



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CAROLINNE LEITE PEDERNEIRAS

CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE PRODUTOS OBTIDOS
DE FORMULAÇÕES ENTRE O RESÍDUO DA CERÂMICA
VERMELHA E O PÓ DO RESÍDUO DE PET

João Pessoa - PB

2019

CAROLINNE LEITE PEDERNEIRAS

**CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE PRODUTOS OBTIDOS
DE FORMULAÇÕES ENTRE O RESÍDUO DA CERÂMICA
VERMELHA E O PÓ DO RESÍDUO DE PET**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação de Engenharia de Materiais, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, para apreciação da banca examinadora como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra

Coorientador: Prof. Dr. Petrônio Filgueiras de Athayde Filho.

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

P371c Pederneiras, Carolinne Leite.

Características e propriedades de produtos obtidos entre o resíduo da cerâmica vermelha e o pó do resíduo de PET / Carolinne Leite Pederneiras. - João Pessoa, 2019.

64f. : il.

Orientação: Ricardo Peixoto Suassuna Dutra.

Coorientação: Petrónio Filgueiras de Athayde Filho.
Monografia (Graduação) - UFPB/CT- Campus I.

1. Resíduo da cerâmica vermelha. 2. PET. 3. Propriedades. I. Dutra, Ricardo Peixoto Suassuna. II. Título.

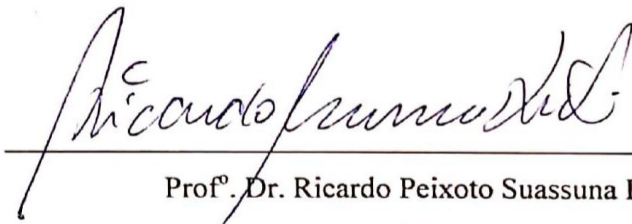
UFPB/BC

CAROLINNE LEITE PEDERNEIRAS

**CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DE PRODUTOS
OBTIDOS DE FORMULAÇÕES ENTRE O RESÍDUO DA
CERÂMICA VERMELHA E O PÓ DO RESÍDUO DE PET**

Trabalho aprovado em: 03, 05, 19

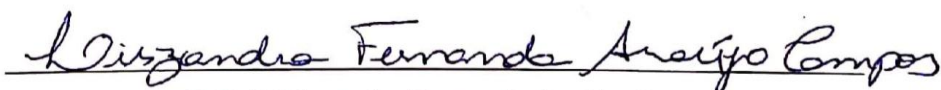
BANCA EXAMINADORA



Prof.^o Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra

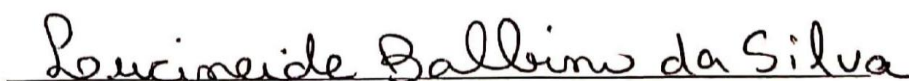
Orientador

UFPB



Prof.^a Dr.^a Lizandra Fernanda Araújo Campos

DEMAT/CT/UFPB



Prof.^a Dr.^a Lucineide Balbino da Silva

DEMAT/CT/UFPB

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço a Deus, por ser soberano em minha vida e permitir a realização da conclusão de mais uma etapa, sem ele nada disso seria possível;

Aos meus pais e irmãos toda minha gratidão, por serem meu ponto de apoio, por toda dedicação, incentivo, amor e ensinamentos dedicados ao longo da minha vida;

À minha tia Sana e minha prima Jéssica, em especial por estarem comigo durante toda essa jornada do curso me acolhendo, me apoiando e me incentivando;

Ao meu Orientador Dr. Ricardo Peixoto Suassuna Dutra por toda disponibilidade, por ser um profissional excepcional e por ter dado todo suporte necessário para a realização deste trabalho;

Ao Professor Petrônio Filgueiras de Athayde Filho pela coorientação e por sempre estar à disposição e pela participação na avaliação deste trabalho;

Ao meu namorado, melhor amigo e companheiro de todas as horas, Gabriel Barbosa obrigada pelo apoio e estímulo durante todos esses anos;

Às minhas queridas amigas que tive oportunidade de conhecer na graduação Camila, Danusa, Janetty, Ana Natália, Suellen, Rayane, Thais, Raquel e Gessyane vocês sem dúvida tornaram tudo mais leve, obrigada pelo apoio incondicional e, sobretudo, pela paciência e incentivo nos momentos difíceis. Esta caminhada não seria a mesma sem vocês.

A todos vocês que de alguma forma estiveram comigo durante essa árdua jornada, o meu muito obrigado por todo companheirismo, apoio e incentivo.

RESUMO

A reciclagem significa transformar objetos materiais usados em novos produtos para o consumo. Esta necessidade foi despertada pelos seres humanos, a partir do momento em que se verificaram os benefícios que este procedimento traz para o planeta Terra. O PET Poli (Tereftalato de Etileno) é um poliéster, polímero termoplástico que proporciona alta resistência mecânica (impacto) e química. Já os resíduos da indústria cerâmica apresentam substâncias que afetam as propriedades modificando o comportamento da cerâmica. A execução deste trabalho seguiu as seguintes etapas: obtenção, preparação, caracterização e formulações entre os resíduos; determinação das propriedades dos materiais obtidos e ensaio mecânico. Onde as formulações foram preparadas adicionando-se três diferentes concentrações dos resíduos da cerâmica vermelha ao PET: A (1:2 de Cerâmica/PET), B (1:1 de Cerâmica/PET) e C (2:1 de Cerâmica/PET). O objetivo deste trabalho foi estudar as formulações entre o resíduo de cerâmica vermelha e o resíduo do PET, a fim de analisar as propriedades físicas e mecânicas de modo a obter um material com uma formulação que apresente as melhores características e propriedades mecânicas. Os resultados apontam que a adição do PET ao resíduo cerâmico influencia de forma diferente nas características e propriedades das diferentes formulações, onde foi possível observar que a melhor formulação obtida foi a com maior quantidade de PET (formulação A).

Palavras chaves: Resíduo da cerâmica vermelha; PET; Propriedades.

ABSTRACT

Recycling means turning used material objects into new products for consumption. This need has been aroused by human beings, from the moment in which the benefits that this procedure brings to the planet Earth have been verified. PET Poly (Ethylene Terephthalate) is a polyester, thermoplastic polymer that provides high mechanical (impact) and chemical resistance. Already the residues of the ceramic industry present substances that affect the properties modifying the behavior of the ceramics. The execution of this work followed the following steps: obtaining, preparation, characterization and formulations among the residues; determination of the properties of the obtained materials and mechanical test. Where the formulations were prepared by adding three different concentrations of red ceramic residues to PET: A (1: 2 of Ceramics / PET), B (1: 1 of Ceramics / PET) and C (2: 1 of Ceramics / PET). The objective of this work was to study the formulations between the red ceramic residue and the PET residue in order to analyze the physical and mechanical properties in order to obtain a material with a formulation with the best characteristics and mechanical properties. The results showed that the addition of PET to the ceramic residue had a different influence on the characteristics and properties of the different formulations, where it was possible to observe that the best formulation obtained was the one with the highest amount of PET (Formulation A).

Keywords: Red ceramics residue; PET; Properties.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Garrafa PET para envase de refrigerantes..... | 19 |
| Figura 2. Resíduos plásticos separados em programas de coleta seletiva..... | 20 |
| Figura 3. Diagrama da reciclagem de garrafas PET..... | 22 |
| Figura 4. Diagrama de produção do polímero PET..... | 24 |
| Figura 5. Difrátograma do PET(poli(tereftalato de etileno)..... | 31 |
| Figura 6. Matéria-prima do PET (poli(tereftalato de etileno))..... | 32 |
| Figura 7. Etapas principais do processo de fabricação..... | 35 |
| Figura 8. Esquema da metodologia utilizada no trabalho.. | 40 |
| Figura 9. Corpos de prova nas formulações A, B e C..... | 45 |
| Figura 10. Difrátograma do resíduo da cerâmica vermelha a 700 °C..... | 50 |
| Figura 11. Porcentagem acumulativa das partículas do PET..... | 51 |
| Figura 12. Análise da Retração Linear após tratamento térmico..... | 53 |
| Figura 13. Análise de perda de densidade..... | 54 |
| Figura 14. Análise da Porosidade Aparente..... | 55 |
| Figura 15. Análise da Absorção de Água..... | 56 |
| Figura 16. Análise da Densidade Aparente..... | 57 |
| Figura 17. Análise da Tensão de Ruptura a Flexão..... | 58 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Principais tipos de plásticos..... | 17 |
| Tabela 2. Utilização do PET para embalagens..... | 18 |
| Tabela 3. Formulações das amostras..... | 44 |
| Tabela 4. PET análise granulométrica..... | 52 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 13 |
| 2 OBJETIVO..... | 15 |
| 2.1 OBJETIVO GERAL | 15 |
| 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 15 |
| 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 16 |
| 3.1 POLIETILENO TEREFTALATO..... | 16 |
| 3.1.1 RECICLAGEM DE GARRAFAS PET | 19 |
| 3.1.2 TIPOS DE RECICLAGEM..... | 21 |
| 3.1.2.1 RECICLAGEM QUÍMICA..... | 21 |
| 3.1.2.2 RECICLAGEM MECÂNICA | 22 |
| 3.1.2.3 RECICLAGEM ENERGÉTICA | 23 |
| 3.1.3 ANÁLISE DA CADEIA DE PRODUÇÃO DE PET | 24 |
| 3.1.3.1 EXTRAÇÃO DO PETRÓLEO | 25 |
| 3.1.3.2 REFINO DO PETRÓLEO..... | 26 |
| 3.1.3.2.1 OBTENÇÃO DA NAFTA | 26 |
| 3.1.3.2.2 OBTENÇÃO DO ETILENO | 27 |
| 3.1.3.2.3 OBTENÇÃO DO P-XILENO | 27 |
| 3.1.3.2.4 OBTENÇÃO DO MONOETILEOGLICOL..... | 28 |
| 3.1.3.2.5 OBTENÇÃO DO DIMETILTEREFTALATO | 28 |
| 3.1.3.3 FABRICAÇÃO DA RESINA | 29 |
| 3.1.3.4 FABRICAÇÃO DA PREFORMA | 29 |
| 3.1.3.5 PRODUÇÃO DA GARRAFA E LAVAGEM | 29 |
| 3.1.3.6 FABRICAÇÃO DO RÓTULO E DA TAMPA | 30 |
| 3.1.3.7 RECICLAGEM | 30 |
| 3.1.4 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DO PET | 31 |

| | |
|---|----|
| 3.2 INDÚSTRIA CERÂMICA | 32 |
| 3.2.1 MATERIAIS CERÂMICOS | 32 |
| 3.2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CERÂMICOS | 34 |
| 3.2.3 CERÂMICA VERMELHA..... | 34 |
| 3.2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA ESTRUTURAL | 35 |
| 3.2.4.1 PREPARAÇÃO DA MASSA | 35 |
| 3.2.4.2 CONFORMAÇÃO DA PEÇA | 36 |
| 3.2.4.3 SECAGEM..... | 36 |
| 3.2.4.4 QUEIMA..... | 37 |
| 3.2.5 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA | 37 |
| 3.2.5.1 USO DE RESÍDUO EM CERÂMICA VERMELHA | 38 |
| 4 MATERIAIS E METODOLOGIA..... | 39 |
| 4.1 MATERIAIS | 39 |
| 4.2 MÉTODOS..... | 40 |
| 4.2.1 OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS..... | 40 |
| 4.2.2 PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS | 41 |
| 4.2.2.1 RESÍDUO DA CERÂMICA VERMELHA | 41 |
| 4.2.2.2 PET (poli(tereftalato de etileno) | 41 |
| 4.2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS | 41 |
| 4.2.3.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)..... | 42 |
| 4.2.3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA..... | 43 |
| 4.2.4 PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES..... | 43 |
| 4.2.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA | 44 |
| 4.2.6 TRATAMENTO TÉRMICO | 45 |
| 4.2.7 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES | 45 |
| 4.2.7.1 PROPRIEDADES FÍSICAS..... | 46 |
| 4.2.7.1.1 RETRAÇÃO LINEAR (RL) | 46 |

| | |
|---|----|
| 4.2.7.1.2 PERDA DE DENSIDADE | 46 |
| 4.2.7.1.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA..... | 47 |
| 4.2.7.1.4 POROSIDADE APARENTE | 47 |
| 4.2.7.1.5 DENSIDADE APARENTE..... | 48 |
| 4.2.7.2 PROPRIEDADE MECÂNICA | 48 |
| 4.2.7.2.1 TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO (TRF)..... | 48 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 49 |
| 5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS | 49 |
| 5.1.1 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X | 49 |
| 5.2 CARACTERIZAÇÃO DO PET (poli(tereftalato de etileno) | 51 |
| 5.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA | 51 |
| 5.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS | 52 |
| 5.3.1 RETRAÇÃO LINEAR APÓS TRATAMENTO TÉRMICO | 52 |
| 5.3.2 PERDA DE DENSIDADE..... | 53 |
| 5.3.3 POROSIDADE APARENTE..... | 54 |
| 5.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA | 55 |
| 5.3.5 DENSIDADE APARENTE | 56 |
| 5.3.6 TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO..... | 57 |
| 6 CONCLUSÕES | 59 |
| REFERÊNCIAS..... | 61 |

1 INTRODUÇÃO

Reciclar significa transformar objetos materiais usados em novos produtos para o consumo. Esta necessidade foi despertada pelos seres humanos, a partir do momento em que se verificaram os benefícios que este procedimento traz para o planeta Terra. Os materiais mais comuns para a prática da reciclagem são: papel, plástico, metal e alumínio (FONSECA, A. H, L., 2013).

A primeira amostra do PET foi desenvolvida pelos ingleses Whinfield e Dickson (1941). As pesquisas que levaram à produção em larga escala do poliéster começaram somente após a Segunda Grande Guerra, nos anos 50, em laboratórios dos EUA e Europa. Baseavam-se, quase totalmente, nas aplicações têxteis. Em 1962, surgiu o primeiro poliéster pneumático (ABEPET, 2011).

No início dos anos 1970, o PET começou a ser utilizado pela indústria de embalagens. O PET chegou ao Brasil em 1988 e seguiu uma trajetória semelhante ao resto do mundo, sendo utilizado primeiramente na indústria têxtil. Apenas a partir de 1993 passou a ter forte expressão no mercado de embalagens, notadamente para os refrigerantes (ABEPET, 2011).

Atualmente o PET está presente nos mais diversos produtos. O PET Poli (Tereftalato de Etileno) é um poliéster, polímero termoplástico. Simplificando, PET é o melhor e mais resistente plástico para fabricação de garrafas e embalagens para refrigerantes, águas, sucos, óleos comestíveis, medicamentos, cosméticos, produtos de higiene e limpeza, destilados, isotônicos, cervejas, entre vários outros como embalagens termo formadas, chapas e cabos para escova de dente. O PET proporciona alta resistência mecânica (impacto) e química, além de ter excelente barreira para gases e odores (ABEPET, 2011).

As embalagens PET são 100% recicláveis e a sua composição química não libera nenhum produto tóxico. Existe uma grande importância na reciclagem: Com o uso em grande escala das garrafas PET, principalmente a partir da década de 1990, surgiu um problema ambiental sério. Muitas destas garrafas são descartadas e acabam parando em terrenos, rios, esgotos, mares e matas. Como este material pode se manter até 750 anos na natureza, tornou-se de fundamental importância a sua coleta e reciclagem (ABEPET, 2011).

Além de favorecer o meio ambiente, a reciclagem de garrafas PET gera empregos nas cooperativas de catadores de lixo reciclável e, também, nas empresas que trabalham

diretamente com o processo de reciclagem e produção de matéria-prima a partir de embalagens PET. Ao invés de ficar poluindo o meio ambiente, o material pode voltar à cadeia produtiva. Dentre outras vantagens essas são as principais: redução do volume de lixo nos aterros sanitários e melhoria nos processos de decomposição de matérias orgânicas nos mesmos (ABEPET, 2011).

O termo argila é normalmente empregado quando se faz referência a um material terroso, de granulação fina, que adquire comportamento plástico conformável, ao ser misturado a uma quantidade pequena de água. Com o uso de técnicas de raios-X, mostrou-se que as argilas são constituídas predominantemente por um grupo de substâncias cristalinas conhecidas como minerais argilosos. Todas essas substâncias são essencialmente silicatos de alumínio hidratados. Em alguns casos, o alumínio é substituído parcialmente pelo magnésio ou pelo ferro (DANA e HURLBUT, 1969).

A maioria do rejeito gerado pela indústria é, em geral, descartada em campo aberto e em várzeas de riachos e rios, o que causa vários danos ao meio ambiente, com agressão à fauna e flora da região e à saúde da população. Essa postura das empresas da região vem sendo alvo de severas fiscalizações por parte dos órgãos de proteção ambiental, fazendo com que o resíduo gerado torne-se uma fonte de custos para as empresas e um limitante no aumento de suas produções. O que vislumbra um grande potencial de lucro para as empresas que poderem reaproveitar ou incorporar esses resíduos em suas linhas de produção (MENEZES, 2007).

Recentemente, considerável esforço vem sendo dedicado aos estudos e pesquisas visando à reutilização e aplicação segura dos resíduos originados das indústrias de mineração e beneficiamento mineral (SOUZA, 2004) (MENEZES, 2005; MOREIRA, 2005). A maioria desses estudos mencionou que os resíduos podem ser considerados importantes recursos minerais secundários.

A reutilização e a reciclagem de resíduos, após a detecção de suas potencialidades são consideradas atualmente alternativas que podem contribuir para a diversificação de produtos, diminuição dos custos de produção, fornece matérias-primas alternativas para uma série de setores industriais, conservação de recursos não renováveis, economia de energia e, principalmente, melhoria da saúde da população (MENEZES, 2002; MOREIRA, 2005).

A indústria da cerâmica vermelha é responsável por produzir uma quantidade significativa de rejeitos, podendo chegar a 10% do total da produção. Estes, quando lançados ao meio ambiente de forma aleatória, impactam de forma negativa, ainda que não tenham compostos tóxicos em sua maioria. A cerca desse assunto, estudos têm sido desenvolvidos para

que os resíduos gerados nesse ramo de empreendimento sejam cada vez mais aproveitados (PAZ, 2013).

A perda direta de blocos cerâmicos na sua produção ocorre em forma de resíduo de peças defeituosas, da má queima, de quebras realizadas durante o processo fabril e durante o armazenamento. Esta perda é variável no Brasil, e depende de fatores tais como: matéria prima, tecnologia na fabricação e controle de qualidade adotados nas indústrias, dentre outros. Entre os principais defeitos observados nos blocos, que geram a perda em questão, podem ser citadas as trincas por retração, em geral derivadas do proporcionamento não adequado das argilas e do elevado teor de umidade na fabricação (GOUVEIA, 2009; CASTRO, 2012).

Os resultados obtidos, com os processos de reuso dos rejeitos da cerâmica vermelha, demonstram as reais formas de redução de custo e impactos ambientais e comparativos dos investimentos com o retorno financeiro da implantação que provocam a mudança na conscientização industrial, além do aumento de credibilidade e imagem da empresa perante o mercado consumidor (CASTRO, 2012).

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar os produtos obtidos de formulações envolvendo resíduo da cerâmica vermelha e o pó do resíduo de PET (poli(tereftalato de etileno)).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

I. Caracterizar os materiais com a finalidade de escolher a rota de processamento a ser utilizada na confecção dos produtos finais;

II.Desenvolver formulações entre o resíduo da cerâmica vermelha e pó de PET (poli(tereftalato de etileno));

III.Determinar as propriedades finais dos produtos obtidos.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 POLIETILENO TEREFALATO

O polietileno tereftalato (PET) faz parte de um grupo de materiais denominados plásticos, produzidos através de um processo químico chamado de polimerização que proporciona a união de monômeros para formar polímeros (ABIQUIM, 2004). A principal matéria-prima utilizada na fabricação dos plásticos é o petróleo, formado por uma complexa mistura de compostos que se separam através de destilação, gerando diversos produtos que posteriormente darão origem aos monômeros.

Os plásticos, denominados polímeros termoplásticos, não sofrem alterações na sua estrutura química durante o aquecimento, podendo ser novamente fundidos mesmo após resfriados (ABIQUIM, 2004). Além do PET, os principais tipos de polímeros termoplásticos são o polipropileno (PP), o policloreto de vinila (PVC), o polietileno de alta densidade (PEAD), o polietileno de baixa densidade (PEBD) e o polietileno linear de baixa densidade (PELBD), cujas características e aplicações são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Principais tipos de plásticos.

| Resina | Aplicação | Característica |
|--------------|--|--|
| PET | frascos e garrafas para uso alimentício, hospitalar e cosmético, bandejas para microondas, filmes para áudio e vídeo, fibras têxteis e telhas. | transparência total, inquebrável, impermeável, bastante leve. |
| PEAD | embalagens para detergentes e óleos automotivos, sacolas de supermercados, tampas, tambores para tintas, potes e utilidades domésticas. | inquebrável, resistente a baixas temperaturas, leve, rígido, impermeável, resistência química. |
| PVC | embalagens para água mineral, óleos comestíveis, maioneses e sucos, perfis para janelas, tubulações de água e esgotos, mangueiras, embalagens para remédios, brinquedos, bolsas de sangue e material hospitalar. | rígido, transparente, impermeável, resistente à temperatura e inquebrável. |
| PEED e PELED | sacolas para supermercados e boutiques, filmes para embalar leite e outros alimentos, sacaria industrial, filmes para fraldas descartáveis, bolsa para soro medicinal, sacos de lixo. | flexíveis, leves, transparentes e impermeáveis. |
| PP | filmes para embalagens e alimentos, embalagens industriais, cordas, tubos para água quente, fios e cabos, frascos, caixas de bebidas, fibras para tapetes, potes, fraldas e seringas descartáveis. | conserva o aroma, é inquebrável, transparente, brilhante, rígido e resistente a mudanças de temperatura. |

Fonte: ABIQUIM, 2004.

Os plásticos são utilizados nas mais diversas aplicações, conforme as informações da Tabela 1. Por apresentarem estruturas químicas variadas, cada tipo de plástico possui propriedades e características diferentes dos demais, proporcionando aplicações convencionais, como embalagens de PVC para água mineral, e aplicações alternativas, como telhas de PET.

O PET é o mais importante membro da família dos poliésteres, grupo de polímeros descoberto na década de 1930 por W. H. Carothers, da Du Pont (ABIQUIM, 2000). No entanto, somente em 1940 o PET foi desenvolvido pelos químicos ingleses Whinfield e Dickson, e as garrafas produzidas com este polímero só começaram a ser fabricadas na década de 70 (CEMPRE, 2004).

Esta propriedade é de grande importância em muitas aplicações, pois, às elevadas temperaturas de secagem do PET antes da utilização, a resina amorfa tende a ser mole e pegajosa formando grumos e aderindo à unidade de secagem. A cristalinidade também afeta a transparência e o processamento do produto (ABEPET, 2004). Atualmente, no Brasil, a resina PET para embalagens tem sido utilizada principalmente no envase de produtos alimentícios, conforme se observa na Tabela 2.

Tabela 2. Utilização do PET para embalagens.

| Utilização do PET | (%) |
|--------------------------|------------|
| Refrigerante | 55,0 |
| Óleo Comestível | 28,0 |
| Água Mineral | 7,0 |
| Outros setores | 10,0 |

Fonte: ABEPET, 2004.

Verifica-se, através dos dados da Tabela 2, que as embalagens para refrigerantes são responsáveis pela maior porcentagem de utilização do PET, seguido pelas embalagens para óleo comestível e água mineral, que apresentam um grande potencial de desenvolvimento. Observa-se na Figura 1 uma garrafa PET cristal de 2,0 L para envase de refrigerantes.



Figura 1. Garrafa PET para envase de refrigerantes. Fonte: ABEPET, 2004.

A garrafa PET com capacidade de 2L é o modelo que tem a melhor relação custo/benefício entre os diversos tamanhos de garrafa deste material presente no mercado, por apresentar, proporcionalmente, menor massa de resina por volume de líquido envasado. Por exemplo, para a garrafa de 600 ml esta relação é de 0,046 g/ml, enquanto para a garrafa de 1,0L a relação é de 0,035 g/ml e para a garrafa de 2,0L a relação é de 0,025 g/ml (ABEPET, 2004).

As garrafas PET são totalmente inertes, ou seja, mesmo que sejam indevidamente descartadas, não causam nenhum tipo de contaminação para o solo ou lençóis freáticos. No entanto, o descarte adequado destas embalagens e seu encaminhamento para a reciclagem são fundamentais para que os aterros sanitários sejam poupados e para que o meio ambiente não seja prejudicado.

3.1.1 RECICLAGEM DE GARRAFAS PET

Segundo ADAMS (2001), reciclar é economizar energia, poupar recursos naturais e trazer de volta ao ciclo produtivo o resíduo que seria jogado fora, para que o mesmo seja usado novamente como matéria-prima.

A reciclagem, portanto, é um processo de transformação de materiais previamente separados para posterior utilização. Desta forma, os resíduos são recuperados através de uma série de operações que permitem que materiais já processados sejam aproveitados como matéria-prima no processo gerador ou em outros processos.

Basicamente, a reciclagem inclui as etapas de separação, revalorização e transformação do material coletado (ABRE, 2004). A coleta e separação são atividades iniciais de triagem por tipo de material como papel, metal, plásticos e madeiras. A revalorização é uma etapa intermediária que prepara os materiais separados para a etapa de transformação, responsável pelo processamento industrial dos materiais para a fabricação de novos produtos.

Entre todas as etapas do processo de reciclagem, a que exige maior atenção é a etapa de coleta e separação de resíduos, pois dela depende todo o restante do processo. Ela pode ser efetuada em vários locais, tais como nos pontos de geração, em domicílios, em usinas de triagem, no processamento industrial e em lixões.

Entre a porcentagem de plásticos coletados nos resíduos urbanos através dos programas de coleta seletiva, encontram-se o PEAD, PEBD, PET, PVC e PP, conforme se observa na Figura 2.

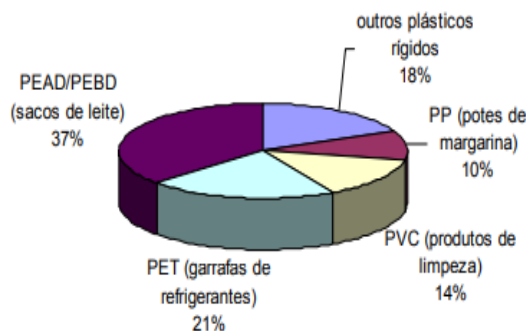


Figura 2. Resíduos plásticos separados em programas de coleta seletiva. Fonte: CEMPRE, 2004.

Observa-se pelos dados da Figura 2 que o PEAD e o PEBD são os resíduos plásticos separados em maior quantidade durante a coleta seletiva, e junto com o PET somam mais da metade de todo resíduo plástico coletado.

Cabe salientar que o local de coleta do material define o tipo de processamento a ser realizado. Observa-se que o material coletado em lixões apresenta um alto grau de

contaminação, como vestígios de gorduras, tintas, metais pesados e sujeira de modo geral. A embalagem assim poluída exigirá um dispendioso processo de limpeza, desvalorizando-a.

Deste modo, a prática da coleta seletiva permite que o material tenha um valor de mercado mais elevado. O preço de venda da embalagem coletada também está associado a outros fatores como: o fardo deve conter somente um tipo de material, cada fardo deve ter uma única cor de produto, a embalagem deve estar limpa e rótulos, tampas e anéis de vedação devem ter sido retirados.

3.1.2 TIPOS DE RECICLAGEM

Os principais tipos de reciclagem são as reciclagens: química, mecânica e térmica. A seguir é apresentada uma descrição mais detalhada destes tipos de reciclagem.

3.1.2.1 RECICLAGEM QUÍMICA

A reciclagem química reprocessa plásticos transformando-os em monômeros ou misturas de hidrocarbonetos que servem como matéria-prima para a obtenção de novos produtos. A reciclagem química também permite tratar misturas de plásticos, reduzindo custos de pré-tratamento, custos de coleta e seleção. Além disso, a reciclagem química permite produzir plásticos novos com a mesma qualidade de um polímero original (PLATIVIDA, 2004).

Um dos principais processos de reciclagem química consiste na quebra das cadeias mediante o tratamento com hidrogênio e calor, gerando produtos capazes de serem processados em refinarias. Os plásticos também podem ser quebrados parcialmente ou totalmente em monômeros na presença de água, glicol ou metanol.

Outra alternativa de reciclagem química é o aquecimento dos plásticos com ar ou oxigênio puro, gerando-se um gás de síntese contendo monóxido de carbono e hidrogênio, que podem ser usados como matéria-prima em outros processos (PLASTIVIDA, 2004).

Finalmente, a reciclagem química também pode ser realizada através da quebra das moléculas pela ação do calor na ausência de oxigênio, gerando frações de hidrocarbonetos.

3.1.2.2 RECICLAGEM MECÂNICA

A reciclagem mecânica do PET consiste na transformação dos materiais descartados pela indústria e após o consumo em partículas, chamadas de flocos, que podem ser reutilizados na produção de outros produtos como sacos de lixo, solados, pisos, filmes plásticos, mangueiras, varais, cordas, fibras, outras embalagens (PLATIVIDA, 2004). O diagrama mostrado na Figura 3 ilustra o processo de reciclagem de PET, conforme informado por empresa recicladora.

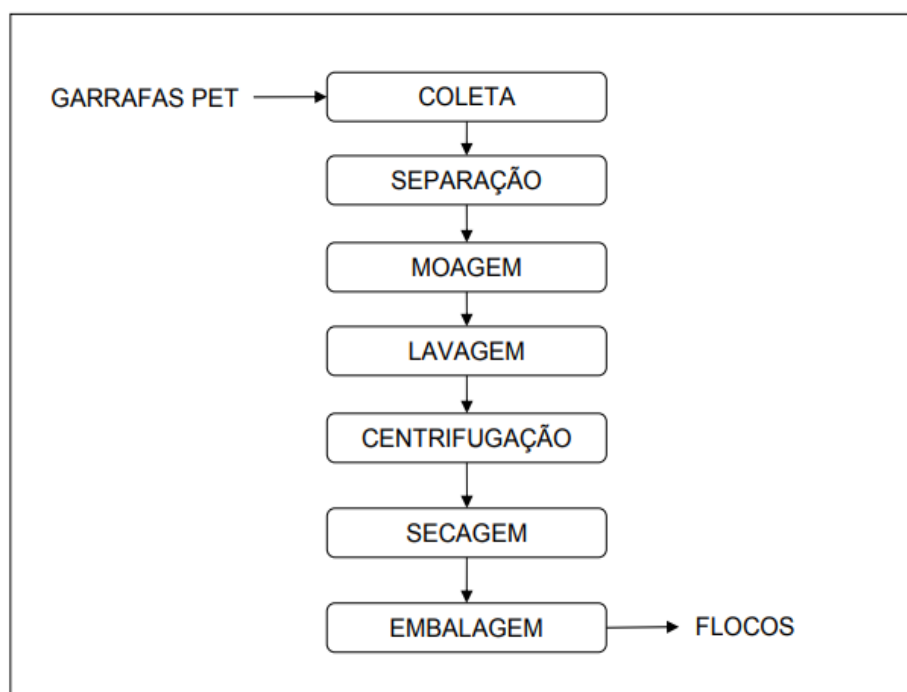


Figura 3. Diagrama da reciclagem de garrafas PET.

Os descartes plásticos industriais se originam principalmente de refugos de processos de produção e transformação, tais como aparas e rebarbas. Os descartes plásticos após o consumo são os materiais já utilizados pela população, na sua maioria embalagens de refrigerantes e óleos comestíveis.

Como se observa na Figura 3, a primeira etapa do processo de reciclagem é a coleta de material. Após a coleta, o material é separado de acordo com o tipo de plástico e encaminhado para a etapa de moagem, onde ocorre a fragmentação do produto em flocos. Os flocos são lavados com água para remoção dos contaminantes e seguem para centrifugação e secagem. O material seco é então embalado e enviado para a fabricação de novos produtos.

Estudos mostram que existem limitações quanto ao número de reciclagens do PET. Segundo MANCINI (1999), após o quinto ciclo de reciclagem do PET ocorre a quebra de sua cadeia cumulativa, causando a degradação da estrutura macromolecular do polímero.

Com relação ao uso de PET reciclado para fabricação de novas embalagens, órgãos de controle como o Food and Drug Administration (FDA) nos Estados Unidos e o International Life Sciences Institute (ILSI) na União Européia liberaram o uso da embalagem de PET reciclado em contato direto com alimentos e bebidas. A tecnologia é conhecida como processo monocamada ou URRC, sendo capaz de descontaminar o PET após o consumo através de um sistema de lavagem que assegura ao reciclado o mesmo nível de limpeza da matéria prima virgem.

O processo tradicional de utilização de PET reciclado é realizado através de multicamada, composta por três camadas, sendo as duas de fora de material virgem e a camada de dentro de material reciclado, num máximo de 48% do total de material (CEMPRE, 2004). No Brasil, até o momento, apenas a embalagem multicamada destinada ao acondicionamento de bebidas carbonatadas não alcoólicas foi liberada pela Portaria N° 987, de 8 de dezembro de 1998, da Secretaria de Vigilância Sanitária do Ministério da Saúde (LIMA, 2001).

3.1.2.3 RECICLAGEM ENERGÉTICA

A reciclagem energética consiste na recuperação da energia contida nos materiais através de processos térmicos. Neste processo o plástico funciona como combustível auxiliar para a geração de energia elétrica e aquecimento de caldeiras, reduzindo mais o uso de recursos naturais. A energia contida em 1 kg de plásticos é equivalente à contida em 1 kg de óleo combustível, que é da ordem de 10.000 kcal (PLASTIVIDA, 2004).

Esta é uma alternativa fácil e de rápida implementação se for considerada a disponibilidade de tecnologias limpas para queima de resíduos sólidos e o co-processamento com outros combustíveis. Deve-se ressaltar, no entanto, que para plásticos contendo cloro não

se recomenda a reciclagem energética, uma vez que existe a possibilidade da formação de compostos tóxicos na fase gás (FUJII, 1994).

3.1.3 ANÁLISE DA CADEIA DE PRODUÇÃO DE PET

O ciclo de vida do PET para a fabricação de garrafas envolve etapas que vão desde a extração do petróleo até a reciclagem das garrafas após o consumo, conforme pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 4.

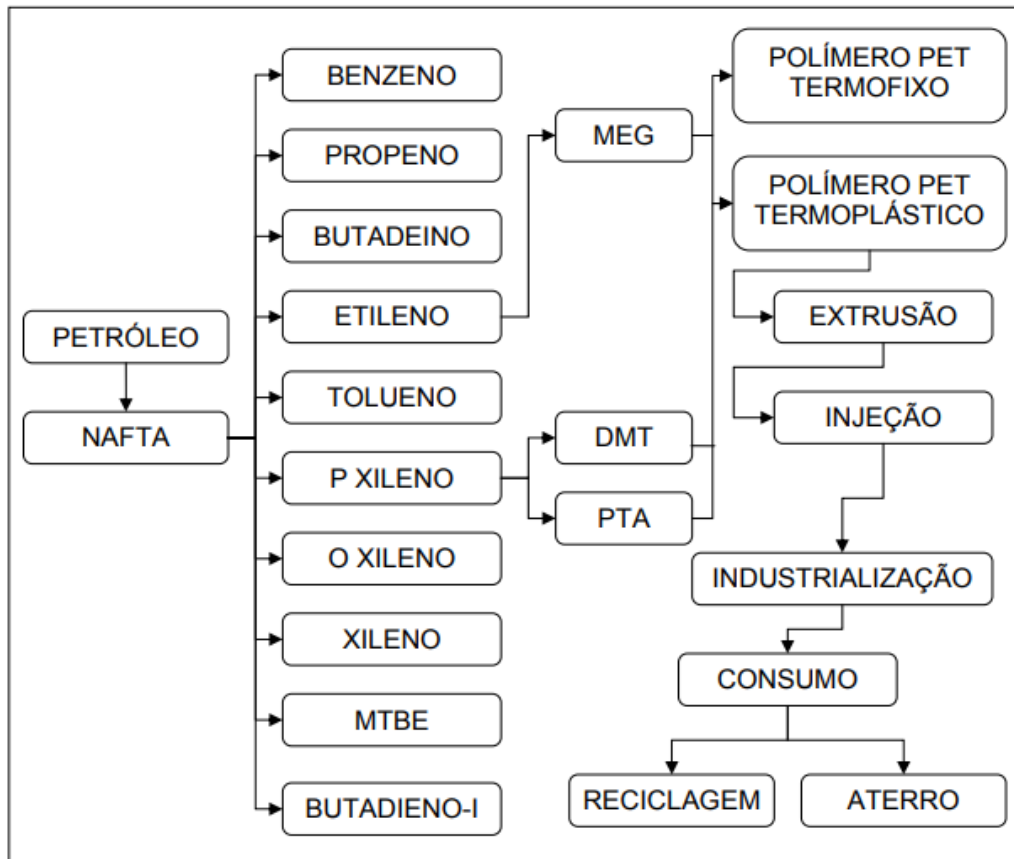


Figura 4. Diagrama de produção do polímero PET.

Verifica-se na Figura 4 que o ciclo de vida das garrafas PET tem início na extração do petróleo que após ser processado se separa em vários compostos, entre os quais a nafta. A partir da destilação da nafta, são obtidos outros produtos como o etileno e o p-xileno, que são

matérias-primas para a fabricação de monoetilenoglicol (MEG) e dimetiltereftalato (DMT), respectivamente.

A partir destes dois materiais obtém-se o polímero PET para garrafa na forma de flocos. Os flocos são então transformados em preformas que seguem para o engarrafador, onde ocorrem as etapas de sopro para a formação das garrafas e o envase do refrigerante.

As garrafas de refrigerante seguem então para os centros consumidores e, após serem usadas, são descartadas. Parte das garrafas descartadas é recolhida e encaminhada para a reciclagem e o restante segue para disposição em aterros. A seguir são descritas as etapas do ciclo de vida das garrafas PET.

3.1.3.1 EXTRAÇÃO DO PETRÓLEO

O petróleo é formado a partir do processo de decomposição de matéria orgânica, como restos vegetais e restos de animais marinhos, ocorrido durante centenas de milhões de anos da história geológica da Terra. Este material é oleoso, inflamável, quimicamente apolar, menos denso que a água e com cheiro característico (CAMPOS, 1999).

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos composta de diversos tipos de moléculas, formadas principalmente por átomos de hidrogênio e carbono e, em menor parte, de oxigênio, nitrogênio, hidrogênio e enxofre, combinados de forma variável. Estas várias combinações conferem características diferenciadas aos diversos tipos de óleo crus encontrados na natureza (SHREVE, 1997).

A extração do petróleo ocorre através da perfuração de um poço que atinge o lençol petrolífero, que jorra espontaneamente. Esse tipo de extração é conhecido como primeira recuperação, tem baixo custo, e extrai 5% da reserva total.

Com o tempo, a pressão no subsolo diminui e o petróleo não jorra mais espontaneamente. A partir deste ponto outro poço é perfurado e, através da injeção de água sob alta pressão, outra parte da reserva é extraída. O custo desta segunda recuperação é maior, sendo capaz de extrair 30% da reserva restante. Como o custo da extração do petróleo restante no subsolo é bastante alto, ela somente é realizada quando se torna viável economicamente (SOKA, 2001).

3.1.3.2 REFINO DO PETRÓLEO

A etapa de refino do petróleo dentro do ciclo de vida da garrafa PET tem como objetivo transformá-lo em seus derivados. A seguir são apresentadas as etapas de obtenção de nafta, etileno, p-xileno, MEG e DMT.

3.1.3.2.1 OBTENÇÃO DA NAFTA

Inicialmente o petróleo é enviado à etapa de dessalga para a remoção de água, sais e partículas sólidas em suspensão que podem prejudicar a qualidade do produto final (LIMA, 2001). Através da passagem por um campo elétrico de alta voltagem, o petróleo é separado das impurezas que constituem a salmoura.

O petróleo segue então para a etapa de destilação, que consiste em um processo físico de separação baseado na diferença de pontos de ebulição entre compostos coexistentes em uma mistura líquida (LIMA, 2001).

O processo de destilação tem início com o bombeamento contínuo de petróleo através de trocadores de calor que aquecem o material antes de ser encaminhado a torre de pré-fracionamento.

No ponto de entrada da torre, conhecido como zona de vaporização, ocorre a separação do petróleo em duas frações. A primeira fração, que se encontra no estado vaporizado, é encaminhada para um tanque de estabilização onde se separa em GLP e nafta leve.

A segunda fração, no estado líquido, é encaminhada para uma torre de destilação atmosférica que promove a separação da mistura em outras três correntes. A primeira corrente segue para uma torre de destilação a vácuo, sendo separada em gasóleo leve, gasóleo pesado e resíduo de vácuo. A segunda corrente segue para torres retificadoras, onde é separada em querosene, diesel pesado e diesel leve.

Finalmente, a terceira corrente, constituída por nafta pesada, é enviada juntamente com a nafta leve para indústrias petroquímicas para a obtenção de compostos como o etileno e o p-xileno.

3.1.3.2.2 OBTENÇÃO DO ETILENO

A nafta bruta resultante da destilação do petróleo é aquecida e alimentada junto com vapor d'água nos fornos de craqueamento, onde ocorre a pirólise. Nesta etapa obtém-se o gás combustível, que é recolhido. O material restante segue então para a etapa de fracionamento primário, sendo separado em três frações. A primeira fração é composta pelo resíduo de pirólise, onde se concentram os compostos mais pesados e polímeros formados no craqueamento (LIMA, 2001).

A segunda fração é composta por vapor d'água e gásóleo, que é incorporado a outras correntes para a formação de subprodutos. Finalmente, na terceira fração encontram-se gasolina, uma fração rica em aromáticos e uma fração leve composta por uma mistura de hidrocarbonetos, onde se encontra o etileno.

Esta mistura de hidrocarbonetos leves é separada dos outros compostos através de compressão e segue para uma torre fracionadora onde ocorre a retirada do hidrogênio e metano presentes na corrente. O material remanescente segue para a fracionadora seguinte, sendo separado em duas correntes. A primeira corrente é composta por substâncias mais pesadas que o etileno, como o propileno, o propano e o butano.

A segunda corrente, composta por etileno, etano e traços de acetileno, é encaminhada para a etapa de purificação, onde o acetileno presente na mistura é convertido a etileno.

Finalmente, a corrente final passa por uma última fracionadora onde são separados o etano, que retorna para o processo, e o etileno, que segue para a produção de MEG (LIMA, 2001).

3.1.3.2.3 OBTENÇÃO DO P-XILENO

A fração rica em aromáticos separada dos hidrocarbonetos leves por compressão é processada em uma unidade de reforma catalítica com o objetivo de aumentar a concentração dos compostos aromáticos. Após uma separação por destilação extrativa, obtém-se uma corrente rica em benzeno, tolueno, xilenos e etilbenzeno.

Essa corrente segue para uma torre de destilação, sendo separada em duas frações. A primeira fração é rica em p-xileno, m-xileno e etilbenzeno. A segunda fração é composta por o-xileno e substâncias mais pesadas.

A mistura de p-xileno, m-xileno e etilbenzeno é encaminhada para um processo de adsorção, ocorrendo então a separação do p-xileno dos demais componentes.

3.1.3.2.4 OBTENÇÃO DO MONOETILEOGLICOL

A partir da reação de etileno com oxigênio, pelo processo de oxidação catalítica, obtém-se o óxido de etileno. Através da reação deste óxido de etileno com água obtém-se o MEG, o mais simples dos etilenoglicóis. As reações de processo do MEG são fortemente exotérmicas, sendo realizadas na fase líquida sem a presença de catalisadores (BRASKEM, 2003). O MEG fabricado segue então para a etapa de fabricação de resina PET.

3.1.3.2.5 OBTENÇÃO DO DIMETILTEREFTALATO

O processo de fabricação do DMT é dividido em quatro etapas, oxidação, esterificação, cristalização e destilação. Na primeira etapa, ocorre a oxidação do p-xileno pelo metanol formando o p-toluoato de metila. A mistura de p-toluoato de metila com o p-xileno remanescente é recirculada no processo na presença de ar e catalisadores, formando os ácidos tereftálico e monometilestertereftálico.

Na segunda etapa, os ácidos tereftálico e monometilestertereftálico passam pela etapa de esterificação a partir da reação com metanol, formando o DMT. A terceira etapa de produção é responsável pela purificação do DMT através do processo de cristalização.

Nesta fase, o DMT é dissolvido em metanol juntamente com os isômeros e as impurezas formados durante o processo. Por ser menos solúvel em metanol que as duas outras substâncias, o DMT é separado da solução através da diminuição da temperatura, sendo obtidos desta maneira cristais puros de DMT.

Finalmente, na quarta etapa de produção é realizada a destilação do DMT cristalizado, resultando em DMT de elevada pureza que é enviado para a fabricação da resina PET juntamente com o MEG (BRASKEM, 2003).

3.1.3.3 FABRICAÇÃO DA RESINA

O PET para garrafa é produzido através do processo de transesterificação, a partir da reação entre MEG e DMT, com liberação de metanol. O produto formado nesta transesterificação é o dihidroxetileno tereftalato (DHET).

A reação continua até que o peso molecular ideal seja alcançado e o polímero PET seja totalmente formado. Após sua fabricação, o polímero é extrusado, resfriado e enviado para produção de grãos. Os grãos são então alimentados a um secador para reduzir o teor de umidade e ensacados.

3.1.3.4 FABRICAÇÃO DA PREFORMA

Os grãos secos provenientes da etapa de fabricação de resina são encaminhados para a etapa de plastificação, que provoca o amolecimento do material necessário para a etapa de moldagem. O material é então injetado no molde, com altas pressões, temperatura e velocidade, tomando sua forma e sendo resfriado por troca térmica em seguida. Com este resfriamento a preforma solta do molde e é desprendida por força mecânica. Durante a extração da preforma outra quantidade de resina é injetada no molde dando continuidade à produção.

3.1.3.5 PRODUÇÃO DA GARRAFA E LAVAGEM

As preformas são então enviadas para o engarrafador e seguem para a etapa de sopro com ar quente. Tendo em vista que esta resina pode ser termo-moldada, o sopro a quente expande a preforma, preenchendo os espaços do molde que a envolve. A garrafa pronta passa então pela etapa de lavagem para a retirada de pó e segue para a etapa de envase de refrigerante.

3.1.3.6 FABRICAÇÃO DO RÓTULO E DA TAMPA

Os rótulos empregados nas garrafas PET são fabricados a partir de PEBD. Da mesma maneira, as tampas são fabricadas a partir de PP, com retentores de PVC termo encolhível. O PEBD é um termoplástico flexível e tenaz, apresentando pouca tendência a se arranjar em estrutura cristalina, apresentando então pouca resistência mecânica.

O PEBD é obtido pela polimerização do etileno sob alta pressão e altas temperaturas (BLASS, 2001).

O PP apresenta baixa densidade e alta resistência ao calor. É obtido pela polimerização do propileno sob condições controladas. Sua alta cristalinidade lhe confere elevada resistência mecânica, rigidez e dureza (BLASS, 2001).

Finalmente, o PVC termo encolhível é obtido a partir da polimerização do cloreto de vinila a altas temperaturas. A introdução de modificadores permite o amolecimento da resina pura, que originalmente é dura e rígida. Desta maneira obtém-se materiais de cores variadas e mais flexíveis (BLASS, 2000).

3.1.3.7 RECICLAGEM

O processamento básico de reciclagem de garrafas PET compreende as seguintes etapas: aquisição de matéria-prima, classificação, moagem, lavagem, enxágüe, descontaminação, pré-secagem, secagem, eliminação de pó e embalagem.

As principais fontes de matéria-prima para a reciclagem de PET são as embalagens após o consumo, distribuídas entre garrafas de bebidas como refrigerante, água e suco e embalagens de óleo comestível.

Após a coleta do material é realizada a etapa de classificação, que consiste na separação dos possíveis contaminantes presentes na sucata de PET. A separação pode ser feita manualmente ou automaticamente, através de equipamentos com sensores óticos.

O material separado é então encaminhado para a etapa de moagem e classificação, de acordo com o tamanho alcançado. Os grãos classificados seguem para a etapa de enxágüe através de roscas sem fim para a retirada de possíveis contaminantes, como restos gordurosos de alimentos e bebidas.

O material segue então para um tanque de separação e descontaminação para drenagem da água de enxágüe. Um pré-secador é utilizado para a retirada da água superficial do material e a secagem total é realizada com ar quente em um secador contínuo. A última etapa da reciclagem é a remoção do pó aderido aos grãos através da passagem de ar quente com ventilador e de um sistema para exaustão do pó. O material seco e isento de pó é enviado para um ensacador que faz a embalagem do produto e completa o processo.

3.1.4 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X DO PET

A partir da técnica de difração de raios X, foi possível determinar a composição mineralógica do PET (poli(tereftalato de etileno)) como mostra na Figura 5.

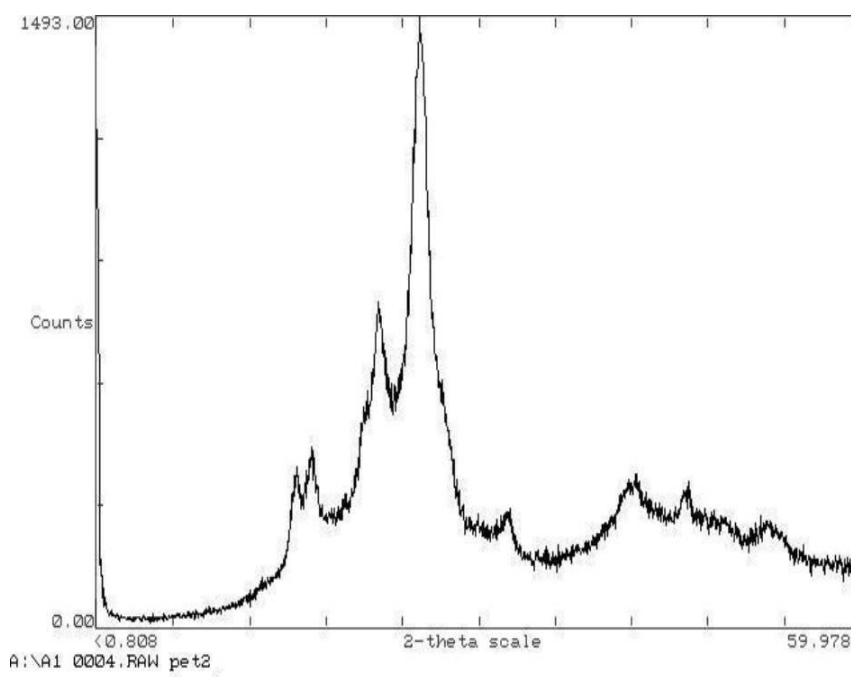


Figura 5. Difratoograma do PET (poli(tereftalato de etileno)). Fonte: Universitat Barcelona, 2019.

O difratograma mostra que o PET é composto essencialmente por $(\text{CO}(\text{C}_6\text{H}_5) - \text{COO} - (\text{CH}_2)_n - \text{O})_n$. A matéria-prima é composta por ácido tereftálico, etilenoglicol, óxido de etileno e etileno. O poli (tereftalato de etileno) consiste em cadeias macromoleculares não ramificadas, pode-se observar na Figura 6 (UNIVERSITAT BARCELONA; 2019).

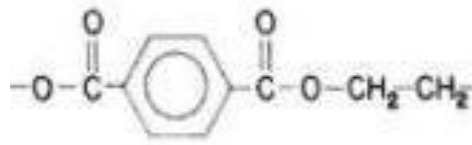


Figura 6. Matéria-prima do PET (poli(tereftalato de etileno)).

A presença de apenas um halo no difratograma do PET indica que o polímero possui estrutura amorfa. Este efeito é devido ao resfriamento rápido do polímero (quenching) no molde, após a injeção, não permitindo a cristalização.

Nos difratogramas, a visualização do pico de difração do plano 002 dos cristais não delaminados no compósito é facilitada pelas características amorfas do PET. Mesmo para o PET cristalino, o primeiro pico de difração ocorre em valores acima de 16° (SIRELLI L., 2004), não havendo dificuldade de assinalamentos entre os picos de difração do polímero e dos cristais lamelares.

3.2 INDÚSTRIA CERÂMICA

3.2.1 MATERIAIS CERÂMICOS

O termo “cerâmica” vem da palavra grega *keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”, indicando que as propriedades desejáveis destes materiais são normalmente atingidas através de um processo de tratamento térmico a altas temperaturas conhecido como sinterização (Callister, 2007).

Segundo a Associação Brasileira de Cerâmica, os materiais cerâmicos compreendem os materiais inorgânicos, não-metálicos que ficam utilizáveis geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas.

De acordo com Santos (1989), cerâmica é o ramo da indústria no qual “minerais de composição inconstante e pureza incerta são submetidos a temperaturas mal definidas, durante períodos de tempo que fazem reações desconhecidas ocorrerem de forma incompleta, originando produtos heterogêneos e não-estequiométricos, denominados materiais cerâmicos”.

O setor cerâmico é dividido em sub-setores em função de fatores como matérias-primas, propriedades e áreas de utilização, assim é adotada a seguinte classificação, de acordo com ABC, (2011):

Cerâmica Vermelha: Compreende alguns materiais empregados na construção civil como telhas, tijolos, blocos, lajes, etc. **Materiais de Revestimento/Placas Cerâmicas:** São materiais utilizados como revestimentos de paredes, pisos entre outros. Podendo ser chamados de azulejo, pastilha, porcelanato, grés, lajota, etc.

Cerâmica Branca: São materiais constituídos por um corpo branco e geralmente revestidos por uma camada vítrea transparente e incolor. Neste ramo podemos citar louças sanitárias e de mesa, isoladores elétricos de alta e baixa tensão e cerâmica artística.

Materiais Refratários: Compreende diversos produtos que tem por finalidade suportar temperaturas elevadas. Geralmente também são materiais que suportam esforços mecânicos, ataques químicos, variações bruscas de temperatura e outras solicitações. São classificados quanto à matéria-prima ou componentes químico: sílica, sílico-aluminoso, aluminoso, mulita, magnesianocromítico, cromítico-magnésiano, carbetto de silício, grafita, carbono, zircônia, zirconita, espinélio e outros.

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

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

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

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

Cerâmica de Alta Tecnologia/Cerâmica Avançada: São os materiais utilizados nas áreas aeroespacial, eletrônica, nuclear e muitas outras. Neste setor os materiais utilizados são desenvolvidos a partir de matérias-primas sintéticas de altíssima pureza e por meio de processos rigorosamente controlados. Como alguns exemplos, podemos citar: naves espaciais, satélites, usinas nucleares, materiais para implantes em seres humanos, aparelhos de som e de vídeo,

suporte de catalisadores para automóveis, sensores (umidade, gases e outros), ferramentas de corte, brinquedos, acendedor de fogão, etc.

3.2.2 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS CERÂMICOS

As propriedades dos materiais cerâmicos permitem que estes sejam aplicados em larga escala a uma gama de indústrias como, civil, eletrônica, comunicação, computadores, aeroespacial, entre outras que dependem do uso desse material. Isto ocorre devido a propriedades tais como a facilidade de conformação, baixo custo e densidade, resistência à corrosão e a temperaturas elevadas, que fizeram com que os materiais cerâmicos tradicionais conquistassem posições de relevo em diferentes setores industriais e artísticos.

Para o caso de cerâmica vermelha, enfatizando tijolos e telhas, as principais propriedades avaliadas de acordo com as normas vigentes no Brasil são: absorção de água, densidade aparente, retração linear, resistência mecânica, entre outras.

As propriedades dos materiais cerâmicos são determinadas pelas características atômicas e microestruturais dos materiais que os compõe. Estas características podem ser controladas pela seleção das matérias-primas, processo de fabricação e produto. Assim o controle do processo produtivo é fundamental para que os defeitos microestruturais sejam minimizados (Reed, 1995).

3.2.3 CERÂMICA VERMELHA

A cerâmica vermelha, também conhecida por cerâmica estrutural é um dos segmentos do setor da indústria cerâmica que se subdivide de acordo com matérias-primas, propriedades e área de atuação. Existe também uma subdivisão dentro do campo de cerâmica vermelha que compreende os seguintes materiais: tijolos, telhas, blocos de vedação e estruturais, manilhas, pisos rústicos, cerâmica utilitária e também agregados leves de argila expandida (ABC, 2011).

É um setor que permite com grande facilidade a incorporação de materiais alternativos, visto que uma das propriedades das argilas que favorecem a inertização dos resíduos é a capacidade de troca de cátions. Daí vem à importância do estudo de resíduos gerados pelas indústrias civil, metalúrgica, siderúrgica, têxtil, mineração, papel e celulose, entre outras.

3.2.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CERÂMICA ESTRUTURAL

Na área de cerâmica estrutural o processo para produção de peças, com ênfase em telhas e tijolos, é composto basicamente por 4 etapas: preparação da massa, conformação das peças, secagem e queima, que podem ser visualizadas na Figura 7.

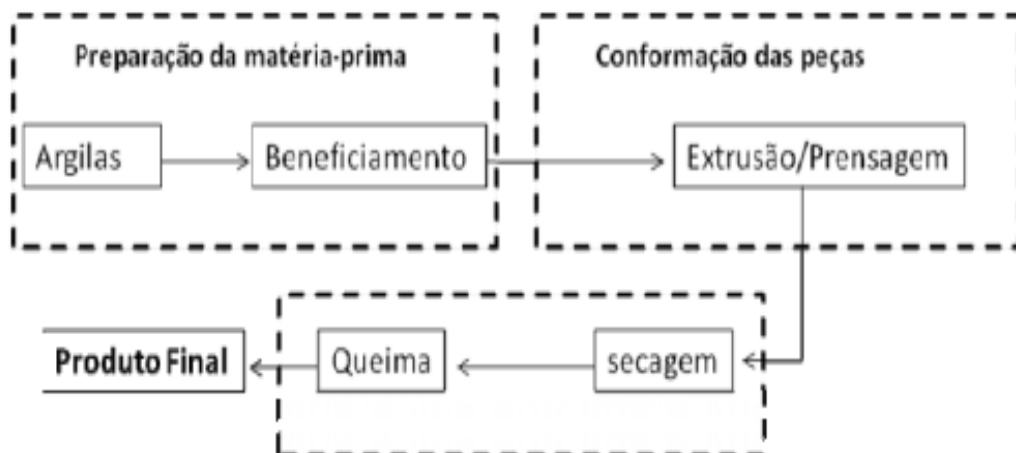


Figura 7. Etapas principais do processo de fabricação.

Segundo ABC (2011), a fabricação de produtos como telhas e tijolos está diretamente ligada ao setor da mineração de argilas, cujo geralmente a própria cerâmica realiza a extração da argila.

3.2.4.1 PREPARAÇÃO DA MASSA

O preparo da massa cerâmica consiste da formulação e mistura das matérias-primas, sendo a formulação de forma empírica, busca-se uma condição de massa próxima a ideal, que atenda características determinadas para uma boa moldagem, secagem e queima, proporcionando assim um produto final de melhor qualidade.

A composição ideal requer plasticidade e fusibilidade, para propiciar boa trabalhabilidade e resistência mecânica de queima.

3.2.4.2 CONFORMAÇÃO DA PEÇA

Na fabricação de cerâmica vermelha, os principais processos utilizados são a extrusão e prensagem.

A extrusão é o processo mais utilizado na indústria de cerâmica estrutural por ser mais econômico, porém gera produtos de menor valor. É realizado por uma máquina chamada extrusora, onde uma massa na forma de uma pasta plástica e rígida é forçada através de um molde, que em seguida é cortada em tamanhos pré-determinados.

Para se obter uma massa adequada para o processo de extrusão é necessário que esta seja dosada utilizando matérias-primas não-plásticas e plásticas, o que ocasiona um ajuste de plasticidade da mistura às condições adequadas de processamento (Meira, 2001).

3.2.4.3 SECAGEM

É a etapa do processo logo após a conformação. É uma operação importante, onde a água utilizada na conformação é eliminada de maneira lenta e uniforme, a fim de evitar possíveis defeitos na peça como trincas, empenamentos ou quebra (Norton, 1973).

A secagem pode ser feita em galpões ou estufa, sendo o galpão o mais utilizado pelas olarias. As perdas giram em torno de 5 % durante o processo de secagem. Após a secagem, o produto deve ter resistência suficiente para possibilitar a sua manipulação até o processo de queima (Soares et al., 2004).

3.2.4.4 QUEIMA

A queima é a etapa mais importante de todo processo produtivo, pois é durante essa etapa que os produtos adquirem suas propriedades finais, através das transformações físicas, químicas e mecânicas causadas pela ação do fogo.

Há quatro fases presentes no processo de queima:

Esquente ou pré-aquecimento: aquecimento gradual para retirada da água residual, num período de 8 a 13 horas chegando até 650°C;

Fogo forte ou caldeamento: inicia por volta de 650° e pode ser elevada em maior ritmo até 950°C ou 1000°C. É nessa fase que se verificam as reações químicas que proporcionam ao corpo cerâmico as características de dureza, estabilidade, resistência aos vários agentes físicos e químicos, como também a coloração pretendida;

Patamar, a temperatura máxima de queima é mantida por um determinado período de tempo, dessa forma, a câmara aproxima ao máximo o gradiente de temperatura por todo o forno;

Resfriamento, realizado de forma gradual e cuidadosa para evitar ocorrência de trincas, através da chaminé ou do aproveitamento de calor para os secadores, num período em torno de 38 a 50 horas (SENAI, 2010).

3.2.5 RESÍDUOS DA INDÚSTRIA CERÂMICA

A indústria cerâmica é uma das que mais se destacam na reciclagem de resíduos industriais e urbanos, em virtude de possuir elevado volume de produção que possibilita o consumo de grandes quantidades de rejeitos e que, aliado às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas e às particularidades do processamento cerâmico, faz da indústria cerâmica como uma das grandes opções para a reciclagem de resíduos sólidos.

De acordo com Vieira (2009), os resíduos da indústria cerâmica foram classificados da seguinte forma:

Resíduos combustíveis: apresenta carbonáceo, matéria combustível que contém carbono, que contribui energeticamente para o processo de sinterização da cerâmica. Nesta

categoria podemos citar: resíduos oleosos (derivados do petróleo), resíduos de lama de alto forno e resíduos da indústria do papel (Vieira, 2009).

Resíduos fundentes: apresentam teor de compostos como, alcalinos e alcalinos terrosos que auxiliam no processo de sinterização, reduzindo a temperatura de sinterização, através do aparecimento de uma fase líquida. Neste caso temos como exemplos, resíduos de lamas de rochas ornamentais, resíduos de vidros, cinzas fundentes e resíduos contendo Boro (Vieira, 2009).

Resíduos que afetam as propriedades: apresentam substâncias que modificam o comportamento da cerâmica, e não podem ser incluídos nas duas primeiras categorias. Considerando tais propriedades podemos citar: chamote, lodo de estação de tratamento de água, lama e escória do refino do aço, cinzas não fundentes (bagaço da cana-de-açúcar), resíduos do processo de mineração (resíduos de ferro, cobre, manganês, etc.), lama do processo galvânico, lama de indústria têxtil, lodo de curtume, sobras de construção e demolição, rejeito de areia do processo metalúrgico de redução de minérios (Vieira, 2009).

3.2.5.1 USO DE RESÍDUO EM CERÂMICA VERMELHA

Atualmente a área dos materiais cerâmicos tem sido amplamente estudada a fim de obtenção de novos materiais a partir de matérias-primas alternativas. Apresentam-se a seguir alguns estudos referentes à incorporação de resíduos em diversos processos de fabricação de cerâmica vermelha.

Santos (2007), analisou as propriedades físicas e mecânicas de uma argila proveniente da região do Recôncavo Baiano, com adições de 5, 10 e 15% em peso de rejeitos cerâmicos. Seus resultados mostraram que os corpos de prova com incorporações de 15% em peso de rejeitos cerâmicos, apresentaram propriedades superiores as da argila, nas temperaturas entre 900° e 1000°C, ou seja, é possível gerar produtos de qualidade utilizando a combinação de resíduo cerâmico com a argila do Recôncavo Baiano.

Faria et. al. (2010), estudou a influência da adição do resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades tecnológicas da cerâmica vermelha. Utilizando assim, o resíduo de cinza como matéria-prima alternativa para substituição parcial da argila. Foram estudadas cinco formulações com 0, 5, 10, 15 e 20 % em peso de resíduo misturado com argila caulínica.

A temperatura estudada foi de 1000°C e as propriedades analisadas foram retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e resistência à compressão. Os resultados deste trabalho mostraram que o resíduo pode ser utilizado como matéria-prima alternativa, pois influencia positivamente na resistência mecânica em incorporações de até 10%.

Silva (2007), afirma ser possível a adição de resíduos da construção civil como, areia, concreto, tijolos vermelhos, cimento e blocos de cimento e argamassa na massa para produção de cerâmica vermelha. As amostras foram submetidas a ensaios de absorção de água, retração linear, porosidade aparente, massa específica, resistência à flexão, DRX e MEV. Os resultados mostraram-se satisfatórios, visto que é possível a adição em até 50% de resíduos nas massas cerâmicas sem grandes perdas na resistência mecânica, porém ficou provado que os melhores resultados para a fabricação de peças cerâmicas é de até 30% de resíduos.

Morais (2010), avaliou o efeito da incorporação de resíduo de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha para fabricação de telhas e tijolos. Ficou provado que o resíduo atua como regulador da plasticidade/trabalhabilidade da massa cerâmica, além de promover a diminuição da porosidade das peças. Os resultados provaram que as peças com incorporações com 10% do resíduo, queimadas a 1050°C, apresentaram aumento na resistência mecânica e diminuição da absorção de água.

4 MATERIAIS E METODOLOGIA

4.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados neste trabalho foram: o resíduo da cerâmica vermelha obtidos a partir de blocos cerâmicos e o poli (tereftalato de etileno) (PET), obtido de vasilhames de garrafas descartadas.

4.2 MÉTODOS

A metodologia de execução deste trabalho seguiu as seguintes etapas, podendo ser vista no esquema, ilustrado na Figura 8.

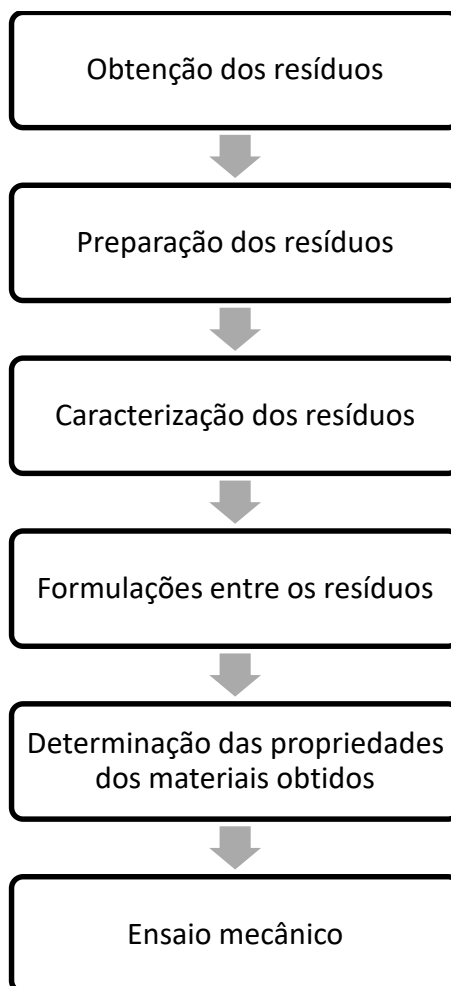


Figura 8. Esquema da metodologia utilizada no trabalho. Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.1 OBTENÇÃO DOS RESÍDUOS

Os resíduos cerâmicos foram obtidos em laboratório a partir da sinterização controlada de blocos cerâmicos produzidos pela cerâmica vermelha a uma temperatura de 700°C. E para a obtenção do pó de PET (poli(tereftalato de etileno) foram coletados vasilhames de garrafas de um único tipo de refrigerante.

4.2.2 PREPARAÇÃO DOS RESÍDUOS

4.2.2.1 RESÍDUO DA CERÂMICA VERMELHA

O parâmetro utilizado na queima dos blocos foi: temperatura de queima de 700°C, taxa de aquecimento de 2°C/min e permanência de 20 minutos na temperatura final.

Após o processo de sinterização, os blocos queimados tiveram seus tamanhos reduzidos com o auxílio de um martelo e do pistilo e almofariz, com o intuito de facilitar o posterior processo de moagem.

Depois de triturados, os pedaços dos blocos passaram pelo moinho de disco para serem cominuídos. Após a moagem, o material foi peneirado, manualmente, em peneira de malha 40 ASTM.

4.2.2.2 PET (poli(tereftalato de etileno))

Foram coletados vasilhames de garrafas de um único tipo de refrigerante, retirados os rótulos e tampas. Em seguida, foram triturados pelo moinho de facas para serem cominuídos. Após a moagem, o material foi peneirado, manualmente, em peneiras de malha de 10, 20, 30 e 40 ASTM.

4.2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A caracterização dos resíduos foi realizada com o objetivo de determinar suas características físico-químicas e mineralógicas, utilizando as seguintes técnicas: difração de raios-X e análise granulométrica.

4.2.3.1 DIFRAÇÃO DE RAIOS X (DRX)

Os métodos de difração de raios-X são utilizados para a determinação da estrutura cristalina dos materiais. Métodos de difração podem identificar compostos químicos a partir de sua estrutura cristalina, não de suas composições de elementos químicos. Isso significa que os diferentes compostos (ou fases) que têm a mesma composição podem ser identificados (LENG, 2008).

Os raios X ao atingirem um material podem ser espalhados elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons de um átomo (dispersão ou espalhamento coerente). O fóton de raios X após a colisão com o elétron muda sua trajetória, mantendo, porém, a mesma fase e energia do fóton incidente (KAHN, H).

Se os átomos que geram esse espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como uma estrutura cristalina, apresentando entre eles distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente, pode-se verificar que as relações de fase entre os espalhamentos tornam-se periódicas e que efeitos de difração dos raios X podem ser observados de vários ângulos (KAHN, H).

Considerando-se dois ou mais planos de uma estrutura cristalina, as condições para que ocorra a difração de raios X (interferência construtiva ou numa mesma fase) vão depender da diferença de caminho percorrida pelos raios X e o comprimento de onda da radiação incidente. Essa condição é expressa pela Lei de Bragg, utilizando a equação 1 (KAHN, H):

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Onde n é um número inteiro, λ é a distância interplanar e θ é o ângulo de incidência.

Essa análise foi feita na Universidade Federal de Campina Grande. Também foi necessário peneirar as amostras do resíduo cerâmico em peneira de malha 200 ASTM.

4.2.3.2 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

A análise granulométrica (AG) é de extrema importância para uma precisa caracterização das matérias-primas, fundamentado que em materiais argilosos a granulometria influencia de forma decisiva no processamento e nas propriedades finais do material (PRACIDELLI; MELCHIEADES, 1997).

Para a análise granulométrica (AG) no PET utilizou-se um granulômetro da marca CILAS, modelo 1064, foi necessário peneirar as amostras em peneira de malha 10, 20, 30 e 40 ASTM. E foi utilizada a quantidade passante após a peneira de malha 40 ASTM. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais Cerâmicos do Departamento de Engenharia de Materiais – UFPB.

4.2.4 PREPARAÇÃO DAS FORMULAÇÕES

As formulações foram preparadas adicionando-se três diferentes concentrações dos resíduos da cerâmica vermelha ao PET: A, B e C. Com relação às formulações foi utilizada a nomenclatura A – Formulação com 1:2 de Cerâmica/PET; B – Formulação com 1:1 de Cerâmica/PET e C – Formulação com 2:1 de Cerâmica/PET. A mistura entre os materiais ocorreu em um recipiente plástico, de forma manual, tampando o recipiente e agitando para ajudar na homogeneização da mesma.

Os diferentes percentuais entre os resíduos da cerâmica vermelha e o resíduo do PET estão detalhados na Tabela 3.

Tabela 3. Formulações das amostras.

| AMOSTRAS | RESÍDUO DA CERÂMICA VERMELHA (%) | RESÍDUO DO PET (%) |
|-----------------|---|-------------------------------|
| A | 33,33 | 66,66 |
| B | 50,00 | 50,00 |
| C | 66,66 | 33,33 |

Fonte: elaborado pelo autor.

4.2.5 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova foram produzidos a partir do processo de prensagem manual. As formulações prontas foram armazenadas em recipientes plásticos com tampa, para proporcionar a homogeneização manualmente. Para em seguida, serem colocados uniformemente nos moldes feitos de lata de refrigerante e serem aquecidos em uma chapa elétrica, modelo JX-1010A, a uma temperatura de 260°C durante 5 minutos.

Para a realização da prensagem, utilizou-se um bloco de madeira que encaixasse no molde de lata de refrigerante, aguardando um tempo de aproximadamente 10 segundos, aliviando a pressão ao atingir a uniformização da peça. A cada corpo de prova prensado, era preciso que o mesmo fosse pesado, em uma balança com precisão de 3 casas decimais, e era medido seu comprimento, largura e altura com o auxílio de um paquímetro.

Foram confeccionados 5 corpos de prova para cada formulação, ou seja, 15 corpos de prova ao todo, sendo cada qual produzido a partir de 14 gramas de material, apresentando-se esses na forma de placas, com dimensões de, aproximadamente, 60x20x5 mm. Como vistos na imagem na Figura 9.



Figura 9. Corpos de prova nas formulações A, B e C. Fonte: registrada pelo autor.

4.2.6 TRATAMENTO TÉRMICO

Após a fabricação dos 15 corpos de prova, ocorreu à realização do teste de Arquimedes onde todos os corpos de prova foram deixados em repouso em um recipiente com água por 24 horas a temperatura ambiente. Primeiramente, foi feita a pesagem dos corpos de prova imersos em água em uma balança de precisão. Para a realização deste método cada bloco foi colocado dentro de um béquer com água, que possuía uma cesta de metal, onde corpo de prova é introduzido e pesado. Por último os blocos foram retirados e enxugados com papel toalha para que assim pudesse ser feita a pesagem do corpo de prova úmido em uma balança de precisão.

Posteriormente, eles foram colocados em estufa a 60 °C, a fim de secá-los. Após serem secados, os corpos de prova foram novamente pesados e medidos seus comprimentos, larguras e alturas.

4.2.7 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES

Foram determinadas as propriedades tecnológicas das amostras, através da avaliação das propriedades físicas e mecânicas, apresentadas em seguida.

4.2.7.1 PROPRIEDADES FÍSICAS

As propriedades físicas determinadas no trabalho foram a Retração Linear à queima, a Perda de densidade, a Absorção de Água, a Porosidade Aparente e a Densidade Aparente.

4.2.7.1.1 RETRAÇÃO LINEAR (RL)

A Retração Linear é consequência do processo de sinterização que se define pelo agrupamento de moléculas que compõem a cerâmica à medida que a temperatura aumenta, estando sempre abaixo do ponto de fusão do material, fazendo com que as imperfeições e poros diminuam, aumentando assim a densidade do material e diminuindo suas dimensões (JUNG, M., 2012).

A Retração Linear (RL) relaciona as dimensões da amostra a seco e queimada, utilizando a equação 2:

$$RL(\%) = \frac{C_s - C_q}{C_s} \times 100 \quad (2)$$

Onde, C_s é o comprimento (mm) da amostra a seco antes do teste de Arquimedes e C_q é o comprimento (mm) da amostra após a secagem na estufa.

4.2.7.1.2 PERDA DE DENSIDADE

A Perda de densidade indica o teor de matéria orgânica e umidade presente na amostra através da diminuição de peso desta, que ocorre com o aumento de temperatura (GRUN, E., 2007). Para calcular a perda ao fogo é utilizado a equação3:

$$PF(\%) = \frac{Ms - Mq}{Ms} \times 100 \quad (3)$$

Onde, Ms é a massa (g) da amostra após secagem a 60 °C e Mq a massa (g) após aquecida a 260 °C.

4.2.7.1.3 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água apresenta a característica de expansão da amostra, através do ganho de massa ao absorver o líquido, no caso a água, quando em contato com a mesma. Para o cálculo da absorção de água é utilizado a equação 4:

$$AA(\%) = \frac{Mu - Mq}{Mq} \times 100 \quad (4)$$

Onde, Mq é a massa (g) após aquecida a 260 °C e Mu é a massa (g) úmida.

4.2.7.1.4 POROSIDADE APARENTE

A Porosidade Aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. Esse tipo de porosidade tem a característica de conectar-se com a superfície (RICHERSON, 1992). Para o cálculo da porosidade aparente é utilizado a equação 5:

$$PA(\%) = \frac{Mu - Mq}{Mu - Mi} \times 100 \quad (5)$$

Onde, M_q é a massa (g) após aquecida a 260 °C, M_u é a massa (g) úmida e M_i é a massa (g) imersa em água.

4.2.7.1.5 DENSIDADE APARENTE

A densidade aparente (DA) considera o volume total da amostra, inclusive o espaço vazio entre os grãos que a compõem (SALVAGNINI, 2006). Para a determinação da densidade aparente, foi levado em consideração o peso dos corpos-de-prova secos, imersos e úmidos, sendo obtida através da equação 6:

$$DA(\text{g/cm}^3) = \frac{M_q}{M_u - M_i} \times \rho_{\text{água}} \quad (6)$$

Onde, M_u é a massa (g) úmida, M_q é a massa (g) aquecida a 260 °C, M_i é a massa (g) imersa em água, $\rho_{\text{água}}$ é 1 g/cm³.

4.2.7.2 PROPRIEDADE MECÂNICA

A propriedade mecânica avaliada foi a Tensão de Ruptura a Flexão. Por fim, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio mecânico de flexão, em três pontos, com distância de 40 mm entre os apoios, para qual foi utilizada uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Esse ensaio foi realizado no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da Universidade Federal da Paraíba, no equipamento AG X 10KN da Shimadzu.

4.2.7.2.1 TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO (TRF)

Tensão de Ruptura a Flexão indica a resistência máxima suportada pelo corpo de prova quando submetido a um ensaio de flexão. Essa propriedade é calculada a partir da equação 7:

$$TRF(MPa) = 3FxL/2bxh^2 \quad (7)$$

Onde, F é a carga de ruptura (N), L é a distância entre os apoios do suporte (mm), b é a largura da amostra na região da ruptura (mm) e h é a altura da amostra na região da ruptura (mm).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados a seguir foram conseguidos a partir de análises realizadas das características física, química e mineralógica das matérias-primas e das propriedades tecnológicas das amostras.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS CERÂMICOS

5.1.1 ANÁLISE MINERALÓGICA POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A partir da técnica de difração de raios X, foi possível determinar a composição mineralógica presentes no resíduo da cerâmica vermelha a 700 °C. A Figura 10 ilustra as principais fases encontradas.

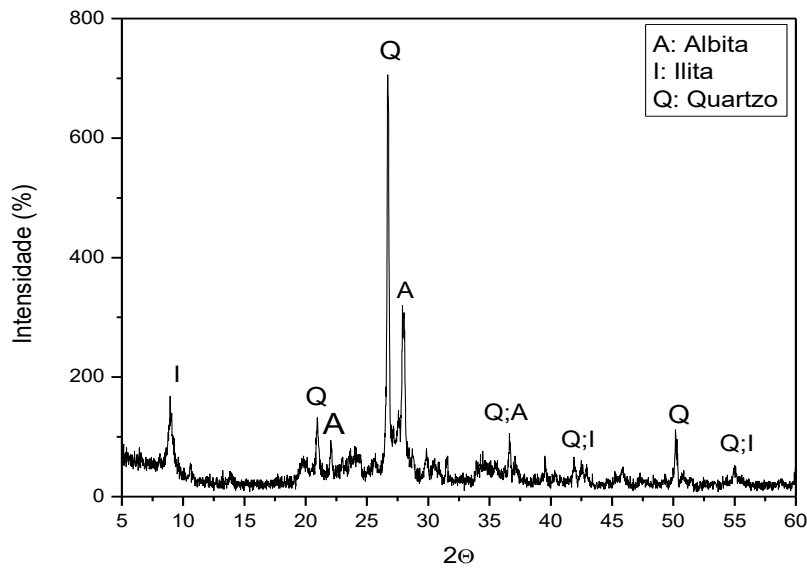


Figura 10. Difratograma do resíduo da cerâmica vermelha a 700 °C. Fonte: elaborada pelo autor.

Os resultados encontrados na análise de DRX foram identificados através das siglas relativas aos nomes dos minerais presentes. É possível verificar, ao observar o difratograma a presença predominante, de SiO_2 , sob sua forma livre, o quartzo. O quartzo é um mineral encontrado naturalmente nas argilas. Ele atua como preenchimento, sendo a fase estável à temperatura de sinterização, reduzindo a retração e distorção da peça cerâmica e garantindo a integridade estrutural da peça (ALBUQUERQUE, F.R.; 2007).

Foram encontrados também os minerais albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) e ilita ($(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,\text{H}_2\text{O}]$) que apresentam em sua constituição elementos que atuam como fundentes, tais como o cálcio, o sódio e o potássio, que baixam a temperatura de fusão do material.

A albita, é rica em sódio, forma uma série isomórfica contínua de solução sólida nessa temperatura. Esta série é denominada de plagioclásio e varia desde a albita pura. A albita pertence à mesma família, do feldspato, o qual tem a característica de reagir com outros constituintes, reduzindo a temperatura de sinterização das peças (ALBUQUERQUE, F.R.; 2007). No resíduo da cerâmica vermelha em estudo, ela se apresenta em grande quantidade, aparecendo nos picos a 22°, 28° e 37°.

A ilita difere-se das micas bem cristalizadas, por ter uma menor substituição de alumínio no lugar do silício, uma menor carga estrutural, menos potássio interlamelar e menor regularidade no empilhamento das camadas. Matérias-primas contendo ilita são largamente

usadas na produção de artefatos de base vermelha. Esses minerais têm forte característica de fundentes, pois são fontes de potássio, que é o principal agente de sinterização da massa cerâmica (CASTRO, R. J. S.; 2012). No resíduo da cerâmica vermelha a 700 °C, a ilita, aparece nos picos 9°, 42° e 55°.

5.2 CARACTERIZAÇÃO DO PET (poli(tereftalato de etileno))

5.2.1 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

O resultado da análise granulométrica do PET é apresentado na Figura 11 representada pela curva acumulativa.

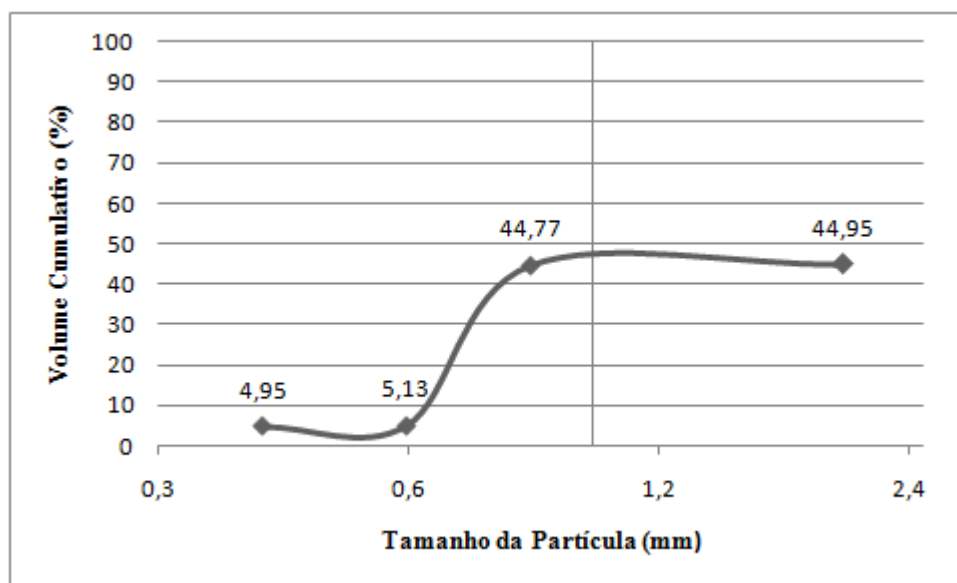


Figura 11. Porcentagem acumulativa das partículas do PET. Fonte: elaborado pelo autor.

Na curva da Figura 11 nota-se as porcentagens acumulativas do volume das partículas do PET em função do seu diâmetro. Os diâmetros máximos para as porcentagens acumulativas de 4,95%, 5,13%, 44,77% e 44,95% do volume total da amostra foram determinadas. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4. PET análise granulométrica.

| Diâmetro (mm) | D4,95 | D5,13 | D44,77 | D44,95 |
|------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| Volume cumulativo (%) | 0,400 | 0,595 | 0,841 | 2,000 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Os resultados sugerem a presença de partículas grandes presente no resíduo de PET, uma vez que 44,95% do volume total da amostra compreendem diâmetros menores que 2 mm, 44,77% do volume total com diâmetro menor que 0,841 mm, 5,13% do volume total com diâmetros menores que 0,595 mm e 4,95% do volume total com diâmetros menores que 0,4 mm.

5.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TECNOLÓGICAS

Os resultados obtidos das propriedades física e mecânica dos corpos de prova produzidos no trabalho são apresentados a seguir.

5.3.1 RETRAÇÃO LINEAR APÓS TRATAMENTO TÉRMICO

Os resultados obtidos para a retração linear das amostras podem ser observados na Figura 12.

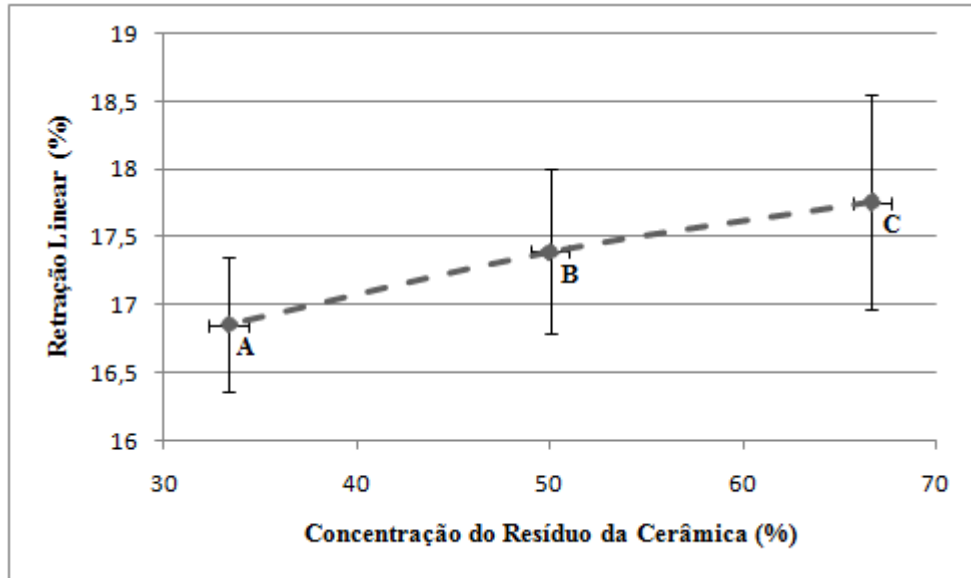


Figura 12. Análise da Retração Linear após tratamento térmico. Fonte: elaborada pelo autor

A Figura 12 corresponde aos resultados de retração linear de queima das formulações. Nota-se um aumento da retração linear de queima com a elevação da concentração do resíduo da cerâmica. Isso se deve ao fato de que, com o aquecimento o resíduo da cerâmica elimina a matéria orgânica presente nas amostras caracterizando uma diminuição no tamanho dos corpos de prova, ou seja, com uma maior retração.

Pode-se observar ainda que as amostras com maior teor de resíduo de PET apresentam uma menor retração, isto pode estar associado ao fato da fluidez do PET à temperatura submetida, fazendo com que o PET seja capaz de preencher os espaços vazios presentes e diminuindo o volume de poros e, conseqüentemente, diminuindo a retração da amostra.

5.3.2 PERDA DE DENSIDADE

A Figura 13 mostra a curva obtida para a propriedade de perda de densidade.

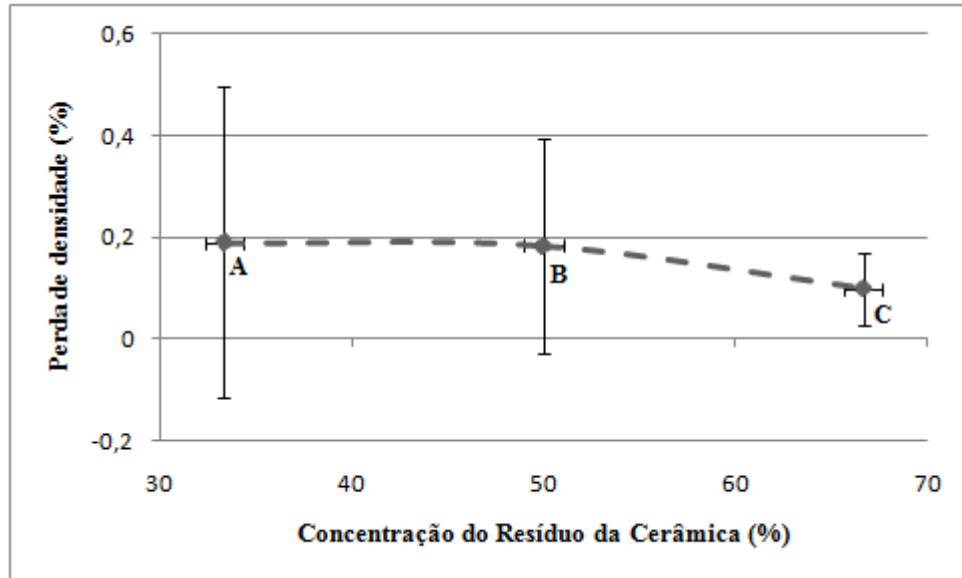


Figura 13. Análise de perda de densidade. Fonte: elaborada pelo autor.

A partir da análise da Figura 13, é possível observar que à medida que aumenta o resíduo da cerâmica vermelha, há uma diminuição da perda de densidade das amostras, e isso ficou mais aparente quando se utilizou o teor 66,66% do resíduo da cerâmica vermelha com PET (formulação C).

Quando se tem um maior teor do resíduo de PET na amostra, se tem uma maior perda de densidade, isto pode ser associado a uma possível degradação do PET, visto que, o seu ponto de fusão é 260 °C.

5.3.3 POROSIDADE APARENTE

A Figura 14 mostra curva obtida para a propriedade de porosidade aparente.

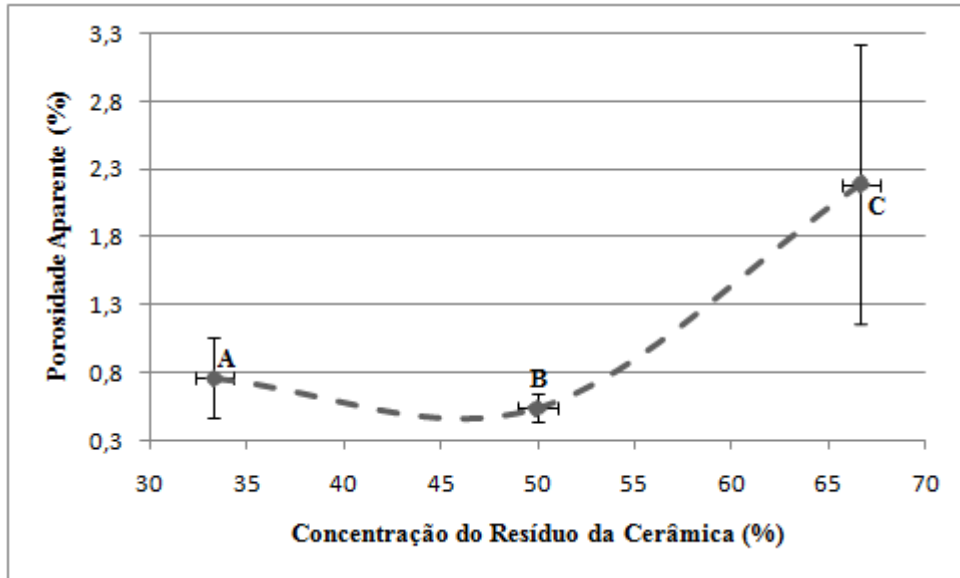


Figura 14. Análise da Porosidade Aparente. Fonte: elaborada pelo autor.

Pode-se observar na Figura 14 que, para as amostras contendo o resíduo da cerâmica vermelha com uma concentração de 33,33% (formulação A), houve uma diminuição na porosidade aparente. Para uma concentração de 50% (formulação B), a porosidade aparente aumentou 16,67% comparada com a amostra A, e para uma concentração de 66,66% (formulação C), a porosidade aumentou 33,33% comparada à amostra A e 16,66% comparada a amostra B.

5.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A Figura 15 mostra curva obtida para a propriedade de absorção de água.

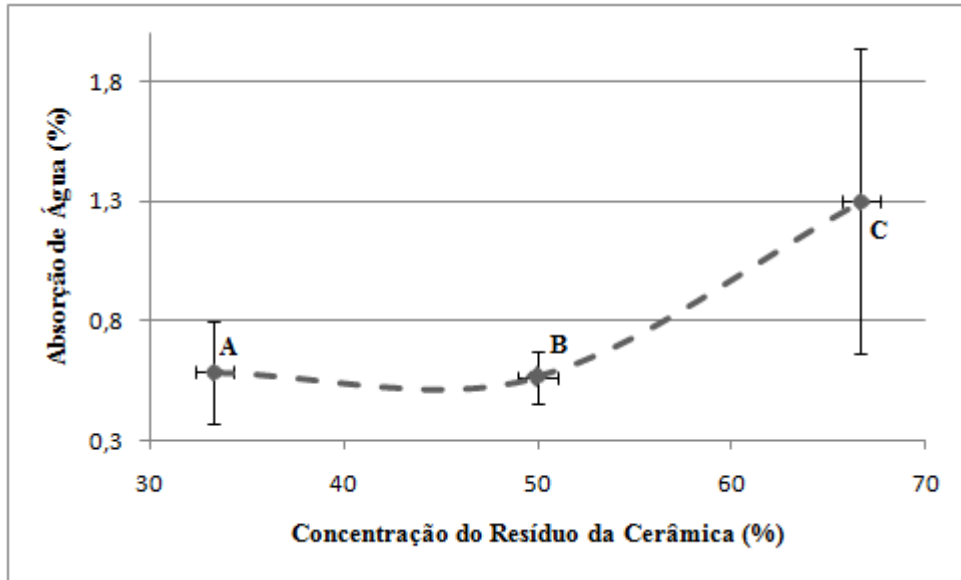


Figura 15. Análise da Absorção de Água. Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 15, é possível perceber, de maneira geral, uma coerência entre a propriedade de absorção de água com a porosidade aparente, ou seja, as curvas das duas propriedades estão bastante semelhantes. Esse fato acontece, pois a absorção de água está bastante relacionada com a porosidade na estrutura do material.

Como a temperatura de obtenção do resíduo da cerâmica vermelha foi a 700 °C percebe-se um aumento da absorção de água com a adição de 66,66% (formulação C) do resíduo da cerâmica vermelha e uma diminuição da mesma com adição de 33,33% (formulação A) do resíduo da cerâmica.

5.3.5 DENSIDADE APARENTE

A Figura 16 mostra curva obtida para a propriedade de densidade aparente.

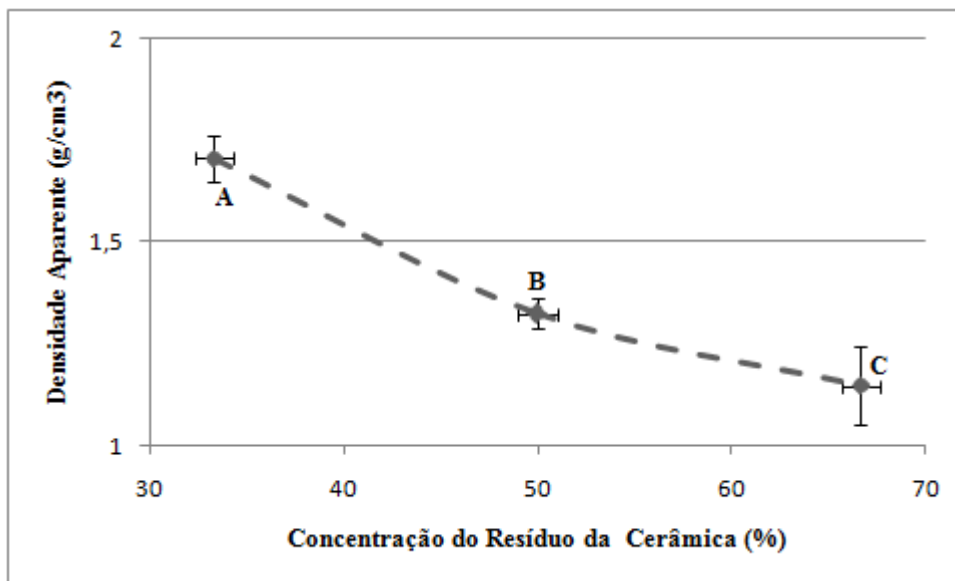


Figura 16. Análise da Densidade Aparente. Fonte: elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 16, podemos observar que as amostras contendo o resíduo da cerâmica vermelha com uma concentração de 66,66% (formulação C) tiveram uma diminuição da densidade aparente e, com a diminuição do teor de cerâmica vermelha temos o aumento da densidade aparente.

Visto que, o aumento pode estar associado aos valores de absorção de água e da porosidade aparente, quando ambos apresentam baixos valores, tornam o corpo cerâmico mais compacto ou uma densificação mais efetiva.

5.3.6 TENSÃO DE RUPTURA A FLEXÃO

A Figura 17 mostra curva obtida para a propriedade de resistência mecânica à flexão em relação ao resíduo da cerâmica vermelha.

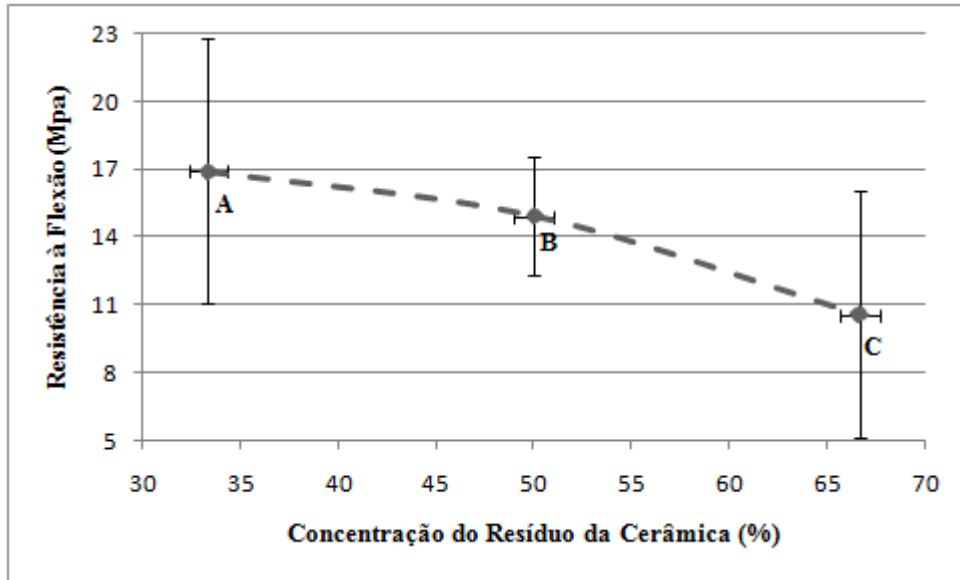


Figura 17. Análise da Tensão de Ruptura a Flexão. Fonte: elaborado pelo autor.

Pode-se perceber, analisando a Figura 17, que a resistência mecânica à flexão diminuiu com uma concentração do resíduo da cerâmica vermelha de 50% (formulação B) e diminuiu ainda mais com a concentração de 66,66% (formulação C) do mesmo resíduo.

O resíduo da cerâmica vermelha é prejudicial à resistência mecânica das peças, pois suas partículas dificilmente aderem à matriz de PET, tornando-se pontos de concentração de tensão, reduzindo assim, a capacidade de resistir a um esforço, levando à consequente ruptura do material. Por isso, quanto maior for o teor do resíduo da cerâmica vermelha adicionado ao PET, mais pontos de concentração de tensão irão existir, de forma que reduzirá a tensão suportada.

6 CONCLUSÕES

Após analisar e interpretar os resultados dos ensaios é possível concluir, que:

- Constatou-se retração em todas as amostras, explicadas através de que com uma maior quantidade de PET apresenta uma fluidez capaz de preencher os espaços vazios presentes e diminuindo o volume de poros e, conseqüentemente, diminuindo a retração da amostra.
- Os maiores valores de perda de densidade foram encontrados para o resíduo da cerâmica obtido com a formulação A com 33,33%. Isso se deu, pois quando se tem um maior teor do resíduo de PET na amostra, se tem uma maior perda de densidade, o que pode está associado a uma possível degradação do PET, visto que, o seu ponto de fusão é 260 °C.
- A amostra que continha o resíduo da cerâmica vermelha na formulação A (1:2 Cerâmica/PET) foi a que teve o maior valor para densidade aparente. Visto que, o aumento da concentração do resíduo cerâmico ao PET, pode estar associado aos valores de absorção de água e da porosidade aparente, quando ambos apresentam baixos valores, tornam o corpo cerâmico mais compacto ou uma densificação mais efetiva.
- Quanto maior for o teor do resíduo da cerâmica vermelha adicionado ao PET, mais pontos de concentração de tensão irão existir, de forma que reduzirá a tensão suportada, ou seja, menor resistência mecânica à flexão.

Com isso, fica comprovado que a adição do PET ao resíduo cerâmico influencia de forma diferente nas características e propriedades das diferentes formulações. E, a partir desses resultados pode-se observar que a formulação A (1:2 Cerâmica/PET) é a que apresenta melhores características e propriedades.

REFERÊNCIAS

ABC - Associação Brasileira de Cerâmica. Informações técnicas, 2011.

ABEPET – Associação Brasileira dos Fabricantes de Embalagens PET. Reciclagem de Embalagens PET, 2011.

ABIQUIM – Associação Brasileira das Indústrias Químicas. Os plásticos, 2004.

ALBUQUERQUE, F.R.; SANTOS, I.M. G.; LIMA, S. J. G.; SOLEDADE, L. E. B.; SOUZA, A. G.; MARTINELLI, A. E. Planejamento Experimental Aplicado à Otimização de Massas Cerâmicas Contendo Matérias-Primas Naturais. Cerâmica vol.53 nº327.São Paulo, Julho/Setembro de 2007.

ALEXANDRE, M., DUBOIS, P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, Materials Science and Engineering, v. 28, p. 1-63, 2000.

AMMALA, A., BELL, C., DEAN, K. Poly(ethylene terephthalate) clay nanocomposites: Improved dispersion based on an aqueous ionomer, Composites Science and Technology, v. 68, p. 1328-1337, 2008.

CALLISTER, W. D. Jr. (2007). Materials science and engineering: An introduction. Seventh Edition, United States of America, John Wiley & Sons.

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

DANA, J. D.; HURLBUT, J. Manual de Mineralogia, Rio de Janeiro, Ao Livro Técnico.S.A., 1969, v. 2, 642 p.

DAVIS, C. H., MATHIAS, L. J., GILMAN, J. W., SCHURALDI, D. A., SHIELDS, J. R., TRULOVE, P., SUTTO, T. E., DELONG, H. C. Effects of melt-processing conditions on the quality of poly(ethylene terephthalate) montmorillonite clay nanocomposites, *Journal of Polymer Science: Part B: Polymer Physics*, v. 40, p. 2661-2666, 2002.

FARIA, K. C. P.; GURGEL, R. F.; HOLANDA, J. N. F. (2012). Influência da adição de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha. SIMPÓSIO MATÉRIA, RIO DE JANEIRO, RJ.

FONSECA, A. H, L.; *Reciclagem: o primeiro passo para a preservação ambiental*. Bacharel em Administração – Centro Universitário Barra Mansa, 2013.

KAHN, H. *Difração de raios X*. PMI-2201.

GOMES, C. B., *Técnicas analíticas instrumentais aplicadas a geologia – Microsonda eletrônica: princípios e aplicações na geologia*. Edgard Blucher, 1985.

GOUVEIA, F. P.; SPOSTO, R. M.; *Incorporação de chamote em massa cerâmica para a produção de blocos. Um estudo das propriedades físico-mecânicas*. *Cerâmica* Vol. 55no. 415-419. São Paulo – 2009.

GRIM, R. E., “*Clay Mineralogy*” 1ª ed, Mc. Graw-Hill Book Company, New York, 1953.

GRIPPI, Sidney. *Lixo. Reciclagem e sua história: Guia para as prefeituras brasileiras*. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

GRUN, E. *Caracterização de Argilas Provenientes de Canelhinha/SC e Estudo de Formulações de Massas Cerâmicas*. Dissertação de Mestrado. Joinville, 2007.

JUNG, M.; CAMISA, I. de S.; ALBANAZ, I.; PEREIRA, S. L. da S.; CARGNIN, M. *Comparativo entre diferentes métodos de determinação da retração linear de placas cerâmicas*. 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul, 2012.

LANES, P.G.; DIAS, F.M.; DUTRA, J.F.; GUIMARÃES, I.F., Reaproveitamento do Resíduo de Cerâmica Vermelha na Fabricação de Tijolos Ecológicos, 22º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, 2016.

LENG, Y. Materials Characterization: Introduction To Microscopic And Spectroscopic Methods. Ed. John Wiley and Sons, 384p, 2008.

MEIRA, J. M. L. (2001). Argilas: o que são, suas propriedades e classificações. Comunicações técnicas. 01 – 07.

MENEZES, R.R., NEVES, G.A., FERREIRA, H.C., et al., “Recycling of Granite Industry Waste from the Northeast Region of Brazil”, Environmental Management and Health, v. 13, pp. 134-141, 2002.

MENEZES, R.R., FERREIRA, H.S., NEVES, G.A., et al., “Use of Granite Sawing Wastes in the Production of Ceramic Bricks and Tiles”, Journal of the European Ceramic Society, v. 25, pp. 1149- 1158, 2005.

MENEZES, R. R.; ALMEIDA, R. R.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. S.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. ‘‘Use of kaolin processing waste for the production of ceramic brick and roof tiles’’. Matéria (Rio J.) v.12, n°1, Rio de Janeiro, 2007.

MORAIS, A. S. C. et. al. (2010). Recycling of Fluorescent Lamp Glass into Clayey Ceramic. In: TMS 2011 - 140th Annual Meeting & Exhibition, 2011, San Diego. EPD Congress 2011, 2011. v. 1. p. 1053-1060.

MOREIRA, J.M.S., MANHÃES, J.P.V.T., HOLANDA, J.N.F., “Reaproveitamento de Resíduo de Rocha Ornamental Proveniente do Noroeste Fluminense em Cerâmica Vermelha”, Cerâmica, v. 51, n. 319, pp. 180-186, 2005.

NORTON, F. H. (1973). Introdução à Tecnologia das Cerâmicas. Ed. da USP, São Paulo, SP.
PAZ, Y. M.; MORAIS, M. M. de; HOLANDA, R. M. de. Desenvolvimento Econômico Regional e o Aproveitamento de Resíduos sólidos no Pólo da Indústria da Cerâmica Vermelha de Pernambuco. Pernambuco, 2013.

PRACIDELLI, S.; MELCHIADES, F. G.; Importância da composição granulométrica de massas para a cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, São Paulo, p. 35, janeiro/abril 1997.

RAY, S. S., OKAMOTO, M. Polymer/layeredsilicatenanocomposites: a reviewfrompreparationtoprocessing. *Progress in Polymer Science*, v. 28, p. 1539-1641, 2003.

REED, S. J. (1995). *Principles of ceramics processing*. 2^a.ed. New York: John Wiley & Sons.

RICHERSON, D. W. *Modern Ceramic Engineering. Properties, Processingand Use in Design*.SegundaEdição. Editora Marcel Dekker, 1992.

SALVAGNINI, W. www.hottopos.com.br/regeq3/densidad.htm> acesso em: julho, 2006.

SANTOS, P. S. (1989). *Ciência e Tecnologia de Argilas*. vol. 1, Ed. São Paulo: Edgar Blucher, 408 p.

SANTOS, O. C. (2007). *Influência da adição de rejeitos cerâmicos nas propriedades de cerâmica vermelha da região do recôncavo baiano*, Natal/RN, 80 p. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. SENAI – Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas (2010).

SILVA, E. O. S. (2007). *Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil*. 75 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

SIRELLI, L. *Comportamento Térmico de Cristais de Poli(tereftalato de Etileno) por Difração de Raios-X a Altos ângulos*. 2004. 109 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Polímeros) - Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Orientador: Marcos Lopes Dias.

SOARES, J. M. D., ZETTI, R. R., TAVARES, I. S., PINHEIRO, R. B. (2004). *Panorama Sócio-Econômico das Indústrias de Cerâmica Vermelha da Região Central do Estado do Rio Grande do Sul*, *Cerâmica Industrial*, 39- 46.

SOUZA, L.P.F., MANSUR, H.S., “Production and Characterization of Ceramic Pieces Obtained by slip Casting Using Powder Wastes”, *Journal of Materials Processing Technology*, v. 145, pp. 15-20, 2004.

VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. (2009). Incorporation of solid waste in red ceramic – An updated review. *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, pp. 881 – 905.

UNIVERSITAT BARCELONA, *Materials: Poli(tereftalato de etileno)*. Acesso em Abril de 2019.