas das cinzas pesadas estão listadas em tabela 3. A referência foi determinada com base em areias e cascalhos em geral com gradação semelhante de cinzas pesadas.

Tabela 3: Características físicas das cinzas pesadas. Fonte: (KIM & LEE, 2015). Adaptado.

Características físicas		Cinzas pesadas (inclui escoria)	Referência
Gravidade específica	(OD)	1.3-2.5	2.3 - 2.7
	(SSD)	1.8-2.7	
Densidade aparente (Kg/m ³)		700-1600	1600-2000
Absorção (% em peso)		0.8-6.0	<2.0
Porosidade (vol. %)		5-13	<5.0
Conteúdo vazio não compacto (vol. %)		30-50	<35.0

A diferença entre a gravidade específica do OD e SSD é o peso do agregado usado nos cálculos. A diferença entre esses pesos é o peso da água absorvida nos vazios permeáveis do agregado. Ambos usam o mesmo volume agregado.

Em geral, as partículas de cinza pesada são escuras, angulares formas com texturas porosas. Muitas crateras e poros de tamanho milimétrico são mostrados na superfície da cinza pesada, enquanto algumas crateras podem ser observadas na superfície de cinzas finas. Por outro lado, a porosidade da cinza pesada é cerca de metade da areia de quartzo com raio entre 1,7 nm e 300 nm. Isso indica que a nano-estrutura das cinzas pesadas é

mais densa do que as areias naturais ou cascalhos. A distribuição de tamanho das partículas de cinza pesada é bem graduada, variando de cascalho de 40 mm a silte-argila de 0,075 mm (KIM & LEE, 2010).

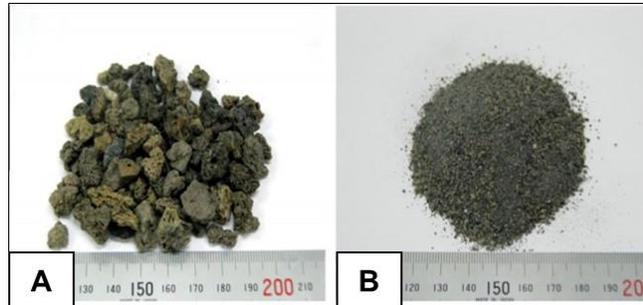


Figura 10: Forma de partícula da cinza pesada (medida em mm), cinza pesada grossa A e cinza pesada fina B. Fonte: (KIM & LEE, 2010).

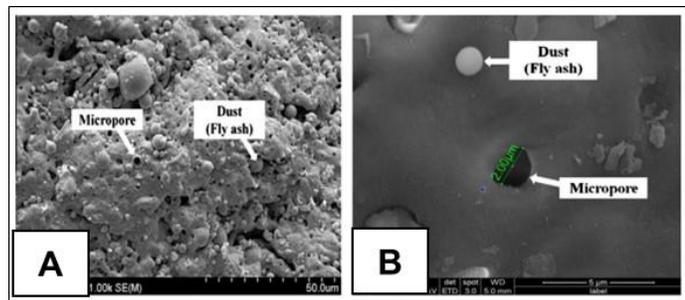


Figura 11: Imagens microscópicas da superfície das partículas de cinza pesada: nível de 50 µm (A) e nível de 5 µm (B). Fonte: (KIM & LEE, 2010).

Diversas pesquisas concluem que, a composição química da cinza pesada varia de 40% a 70% de SiO_2 , de 15% a 30% de Al_2O_3 , e de 2,0% a 14% de Fe_2O_3 , o que corresponde a mais de 80% dos componentes totais (FARIAS, 2005) (KIM & LEE, 2015). O restante é formado por outros óxidos, traços de outros metais como chumbo e mercúrio e sulfatos em percentuais inferiores a 0,1% (FARIAS, 2005).

2.4.2.1.2. Características químicas das cinzas pesadas

As características químicas da cinza pesada são principalmente determinada pelo tipo e qualidade da fonte de carvão e pelas condições operacionais da central termoelétrica e não pela pulverização (ÖZKAN, et al., 2007). Em geral, a composição química da cinza pesada é semelhante à da cinza volante. A tabela a seguir ilustra a composição em

percentagem dos constituintes das cinzas pesadas provenientes do carvão mineral feito na Virgínia Ocidental e no Texas conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4: Composição química da cinza pesada. Fonte: (MOULTON, 1993) apud (FARIAS, 2005). Adaptado

Tipo do Carvão	Betuminoso			Sub-betuminoso	Lenhite	
	Localização	Virginia Ocidental (%)	Ohio (%)			Texas (%)
SiO ₂		53.6	45.9	47.1	45.4	70
Al ₂ O ₃		28.3	25.1	28.3	19.3	15.9
Fe ₅ O ₃		5.8	14.3	10.7	9.7	2
CaO		0.4	1.4	0.4	15.3	6
MgO		4.2	5.2	5.2	3.1	1.9
Na ₂ O		1	0.7	0.8	1	0.6
K ₂ O		0.3	0.2	0.2	0	0.1
Total		93.6	92.8	92.7	93.8	96.5

Portanto, a cinza pesada fornece potencial de reactividade pozolânica quando usado com cimento ou materiais de cimento devido a este elevado teor de SiO₂ amorfa e Al₂O₃ (MALLMANN, 1996).

As cinzas pesadas e volantes com teor de CaO elevado têm uma propriedade hidráulica latente, o que pode aumentar ligeiramente a coesão entre as partículas (VADDU, 2010).

2.5. BLOCOS PERFURADOS

Depois dos anos 80 a iluminação natural voltou a ser valorizada, depois de um período em que a energia eléctrica era consumida de maneira excessiva, especificamente depois da crise do petróleo, pois houve maior preocupação ambiental resultante das consequências da exploração dos recursos naturais, e temas como a eficiência energética ganharam importância.

O nome **cobogó** (bloco perfurado decorativo ou elemento vazado) teve origem das iniciais dos três engenheiros civis que criaram este elemento, Amadeu Oliveira Coimbra (**co**), Ernesto Augusto Boeckmann (**bo**) e António de Góis (**gó**). Esses elementos sempre foram utilizados na arquitectura árabe e sua função é filtrar a iluminação natural dos ambientes e também permitir a privacidade de seus ocupantes com acesso à iluminação e à ventilação. Esses blocos têm sua origem no Oriente Médio, região onde as condições climáticas

levaram ao uso de técnicas e de materiais que proporcionam um melhor aproveitamento dos recursos naturais visando amenizar o desconforto térmico dentro das edificações (MIRANDA, CAMACHO, BESSA, & SACHT, 2019). Os blocos perfurados possuem diversas variedades e *designs*, a figura 11 confirma o facto.

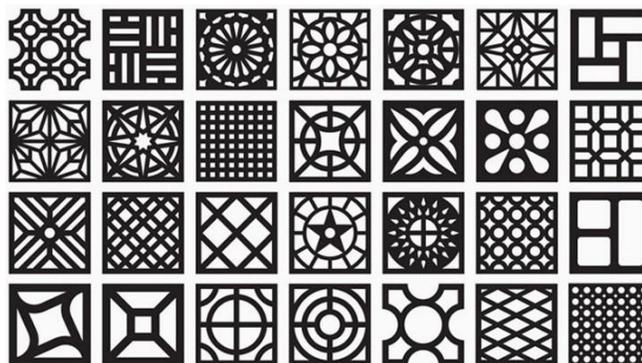


Figura 12: Variedades dos blocos perfurados. Fonte: (MIRANDA, CAMACHO, BESSA, & SACHT, 2019).

Os blocos perfurados são, geralmente usados em paredes devido ao seu baixo custo e fácil acesso de ventilação. A construção com recurso aos blocos perfurados fornece facilidades para ocultar fios eléctricos, tubulações de água e solo. Economiza cimento na alvenaria de trabalho e reduz consideravelmente o custo de construção. Muitos tipos de agregados (brita, cascalho, areia, cinzas vulcânicas, escória, escória de espuma, clínquer de forno etc.) têm sido usados com sucesso para fazer blocos de concreto (Ministry of Housing & Urban Poverty Alleviation, 1983).

O sombreamento é uma estratégia muito eficaz para reduzir a penetração da radiação solar no edifício, oferecendo protecção às áreas de envidraçado, e também à envolvente opaca. Os ganhos de calor através das janelas podem ser muito significativos, visto que estas têm muito pouca resistência à transferência de calor radiante. Em regiões quentes, um edifício bem sombreado pode ser entre 4°C a 12°C mais fresco do que um sem sombra. O sombreamento da envolvente opaca do edifício pode ser feito por dispositivos fixos de sombreamento, pela vegetação, ou através de dispositivos ajustáveis. Varandas, pátios ou átrios, podem ser tipologias úteis na protecção solar (FORJAZ, et al., 2009). O exemplo de uso de tijolos para sombreamento é ilustrado na figura 12.



Figura 13:Utilização de “Brise Soleil” para sombreamento de fachada num edifício projectado pelo Arq. Pancho Guedes, em Maputo. Fonte: (FORJAZ, et al., 2009).

O uso de sistemas de grelhas (desde simples gelsias de madeira até sistemas pré-fabricados em cimento ou material cerâmico) também pode ser muito eficaz para sombreamento, e oferece vantagens em termos de privacidade. Reduz contudo a vista para o exterior, e na sua concepção devem ser especialmente consideradas as necessidades de luz e ventilação natural (FORJAZ, et al., 2009).

Embora todos os produtos pesquisados, possuam como função principal a construção de muros e paredes, e como função base permitir a passagem da ventilação natural ao mesmo tempo em que reduz a incidência da luz solar, percebeu-se que, pela possibilidade de personalização a partir dos diferentes modos de montagem, o bloco perfurado tem feito parte da decoração do ambiente. Além de outras funções adaptadas por simpatizantes deste elemento, ilustradas na figura 13 (RAMOS, 2015).



Figura 14: Novas adaptações e funções dos blocos perfurados. Fonte: (RAMOS, 2015)

A árvore funcional do bloco perfurado, representado na figura 14, foi desenvolvida através dos resultados da pesquisa de mercado, do desenvolvimento histórico e da contextualização do bloco perfurado na actualidade (RAMOS, 2015).

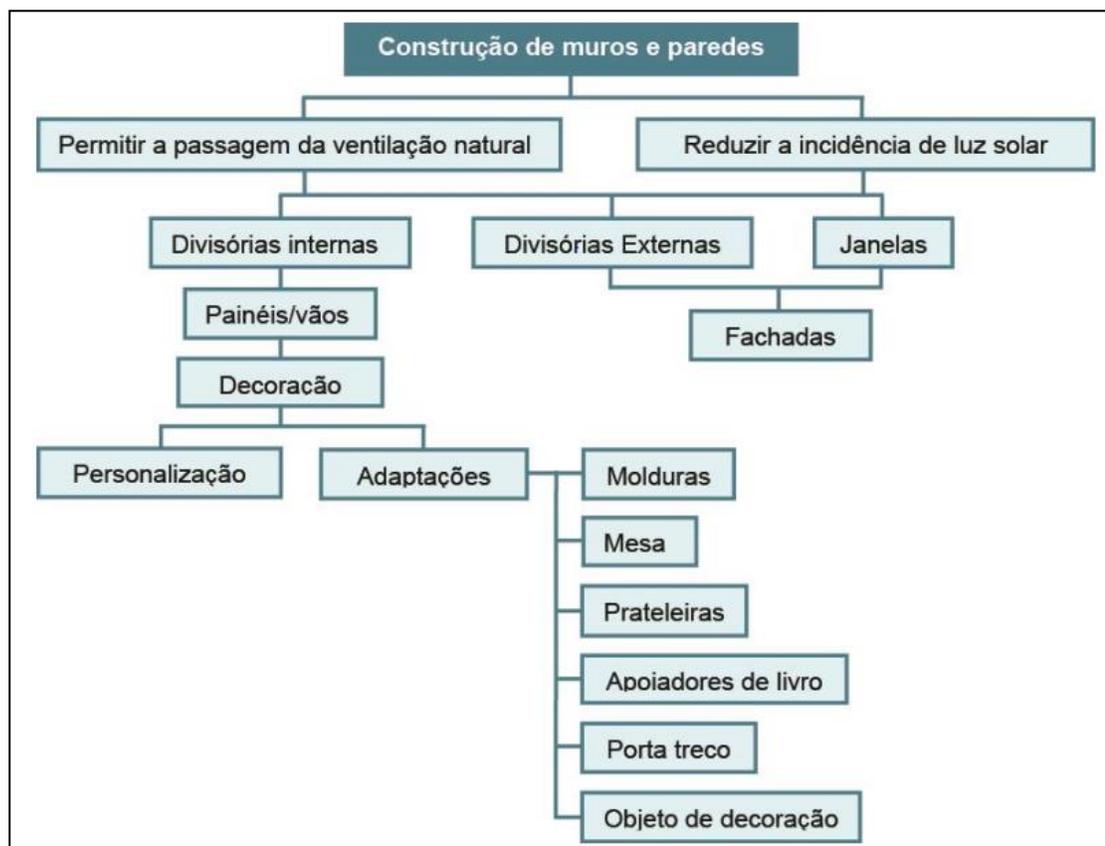


Figura 15: Árvore funcional do bloco perfurado. Fonte: (RAMOS, 2015).

Outro uso popular das cinzas é usá-las como materiais de concreto para a construção. O estudo do uso de cinzas volantes em concreto foi feito extensivamente ao longo dos anos no entanto, poucas pesquisas focam-se na aplicação das cinzas pesadas (MUNTASIR, 2015).

No estudo realizado por Andrade, et al. (2007) sobre a incorporação de cinzas pesadas de carvão mineral como material alternativo da areia natural na produção de concreto obteve resultados que mostram que quanto maior teor de cinzas no concreto, menor será o desempenho no transporte da humidade e que para um determinado tipo de concreto de cinzas pesadas, as propriedades mecânicas como a resistência à compressão e o módulo de elasticidade foram mantidas.

As cinzas do carvão mineral influenciam muitas propriedades: (1) demanda de água, em função da quantidade de partículas finas, material não queimado e o conteúdo natural de água que é removido internamente das partículas de cinza; (2) o efeito de preenchimento, com uma melhoria na função de preenchimento (PANDEY & SHARMA, 2000) e (3) propriedades mecânicas, devido também ao efeito pozolânico que promove o consumo de hidróxido de cálcio para a formação de hidrato de silicato de cálcio, com melhor preenchimento de vazios (RAVINA, 1996).

Segundo Lin e Yang (2002), no estudo feito com relação à remoção de poluentes de águas residuais por cinzas pesadas, onde os resultados experimentais mostram que as cinzas de carvão tiveram uma boa capacidade adsorção de Cu^{2+} e DQO e poderia reduzir as concentrações de vários poluentes no lixiviado. As capacidades de adsorção de cada grama de cinzas de carvão foram 0,48 mg Cu (a pH 4 e temperatura de 25 °C) e 7,5 mg DQO (a pH 5 e temperatura de 25 °C); seus comportamentos de adsorção conformado ao modelo de adsorção de Freundlich. No tratamento do lixiviado, as eficiências de remoção (%) de DQO, NH_3 -N, nitrogénio Kjeldah total, P, Fe^{3+} , Mn^{2+} e Zn^{2+} foram 47; 39,4; 31,1; 92,9; 96,5; 94,3 e 82,2, respectivamente e concluíram que é possível usar cinzas de carvão para remover poluentes de águas residuais.

Segundo Manimaran et al. (2017), no estudo que visava substituir parcialmente o agregado grosso por bambu e agregado fino por pó de pedra em concreto concluíram que o pó de pedra tem a composição apresentada na tabela 5.

Tabela 5: Propriedades químicas do pó de pedra e Areia natural. Fonte: (MANIMARAN, SOMASUNDARAM, & RAVICHANDRAN, 2017).

Constituintes	Pó de Pedra (%)	Areia Natural (%)
SiO ₂	65.73	82.37
Al ₂ O ₃	19.31	8.23
Fe ₂ O ₃	5.27	1.39
CaO	3.64	2.79
MgO	2.16	1.47
Na ₂ O	0	1.63
K ₂ O	2.26	1.81
TiO ₂	1.28	0
Perda de Ignição	0.35	0.31

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os principais materiais, os equipamentos e os métodos utilizados no trabalho experimental desta pesquisa.

A metodologia adoptada consistiu em identificar a proporção mássica adequada de cinzas, areia, pó de pedra e plástico para a fabricação dos tijolos.

A produção dos tijolos perfurados a base de plástico foi realizada na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, localizada na Avenida de Moçambique, próximo ao Terminal Rodoviário Interprovincial da Junta em Maputo. Para produzir os tijolos foi necessário fazer um molde em prol de adequa-lo as condições de fabrico, da ergonomia e da saúde ocupacional. Os parâmetros utilizados para a produção dos tijolos, a partir das cinzas pesadas de carvão mineral e plástico PE, não foram semelhantes aos utilizados na produção de blocos de areia-cimento, pois não foi usada água para formar argamassa mas sim para arrefecer o molde e o tijolo.

3.1. MATERIAIS USADOS

3.1.1. Agregados

3.1.1.1. Cinzas de Carvão

A amostra de cinzas pesadas de carvão mineral usadas no presente trabalho é proveniente da fábrica de cerveja 2M, situada no Bairro Jardim cidade de Maputo. Foi necessário um tratamento prévio das cinzas, para garantir a homogeneidade dos seus graus.

3.1.1.2. Areia e pó de pedra

A areia e o pó de pedra são provenientes da faculdade. A areia foi colhida na entrada dos fundos das oficinas no departamento da Engenharia Mecânica e o pó de pedra fina, atrás do LEM.

3.1.2. Ligante

3.1.2.1. Plástico PE

A amostra do PE usado para desenvolver o compósito, é o saco plástico comum, nesse caso o PEBD e PEAD, os quais são provenientes de um vendedor informal de plástico, que colecta o plástico, aos arredores da cidade de Maputo, para a sua posterior venda às

associações recicladoras e da recolha efectuada pelo autor na sua faculdade, bairro e no mercado Zimpeto. A amostra foi colectada a partir do mês de Novembro de 2021 e finalizada no mês de Março de 2022, tendo sido colectado em média uma vez a cada duas semanas num dos pontos.

3.1.3. Molde

O molde usado no presente estudo foi feito na serralharia do departamento de Engenharia Mecânica da faculdade de engenharia da UEM. O molde trabalhado com recurso a chapa metálica (com 2mm de espessura), tubo de ferro quadrado de 35mmx35mm e ferro 10, por meio da soldadura, tem o formato e dimensões apresentados na figura 16.

O procedimento para fazer o molde obedeceu a seguinte ordem:

❖ Concepção do Modelo do molde

O modelo do molde, usado para fazer os foi da escolha do autor e desenhada no programa AutoCAD, *software* usado principalmente para a elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões e para criação de modelos tridimensionais, conforme a figura 15.

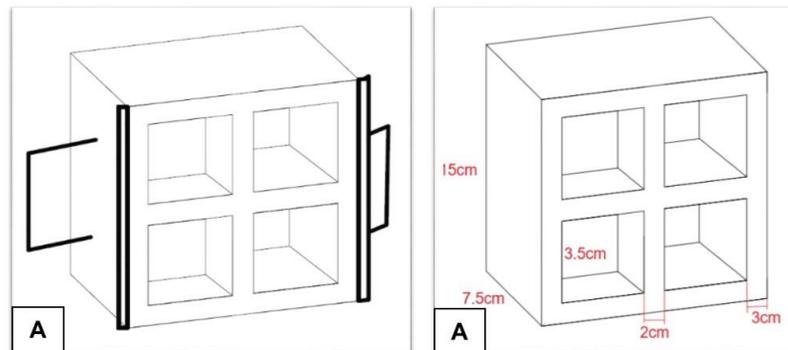


Figura 16: O esquema A - represente o molde usado para o fabrico de B - blocos perfurados decorativos com respectivas dimensões. Fonte: Autor.

❖ Corte de chapa e ferro

Para o corte da chapa e ferro (figura 16) foi feita com recurso a uma Rebarbadora Bosch Professional GWS 2000.

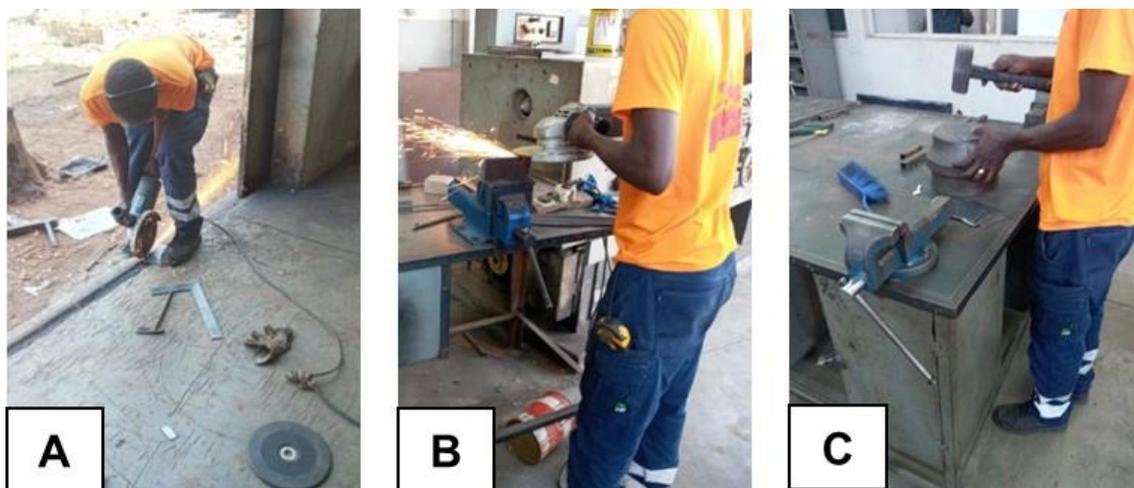


Figura 17: Processo de Corte de chapas e sua respectiva preparação A-Corte, B- Polimento e C - Configuração. Fonte: Autor.

❖ Junção e Soldagem

As peças metálicas (pedaços de chapas cortadas) foram juntadas manualmente e soldadas por meio da máquina de solda (marca *costruzioni elettromeccaniche* TM 320 Nº 9102214) sob alimentação de energia eléctrica, conforme a figura 17.



Figura 18: Máquina de solda A, processo de solda B e produto acabado (C – Macho e D - Fêmea. Fonte: Autor.

3.2. PROCESSAMENTO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

O processamento obedeceu os seguintes passos principais: classificação das cinzas, areia e de pó de pedra quanto a granulometria, preparação do PE e preparação e planeamento das misturas.

3.2.1. Classificação das cinzas Quanto a granulometria

A metodologia adoptada para a classificar as cinzas pesadas quanto a sua granulometria foi a peneiração por meio de uma peneira de 2 mm através da vibração.

Para garantir a homogeneidade dos grãos das cinzas, foi necessário pesar e colocar num moinho de bolas, apresentado na figura 18, (marca *Anand A.C Induction Motor*, com 40 rotações por minuto (rpm)) com uma velocidade constante, ilustrada na figura por um intervalo de 10 minutos para cada 4kg de cinzas.

Esse critério de separação de material é possível quando existe uma diferença no tamanho das partículas. A peneira permitiu reter os materiais grosseiros como é o caso do carvão mineral não queimado e alguns restos, os quais foram separadas, conforme a figura 19. As cinzas remanescentes (médias e as finas) foram utilizadas para a produção dos blocos por serem mais homogenias e por apresentarem poucos materiais que colocariam em causa a resistência e a estética dos blocos. Ressaltar que, é possível utilizar todo o resíduo resultante da combustão do carvão mineral desde que este tenha um devido tratamento prévio.



Figura 19: Equipamento usado para moer as cinzas – Moinho de Bolas. Fonte: Autor.



Figura 20: A - cinzas pesadas antes do processo da moagem, B - cinzas mais grosseiras contendo algumas impurezas (resíduo) e C - cinzas já prontas para o uso (que passaram da grelha da peneira). Fonte: Autor.

3.2.2. Classificação da areia e de pó de pedra quanto a granulometria

A metodologia adotada para classificar a areia quanto a sua granulometria, assemelha-se ao das cinzas pesadas, a peneiração por meio de uma peneira de 2 mm através da vibração. A peneira reteve os materiais mais grosseiros como é o caso de pedras e lixo (pedaços de madeira, pãezinhos e folhas), conforme figura 20 (A e B). No que diz respeito ao pó de pedra, não foi feito nenhum tratamento prévio, visto que não apresentava impurezas, conforme a figura 20 C). Ressaltar que o pó de pedra usado foi o pó de pedra fina.

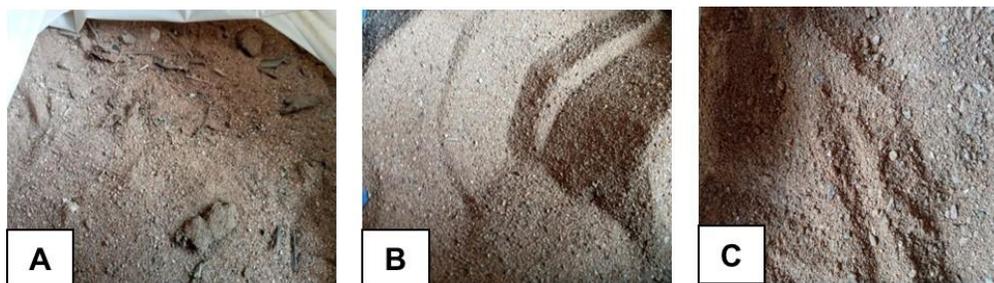


Figura 21: A - areia antes da peneiração, B – areia já peneirada e C - pó de pedra fina. Fonte: Autor.

3.2.3. Preparação do Plástico PE

O PE usado nesse trabalho é especialmente o saco plástico comum, mas teve também o PE fino resultante do embalamento de paletes de Produtos comercializados. Foi necessário fazer uma pequena caracterização do plástico obtido do vendedor informal, pois este dispunha de uma mistura de plásticos. Após a obtenção do plástico foi necessário recortar

com recurso a uma tesoura para diminuir o tamanho e facilitar o transporte e aumentar a superfície de contacto, conforme a figura 21.



Figura 22: A - Plástico PE antes de corte e B - Plástico já cortados. Fonte: Autor.

3.2.4. Preparação e Planeamento das Misturas

As misturas usadas para a produção dos blocos são constituídas por: plástico PE (PEBD e PEAD), areia, cinzas pesadas do carvão mineral e o pó de pedra, as quais foram determinadas com base na composição mássica.

A tabela 1 a seguir mostra as diferentes formulações das amostras segundo o planeamento estatístico de mistura para três (3) componentes, conforme o caso em estudo.

Tabela 6: Formulação das amostras no planeamento estatístico de mistura para três (3) componentes.

Nº s ensaio	Amostras	Componentes			Pseudo – componentes		
		X ₁	X ₂	X ₃	X	Y	Z
1	BD I	1	0	0	0.65	0	0
2	BD II	0	1	0	0	0.65	0
3	BD III	0	0	1	0	0	0.65
4	BD IV	½	½	0	0.325	0.325	0
5	BD V	½	0	½	0.325	0	0.325
6	BD VI	0	½	½	0	0.325	0.325
7	BD VII	1/3	1/3	1/3	0.217	0.217	0.217

Foi usada uma proporção mássica fixa do plástico (35%) como ligante, e as restantes composições foram complementadas pelos três componentes de mistura (agregados), nomeadamente: areia (Variável X), cinzas pesadas (Variável Y) e pó de pedra (Variável Z). Essa composição foi determinada em termos mássicos.

São adicionados pedaços de plástico no balde metálico para derreter até atingir a homogeneidade exigida. Os agregados são usados para adição na mistura de PE + Agregado. Quando a temperatura do PE derretido no balde está em torno de 180 - 200 °C, então o agregado é adicionada ao balde. O Agregado e o PE derretido são agitados continuamente para que ambos se unam perfeitamente. À medida que as peças de plástico derretem, elas começam a se unir às partículas do agregado e, portanto, a mistura necessária para o tijolo decorativo é obtida e para o processo de preparação da mistura em causa foram necessários 9 minutos.

Essa experiência foi planejada pelo modelo estatístico de misturas, sendo que a composição dos componentes para melhor compreensão do comportamento e funcionamento do processo de produção dos tijolos e foram produzidos um total de 24 (vinte e quatro) tijolos, os quais 21 (vinte e um) foram submetidas aos ensaios, sendo 3 (três) amostras para cada composição.

3.3. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

3.3.1. Absorção de Água

A determinação da absorção de água foi realizada de acordo com a norma Especificação IS 2185-1: 2005.

Os tijolos produzidos foram submetidos ao processo de secagem numa estufa, a uma temperatura de 110°C por 24 horas para determinar a massa no estado seco e submersos em água limpa em um balde plástico a temperatura ambiente por 24 horas, tendo o excesso da água superficial sido removida com base num pano e depois pesado, para determinar a massa através duma balança digital, no estado saturado de água. O índice de absorção de água foi calculado conforme a equação 3:

$$AA = \frac{(m_h - m_s)}{m_s} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

- ✓ AA = Absorção de água em porcentagem (%)
- ✓ m_h = Massa húmida da unidade em kg.
- ✓ m_s = Massa seca da unidade em kg.

3.3.2. Massa específica

A massa específica é definida como a razão entre massa do compósito pelo volume da água deslocada. Essa análise realizou-se para saber a relação entre peso do tijolo perfurado decorativo em relação ao seu volume. A massa específica dos tijolos perfurados decorativos foi determinada de acordo com a seguinte expressão matemática:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4)$$

Onde:

- ✓ ρ – Massa específica, em Kg/m^3 ;
- ✓ m – Massa, em quilogramas (Kg) dos tijolos;
- ✓ V – Volume, em metros cúbicos (m^3) dos tijolos.

O volume (V) foi determinada com base na lei de Arquimedes, tendo sido mergulhado no copo graduado de 6 litros e determinado o seu volume, este foi de aproximadamente $0.0009 m^3$ e calculado através da equação.

3.3.3. Resistência à Compressão

A resistência à compressão de um material é definida como sendo a capacidade deste resistir à tensão sem rupturas. A ruptura é algumas vezes identificada como aparecimento de fissuras. Essa análise foi realizada a fim de determinar a resistência do bloco perfurado decorativo.

A resistência à compressão foi determinada após 60 dias. O ensaio de compressão foi realizado com o auxílio de uma prensa de ensaios (ilustrada na figura 23), de marca PROTSURV, modelo CUBAN B, com capacidade de 3000 kN e uma resolução de 0.1 kN, a uma velocidade de carregamento de 1 mm/min. Foram analisados 3 blocos perfurados decorativos para cada ponto da mistura neste ensaio.

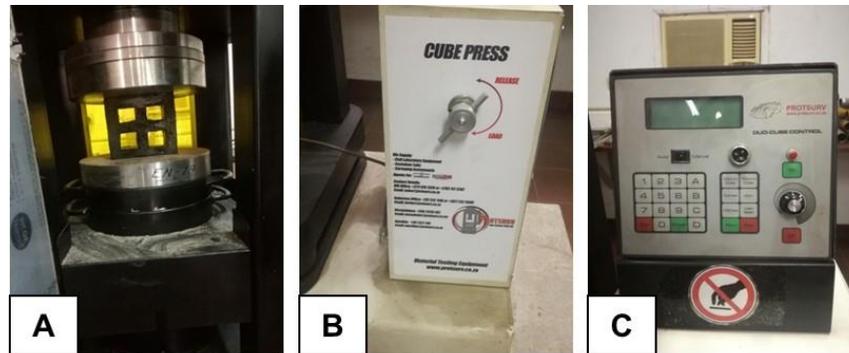


Figura 23: Prensa utilizada no ensaio de compressão: A - Pratos da prensa para colocar o material a ensaiar, B - Cubo da prensa com um accionador para carregar e descarregar e C - painel de controlo. Fonte: Autor.

A resistência à compressão dos corpos cerâmicos foi obtida a partir da equação 5:

$$T = \frac{F}{A} \quad (5)$$

Onde:

- ✓ T – Tensão de ruptura à compressão, em Mega pascais (MPa);
- ✓ F – Força/carga de ruptura, em Newton (N);
- ✓ A – Área das peças curadas, em milímetro quadrado (mm²).

A área (A) foi determinada com base no comprimento (c) e largura (l) e foi aproximadamente 0.009 m² e calculado através da equação (6):

$$T = Cxl$$

3.4. DETERMINAÇÃO DOS GASES EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO PE

Os gases emitidos na combustão do PE foram determinados com o objectivo de identificá-los e se durante o processo de produção dos tijolos perfurados decorativos ocorria a poluição do ar atmosférico. Para verificar se de facto ocorria a poluição atmosférica ou não, foi usado o analisador de gases (*Multi-Gas Analyzer*) modelo S360. A leitura dos gases foi feita em 9 (nove) minutos, em intervalos de 1 (um) minuto. A figura 24 ilustra o equipamento usado para analisar os gases.

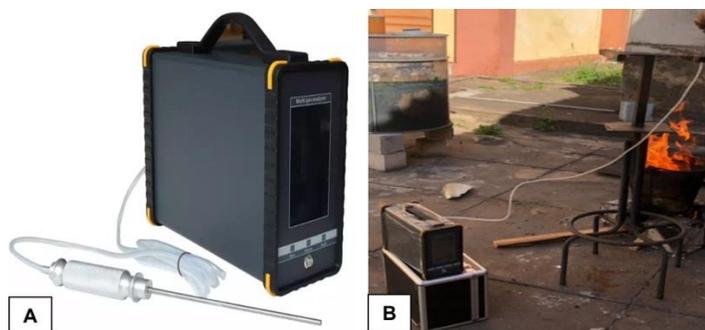


Figura 24: Analisador multigás portátil S360 A e Montagem do Analisador B. Fonte: Autor.

3.4.1. Produção de Blocos Perfurados

A produção dos tijolos perfurados decorativos obedeceu um determinado procedimento e materiais.

Os materiais usados são: um balde metálico de 15 Litros (que serviu para derreter o plástico), dois recipientes para por água (um de 5 Litros para arrefecer o molde e o tijolo e outro de 2 Litros para caso de emergência, Lenha (restos de madeira obtidos na Carpintaria do Departamento de Engenharia Mecânica), uma caixa de fósforo como fonte de ignição, uma colher de pedreiro e um raspador de tintas, um par de luvas de protecção, um par de batas, um boné e uma máscara. O fluxograma de processo de produção dos tijolos é apresentado no diagrama da figura 25, a seguir.



Figura 25: Fluxograma de processo de produção dos tijolos. Fonte: Autor.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os tijolos perfurados decorativos para vedação desenvolvidos no presente trabalho foram ensaiados com uma idade média de 60 dias, uma vez que o tempo de cura não tem uma influência significativa no que concerne a resistência a compressão.

Esse facto já foi demonstrado por Subathra et al. (2022) num estudo que visava fazer uma investigação experimental sobre a produção de tijolo de plástico, observaram que os tijolos feitos a base de areia e plástico (5,10 e 15%) não variam muito com o tempo de cura, sendo que, aos 7; 14; e 28 dias as resistências foram: 14,8; 15,2; e 15,4 kPa (plástico 5%), 23,1; 23,6 e 23,9 kPa (plástico 10%) e 26,5; 27,2 e 27,7 kPa (plástico 15%), respectivamente.

As propriedades dos tijolos perfurados decorativos, produzidos a partir da mistura de PE e Agregados (areia, cinza ou pó de pedra) são influenciadas pela resistência da matriz plástica e pela ligação intersticial entre o plástico e o agregado.

Ocorre o encapsulamento do agregado dentro do aglutinante plástico através de acoplamento mecânico e ligação molecular que formam o mecanismo de ligação (AWAJA, FOX, KELLY, & PIGRAM, 2009).

Todas as propriedades determinadas possuem uma equação do modelo quadrático que permite calcular os efeitos da interação das variáveis independentes (X, Y e Z). Os efeitos da interação das variáveis independentes caracterizam a sua interligação, isto é, a correlação doutra variável independente com a função de resposta (V).

4.1. ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água é o aumento de massa que ocorre em um material sólido, em relação a sua massa seca, quando submerso totalmente em água.

Para a realização do ensaio da absorção da água, foram destinadas duas amostras de cada tijolo perfurado decorativo para a investigação da absorção, onde as suas massas foram aferidas nos estados seco saturado. A técnica consiste em verificar o grau de porosidade do tijolo, conforme sua porosidade interna, sendo que quanto maior a porosidade, maior será a absorção da água.

De acordo com os ensaios realizados, na figura 26, pode-se observar que os tijolos praticamente não absorvem água. Essa característica torna-os excelentes materiais para utilização na construção civil, um exemplo claro é o caso em estudo, os quais podem ser utilizados para vedação.

Por um lado pode se observar que os tijolos resultantes da mistura do PE + Cinza absorvem quase a mesma quantidade de água se comparado com a mistura de PE + Areia+ Cinza, por outro lado observa-se que o efeito da Areia na mistura de PE + Areia + Cinza é quase nulo.

No que diz respeito a mistura do PE + Pó de Pedra, esse comportamento de absorção é quase o mesmo se comparado com o da mistura de PE +Cinza + Pó de Pedra e se também for comparado com o da mistura com PE + Areia + Cinza+ Pó de Pedra, esse comportamento pode ser devido ao tamanho das pedras presentes no pó de pedra, pois quanto maior o tamanho de pedra maior será o tamanho dos poros e maior será a capacidade de deixar a água passar para o interior e para o exterior do bloco.

Os níveis de absorção de água estão entre 0,18% (resultante da mistura de PE + Areia) e 0,39% (resultante da mistura de PE +Areia + Cinza), valores estes que estão na ordem de 0.4%, e essa quantidade muito inferior do máximo permitido de 10% segundo a norma Especificação IS 2185-1: 2005. Os vazios entre a Cinza + PE, Areia + Cinza + PE não são totalmente preenchidos por plástico derretido, este facto que pode ser um dos motivos do aumento em dobro da quantidade de água absorvida nessas misturas, uma das possíveis causas desse comportamento, pode ser devido ao facto das cinzas dissolverem em água, o que também pode ser observado na Tabela A1-2 nos apêndices.

Esses valores já eram esperados, uma vez que, no estudo realizado por Parashar (2019), que visava melhorar a resistência à compressão de tijolos de plástico polipropileno com diferentes materiais residuais a absorção global de cada tijolo foi inferior a 1% (35% de Plástico + 65% de Areia, absorção igual a 0,44% e para 35% de Plástico + 65% de Pó de Pedra, 0,51%) e também observou que quanto maior for a quantidade de plástico maior é a absorção de água.

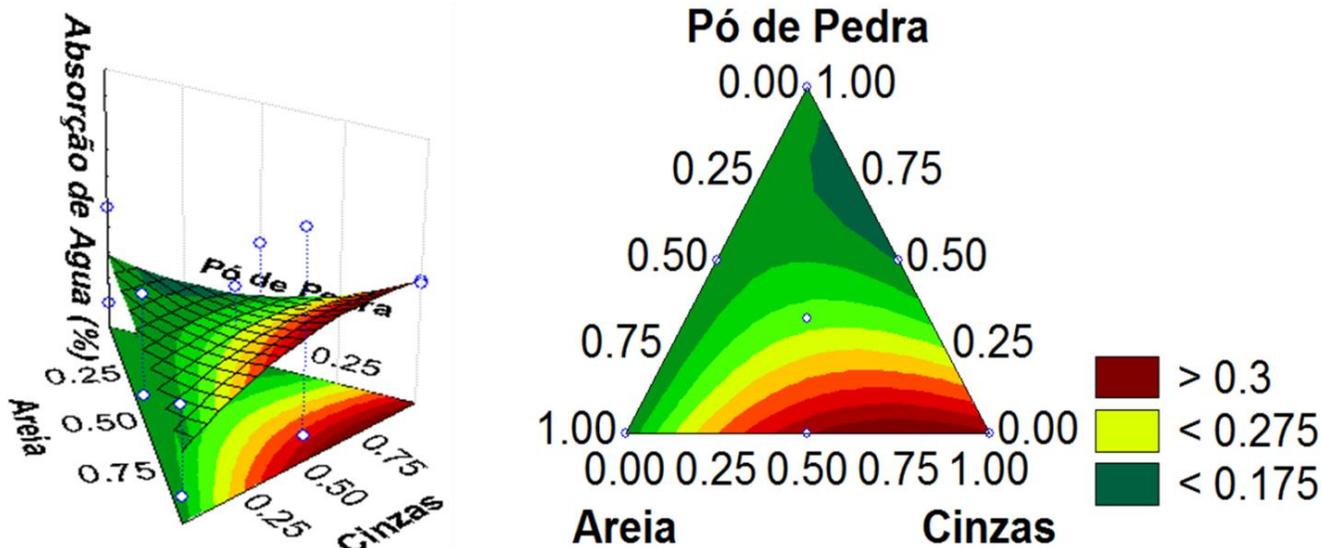


Figura 26: Absorção de Água (%) vs Componentes da Mistura. Fonte: Autor.

Assim, através do gráfico da figura 26, observou-se no *software* que a equação do modelo é:

$$V(x, y, z) = 0.179x + 0.379y + 0.194z + 0.375xy + 0.03485xz + 0.455yz \quad (7)$$

Pelo modelo quadrado proposto pela equação (7), todas as interações influenciam positivamente, sendo que a mistura binária entre as cinzas pesadas do carvão mineral e pó de pedra tem maior influência e depende muito dessa interação, com efeito de 0.455. A menor influência e dependência é observada na mistura binária entre a areia e pó de pedra.

4.2. MASSA ESPECÍFICA

Na figura 27 observa-se o gráfico que mostra o teste da massa específica que à medida que se adiciona mais agregados a massa específica do tijolo aumenta, o que também pode ser reflectido pelo tamanho das partículas de cada um desses. Esse comportamento pode ser observado no gráfico, pois a massa específica das misturas: PE + Cinza; PE + Areia + Cinza e PE + Areia + Cinza + Pó de Pedra; são 1,478; 1,687 e 1,703 g/cm³ respectivamente. Assim sendo, os tijolos perfurados decorativos a base de PE e Cinzas apresenta características importantes para o uso na construção civil, uma vez tijolos mais leves permitem reduzir as cargas totais das obras, o que é conferido pelo tijolo de PE + Cinza. Pode-se observar que

os valores de densidade estão na faixa de 1,478 à 1,703 g/cm³, também pode ser observado na Tabela A1-3 nos apêndices.

E possível observar que, as misturas ternárias (areia 21.7% + cinzas 21.7% + pó de pedra 21.7%) são as que apresentam maior densidade em relação as misturas puras (areia 65%, cinzas 65%, pó de pedra 65%) e binárias (areia 32,5% + cinzas 32,5; areia 32,5% + pó de pedra; 32,5% cinzas + 32,5% pó de pedra), isso pode ser devido aos espaços existentes entre as partículas que são totalmente preenchidas pelos outros agregados, tornando-os mais compactos e consequentemente maior densidade.

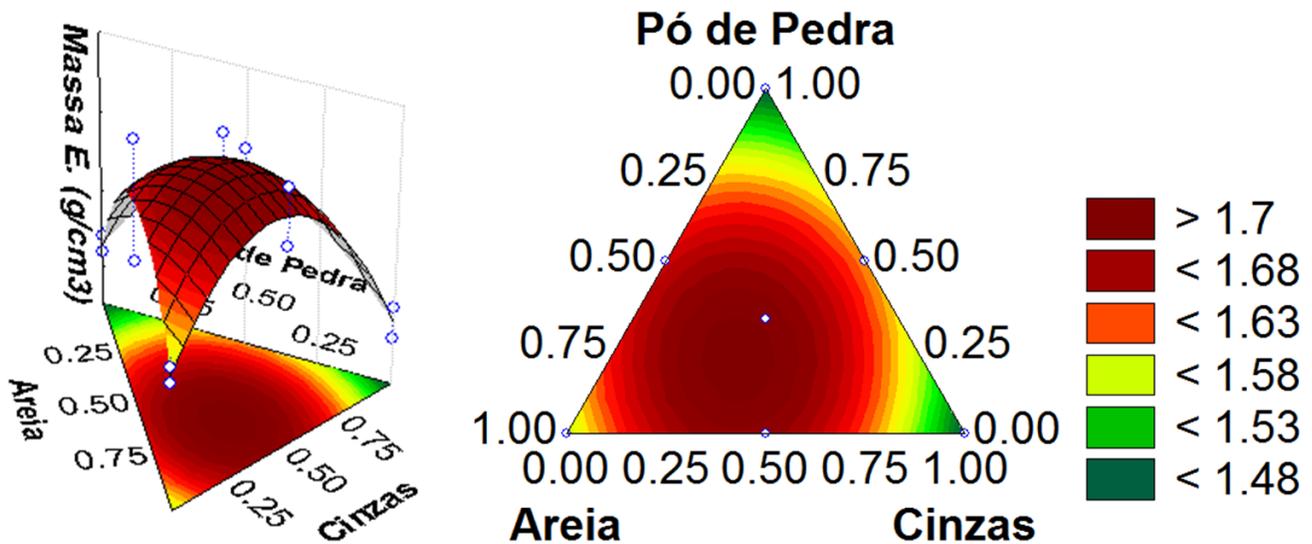


Figura 27: Massa específica em função dos componentes da Mistura. Fonte: Autor.

Assim, através do gráfico da figura 27, observou-se no *software* que a equação do modelo é:

$$V(x, y, z) = +1.570x + 1.480y + 1.480z + 0.645xy + 0.525xz + 0.525yz \quad (8)$$

Pelo modelo quadrado proposto pela equação (8), todas as interações influenciam positivamente, sendo que a areia tem maior influência nesse modelo e tem um efeito de 1.570. A menor influência e dependência é observada na mistura binária entre as cinzas pesadas do carvão mineral e entre a areia e pó de pedra com o mesmo efeito de 0.525.

Realçar que no modelo cúbico seriam observados maiores valores de massa específica na faixa das misturas ternárias de acordo com a figura 27.

4.3. RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO

A figura 28 ilustra o gráfico obtido no ensaio da resistência a compressão pelo qual os tijolos perfurados decorativos foram submetidos, o que também pode ser observado na Tabela A1-1 nos apêndices.

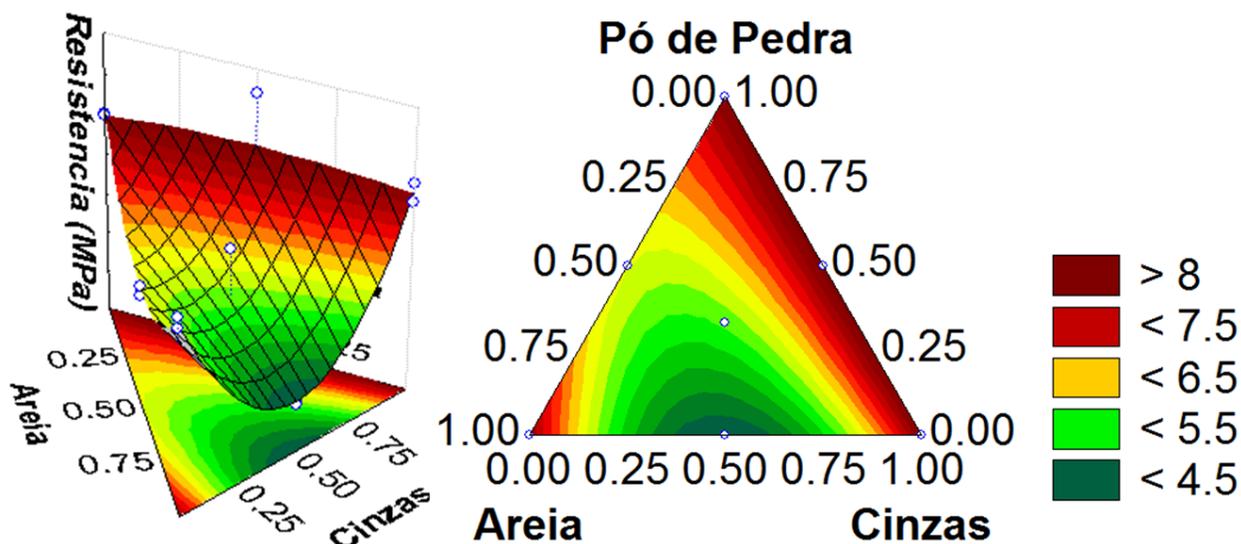


Figura 28: Gráfico da Resistência a Compressão. Fonte: Autor.

Assim, através do gráfico da figura 28, observou-se no *software* que a equação do modelo é:

$$V(x, y, z) = 7.734x + 7.944y + 7.999z - 14.269xy - 7.419xz + 0.781yz \quad (9)$$

Pelo modelo quadrado proposto pela equação (9), as interações binárias entre areia e cinzas pesadas do carvão mineral, e areia e pó de pedra influenciam negativamente. A maior influência e dependência são negativas e é observada na areia e cinzas pesadas do carvão, com efeito de -14.269. O maior valor positivo é observada nas cinzas, com efeito de 7.944 e pó de pedra, com efeito de 7.999.

Observa-se no gráfico, que nas primeiras quatro misturas, a diferença da resistência a compressão nos blocos não é significativa. Mas se comparadas com as últimas três é bastante significativa, chegando a ter uma diferença de até três (3) unidades. É possível ver que os valores da resistência a compressão estão na faixa de 4,23 à 8,13 MPa.

Esses valores da resistência a compressão são bons uma vez que, o LEM (2016), considera que os blocos de cimento sólidos ou ocos devem possuir a resistência nominal à compressão das unidades de 7 MPa com um teor médio mínimo de 5 unidades e resistência mínima à compressão de uma unidade individual de 5,5 MPa, a argamassa deve ser de classe B, salvo indicação em contrário e a argamassa dos blocos deve ser constituída pelos seguintes componentes, apresentados na tabela 7.

Tabela 7: Classificação e constituição de argamassa de blocos de alvenaria de cimento.

Fonte: (LEM, 2016).

Classificação	Resistência à compressão (MPa)	Cimento (Kg)	Pó de pedra (litros)	Areia (litros)
A	>5	50	0 – 10	130
B	4	50	0 – 40	200
C	1,5 – 2	50	0 – 80	300

Os tijolos feitos a base do PE + Areia + Cinza apresentam a menor resistência a compressão de 4,23 MPa, pertencendo assim a classe B. Por outro lado é possível observar que os tijolos a base de PE + Cinza + Pó de Pedra apresentam maior valor da resistência a compressão de 8,13 MPa e uma dispersão bastante superior se comparado com os restantes tijolos de 1,29 MPa (Classe A). Os tijolos feitos a base de PE + Cinza apresenta uma resistência de 7,96 MPa e um desvio de 0,21 MPa, os restantes são também da classe A.

Os melhores valores são observados a medida que se avança ao pó de pedra partindo das cinzas, isto é, a mistura binária entre as cinzas pesadas e o pó de pedra apresenta melhores valores a medida que tem-se maior quantidade de pó de pedra. Esse facto pode ser devido as propriedades químicas do pó de pedra como é por exemplo a quantidade de SiO₂ (semelhante ao das cinzas pesadas) que é reduzida, se comparada com a da areia natural e menor que se comparada a do cimento.

O valor da resistência obtido no tijolo a base de PE + Areia foi inferior ao valor obtido por Parashar (2019), que na mistura de plástico polipropileno (35%) + Areia (65%) obteve 13,25 MPa de resistência a compressão, mas esse facto pode ser devido: primeiro, ao facto dos

tijolos produzidos por este serem totalmente preenchidos e não perfurados, segundo, pelo facto da areia usada pelo mesmo autor ter dimensão menor a 1,18mm, que é inferior à por mim usada e por fim pode ser pelo caso do tipo do plástico que é diferente.

Segundo KUMI-LARBI JNR et al. (2018), no estudo que visava reciclagem de resíduos plásticos (sachês de água) feitos de PEBD para formar blocos pavês de areia ligados em plástico, os resultados mostraram que a areia ligada ao PEBD é um material forte e resistente com resistência à compressão de até 27 MPa quando produzidos em condições ideais de processamento. Esse facto também comprova que quando os tijolos são produzidos e totalmente preenchidos, maior será a resistência a compressão.

O ensaio da resistência a compressão foi destrutivo, tendo apenas causado fissuras ao longo dos blocos e principalmente no centro de gravidade, conforme ilustrado na figura 29.

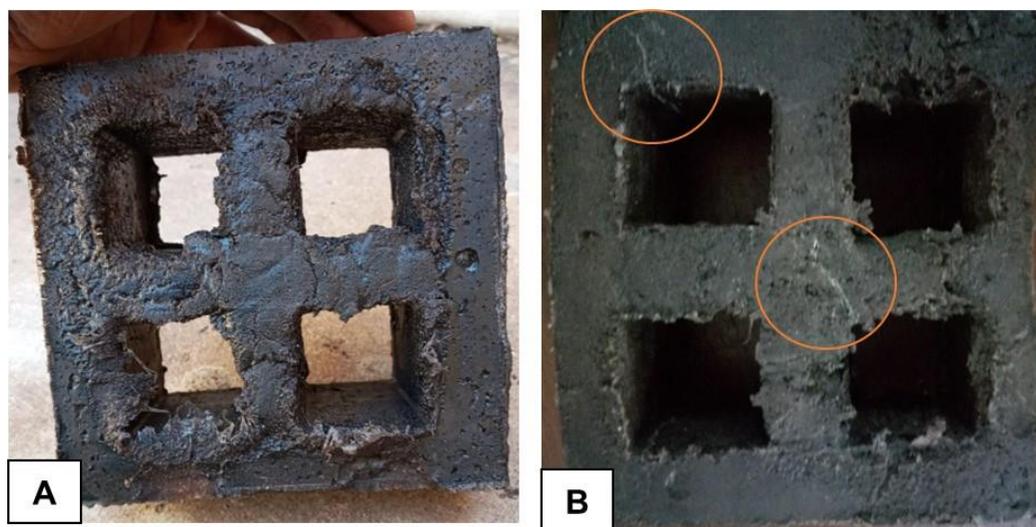


Figura 29: Amostras de tijolos perfurados decorativos a base de PE + Agregado antes a) e depois do ensaio da resistência a compressão (b) mostrando as fissuras desenvolvidas após o ensaio. Fonte: Autor.

4.4. ANÁLISE DE GASES EMITIDOS NA COMBUSTÃO DO PE

As figuras 30 e 31 mostram dois gráficos da variação da concentração dos gases emitidos na combustão do PE em função do tempo, podendo também na Tabela A2-1 nos apêndices. É possível observar que o gás mais emitido e com maior variabilidade é o CO₂.

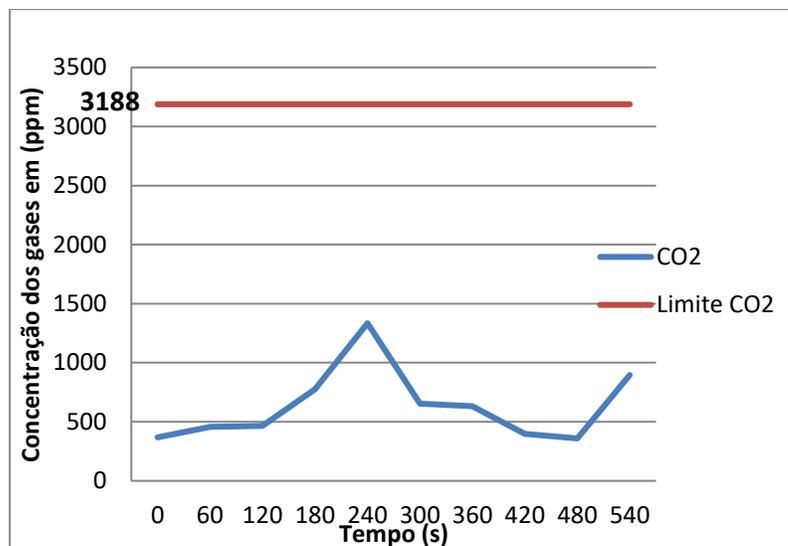


Figura 30: Concentração de CO₂ emitidos em função do tempo. Fonte: Autor.

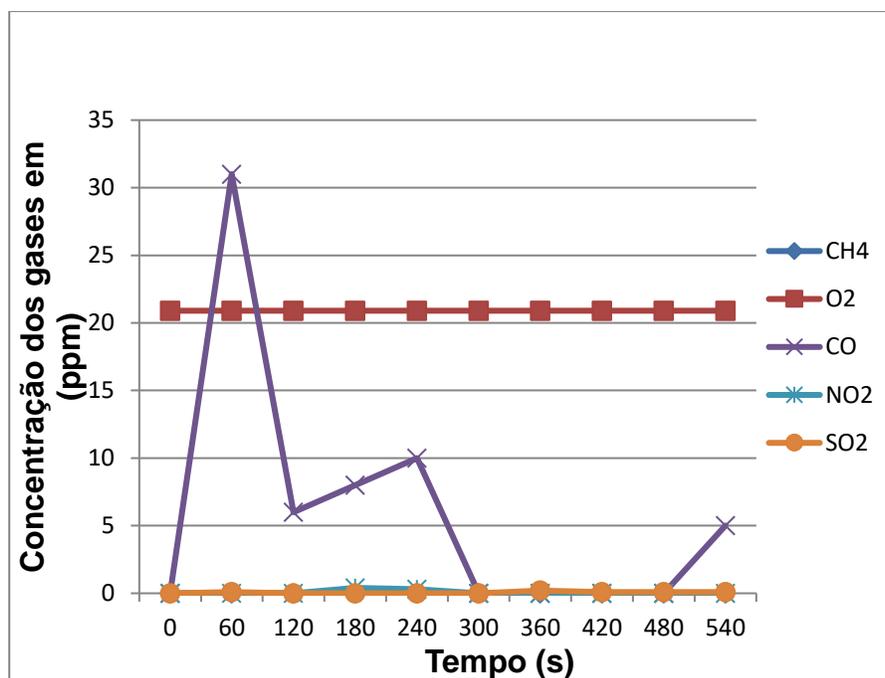


Figura 31: Concentrações de gases emitidos em função do tempo. Fonte: Autor.

Os limites de emissão de poluentes atmosféricos que determinam a qualidade do ar, foram comparados com os pré estabelecidos na tabela do Anexo I (Padrões de Qualidade do Ar) para comparar a concentração de SO₂, NO₂ e CO e a tabela referente ao Limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos admissíveis a fontes móveis ou veículos a motor para o CO₂ do Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e de Emissão de Efluentes (Decreto n.º 18 / 2004) conjugado com a Revisão e actualização dos padrões de qualidade

ambiental e à revisão das taxas e multas aplicáveis (Decreto n.º 67 / 2010), sendo os limites apresentados na tabela a seguir.

Tabela 8: Limites de emissão de poluentes e qualidade do ar.

Limite CO₂ (fontes móveis – automóveis de passageiros)	Limite CO (T=1h)	Limite NO₂ (T=1h)	Limite SO₂ (T=10min)
3188 ppm	40 ppm	0.4 ppm	0.5 ppm

A medida que aumentamos a temperatura a concentração do CO₂ aumenta e atinge um ponto máximo de concentração de 1334 ppm aos 4 (quatro) minutos, e a partir daí começa a diminuir até aos 8 (oito) minutos e volta a subir até uma concentração 897 ppm. O aumento da concentração nos primeiros 4 minutos devem-se ao aumento da temperatura, uma vez que a quantidade do plástico sólido disponível é maior, maior é a tendência do fogo alastrar-se no interior do balde. Consumido o plástico original e transformado na mistura do plástico sólido e líquido a quantidade do fogo aumenta, mas a concentração do CO₂ diminui. No intervalo entre 8-9 minutos o fogo no interior do balde estava totalmente ausente e ocorreu a retirada da massa (PE + Agregado) para o molde, onde é observada o aumento mais uma vez da concentração de CO₂. Esse comportamento era esperado uma vez que CO₂ é o produto da combustão completa do PE.

Após a observação da variabilidade do CO₂, o CO teve uma variabilidade considerável quando comparado com os restantes gases analisados. Logo no primeiro minuto observou-se a maior concentração do CO de 32 ppm, no segundo minuto desceu cerca de duas dezenas e 6 unidades, no terceiro aumenta mais duas unidades, no quarto também aumenta mais duas unidades e no quinto cai até 0 ppm. No intervalo entre 5-8 minutos a concentração de CO manteve-se constante e no último minuto sobe para 5 ppm. No início havia uma dificuldade na combustão completa do plástico, o que é explicado pela maior concentração do plástico. Devido a alguns factores externos, como por exemplo, o vento teve influência no início da combustão pois no intervalo entre 2-5 minutos a concentração de CO teve uma variabilidade baixa. De 5-8 minutos não se observa a concentração de CO, o que significa que a partir do quinto minuto a combustão é completa e no último observa-se mais uma vez a concentração do CO, momento no qual retirou-se a massa do balde. Esse comportamento também era esperado uma vez que o CO faz parte dos produtos da combustão incompleta.

É observada a presença da concentração de NO_2 de 0,4 ppm aos 3 minutos e 0,3 ppm aos 4 minutos, e da concentração de SO_2 de 0.1 ppm em 1 minuto, 0.2 ppm aos 6 minutos e 0.1 ppm entre 7-9 minutos. Esses resultados por um lado não são esperados uma vez que não fazem parte dos produtos de combustão, por outro segundo Alabi et. al (2022) a combustão de plásticos polui o ar causada devido aos gases nocivos liberados na atmosfera e que são prejudiciais para os seres humanos e para o meio ambiente. Alguns compostos podem formar uma mistura combustível, enquanto outros podem oxidar na forma sólida.

A concentração de O_2 manteve-se constante, com uma concentração de 20.9 ppm aquando da combustão do PE, resultado este que é benéfico uma vez que embora poluído o ar, a quantidade de O_2 não é afectado.

A concentração de CH_4 não é observada, sendo que manteve-se em 0 ppm. Esses valores não eram esperados pois, segundo Graham (2021), a combustão de PE em diferentes condições de operação detectou mais de 230 compostos orgânicos voláteis (exemplo o benzeno) e semi-voláteis (benzo (a) pireno e 1,3,5 trimetil-benzeno), especialmente olefinas, parafinas, aldeídos e hidrocarbonetos leves (metano, etano, propano, butano). Assim sendo é possível que na análise de gases, alguns gases nocivos tenham sido dispersos na atmosfera, mas o equipamento usado só consegue fazer leitura de seis gases.

Os gases emitidos, embora estejam dentro dos padrões permitidos por lei, ainda levantam algumas questões no que diz respeito aos impactos cumulativos resultantes da interacção cumulativa da emissão desses gases, o que pode causar danos ao meio ambiente e ao seres vivos, mas esses impactos, são reduzidos se comparados com os actuais impactos ambientais negativos causados pelo PE e cinzas de carvão mineral. O outro factor importante, diz respeito aos impactos causados pelas emissões decorrentes da produção dos tijolos podem ser reduzidos, através do uso de tecnologias amigas do ambiente e/ou utilizar o balde fechado, e utilizar um sistema de lavagem de gases.

5. CONCLUSÃO

Determinadas as propriedades físicas e mecânicas dos tijolos perfurados decorativos a base do plástico, o PE misturado com diferentes agregados pode ser reaproveitado para o fabrico de tijolos para construção civil, especificamente para construção de paredes de vedação, tanques de água e construção próximo a zona costeira.

A massa específica das misturas: PE + Cinza; PE + Areia + Cinza e PE + Areia + Cinza + Pó de Pedra; são 1,478; 1,687 e 1,703 g/cm³ respectivamente. Assim sendo, os tijolos a base de PE e Cinzas apresenta características importantes para o uso na construção civil, uma vez tijolos mais leves permitem reduzir as cargas totais das obras, o que é conferido pelo bloco de PE + Cinza. Os tijolos resultantes das misturas ternárias (areia 21.7% + cinzas 21.7% + pó de pedra 21.7%) favorecem maior compactação e conseqüentemente maior densidade.

Os níveis de absorção de água estão entre 0,18% (PE + Areia) e 0,39%, valores estes que estão na ordem de 0.4%, e essa quantidade muito inferior do máximo permitido de 10% segundo a norma Especificação IS 2185-1: 2005. Essa característica torna-os excelentes materiais para aplicação em zonas costeiras uma vez que não absorve água, um dos principais problemas em construções próximas a costa.

A mistura binária (cinzas + pó de pedra) e pura (cinzas 65% e pó de pedra 65%) apresenta valores óptimos de resistência a compressão, tendo 8.13 MPa para pó de pedra (65%) e 7,96 MPa para cinzas pesadas (65%), sendo que estes apresentam a mistura ótima no que diz respeito a resistência a compressão.

Feita a análise, a mistura ótima mantém-se suficiente para a formulação de compósito, sendo que a mistura ótima observada é a mistura pura (pó de pedra 65%) e (cinzas 65%), por possuir maior resistência a compressão, menor densidade e baixo índice de absorção de água, evidentemente pode ser aplicado na construção civil e conseqüentemente reduzir o impacto negativo das cinzas pesadas do carvão mineral e do plástico no meio ambiente.

Ressaltar que a combustão a céu aberto não é uma opção ambientalmente saudável para descartar resíduos plásticos, mas se considerar a etapa de derreter em vez de, queimar o PE, esse pode constituir uma opção ambiental e economicamente viável.

As cinzas pesadas do carvão mineral que antes eram descartadas no meio ambiente sem nenhum aproveitamento, podem ser incorporados no resíduos domésticos, o plástico PE derretido para produzir tijolos de concreto e outros materiais para a construção civil, sendo necessário uma caracterização prévia do plástico a ser usado nesse processo e a preparação prévia das cinzas através da operação de moagem, de forma a garantir a homogeneidade das cinzas e o uso completo e total das mesmas. Esse reaproveitamento traz diversos benefícios.

Para a sociedade vai permite melhorar as actuais casa e estradas cheias de buracos e permitir a construção de novas, bem como, dar oportunidade de emprego e de negocio a jovens.

Para o meio ambiente vai permitir dar um novo destino adequado ao plástico e as cinzas, o que vai reduzir os impactos ambientais negativos causados por estes no meio ambiente terrestre, aquático e atmosférico.

Para a economia, traz vantagens para a indústria usuária do carvão mineral, pois as cinzas pesadas do carvão mineral passam a ter um novo destino, o que pode reduzir os custos de serviços de transporte e deposição final destas e o meio ambiente agradece, bem como, a redução de preço de compra em relação aos tijolos convencionais.

6. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho mostrou que é possível produzir tijolos perfurados decorativos a base de plástico PE misturado com cinzas pesadas do carvão mineral e outros compósitos com propriedades finais melhoradas.

Dos resultados obtidos no âmbito deste trabalho de pesquisa devem ser transferidos para um estaleiro/cooperativa, uma produção em grande escala de tijolos e outros compósitos para melhor aproveitamento dos resíduos domésticos e industriais.

Estudar o comportamento mecânico dos tijolos perfurados decorativos a base da mistura entre o plástico e cinzas pesadas do carvão mineral, decorrente da dição de diferentes quantidades das cinzas pesadas e em diferentes diâmetros das cinzas.

Tratar, em caso da combustão do PE, os gases nocivos e/ou uso de tecnologias adequadas, como por exemplo, submeter o PE ao processo de fusão, considerando apenas a possibilidade de aquecer o balde fechado e não fazer a chama no interior de balde e utilizar um sistema de lavagem dos gases, bem como a utilização de tecnologias amigas do ambiente existente no mercado para esse efeito.

Há uma necessidade, de discussões com os órgãos responsáveis pela gestão de resíduos, entidades públicas e privadas para a busca de novas soluções de reciclagem do plástico e cinzas pesadas do carvão mineral, e a criação que leis que regulam a produção tijolos e as emissões decorrentes dessa.

7. BIBLIOGRAFIA

- AFONSO, D. C. (2013). *Pirólise Térmica e Catalítica de Resíduos Plásticos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de ciências e tecnologia, Lisboa.
- Agyeman, S., Obeng-Ahenkora, N. K., Assiamahd, S., & Twumasi, G. (2019). Exploiting recycled plastic waste as an alternative binder for paving blocks production.
- ALABI, O. A., OLOGBONJAYE, K. I., AWOSOLU, O., & ALALADE, O. E. (2022). Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review. *Toxicology and Risk Assessment*.
- ANDRADE, L. B., ROCHA, J. C., & CHERIAF, M. (2007). Evaluation of concrete incorporating bottom ash as a natural aggregates replacement. (Waste Management), pp. 1190–1199.
- ANDRADY, A. L. (2003). *Plastics and the environment*. Nova Jérsei, Hoboken: Wiley Interscience.
- ANDREOLI, C. V., ANDREOLI, F. d., TRINDADE, T. V., & HOPPEN, C. (2014). RESÍDUOS SÓLIDOS: ORIGEM, CLASSIFICAÇÃO E SOLUÇÕES PARA DESTINAÇÃO FINAL ADEQUADA. (Programa Agrinho).
- ARIMATÉIA JÚNIOR, H. (2017). *PIRÓLISE DE MISTURAS PLÁSTICAS*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- ASTM D4976. (2006). Standard Specification for Polyethylene Plastics Molding and Extrusion Materials.
- AWAJA, F., FOX, B. L., KELLY, G., & PIGRAM, P. (2009). Adhesion of polymers. 34.
- BOX, G. E., & WILSON, K. B. (1951). ON THE EXPERIMENTAL ATTAINMENT OF OPTIMUM CONDITIONS. *XIII*.
- BOX, G. E., HUNTER, W. G., & HUNTER, J. S. (1978). Statistics for Experimenters. (J. W. Sons, Ed.)
- BRAGA, A., MARTÍNEZ, J., LIMA, S., & SOARES, G. (2012). Gaseificação e pirólise para a conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis.
- COELHO, R. T. (2005). *CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA APLICAÇÃO DE MATERIAIS ALTERNATIVOS NOS COMPÓSITOS À BASE DE CIMENTO PORTLAND: Uso de grãos de polipropileno reciclado em substituição aos agregados do concreto*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP.

- COSTA, P. A. (2006). *PRODUÇÃO DE HIDROCARBONETOS LÍQUIDOS E GASOSOS POR PIRÓLISE DE RESÍDUOS PLÁSTICOS*. Tese, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Lisboa.
- COUTINHO, J. S. (2006). *1ª PARTE – LIGANTES E CALDAS 2002*. Porto.
- Decreto n.º 13 /2006. (s.d.). REGULAMENTO SOBRE A GESTÃO DE RESÍDUOS.
- Decreto n.º 67. (2010). Revisão e actualização dos padrões de qualidade ambiental e à revisão das taxas e multas aplicáveis.
- DGEDGE, E. E. (2017). *Dimensionamento de uma Central Térmica de Incineração de Resíduos Sólidos na Província de Maputo*. TRABALHO DE LICENCIATURA, UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE, DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA.
- FARIAS, E. R. (2005). *A UTILIZAÇÃO DE MISTURAS SOLO/CINZA PESADA NA PAVIMENTAÇÃO - ANÁLISE DE ASPECTOS DE COMPORTAMENTO MECÂNICO E AMBIENTAL*. Dissertação de Mestrado, FLORIANÓPOLIS.
- FONTES, T. I. (2013). *Argamassas de cal hidráulica natural NHL3.5 de fabrico nacional*. Dissertação de mestrado, Universidade nova de Lisboa, Lisboa.
- FORJAZ, J., LAGE, L., GUEDES, M. C., LOPES, L., BORGES, K. E., CANTUÁRIA, G., et al. (2009). *MANUAL DE BOAS PRÁTICAS: ARQUITECTURA SUSTENTÁVEL EM MOÇAMBIQUE*.
- GARLET, G. (1998). *APROVEITAMENTO DE RESÍDUOS DE E.V.A. (Ethylene Vinyl Acetate) COMO AGREGADO PARA CONCRETO LEVE NA CONSTRUÇÃO CIVIL*. Dissertação, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, ESCOLA DE ENGENHARIA, Porto Alegre.
- GHAFOORI, N., & BUCHOLC, J. (1996). INVESTIGATION OF LIGNITE-BASED BOTTOM ASH FOR STRUCTURAL CONCRETE. (Civ. Eng.).
- GOMES , N. D. (2015). *Caracterização de blocos de terra para construção de alvenarias ecoeficientes*. Dissertação de Mestrado, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.
- GONÇALVES, C. K. (2007). *PIRÓLISE E COMBUSTÃO DE RESÍDUOS PLÁSTICOS*. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São aulo.
- GRAHAM, B. (12 de 09 de 2021). Health and Environmental Effects of Burning Waste Plastics.
- GRIMBLEY, M. R., & LEHRLE, R. S. (1995). Polymer Degradation. p. 441.

- HANSSON, L. (2017). *Characterization of bottom ash from municipal solid waste incineration as a possible element in concrete: Investigation of the compressive strength and leaching properties*. Master's thesis, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Gothenburg.
- HOPEWELL, J., DVORAK, R., & KOSIOR, E. (2009). *Plastics recycling: challenges and opportunities*.
- IS 2185-1. (2005). Concrete masonry units-Specification, Part 1: Hollow and solid concrete blocks [CED 53: Cement Matrix Products].
- Islabão, G. I. (2005). *Blendas de Polietileno de Ultra Alto Peso Molar (PEUAPM) com polietileno Linear de Média Densidade (PELMD) para Rotomoldagem*. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, ENGENHARIA QUÍMICA, Prto Alegre.
- KIM, H. K., & LEE, H. K. (2010). Use of power plant bottom ash as fine and coarse aggregates in high-strength concrete.
- KIM, H. K., & LEE, H. K. (2015). Coal Bottom Ash in Field of Civil Engineering A Review of Advanced Applications and Environmental Considerations. *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- KNISS, C. T., KUHNEN, N. C., & RIELLA, H. G. (2002). ESTUDO DO EFEITO DA QUANTIDADE DE ÓXIDO DE FERRO EM CINZAS PESADAS DE CARVÃO MINERAL NA OBTENÇÃO DE VITROCERÂMICOS. *Quim. Nova*, 25, pp. 926-930.
- KOTZ, J. C., TREICHEL, P., & WEAVER, G. C. (2005). Chemistry & Chemical Reactivity. p. 455.
- KREITH, F. (2002). *HANDBOOK OF SOLID WASTE MANAGEMENT* (2 ed.). Colorado.
- KREUZ, A. L. (2002). *UTILIZAÇÃO DE CINZAS PESADAS DE TERMELÉTRICAS NA SUBSTITUIÇÃO DE CIMENTO E AREIA NA CONFECÇÃO DE CONCRETOS*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- KUMI-LARBI JNR, A., YUNANA, D., KAMSOULOUM, P., WEBSTER, M., & WILSON, D. C. (2018). Recycling waste plastics in developing countries: Use of low-density polyethylene water sachets to form plastic bonded sand blocks.
- Laboratório de Engenharia de Moçambique . (8 de Março de 2016). caderno de encargos de controlo de qualidade dos materiais. pp. 51-53.
- Laboratórios de Engenharia de Moçambique (LEM). (s.d.). *CADERNO DE ENCARGOS DE CONTROLO DE QUALIDADE DE MATERIAIS*.

LESTER , G. H. (2010). History and Physical Chemistry of HDPE.

LIN, C.-Y., & YANG, D.-H. (2002). REMOVAL OF POLLUTANTS FROM WASTEWATER BY COAL BOTTOM ASH. *JOURNAL OF ENVIRONMENTAL SCIENCE AND HEALTH, A37*, 1509–1522.

MALLMANN, J. E. (1996). *ESTABILIZAÇÃO POZOLÂNICA DE CINZAS VOLANTE E PESADA COM CAL DOLOMÍTICA HIDRATADA E AREIA, CURADAS PELOS PROCESSOS DE AUTOCLAVAGEM E CÂMARA À TEMPERATURA CONSTANTE*. Dissertação de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, Porto Alegre.

MANGI, S. A., WAN, I. M., JAMALUDDIN , N., ARSHAD , M. F., & RAMADHANSYAH , P. J. (2019). EFFECTS OF GROUND COAL BOTTOM ASH ON THE PROPERTIES OF CONCRETE. *14*, pp. 338 - 350.

MANIMARAN, A., SOMASUNDARAM, M., & RAVICHANDRAN, P. T. (2017). EXPERIMENTAL STUDY ON PARTIAL REPLACEMENT OF COARSE AGGREGATE BY BAMBOO AND FINE AGGREGATE BY QUARRY DUST IN CONCRETE. *International Journal of Civil Engineering and Technology, 8*, 1019–1027.

MATSINHE, J. V., MACUVELE, D. L., MARTINS, G. J., MACUACUA, N. S., BOCA SANTA, R. A., SOARES, C., et al. (2017). USO DE CINZAS PESADAS DE CARVÃO MINERAL COMO FONTES ATRAENTES DE ALUMINOSSILICATOS NA SÍNTESE DE ZEÓLITAS.

MELO, J. M. (2015). *CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITO PRODUZIDO COM DIFERENTES FRAÇÕES DE PÓ DE MADEIRA E POLIETILENO DE ALTA DENSIDADE*. Dissertação de mestrado, UNIVERSIDADE PRESBITERIANA MACKENZIE, São Paulo.

MINDELO, L. J., FAVACHO, C. B., CARDOSO, T. G., ESPÍNDOLA, R. S., & ROCHA, A. (2019). MODELAGEM MATEMÁTICA: A LEI DO RESFRIAMENTO DE NEWTON E SUA APLICAÇÃO NO CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ALIMENTOS DO INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PARÁ CAMPUS CASTANHAL.

Ministry of Housing & Urban Poverty Alleviation. (1983). TECHNO ECONOMIC FEASIBILITY REPORT ON CONCRETE HOLLOW & SOLID BLOCK.

MIRANDA, M. A., CAMACHO, D., BESSA, S. A., & SACTH, H. M. (2019). BREVE HISTÓRICO DO USO E OS ASPECTOS TÉCNICOS DOS ELEMENTOS VAZADOS NA ARQUITETURA BRASILEIRA NOS ÚLTIMOS 20 ANOS.

- MONTEIRO, J. H., FIGUEIREDO, C. E., MAGALHÃES, A. F., BRITO, J. C., ALMEIDA, T. P., MANSUR, G. L., et al. (2001). *Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos* (15 ed.). Rio de Janeiro.
- MOREIRA, A. M. (2008). *Materiais Compósitos*.
- MOTA, J. C., ALMEIDA, M. M., Alencar, V. C., & CURI, W. F. (2009). CARACTERÍSTICAS E IMPACTOS AMBIENTAIS CAUSADOS PELOS RESÍDUOS SÓLIDOS: UMA VISÃO CONCEITUAL.
- MOULTON, L. K. (1993). Bottom Ash and Boiler Slag. *Proceedings of the Third International Ash Utilization Symposium*.
- MUNTASIR, S. Y. (2015). *ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS FÍSICAS E QUÍMICAS DE CINZA INFERIOR E TAPEIRAS DA CALDEIRA VINDO DO INCINERADOR BURNABY*. Dissertação de Mestrado, THE UNIVERSITY OF BRITISH COLUMBIA, COLÔMBIA.
- MURATA, K., HIRANO, Y., SAKATA, Y., & UDDIN, M. A. (2002). Basic study on a continuous flow reactor for thermal degradation of polymers. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*.
- MYERS, R. H., MONTGOMERY, D. C., & ANDERSON-COOK, C. M. (2009). *RESPONSE SURFACE METHODOLOGY: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (3 ed.). (J. W. Sons, Ed.) New Jersey.
- no.18, D. (2004). Regulamento sobre Padrões de Qualidade Ambiental e de Emissão de Efluentes.
- NOGUEIRA, I. B. (2012). *Estudo da Produção de Embalagens Plásticas e Desenvolvimento de Testes de Qualidade*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Engenharia Química, Porto.
- NOGUEIRA, J. R. (2011). *RECICLANDO CINZAS: ESTUDO DE VIABILIDADE PARA PRODUÇÃO DE BLOCOS PARA A CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DA CINZA VOLANTE RESIDUAL DE UM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO*. Dissertação de Mestrado, SÃO CARLOS.
- ONWUDILI, J. A., INSURA, N., & WILLIAMS, P. T. (2009). Composition of products from the pyrolysis of polyethylene and polystyrene in a closed batch reactor: Effects of temperature and residence time. pp. 293–303.
- ÖZKAN, Ö., YÜKSEL, I., & MURATO LU, Ö. (2007). Strength properties of concrete incorporating coal bottom ash and granulated blast furnace slag. *Waste Management*, 27, pp. 161-167.

- PANDEY, S. P., & SHARMA, R. L. (2000). The influence of mineral additives on the strength and porosity of OPC mortar. pp. 19–23.
- PARASHAR, A. K. (2019). Augmentation of Compressive Strength of Bricks Made of Various Materials by Adding Molten Plastic waste. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 8.
- PIVA, A. C. (2014). *CARACTERIZAÇÃO DE ADITIVOS EM FILMES FLEXÍVEIS DE POLIETILENO*. UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC, CRICIÚMA.
- QUEDA, V. R. (2017). *DELINEAMENTO EXPERIMENTAL NA CONCEPÇÃO E OPTIMIZAÇÃO DE DETERGENTES LÍQUIDOS INDUSTRIAIS*. Dissertação de Mestrado, ISEL, Lisboa.
- RAMOS, S. R. (2015). *COBOGÓ: Mil Maneiras de Montar, Só Um Jeito de Falar*. TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, CURITIBA.
- RAVINA, D. (1996). Properties of fresh concrete incorporating a high volume of fly ash as partial fine sand replacement.
- SANTOS, N. E. (1995). Meio Ambiente e a Engenharia de Produção: O Que Fazer na Era do Ambientalmente Correto? *Encontro Nacional de Engenharia de Produção*.
- SILVA, M. V. (2011). *DESENVOLVIMENTO DE TIJOLOS COM INCORPORAÇÃO DE CINZAS DE CARVÃO E LODO PROVENIENTES DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA*. Dissertação de Mestrado, São Paulo.
- SMITH, W. F., & HASHEMI, J. (2012). *Fundamentos da engenharia e ciências dos materiais* (5 ed.). Porto Alegre, São Paulo: AMGH.
- STRONG, A. B. (2006). *Plastics: materials and processing* (3 ed.). New Jersey.
- SUBATHRA, P., VARGHESE, B., MUHAMMED, J. K., & MUZAMMIL, T. H. (2022, January). Experimental Investigation on Making of Plastic Brick. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology (IJARSCT)*, 2.
- VADDU, P. (2010). *Time dependent stiffness, strength and swelling characteristics of PCC dry bottom ash amended with bentonite*. MSc Thesis, University Carbondale, Southern Illinois.
- VASCONCELOS, G. (2008). *Reprocessamento do PEBD por extrusão*. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Porto.

VINAI, R., LAWANE, A., MINANE, J. R., & Pantet, A. (2017). Utilisation of coal bottom ash for the production of compressed building blocks in Sub-Saharan countries.

ZHONG, X., ZHAO, X., QIAN, Y., & ZOU, Y. (2018, Novembro 14). Polyethylene plastic production process. *Insight - Material Science*, 1.

Apêndices

Apêndice: Propriedades físicas e mecânicas

Tabela A1-1: Determinação da Resistência a Compressão.

Ensaio	Mistura	Amostra	Força (kN)	Resistência a Compressão (MPa)	F Média (kN)	RC Média (MPa)	Desvio Padrão
1	A (65%)	BDII	68.6	7.62	69.70	7.74	0.12
		BDIII	70.8	7.87			
2	C (65%)	BDIV	73.5	8.17	71.60	7.96	0.21
		BDVI	69.7	7.74			
3	P (65%)	BDVII	72.3	8.03	72.10	8.01	0.02
		BDVIII	71.9	7.99			
4	C (32.5%) + P(32.5%)	BDX	84.8	9.42	73.15	8.13	1.29
		BDXII	61.5	6.83			
5	A (32.5%) + P(32.5%)	BDXIV	52.6	5.84	53.75	5.97	0.13
		BDXV	54.9	6.10			
6	A (32.5%) + C (32.5%)	BDXVI	38.4	4.27	38.05	4.23	0.04
		BDXVIII	37.7	4.19			
7	A (21.7%) + C (21.7%) + P (21.7%)	BDXIX	40.1	4.46	50.95	5.66	1.21
		BDXX	61.8	6.87			

Tabela A1-2: Determinação do Índice de absorção de água.

Ensaio	Mistura	Amostra	Massa 1 (Kg)	Massa 2 (Kg)	Abs. de água (%)
1	A (65%)	BDII	1.42	1.425	0.35
		BDIII	1.4	1.4	0.00
2	C (65%)	BDIV	1.31	1.315	0.38
		BDVI	1.35	1.355	0.37
3	P (65%)	BDVII	1.34	1.34	0.00
		BDVIII	1.325	1.33	0.38
4	C (32.5%) + P (32.5%)	BDX	1.32	1.325	0.38
		BDXII	1.255	1.255	0.00
5	A (32.5%) + P (32.5%)	BDXIV	1.265	1.265	0.00
		BDXV	1.295	1.3	0.39
6	A (32.5%) + C (32.5%)	BDXVI	1.24	1.24	0.00
		BDXVIII	1.29	1.3	0.78
7	A (21.7%) + C (21.7%) + P (21.7%)	BDXIX	1.255	1.26	0.40
		BDXX	1.3	1.3	0.00

Tabela A1-3: Determinação da massa específica.

Ensaio	Mistura	Amostra	Massa (Kg)	Volume (m³)	Massa Especifica (Kg/m³)	Média (Kg/m³)	Massa Especifica (g/cm³)
1	A (65%)	BDII	1.42	0.0009	1577.8	1566.7	1.57
		BDIII	1.4	0.0009	1555.6		
2	C (65%)	BDIV	1.31	0.0009	1455.6	1477.8	1.48
		BDVI	1.35	0.0009	1500.0		
3	P (65%)	BDVII	1.34	0.0009	1488.9	1480.6	1.48
		BDVIII	1.325	0.0009	1472.2		
4	C (32.5%) + P (32.5%)	BDX	1.32	0.0008	1650.0	1609.4	1.61
		BDXII	1.255	0.0008	1568.8		
5	A (32.5%) + P (32.5%)	BDXIV	1.265	0.0008	1581.3	1654.0	1.65
		BDXV	1.295	0.00075	1726.7		
6	A (32.5%) + C (32.5%)	BDXVI	1.24	0.00075	1653.3	1686.7	1.69
		BDXVIII	1.29	0.00075	1720.0		
7	A (21.7%) + C(21.7%) + P (21.7%)	BDXIX	1.255	0.00075	1673.3	1703.3	1.70
		BDXX	1.3	0.00075	1733.3		

Apêndice 2 – Gases emitidos.

Tabela A2-1: Determinação de gases emitidos durante o processo do fabrico.

Concentração dos gases em (ppm)						
Tempo (s)	CH₄	O₂	CO₂	CO	NO₂	SO₂
0	0	20.9	367	0	0	0
60	0	20.9	457	31	0	0.1
120	0	20.9	466	6	0	0
180	0	20.9	774	8	0.4	0
240	0	20.9	1334	10	0.3	0
300	0	20.9	653	0	0	0
360	0	20.9	632	0	0	0.2
420	0	20.9	399	0	0	0.1
480	0	20.9	359	0	0	0.1
540	0	20.9	897	5	0	0.1
Limite	-	-	3188	40	0.4	0.5