PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO ORNAMENTAL PRODUZIDO COM A ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU

MARIANA VASCONCELOS FERREIRA DE ARAÚJO

MACAÉ-RJ

2018

MARIANA VASCONCELOS FERREIRA DE ARAÚJO

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO ORNAMENTAL PRODUZIDO COM A ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, na linha de Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação, área de atuação Gestão Ambiental das Cidades, Gerenciamento de Resíduos e Efluentes.

Orientador(a): D.Sc Angélica da Cunha dos Santos

MACAÉ-RJ

2018

Avaliação de Revestimento Cerâmico Ornamental Produzido com a Adição de Resíduos de Pneu

Macaé-RJ, 78 Páginas.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental, do Instituto Federal Fluminense, Campus Macaé, na linha de Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação, área de atuação Gestão Ambiental das Cidades, Gerenciamento de Resíduos e Efluentes.

Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia Fluminense, 2018.

1. Cerâmica
2. Tijolo Ornamental
3. Resíduo
4. Pó de borracha

Dissertação intitulada **AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO ORNAMENTAL PRODUZIDO COM A ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU**, elaborada por **Mariana Vasconcelos Ferreira de Araújo** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na linha de Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação, área de atuação Gestão Ambiental das Cidades, Gerenciamento de Resíduos e Efluentes.

Aprovado em: 28/09/2018

Banca Examinadora:

Angélica da Cunha dos Santos, Doutora em Engenharia e Ciências dos Materiais/ Universidade Estadual do Norte Fluminense, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense) - Orientadora

Maísa Luciana Santos de Souza/ Doutora em Química Biológica/ Instituto de Bioquímica Médica – CCS , Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)

Angelus Giuseppe Pereira da Silva, Doutor em Ciências Técnicas (Universidade Técnica de Viena, Austria), Universidade Estadual do Norte Fluminense (UENF)

Dedico este trabalho à minha família, em especial à minha mãe, Solange Maria Vasconcelos Ferreira de Araújo, por ter me ensinado o valor da educação e do conhecimento e por ter sempre me incentivado a seguir. Por ter me oferecido o seu melhor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela permissão de estar aqui e pela força para realizar tudo isso.

Agradeço à minha família, aos meus pais e irmãos pelo amor, pelo incentivo e apoio de toda a vida. Por me fazerem acreditar sempre que sou capaz.

Agradeço aos meus primos, tios e tias pela torcida e boas vibrações de sempre.

Agradeço à amiga Carolina Sancho, companheira de trabalhos, pela parceria e colaboração em todo esse processo.

Agradeço à minha orientadora, Professora Angélica Cunha dos Santos, pela amizade, compreensão, pelos valorosos direcionamentos e pelo apoio sempre presente.

Agradeço ao meu coorientador, Professor Vicente de Paulo Oliveira, pela confiança e pelo suporte sempre que necessário.

Agradeço às estagiárias Thaís Benedito e Jéssica Berbat, que tanto contribuíram com esse trabalho.

Agradeço ao Professor José Nilson, da Universidade Estadual do Norte Fluminense, por ter disponibilizado os laboratórios para a realização dos ensaios deste trabalho.

Agradeço ao Sr. Rodolfo Gama, da Arte Cerâmica Sardinha, pelo incentivo e pelo fornecimento de matérias-primas.

Agradeço a MB Borrachas, empresa localizada em Juiz de Fora, pela atenção e apoio no fornecimento de matérias-primas.

“A coisa mais difícil é a decisão de agir. O resto é apenas tenacidade. Os medos são tigres de papel. Você pode fazer qualquer coisa que você decidir fazer. Você pode agir para mudar e controlar sua vida e o procedimento. O processo é a sua própria recompensa.”

(Amelia Earhart)

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Figura 1 – Caracterização e classificação de resíduos resíduos, conforme NBR 10004/2004..... 10
Figura 2 – Fluxograma do processo produtivo de cerâmicas, entradas e saídas de insumos..... 18
Figura 3 – Distribuição da produção nacional de cerâmicas vermelhas por região..... 20
Figura 4 – Organização da gestão dos resíduos de pneus em fim de vida, na Europa em 2015..... 27

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Figura 1 – Fluxograma do processo de fabricação de cerâmicas vermelhas..... 43
Figura 2 – Fluxograma das etapas envolvidas neste projeto..... 56
Figura 3 – Difratograma de Raios X da massa argilosa..... 59
Figura 4 – Retração linear e absorção de água para massas cerâmicas queimadas a 1050ºC e 1150ºC..... 61
Figura 5 – Massa específica aparente a temperaturas de queima de 1050ºC e 1150ºC..... 63
Figura 6 – Porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão para massas cerâmicas queimadas a 1050ºC e 1150ºC..... 64
Figura 7 – Mosaico com corpos de prova sinterizados a 1050ºC..... 66
Figura 8 – Mosaico com corpos de prova sinterizados a 1150ºC..... 66
Figura 9 – Tijolos comerciais fornecidos pela Cerâmica X..... 67
Figura 10 – Comparação da Comparação da Absorção de Água dos corpos de provas laboratoriais e comerciais..... 68
Figura 11 – Comparação da Tensão de ruptura à flexão dos corpos de provas laboratoriais e comerciais..... 69

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Tabela 1 – Consumo de energia pelo setor de cerâmica do Brasil de 2011 a 2016 (em %).... 48
Tabela 2 – Composição química das Matérias primas (Fluorescência)..... 60
Tabela 3 – Retração linear na queima (em %) dos corpos de prova..... 60
Tabela 4 – Absorção de água (em %) dos corpos de prova..... 61
Tabela 5 – Massa Específica aparente (g/cm³) dos corpos de prova..... 62
Tabela 6 – Porosidade aparente (%) dos corpos de prova..... 64
Tabela 7 – Tensão de Ruptura à Flexão (MPa) dos corpos de prova..... 65

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCERAM – Associação Brasileira de Cerâmica

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELPRE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais

ANIP – Associação Nacional da Indístria de Pneumáticos

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

CTF – Cadastro Técnico Federal

DRM-RJ – Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IE – Instrumentos Econômicos

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

NBR – Norma Brasileira aprovada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas

PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

RSI – Resíduos Sólidos Industriais

SEBRAE – Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas

TEC – Tarifa Externa Comum

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO ORNAMENTAL PRODUZIDO COM A ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU

RESUMO

A questão ambiental e sustentabilidade do planeta têm sido bastante discutidas em fóruns nacionais e internacionais e assumido um papel importante nas comunidades. São temas de responsabilidade coletiva, necessitando da adoção de práticas de produção e consumo sustentáveis. Reduzir e/ou transformar os desperdícios contínuos em insumo para a mesma unidade de produção ou para diferentes instalações industriais é essencial para diminuir o consumo de recursos naturais e para evitar ou minimizar a disposição final desses resíduos no meio ambiente. A incorporação de resíduos de atividades industriais, tais como o pneu em final de vida útil, considerado um resíduo combustível, em produtos cerâmicos pode trazer alguns benefícios para a própria indústria de cerâmica vermelha, como a redução do custo e da quantidade de matéria prima utilizada e a redução do consumo de combustível durante a queima. Primeiramente, neste trabalho, buscou-se, por meio de revisão da literatura, identificar as principais alternativas para aproveitamento de resíduos de pneus inservíveis, a legislação em vigor para este tipo de resíduo e os aspectos ambientais da sua valorização como matéria-prima alternativa na indústria cerâmica. Posteriormente, esta pesquisa visou a avaliar o efeito da incorporação de diferentes teores de resíduo de pneus nas propriedades tecnológicas de revestimentos cerâmicos para usos não estruturais, do tipo plaquetas de tijolos aparentes, sinterizados em diferentes temperaturas. Para isso, foram confeccionados corpos de prova com incorporações do resíduo de 0; 0,5; 1; 1,5 e 2% em massa argilosa proveniente da empresa X. Os corpos de prova foram prensados com pressão uniaxial de 20 MPa e queimadas a 1050 e 1150ºC. Posteriormente, as propriedades tecnológicas dos produtos, como retração linear, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão, foram analisadas. Os resultados obtidos foram comparados aos produtos comercializados pela mesma empresa X, indicando que, de forma geral, a incorporação dos resíduos de pneu influenciou favoravelmente as propriedades dos tijolos fabricados.

Palavras-chave: Tijolos aparentes. Resíduos industriais. Reaproveitamento.

EVALUATION OF ORNAMENTAL CERAMIC COATING PRODUCED WITH THE ADDITION OF TIRE RESIDUES

ABSTRACT

The environmental issue and sustainability of the planet have been widely discussed in national and international forums and assumed an important role in the communities. They are issues of collective responsibility, requiring the adoption of sustainable production and consumption practices. Reducing and/or transforming continuous waste into input into the same production unit or to different industrial facilities is essential to reduce the consumption of natural resources and to avoid or minimise the final disposition of these residues in the environment. The incorporation of waste from industrial activities, such as the end-of-life tyre, considered a fuel residue, in ceramic products may bring some benefits to the red ceramic industry itself, such as reducing the cost and the amount of raw material used and the reduction of fuel consumption during burning. Firstly, in this work, it was verified, through a literature review, the main alternatives for the use of waste tires, the legislation in force for this type of residue and the environmental aspects for its valorization as an alternative raw material in the ceramics industry. Subsequently, this research aimed to evaluate the effect of the incorporation of different concentrations of tyre residue on the technological properties of ceramic coatings for non-structural uses, such as facing bricks, burned in different temperatures. The specimens were prepared with incorporations of 0; 0.5; 1 1.5 and 2% of the residue in the clay from company X. Then, they were pressed with uniaxial pressure of 20 MPa and burned at 1050 and 1150 ºC. Subsequently, the technological properties of the products, such as linear shrinkage, water absorption, apparent porosity and flexural stresss at rupture, were analyzed. The results obtained were compared to the products marketed by the same company X, indicating that, in general, the incorporation of the tyre residues influenced favorably the properties of the manufactured bricks.

Keywords*: Facing bricks. Industrial waste. Resuse.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS..... vii

LISTA DE TABELAS..... vii

LISTA DE ABREVITURAS E SIGLAS..... ix

RESUMO..... x

ABSTRACT..... xi

APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO..... 1

ARTIGO CIENTÍFICO 1: VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA EM CERÂMICAS: O CASO DOS PNEUS INSERVÍVEIS..... 04

1. INTRODUÇÃO..... 05

2. REVISÃO DA LITERATURA..... 08

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... 29

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 31

ARTIGO CIENTÍFICO 2: AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO ORNAMENTAL PRODUZIDO COM A ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU..... 37

1. INTRODUÇÃO..... 38

2. REVISÃO DA LITERATURA..... 40

3. MATERIAL E MÉTODO..... 56

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... 58

5. CONCLUSÃO..... 69

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 72

APÊNDICES 77

APÊNDICE A – Cronograma de Trabalho..... 77

APÊNDICE B – Fluxograma das etapas experimentais envolvidas no projeto..... 78

APÊNDICE C – Artigo publicado em ScientiaTec: Revista de Educação, Ciência e Tecnologia do IFRS..... 79

APRESENTAÇÃO

Os principais problemas ambientais provocados pelos humanos decorrem do uso do meio ambiente para obter os recursos necessários para produzir os bens e serviços que consomem e dos despejos de materiais e energia não aproveitados no meio ambiente (BARBIERI, 2011).

Com o crescimento populacional, a demanda por produtos industrializados aumentou. Demanda que também cresceu devido ao consumo alienado. Estes produtos possuem ciclos de vida cada vez menores e muitas vezes são descartados de maneira inadequada. Porém, há uma forte tendência em buscar alternativas de utilização racional dos recursos naturais e em aproveitar muitos dos resíduos lançados no meio ambiente. A redução, a reutilização, a reciclagem e também a recuperação energética dos resíduos industriais tornaram-se operações inevitáveis dentro da cadeia produtiva de uma empresa.

Segundo a ABNT (2004), um dos principais causadores de impactos ambientais são os chamados resíduos sólidos, que se encontram no estado sólido ou semi-sólido e resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição.

Os pneus inservíveis, por exemplo, são um crescente e volumoso resíduo sólido. Entende-se como pneus inservíveis aqueles que não possuem mais nenhuma possibilidade de recauchutagem ou recapagem. Eles poluem o solo, a água, o ar, o mar e contribuem para uma séria questão de saúde pública atual, pois podem acumular água favorecendo a profileração do *Aedes Egypt*, mosquito transmissor de doenças como dengue, *zika* e *chikungunya*. Muitas vezes, são dispostos em terrenos a céu aberto, sem qualquer controle ou fiscalização, acumulando-se em pilhas. Devido ao seu alto poder calorífico, as pilhas de pneus acumuladas no ambiente podem provocar incêndios de grandes dimensões e difíceis de controlar.

No Brasil, a Resolução CONAMA n^{o} 258 de 1999 proibiu a destinação final de pneus no meio ambiente, tais como o abandono ou lançamento em corpos de água, terrenos baldios ou alagadiços, a disposição em aterros sanitários e a queima a céu aberto. Ela determinou ainda que os fabricantes e os importadores de pneus novos devem coletar e dar destinação adequada aos pneus inservíveis existentes no território nacional, tendo metas de destinação a cumprir (BRASIL, 1999). Além disso, no Brasil, os distribuidores, os revendedores, os destinadores, os consumidores finais de pneus e o Poder Público devem, em conjunto com os fabricantes e importadores, implementar procedimentos para a coleta e logística reversa dos pneus inservíveis (BRASIL, 2010).

Os pneus podem ser utilizados como combustível alternativo, quando reciclados podem ser transformados em tapetes para automóveis, solado de sapato, pisos industriais, pisos de quadras

esportivas, borrachas de vedação. O pó gerado na recauchutagem e seus restos moídos podem ser usados na composição de asfalto de maior elasticidade e durabilidade.

O pneu inservível é atrativo para utilização como combustível alternativo ao coque de petróleo e carvão mineral na indústria cimenteira devido ao seu elevado poder calorífico (MARQUES, 1999). A recuperação de energia contida nos resíduos contribui adicionalmente para a conservação de combustíveis fósseis não renováveis, reduzindo os custos de fabricação, pois os combustíveis provenientes de resíduos energéticos são mais baratos do que qualquer combustível fóssil tradicional, o que incentiva esse potencial de energia. A grande vantagem da utilização de pneus como resíduo combustível é sua total destruição, em função das elevadas temperaturas de processo. Porém, o coprocessamento de pneus como combustível gera gases nocivos como monóxido de Carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_X), óxidos de nitrogênio (NO_X), hidrocarbonetos, metais pesados (Pb, Cd, Cr), além de dioxinas e furanos.

E um dos impactos ambientais considerados mais relevantes na atualidade refere-se ao aumento do efeito estufa na Terra. A importância do tema vem do fato de que a concentração de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera está crescendo muito desde eras pré-industriais. Essas tendências podem ser atribuídas a atividades antrópicas, notadamente ao uso de combustíveis fósseis, mudanças no uso da terra e agricultura.

A indústria cerâmica tem se destacado nos últimos anos como uma alternativa promissora para o destino de grandes quantidades de resíduos sólidos poluentes (SOUZA *et al*., 2004), de diversos tipos e origens, quando comparado aos métodos tradicionais. Segundo Faria (2015), a incorporação de pó de borracha, proveniente da recauchutagem de pneus usados, em cerâmica pode contribuir significativamente no processo de produção industrial e na preservação ambiental. Faria (2015) avaliou as propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas com a incorporação do resíduo na massa, relacionando-as com sua microestrutura, e verificou que a economia de energia e menor tempo de queima. Portanto, o alto poder calorífico do resíduo de pneu representa uma grande possibilidade de economia de energia, durante o processo de queima, associada à possibilidade de uma destinação para enormes volumes de passivo ambiental, porém é necessário se pensar no tratamento e minimização dos gases produzidos na queima do resíduo.

Com o presente trabalho, pretende-se avaliar o efeito da incorporação de diferentes concentrações de resíduo de pneus na fabricação de revestimentos cerâmicos para usos não estruturais, do tipo plaquetas de tijolos aparentes. Os objetos de análise serão caracterizados e depois fabricados conforme metodologia difundida para caracterização de cerâmicos.

Com isso, pretende-se verificar como as propriedades tecnológicas se comportam com a adição dos resíduos e com a variação da temperatura de queima. Posteriormente, comparar os resultados obtidos as propriedades de produtos cerâmicos comerciais.

De forma ampla, é uma motivação deste trabalho a busca por métodos produtivos de reaproveitamento mais sustentáveis de resíduos, considerando o aumento da sua utilização dentro de processos industriais e levando em conta diferentes aspectos ambientais que beneficiem a sociedade como um todo.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

VALORIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS COMO MATÉRIA-PRIMA ALTERNATIVA EM CERÂMICAS: O CASO DOS PNEUS INSERVÍVEIS

VALORIZATION OF SOLID WASTE AS AN ALTERNATIVE RAW MATERIAL IN CERAMICS: THE CASE OF END-OF-LIFE TIRES

Mariana Vasconcelos Ferreira de Araújo - IFFluminense/PPEA
Vicente de Paulo Oliveira - IFFluminense/PPEA
Angélica da Cunha dos Santos - IFFluminense/PPEA

RESUMO

Nos últimos anos, a questão ambiental tem sido bastante discutida em fóruns nacionais e internacionais e tem mobilizado a opinião pública e assumido um papel importante nas comunidades. A sustentabilidade do planeta é de responsabilidade coletiva, sendo necessária a adoção de práticas de produção e consumo sustentáveis. Transformar os desperdícios contínuos em insumo para ser reutilizado na mesma unidade de produção ou por diferentes instalações industriais é essencial, não somente para conservar recursos naturais, mas também para evitar ou minimizar a disposição final desses resíduos no meio ambiente. A tendência de reciclagem de resíduos com poder calorífico na indústria cerâmica pode ser considerada promissora visto que são resíduos que estão sendo dispostos no ambiente e a utilização destes pode significar economia de biomassa, fonte da maior parte da energia utilizada na produção de telhas cerâmicas e tijolos. Porém, é necessário atentar para aspectos além da destinação adequada dos resíduos, pois a fase de sinterização dos corpos cerâmicos pode gerar gases poluentes e o produto final conter substâncias nocivas à saúde. O objetivo principal deste trabalho é verificar, por meio de revisão da literatura, a incorporação de resíduos industriais em materiais cerâmicos, identificar as principais alternativas para aproveitamento de resíduos de pneus inservíveis, a legislação em vigor para este tipo de resíduo e os aspectos ambientais da sua valorização como matéria-prima alternativa na indústria cerâmica.

Palavras-chave: Resíduos combustíveis. Incorporação. Setor cerâmico

ABSTRACT

In recent years, the environmental issue has been much discussed in national and international forums and has mobilized public opinion and played an important role in communities. The sustainability of the planet is a collective responsibility, requiring the adoption of sustainable production and consumption practices. Transforming continuous wastes into inputs to be reused in the same production unit or in different industrial facilities is quite necessary, conserving natural resources, as well as avoiding or minimizing the final disposal of these wastes in the environment. The trend of recycling waste with heating power in the ceramic industry can be considered promising since these wastes have been disposed in the environment and the use of them can mean biomass savings, source of most of the energy used in the ceramic tiles and bricks manufacturing. However, it is necessary to consider aspects besides proper disposal of the waste, as the sintering phase of the ceramic bodies can generate gaseous pollutants and the final product may contain substances harmful to health. The main objective of this work is verify, through the literature review, the incorporation of industrial waste into ceramic materials, identify the main alternatives for the use of end-of-life tire wastes, the regulation in force for this type of waste and environmental aspects for its valorization as an alternative raw material in the ceramics industry.

Keywords: *Fuel wastes. Incorporation. Ceramic industry*

1. INTRODUÇÃO

O acúmulo e disposição inadequada dos resíduos resultantes do consumo da sociedade é um problema ambiental que ainda não foi resolvido, embora já haja diversos encaminhamentos na tentativa de minimizar o impacto gerado. Tal acúmulo ocorreu também por conta do aumento populacional e da demanda por industrializados e, especialmente, porque esta questão foi tratada por vários anos como uma conseqüência indesejada, mas inevitável, do desenvolvimento econômico, e sempre foi carente de regulação e fiscalização intensivas. Assim, o descuido com o meio ambiente causou a poluição das águas, solo e ar, a perda de biodiversidade, tem causado danos à saúde e à qualidade de vida e ainda tem gerado impactos sociais, culturais, podendo tornar-se uma situação irreversível e inclusive comprometer a médio e longo prazo o próprio desenvolvimento econômico (MOTTA, 2008). Sabemos que a natureza impõe limites, principalmente em relação ao volume de recursos naturais que podemos utilizar e à quantidade de resíduos que podemos devolver aos

ambientes naturais. Ainda segundo Motta (2008), devido à constatação e ao aumento dos resultados negativos das agressões ao meio ambiente, os países passaram a regulamentar e a impor ações mais rígidas aos diversos agentes envolvidos, sejam consumidores, empresas, poder público ou outras instituições.

Neste contexto, no Brasil, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) em 2010, sob a Lei Nº 12.305/2010, que é bastante atual e apresenta instrumentos importantes para permitir gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos. A PNRS foi aprovada após muitos anos de discussões e marcou o início de uma forte articulação institucional envolvendo os três entes da Federação – União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade em geral na busca de soluções para os problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2012).

A lei tem entre os seus objetivos a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de padrões de produção e consumo sustentáveis e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, reconhecendo estes como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania, e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Entre os destaques da PNRS está a instituição da responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos: dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o cidadão e titulares de serviços públicos de limpeza urbana e serviços de manejo dos resíduos sólidos pelo ciclo de vida dos produtos; e ainda o sistema de logística reversa, que tem relação direta com a primeira.

No Brasil, existem também as resoluções de órgãos ambientais voltados para questões específicas sobre a deposição de alguns resíduos, como o caso dos pneus inservíveis, que se dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental e sério risco à saúde pública. A Resolução CONAMA nº 258/99 já havia introduzido o princípio da responsabilidade do produtor e do importador pela coleta e destinação final ambientalmente adequada a esses pneus, com estabelecimentos de metas a cumprir. A partir da publicação desta Resolução, ficou proibida a disposição de pneumáticos inservíveis em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e a queima a céu aberto (BRASIL, 1999). À época, contabilizava-se um passivo ambiental de 100 milhões de pneus inservíveis abandonados no meio ambiente. Em 2009, a publicação da Resolução CONAMA nº 416 revogou a Resoluções nº 258/99 e apresenta outras providências para este resíduo.

Segundo Motta (2008), a forma para evitar ou minimizar o problema ambiental causado pelo descarte incorreto deste material é por meio de instrumentos legais e pelo desenvolvimento tecnológico de alternativas de destinação que modifiquem o mercado dos pneus inservíveis e valorizem o material, que apresenta elevado poder calorífico.

A indústria de cerâmica vemelha tem se destacado como grande sorvedora de resíduos industriais e urbanos, por meio da incorporação à formulação da massa cerâmica, sendo considerada uma promissora alternativa para destinação adequada de resíduos. Isso se deve à variedade de composições possíveis para a massa, que permite a introdução de resíduos de diversas características e em variadas porcentagens, à possível inertização desses resíduos e ao elevado volume de produção do setor. O aproveitamento de resíduos sólidos industriais como insumo na indústria cerâmica pode reduzir os custos e a quantidade de matérias-primas utilizadas e reduzir o consumo de combustível e energia, como é o caso da incorporação de resíduos de pneus inservíveis.

Assim, vários estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos a fim de verificar a viabilidade da incorporação de resíduos nas cerâmicas vermelhas e a facilidade de implementação para o produtor, visto que grande parte das indústrias são de pequeno porte e de nível tecnológico reduzido.

Apesar desta característica, o setor cerâmico é de grande representatividade no Brasil. Destacando no Estado do Rio de Janeiro, o polo de Campos dos Goytacazes, cuja produção foi de 962.081.109 peças ou cerca de 80.000 milheiros/mês em 2012, correspondendo a 64% do total produzido no Estado (DRM-RJ, 2014).

A incorporação de resíduos à cerâmica também deve considerar outros aspectos ambientais, além da destinação adequada de resíduos, pois gases tóxicos podem ser liberados durante a queima e substâncias prejudiciais à saúde, como metais pesados, podem estar presentes no produto cerâmico final, dependendo de composição do resíduo.

O objetivo principal do presente trabalho é verificar, por meio de pesquisa na literatura e busca de dados secundários, a incorporação de resíduos industriais em materiais cerâmicos, especificamente, os resíduos de pneus inservíveis. Busca-se identificar as principais alternativas para aproveitamento destes resíduos, as legislações em vigor e os aspectos ambientais da sua valorização como matéria-prima alternativa na indústria cerâmica.

O trabalho está estruturado no formato de artigo científico, formato estabelecido pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense, e

compreende os capítulos: Resumo e Abstract, Introdução, Revisão de Literatura, Considerações finais, Referências Bibliográficas e, por fim, Apêndices. Nesta última parte, são apresentados o cronograma e o fluxograma experimental da segunda fase de estudos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Resíduos Sólidos

Resíduo sólido é conceituado, de uma maneira geral, como todo e qualquer material resultante da atividade cotidiana da sociedade humana, e considerado pelo seu gerador, como inútil, indesejável ou descartável (NETO, 2006).

Segundo definição da norma técnica NBR 10004/2004, os resíduos sólidos são resíduos nos estados sólido e semi-sólido resultantes de atividades e origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. A norma inclui nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades impossibilitem o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou que necessitem de soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível para isso (ABNT, 2004).

Esta norma técnica também apresenta os fatores envolvidos na classificação dos resíduos sólidos, dentre eles, o processo ou atividade que lhes deu origem, a sua constituição e características, e a comparação dos seus constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto ao meio ambiente e à saúde já são conhecidos.

A figura 1 ilustra o fluxograma para a classificação dos resíduos sólidos quanto ao risco à saúde pública e ao meio ambiente. Os resíduos sólidos são classificados em dois grupos - perigosos e não perigosos, sendo ainda este último grupo subdividido em não inerte e inerte.

- *Resíduos classe I – Perigosos*: aqueles que apresentam risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices, e ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada, ou que apresentem uma das seguintes características: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade.

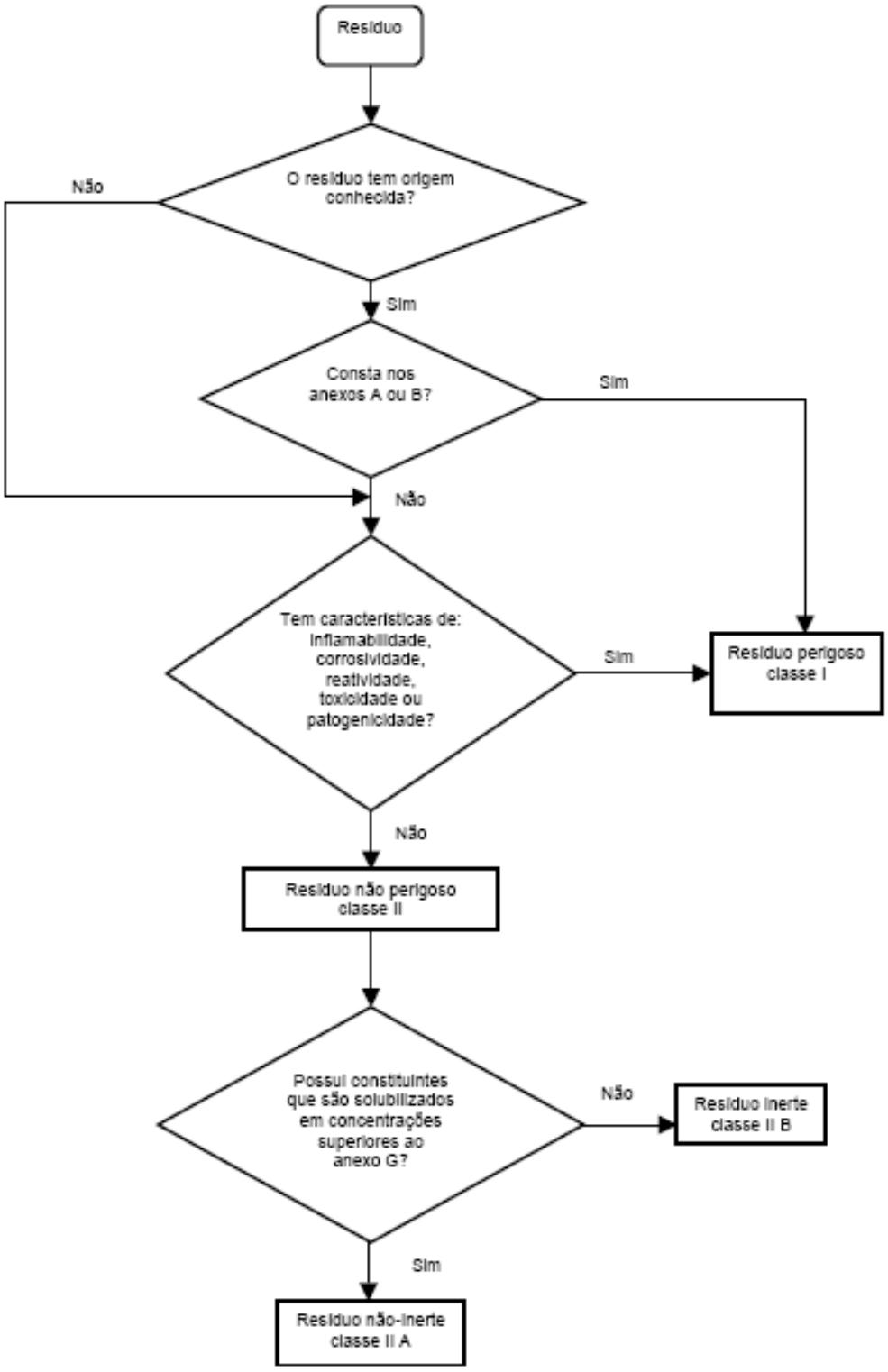
- *Resíduos classe II – Não perigosos* - podem ainda ser subdivididos em:

- *Resíduos classe II A – Não inertes*: aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - perigosos ou de resíduos classe II B – inertes. Eles podem apresentar propriedades tais como: solubilidade em água, combustibilidade ou biodegrabilidade.

- *Resíduos classe II B – Inertes*: São aqueles que ao serem submetidos a testes de solubilização, conforme a norma técnica NBR 10007/2004, não apresentam constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS apresenta, entre outras definições, a referente aos resíduos sólidos, que é bastante similar à apresentada pela NBR 10004/2004. Segundo a PNRS, o resíduo sólido é definido como "material, substância, objeto ou bem descartado que resulta de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível" (BRASIL, 2010).

Figura 1: Caracterização e classificação de resíduos resíduos, conforme NBR 10004/2004



Fonte: ABNT (2004)

A PNRS apresenta também a definição de rejeito como resíduos sólidos para os quais não há possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada, depois de esgotados todos os tipos de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e viáveis economicamente.

O texto da PNRS classifica os tipos de resíduos de acordo com a origem e a periculosidade. Quanto à origem, eles têm a seguinte classificação:

- resíduos sólidos urbanos – sudvididos em resíduos domiciliares, aqueles gerados em atividades domésticas em residências urbanas, e em resíduos de limpeza pública, gerados durante a varrição e limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;

- resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços;

- resíduos dos serviços públicos de saneamento básico;

- resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;

- resíduos de serviços de saúde;

- resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

- resíduos agrossilvopastoris: os originários das atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;

- resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;

- resíduos de mineração: aqueles gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

Quanto à periculosidade, a PNRS classifica os resíduos como resíduos perigosos ou resíduos não perigosos. Os perigosos são aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental. Enquanto que os não perigosos são aqueles não se enquadram na classificação anterior.

2.1.1 Resíduos Sólidos e a problemática ambiental

Ao longo da história, tem-se notado uma mudança no comportamento dos indivíduos. Houve crescimento populacional, um aumento da demanda por produtos industrializados e, em muitas partes do mundo, uma prática consumista alienada. Segundo dados das Nações Unidas, a população mundial atualmente é de 7,6 bilhões de pessoas e estima-se que atinja 8,6 bilhões em 2030, 9,8 bilhões em 2050 e 11,2 bilhões em 2100 (UNITED NATIONS, 2017).

Segundo dados de 2012, eram gerados 1.3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos por ano no mundo, com uma tendência a aumentar para 2.2 bilhões de toneladas por ano em 2025. Globalmente, os custos para o gerenciamento desses resíduos, que eram 205,4 bilhões de dólares em 2012 aumentarão para cerca de 375,5 bilhões de dólares em 2025. O maior impacto ocorrerá nos países periféricos (KYTE, 2012).

As projeções dependem e podem variar com as mudanças no cenário econômico, mas elas apresentam oportunidades e desafios importantes para implementação da sustentabilidade.

O aumento da geração de resíduos sólidos não se dá só pelo aumento da população, mas também porque muitos dos produtos consumidos possuem vida útil cada vez menor e tem-se ainda a questão das suas embalagens. Tudo isso impacta no uso insustentável dos recursos do planeta e sabemos que a natureza impõe limites, principalmente em relação ao volume de recursos naturais que podemos utilizar e à quantidade de resíduos que podemos devolver aos ambientes naturais.

De acordo com o Relatório do Banco Mundial sobre o tema dos Resíduos Sólidos e o seu tratamento, estima-se que os resíduos sólidos descartados estão crescendo mais rapidamente que a proporção de crescimento populacional. Em 2002, cada das 2.9 bilhões de pessoas gerava 0,64kg de resíduos sólidos por dia. Em 2012, os números mostravam um aumento para 3 bilhões de residentes gerando, cada um, 1,2kg de lixo por dia. A previsão para 2025 é de que a população aumente para 4.3 bilhões de residentes das áreas urbanas criando 1,42kg de lixo por pessoa por dia (HOORNWEG AND BHADA-TATA, 2012).

Somado a tudo isso, está o fato de que o crescimento populacional e a também crescente geração de resíduos sólidos se concentra nos centros urbanos. No Brasil, o resultado do Censo 2010 indica que a população brasileira é cerca de 190.755.799, mostra também que a população é mais urbanizada que 10 anos antes: em 2000, 81% dos brasileiros viviam em áreas urbanas, agora são 84%. Esse incremento foi causado pelo próprio crescimento vegetativo nas áreas urbanas, além das

migrações com destino urbano. A Região Sudeste continua sendo a mais urbanizada do Brasil, apresentando um grau de urbanização de 92,9%.

De acordo com o Plano Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008), 50,8% dos municípios brasileiros ainda realizavam uma destinação inadequada dos seus resíduos sólidos, os encaminhando para vazadouros a céu aberto, 22,5% dos municípios os destinavam para aterros controlados e 27,7% os destinavam para aterros sanitários.

Segundo dados de 2015 da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), a disposição final de resíduos sólidos urbanos apresenta sinais de evolução e aprimoramento, com a maioria dos resíduos coletados (58,7%) sendo encaminhados para aterros sanitários, que se constituem como unidades adequadas. Porém, as unidades inadequadas, aterros controlados e lixões, ainda estão presentes em todas as regiões do país e recebem mais de 82.000 toneladas de resíduos por dia, com elevado potencial de poluição ambiental (ABRELPE, 2015). Esses números descrevem um cenário de destinação e de gestão inadequadas, carente de soluções estruturais urgentes.

Neste contexto, no Brasil, temos a Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) que é bastante atual e contém instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País. A aprovação da PNRS, após longos vinte e um anos de discussões no Congresso Nacional marcou o início de uma forte articulação institucional envolvendo os três entes da Federação – União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade em geral na busca de soluções para os problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos e de grande abrangência territorial que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros (BRASIL, 2012).

A lei tem entre os seus objetivos a proteção da saúde pública e da qualidade ambiental, prevê a prevenção e a redução na geração de resíduos, tendo como proposta a prática de padrões de produção e consumo sustentáveis e um conjunto de instrumentos para propiciar o aumento da reciclagem e da reutilização dos resíduos sólidos, reconhecendo estes como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania, e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos (BRASIL, 2010).

Um dos destaques da PNRS é a instituição da responsabilidade compartilhada dos geradores de resíduos: dos fabricantes, importadores, distribuidores, comerciantes, o cidadão e titulares de serviços públicos de limpeza urbana e serviços de manejo dos resíduos sólidos pelo ciclo de vida dos produtos.

Na lei também destaca-se a logística reversa que é definida como um "instrumento de desenvolvimento econômico e social caracterizado por um conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada". A logística reversa está vinculada à responsabilidade compartilhada. De acordo com o Art. 33 da PNRS, ficam obrigados a estruturar e implementar sistemas de logística reversa, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, os fabricantes, importadores, distribuidores e comerciantes dos seguintes produtos: agrotóxicos, seus resíduos e embalagens; pilhas e baterias; produtos eletroeletrônicos e seus components; óleos lubrificantes, seus resíduos e embalagens; lâmpadas fluorescentes e pneus (BRASIL, 2010).

A lei 12.305/2010 prevê ainda a elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, sendo o seu processo de construção descrito no Decreto nº 7.404/2010, que a regulamentou. Sua elaboração é de responsabilidade da União, por intermédio da coordenação do Ministério do Meio Ambiente, no âmbito do Comitê Interministerial, num amplo processo de mobilização e participação social. O Plano Nacional de Resíduos Sólidos, cujo conteúdo deve estar conforme descrito nos incisos I ao XI do Artigo 15 da lei 12.305/2010, tem vigência por prazo indeterminado e horizonte de 20 (vinte) anos, com atualização a cada 04 (quatro) anos. O Plano identifica os problemas dos diversos tipos de resíduos gerados, as alternativas de gestão e gerenciamento passíveis de implementação, indicando planos de metas, programas e ações para mudanças positivas sobre o quadro encontrado (BRASIL, 2012).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos de 2012 apresenta também considerações a respeito dos instrumentos econômicos (IE) aplicados à gestão de resíduos sólidos, quase inexistentes no país. Os IE possuem três principais funções: financiar os serviços de gestão; orientar o comportamento dos agentes (gestores públicos, população e o setor produtivo) para cumprimento das metas municipais, estaduais e federais; e internalizar os impactos gerados pelo volume de resíduos produzidos. Observam-se importantes lacunas na implementação de IE em nível federal, estadual e municipal (BRASIL, 2012).

Em nível internacional, as políticas já adotadas em diferentes países para gestão de resíduos sólidos também podem servir de guia para o Brasil. O Ponto Verde (*Green Dot*) consiste no sistema de logística reversa para coleta de materiais recicláveis e embalagens não recicláveis implementado na União Europeia, e instituído pela Diretiva Europeia 94/62/CE, legislação referente às embalagens

e aos resíduos de embalagens. O financiamento para gestão depende da contribuição obrigatória pelas empresas que vendem seus produtos no mercado, uma tarifa que subsidia o sistema de logística reversa. Os recursos obtidos devem ser aplicados de forma eficiente em programas de coleta, triagem, reciclagem e na sensibilização e estímulo às diferentes partes envolvidas, notadamente aos consumidores, que desempenha papel-chave na gestão das embalagens. O principal sistema de cobrança que os países da Comunidade Europeia buscam implementar é a taxa PAYT (Pay-as-you-throw). A base da taxa é em função do volume ou do peso dos resíduos descartados, considerando o custo marginal de coleta e destinação final. Por meio de um sinal econômico, o gestor municipal é incentivado a reduzir a quantidade de resíduo destinado a aterro sanitário, aumentando a coleta seletiva, já que por esta é cobrada uma taxa inferior ou nula. Portanto, a taxa PAYT é geralmente eficaz quando combinada a um sistema de coleta seletiva eficaz (BRASIL, 2012).

2.1.2 Resíduos Sólidos Industriais

No que tange aos resíduos sólidos industriais, a PNRS (BRASIL, 2010a) determina obrigações para o setor produtivo. Segundo o Instituto de Pesquisa Econônica Aplicada (IPEA), além dos benefícios ambientais, o adequado gerenciamento dos RSI tem um importante viés com a expansão adequada da infraestrutura econômica e social do país. A Lei no 12.305/2010, sob a ótica econômica, obriga os grandes empreendedores a fazer uma opção entre a redução, o reúso e a reciclagem1 dos resíduos, reconhecendo o seu valor econômico e incentivando a integração das indústrias também com as cooperativas de catadores de materiais reciclados (IPEA, 2012).

No Plano Nacional de Resíduos Sólidos, lançado em 2012, apesar das grandes limitações na obtenção de dados que permitissem a realização de um diagnóstico completo da geração de resíduos sólidos industriais no Brasil, foi possível perceber que a sua implantação não poderá prescindir de inovação e competitividade industrial nas áreas de produção mais limpa, logística reversa e recuperação energética dos resíduos como solução tecnológica. A estratégia de desenvolvimento produtivo-tecnológico nestas áreas demandará a articulação entre o planejamento realizado em nível nacional e os planos estaduais e municipais previstos no Decreto no 7.404/2010 (BRASIL, 2010b).

Os esforços orientados para a otimização e redução do uso de matéria-prima; o uso de materiais renováveis, recicláveis, reciclados e energeticamente eficientes; a melhoria das técnicas de produção e dos sistemas de distribuição; e a redução do descarte de resíduos, reinserindo-os sempre que possível na cadeia produtiva, como insumos, são iniciativas estratégicas (IPEA, 2012).

Dentre uma das diretrizes para o gerenciamento de resíduos sólidos industriais do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, tem-se o incentivo ao fortalecimento do gerenciamento de resíduos sólidos nas indústrias. Uma das estratégias desta diretriz é estimular, fomentar e apoiar o uso de resíduos sólidos, materiais reciclados e recicláveis pela indústria, como insumos e matérias-primas; a outra estratégia é fomentar o desenvolvimento de tecnologias de destinação final ambientalmente adequada de resíduos sólidos industriais. A indústria e academia no Brasil e no mundo têm se aplicado a isso. Além da destinação ambientalmente adequada destes resíduos, determinada pela PNRS (BRASIL, 2010a), o aproveitamento de resíduos sólidos industriais como insumo na indústria cerâmica pode reduzir os custos e a quantidade de matérias-primas utilizadas e reduzir o consumo de combustível e energia.

A indústria cerâmica é considerada hoje um dos setores que mais reciclam resíduos, sejam eles industriais ou urbanos. Os estudos sobre a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha têm se tornado cada vez mais frequentes e grande de alvo interesse científico. Isto se deve às características físico-quimicas das matérias-primas cerâmicas, ao fato da grande demanda de matéria-prima e sua grande produção (MENEZES, 2002) e à plasticidade e composição variável das massas argilosas (DONDI *et al.*, 1997), facilitando a incorporação de vários resíduos.

2.2. O Setor Cerâmico

Segundo definição da Associação Brasileira de Cerâmica (ABCERAM), cerâmica compreende todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas (ABCERAM, 2017). Eles são tipicamente de natureza cristalina (têm uma estrutura ordenada) e são compostos formados entre os elementos metálicos e não metálicos tais como: o óxido de alumínio (alumina, Al_2O_3), óxido de cálcio (CaO) e nitreto de silício (Si_3N_4).

A fabricação de utensílios neste material é uma das atividades industriais mais antigas da humanidade. A necessidade de produtos com propriedades superiores às existentes levaram o homem a desenvolver e investir na tecnologia de processamento cerâmico. Atualmente, os materiais cerâmicos são aplicados na produção de vários produtos, entre eles destacam-se os revestimentos, os tijolos, as telhas, as louças e os sanitários (CASAGRANDE *et al.*, 2008).

A abundância de matérias-primas naturais, fontes alternativas de energia e disponibilidade de tecnologias práticas embutidas nos equipamentos industriais, fizeram com que as indústrias cerâmicas brasileiras evoluíssem rapidamente e muitos tipos de produtos dos diversos segmentos

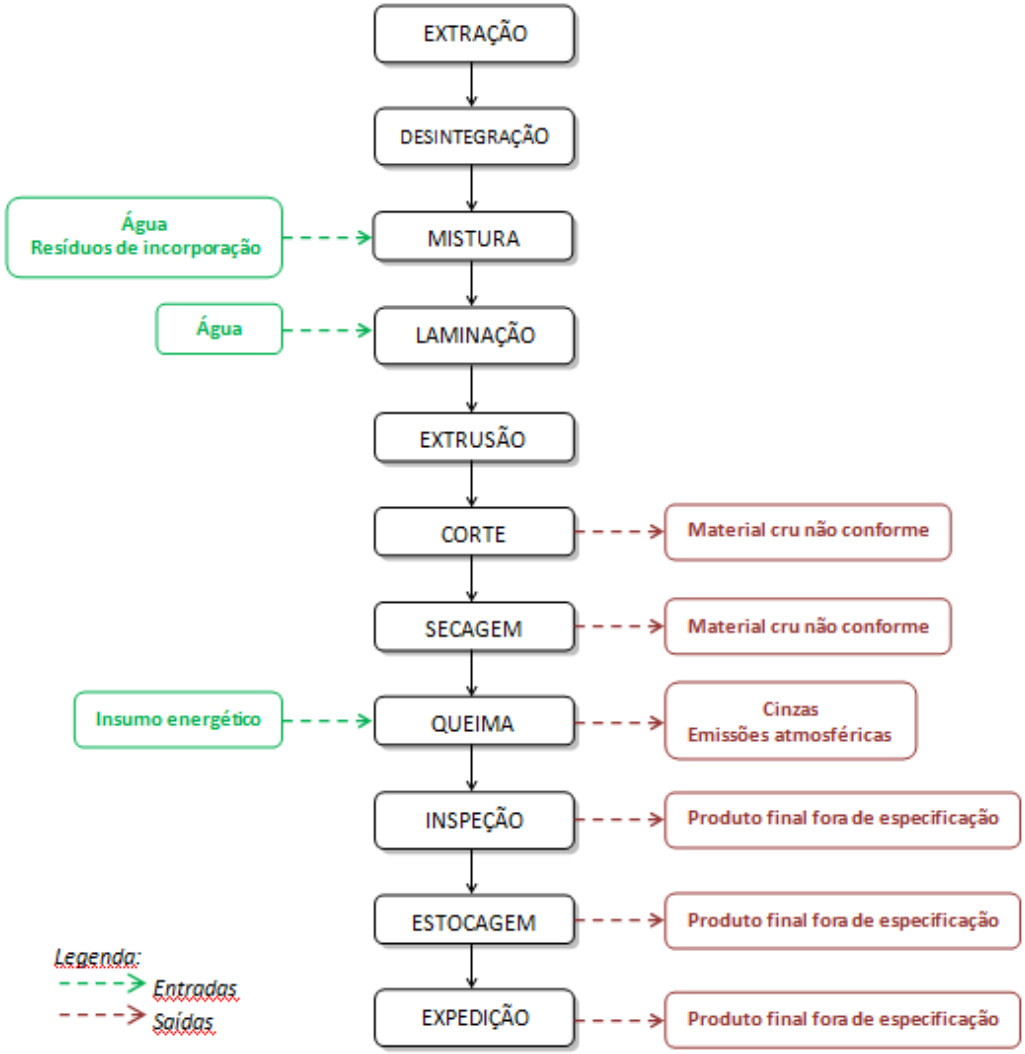
cerâmicos atingissem nível de qualidade mundial com apreciável quantidade exportada (ABCERAM, 2017).

As regiões do Brasil que mais se desenvolveram foram a SUDESTE e a SUL, em razão da maior densidade demográfica, maior atividade industrial e agropecuária, melhor infraestrutura, associado ainda à disponibilidade de matérias-primas, energia, centros de pesquisa, universidades e escolas técnicas. Portanto, são nelas onde se tem uma grande concentração de indústrias de todos os segmentos cerâmicos. E ainda, segundo a ABCERAM, as outras regiões do país tem apresentado um certo grau de desenvolvimento, principalmente no Nordeste, onde tem aumentado a demanda de materiais cerâmicos, principalmente nos segmentos ligados à construção civil, levando à implantação de novas fábricas cerâmicas nessa região (ABCERAM, 2017).

Devido à sua heterogeneidade e amplitude, o setor cerâmico é dividido em vários segmentos em função da matéria-prima utilizada, das propriedades e áreas de utilização dos produtos. Segundo a ABCERAM, em geral, adota-se a seguinte classificação (ABCERAM, 2017): Materiais de Revestimento (Placas Cerâmicas); Cerâmica Branca; Materiais Refratários; Isolantes Térmicos; Fritas e Corantes; Abrasivos; Vidro, Cimento e Cal; Cerâmica de Alta Tecnologia ou Cerâmica Avançada; e Cerâmica Vermelha. Esta última, que será o enfoque deste trabalho, **co**mpreende aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno. As lajotas, muitas vezes, são enquadradas neste grupo, porém o mais correto é classificá-las como Materiais de Revestimento.

Os processos de fabricação empregados pelos diversos segmentos cerâmicos assemelham-se parcial ou totalmente, envolvendo, essencialmente, as mesmas etapas. O setor que mais se diferencia quanto a esse aspecto é o de fabricação do vidro, embora exista um tipo de refratário (eletrofundido), cuja fabricação se dá através de fusão, ou seja, por processo semelhante ao utilizado para a produção de vidro ou de peças metálicas fundidas. Esses processos de fabricação podem diferir de acordo com o tipo de peça ou material desejado. De um modo geral, eles consistem basicamente nas seguintes etapas: seleção, dosagem e preparação da matéria-prima, e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento. No processo de fabricação, muitos produtos são submetidos a esmaltação e decoração (ABCERAM, 2017). O fluxograma (Figura 2) ilustra o processo produtivo de cerâmicas vermelhas.

Figura 2 - Fluxograma do processo produtivo de cerâmicas, entradas e saídas de insumos.



Fonte: Guia Técnico Ambiental da Indústria Cerâmica (FIEMG, 2013)

2.2.1 Cerâmica Vermelha

A cerâmica vermelha, também conhecida como cerâmica estrutural, é caracterizada por produtos oriundos da argila ou misturas contendo argila, submetidos à moldagem, secagem e queima.

A granulometria de uma argila influencia no processamento de cerâmica vermelha, devido à sua relação direta com a composição mineralógica. A chamada “fração argila”, associada a partículas com tamanho inferior a 2 µm, é geralmente constituída de argilominerais, que são os principais responsáveis pelo desenvolvimento da plasticidade. A plasticidade é uma propriedade fundamental que permite que massas argilosas alcancem a consistência plástica adequada para serem conformadas pelo processo de extrusão (VIEIRA *et al.*, 2007).

Uma quantidade maior de argilominerais de granulometria muito fina irá conferir maior plasticidade à argila, sendo esta denominada argila “gorda”. A plasticidade provém da forma das partículas, coloidais, que possuem boa coesão entre si. As argilas “gordas” possuem facilidade na moldagem das peças, com baixo consumo de energia e reduzido desgaste dos equipamentos. A utilização somente destas argilas em cerâmica vermelha pode trazer problemas de processamento, dificultando a etapa de conformação e secagem. Por serem pouco permeáveis, a difusão da água do centro para a superfície da peça é dificultada, o que causa secagem diferencial com o aparecimento de tensões, deformações e trincas. Por outro lado, geralmente peças produzidas com estas argilas apresentam uma resistência mecânica a verde e a seco satisfatória (VIEIRA *et al.*, 2007).

As argilas com menor teor de argilominerais são denominadas “magras”, apresentando baixa plasticidade. As argilas “magras” possuem baixa resistência no estado após a secagem e baixa retração linear. Geralmente, elas são usadas para a correção da plasticidade das argilas que apresentam plasticidade muito alta (CARDOSO, 1995).

Além dos argilominerais, segundo Gaidzinski (2006), as argilas geralmente contêm outros materiais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, e podem conter também minerais não cristalino.

Devido à grande diversidade de argila encontrada na superfície da Terra, podem-se obter produtos cerâmicos com as mais diversas características tecnológicas (FARIA, 2015).

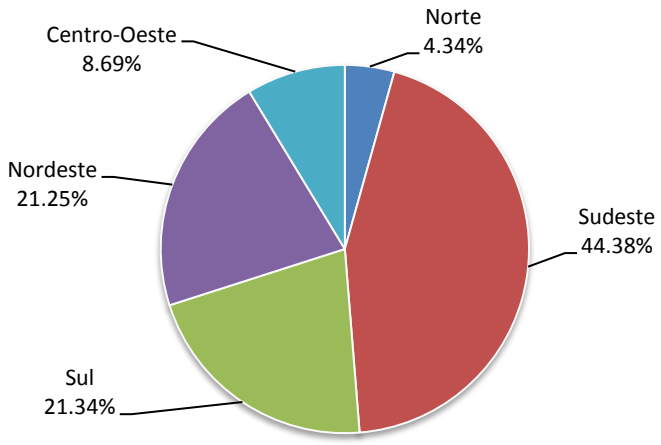
A indústria de cerâmica vermelha é de grande representatividade no Brasil, apesar de a maior parte da cerâmica vermelha ser produzida por empresas de pequeno e médio portes. Atendendo à construção civil em geral, as empresas encontram-se distribuídas por todo o país e estão localizadas nas regiões onde há maior disponibilidade de matéria-prima e proximidade com os mercados consumidores.

Conforme dados do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2015), esta indústria representa 4,8% da indústria da construção civil, gera cerca de 300 mil empregos diretos e 1,5 milhão de empregos indiretos e fatura 18 bilhões de reais anualmente.

Mensalmente, as 9.071 pequenas empresas que compõem o setor produzem um total de 1,3 bilhão de telhas e 4 bilhões de blocos de vedação e estruturais (SEBRAE, 2015).

O gráfico da produção nacional de cerâmica vermelha por região é apresentado no Figura 3, destacando-se a região Sudeste, onde também estão instaladas a maior partes das empresas, correspondendo a 36,9%.

Figura 3 – Distribuição da produção nacional de cerâmicas vermelhas por região



Fonte: Adaptado de SEBRAE (2015)

O parque produtor de cerâmica vermelha para construção no Estado do Rio de janeiro é representado por três polos que respondem por mais de 90% de toda a produção deste Estado, são eles: Campos dos Goytacazes, Itaboraí e Médio Vale do Rio Paraíba do Sul (DRM-RJ, 2014).

No ano de 2012, nas 172 indústrias distribuídas pelos três polos, o Estado do Rio de Janeiro produziu 1.503.169.797 peças cerâmicas com prevalência dos blocos de vedação, 94% do total produzido. As peças apresentaram preço médio de R$ 300,73 por milheiro, com um faturamento total de R$ 452,04 milhões (DRM-RJ, 2014).

Porém, neste mesmo ano, segundo dados do Cadastro de Atividades Mineriais do Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro (DRM-RJ), foi observada uma retração no número de indústrias e de peças produzidas nos polos de Itaboraí e do Médio Vale do Rio Paraíba do Sul, em comparação a 2011. A queda observada foi de 15,1% no número de peças produzidas (DRM-RJ, 2014).

O polo cerâmico de Campos dos Goytacazes, que será o foco de estudo na continuidade deste trabalho, é o maior do estado. No ano de 2012, contava com 113 empresas localizadas na margem direita do Rio Paraíba do Sul, ao longo da estrada RJ-216 (Rodovia do Açúcar) que liga Campos dos Goytacazes ao Farol de São Tomé. A produção foi de 962.081.109 peças ou cerca de 80.000 milheiros/mês, com predomínio na produção de blocos de vedação, que possui menor valor

agregado, e receita estimada em 256 milhões de reais (21,33 milhões de reais/mês). Essa produção é atribuída a 107 indústrias que operaram em 2012 e que apresentaram seus dados de produção ao DRM-RJ, as outras não o fizeram (DRM-RJ, 2014).

Apesar de contar com a grande disponibilidade de recursos naturais, um fator bastante relevante do setor de cerâmica vermelha é sua sazonalidade, condicionada ao regime pluviométrico. Durante o período chuvoso, que se estende de novembro a abril, além da atividade extrativa de argila que é praticamente suspensa, a produção do setor cerâmico também é reduzida neste período devido à arrefecimento das atividades da construção civil. Em geral, as empresas não têm muito controle dos seus custos de produção, mas é consenso que os principais custos são atribuídos ao combustível utilizado nos fornos, seguido pela mão-de-obra, respondendo por 34% e 26%, respectivamente (FEAM, 2012).

O aproveitamento de resíduos sólidos industriais como insumo na indústria cerâmica pode reduzir os custos e a quantidade de matérias-primas utilizadas e reduzir o consumo de combustível e energia. Assim, vários estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos a fim de verificar a viabilidade da incorporação de resíduos nas cerâmicas vermelhas e a facilidade de implementação para o produtor, visto que grande parte das indústrias são de pequeno porte e de nível tecnológico reduzido.

Em seus estudos sobre resíduos industriais, Vieira e Monteiro (2009) apresentaram uma revisão atualizada dos avanços tecnológicos relacionados à incorporação de diferentes tipos de resíduos sólidos em cerâmica vermelha. Assim, as três categorias propostas foram:

- Resíduos combustíveis;

- Resíduos fundentes;

- Resíduos que afetam as propriedades cerâmicas.

Os resíduos combustíveis são aqueles que apresentam poder calorífico relativamente alto devido à matéria-orgânica presente em sua composição. De acordo com Menezes e colaboradores (2002), a utilização desses resíduos por parte das indústrias cerâmicas pode ocorrer por incorporação dos resíduos à massa cerâmica ou na mistura com os combustíveis responsáveis pela queima do corpo cerâmico, podendo trazer economia de energia da ordem de 45%. No entanto, apresenta limitações quanto à porosidade do produto final e às emissões atmosféricas. Essa categoria inclui resíduos da industria de papel, lama de alto forno e resíduos derivados da extração e refino de petróleo (VIEIRA E MONTEIRO, 2009).

Os resíduos fundentes são assim denominados, pois apresentam uma quantidade relativamente alta de óxidos alcalinos, como K_2O e Na_2O, que em reação com a sílica e a alumina promovem a formação de fase líquida que facilita a densificação e melhora a compactação das cerâmicas (Vieira e Monteiro, 2009). Nessa categoria os autores incluem resíduo de serragem de rochas ornamentais, vidro e cinzas.

Vieira e Monteiro (2009) caracterizaram os resíduos que afetam as propriedades cerâmicas e não se enquadram nas duas categorias anteriores, por não forneceram poder calorífico nem conter substâncias fundentes. A categoria de resíduos que afetam as propriedades cerâmicas, os autores incluem o chamote, resíduos de mineração, lodo de tratamento de água, lodo de curtumes, areias de fundição e restos de construção e demolição.

Conforme a classificação proposta por Dondi *et al.*(1997) e Vieira e Monteiro (2009), o resíduo da borracha de pneu, que será o objeto de estudo de fase posterior deste trabalho, é um resíduo combustível.

Entre alguns estudos voltados para a incorporação de resíduos à cerâmica vermelha, podem-se citar a utilização de resíduos de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (FARIA, 2011), lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (AREIAS, 2015), resíduo de serragem de rocha ornamental (AGUIAR, 2012), rejeitos de construção civil (SILVA, 2007), lodo amarelo de Estação de Tratamento de Água (CAMARGO, 2014), lama vermelha (BABISK, 2015), resíduos de cascalho da perfuração de petróleo combinado com resíduos de polimento do porcelanato (SILVA, 2012), lama de alto-forno (MOTHÉ, 2008), resíduo de vidro de lâmpada fluorescente (MORAIS, 2013) e resíduos de pó de borracha de pneus inservíveis (FARIA, 2015). Muitos desses trabalhos estão voltados para o polo cerâmico de Campos dos Goytacazes/RJ.

2.3. Pneus: legislação, produção e alternativas de destinação

O pneu é o produto da combinação de matérias-primas e processos, e o elemento de contato entre o veículo e a via sobre a qual este trafega. A primeira iniciativa de definição de pneus por uma legislação foi estabelecida pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 258/99 que considerava:

- pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço utilizados para rodagem em veículos automotores e bicicletas. Esta definição foi atribuída em nova redação pela Resolução n° 301/02;

- pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem sob qualquer forma, enquadrando-se, para efeito de importação, no código 4011 da Tarifa Externa Comum - TEC;
- pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem, enquadrando-se, para efeitos de importação, no código 4012.10 da Tarifa Externa Comum-TEC;
- pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional, conforme código 4012.20 da Tarifa Externa Comum - TEC.

Os principais polímeros utilizados no processo de fabricação dos pneus são a borracha natural, derivada da seiva das árvores *Hevea brasiliensis*, e a borracha sintética, derivada do petróleo. A elas são adicionados químicos como negro de fumo, sílica, enxofre, além de susbstâncias aceleradoras, plastificantes, antioxidantes e antiozonantes, para conferir suas propriedades específicas e bastante variáveis. Além da matéria-prima polimérica, os pneus são compostos por tecido de náilon e aço. A composição dos pneus varia com o fabricante, com sua aplicação e exigências de performance (ANIP, 2016).

O negro de fumo é um dos aditivos principais dos pneus, ao qual é atribuída a função de aumento da resistência do borracha. Trata-se de um pó de carvão muito fino, derivado da fuligem recolhida a partir de óleo queimado. Ele que confere a cor escura característica da borracha.

A adição de enxofre à borracha, processo conhecido como vulcanização, diminui sua viscosidade e aumenta a resistência. Isso ocorre porque os átomos de enxofre criam ligadas "cruzadas" entre as moléculas da borracha, impedindo-as de se movimentar. Essa adição também torna a borracha resistente à temperatura (SOARES, 2015). A vulcanização é um processo quase que irreversível e faz com que um pneu leve em média 600 anos para se degradar se disposto inadequadamente no meio ambiente.

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), foram produzidos anualmente, em média, mais de 63 milhões de pneus nos últimos 11 anos no Brasil. Em 2016, somando todas as categorias (carga, passeio, moto, agrícola e outros), a produção foi de 67.870.350 pneus (ANIP, 2016). Ao final de sua vida útil, esses milhares de pneus serão considerados inservíveis, podendo se transformar em um grande passivo ambiental.

O resíduo de pneus pode ser classificado, conforme NBR 10004/2004, como sendo não-perigoso Classe II A – não-inerte, por apresentar teores de metais (zinco e manganês) no extrato solubilizado superiores aos padrões estabelecidos por esta mesma norma (BERTOLLO *et al.*, 2002).

Considerando que os pneus inservíveis dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública, com a Resolução CONAMA nº 258/99, foi introduzido o princípio da responsabilidade do produtor e do importador pela coleta e destinação final ambientalmente adequada a esses pneus. Essa resolução estabeleceu, ainda, os prazos e quantidade a serem atendidos (BRASIL, 1999).

A partir de 1º de janeiro de 2002, para cada quatro pneus produzidos ou importados (novos ou reformados), as empresas fabricantes e as importadoras deveriam dar destinação final a um pneu inservível. A partir de 1º janeiro de 2003, a relação passou a ser de dois pneus produzidos ou importados (novos ou reformados) para um pneu inservível com destinção final adequada. A partir de 1º de janeiro de 2004, as empresas fabricantes e as importadoras deveriam dar destinação fi nal a um pneu inservível para cada pneu produzido ou importado novo e, no caso de pneus reformados importados, para cada quatro, cinco pneus inservíveis deveriam ter destinação final por parte dos importadores. A partir do primeiro dia do ano de 2005, a relação cresceu para cada quatro pneus produzidos ou importados novos, cinco pneus usados deveriam ter destinação final e, para cada 3 pneus importados reformados de qualquer tipo, as importadoras deveriam dar destinação final a quatro pneumáticos inservíveis (BRASIL, 1999).

Ficou proibida a partir da data de publicação desta Resolução, 26 de agosto de 1999, a disposição de pneumáticos inservíveis em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e a queima a céu aberto (BRASIL, 1999).

A Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009, revoga as Resoluções nº 258/ 1999 e nº 301/2002, dispondo sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, além de dar outras providências. Ela traz outras definições para pneus, para destinação ambientalmente adequada, para pontos de coleta e para central de armazenamento. Ela estabelece que as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição, sendo a quantidade convertida em peso para efeito de controle e fiscalização, considerando o fator de desgaste de 30% (trinta por cento) sobre o peso do pneu novo produzido ou importado. Fica determinado por esta Resolução que os fabricantes e importadores de pneus novos devem declarar ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis -

IBAMA, numa periodicidade máxima de 01 (um) ano, por meio do Cadastro Técnico Federal - CTF, a destinação adequada dos pneus inservíveis. Esta determinação também é atribuída aos destinadores. (BRASIL, 2009)

A Instrução Normativa nº 1, de 18 de março de 2010, que está relacionada à Resolução CONAMA N.º 416/2009, institui os procedimentos necessários ao seu cumprimento e apresenta algumas determinações considerando que a referida Resolução demanda ao IBAMA determinadas atividades fundamentais para a sua implementação (BRASIL, 2009).

Na Europa, também é proibida a disposição em aterros de pneus inteiros a partir de 2003 e de pneus triturados a partir de 2006, resultado da Diretiva Europeia 1999/31/EC, de 26 de Abril de 1999. Assim, os Estados-Membros ficam obrigados a concentrarem os seus esforços na responsabilidade ambiental e em recolher e tratar adequadamente os seus pneus usados. Não existe nenhum regulamento europeu específico para recolher e tratar pneus usados. Cada Estado-Membro poderá escolher o seu próprio sistema de gestão dentre os 3 tipos existentes na Europa são eles: o sistema de responsabilidade do produtor, o sistema de taxas e o sistema de mercado livre. Os países podem mudar de um sistema de gestão para outro (VALORPNEU, 2017).

No sistema de responsabilidade do produtor, os fabricantes ficam responsáveis por recolher e tratar adequadamente os pneus em final de vida e ao Estado cabe definir a estrutura reguladora que irá enquadrar a gestão destes resíduos. Em países que escolheram esta opção de sistema de gestão, os fabricantes criam um setor de atividade especializada nesta área, que é representado por uma ou mais entidades gestoras. No ato de compra de um pneus novo, é cobrado um valor de contarapartida que serve para financiar este sistema e que, dependendo do paí, pode estar ou não visível na fatura.

No sistema de taxas, um imposto determinado pelo Estado é cobrado aos fabricantes de pneus, e normalmente é repassado ao comprador. Este valor será usado para finaciar a coleta e o tratamento de pneus em final de vida. Assim, fica a cargo do Estado o processamento dos pneus e a remuneração dos operadores deste serviço.

Para o sistema de mercado livre, o Estado define os objetivos de coleta e tratamento de pneus usados, mas não determina nenhum responsável direto por esta gestão. O detentor final dos pneus usados fica responsável por destiná-lo adequadamente. Assim, os operadores de coleta e tratamento competem uns com os outros e são livres para promover práticas de valorização a a custo otimizado.

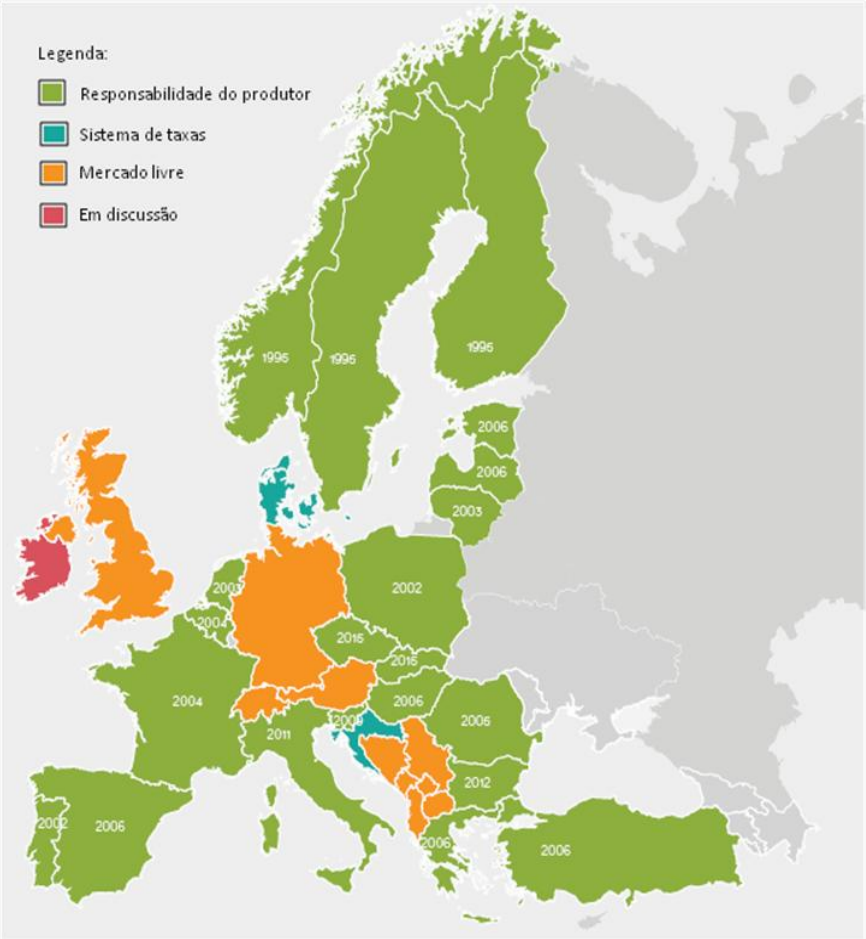
Segundo a Valorpneu (2017), entidade gestora em Portugal, o sistema de responsabilidade do produtor é o que apresenta meios e resultados mais eficientes para alcançar o objetivo de coleta e

tratamento de 100% dos pneus usados. A Figura 4 mostra a organização da gestão dos resíduos de pneus em fim de vida na Europa em 2015.

Nos Estados Unidos, o sistema implementado é o de mercado livre, não existe uma legislação federal regulamentadora, cada estado possui sua própria legislação para pneus. Segundo Campos (2006), alguns estados têm fundos específicos para lidar com os resíduos de pneus usados, baseados em taxas cobradas, outros proíbem o comerciante de pneus de cobrar taxas adicionais dedicadas a destinar pneus usados. Em alguns estados, é proibida a deposição de pneus inteiros em aterros, em outros, a de pneus triturados.

A ANIP é uma entidade que representa as empresas fabricantes de pneumáticos de todo o Brasil desde 1960. Nesse contexto, para atuar na coleta e destinação de pneus inservíveis, procedimento que redunda no atendimento da finalidade ambiental já expressa na revogada Resolução 258/99 do CONAMA, as indústrias de pneumáticos valem-se de instrumentos implantados pela ANIP, que criou o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis. Esse programa, que contava em 2014 com a participação de 834 pontos de coleta em todos os estados do país e no Distrito Federal, tornava necessária a constituição de uma entidade exclusivamente dedicada à gestão e aprimoramento dos trabalhos sobre o pós-consumo dos pneumáticos. Assim, foi criada em 2007 a Reciclanip, com base no modelo europeu, com a diferença que nos países da Europa o custo é compartilhado entre os diversos participantes da cadeia e, no Brasil, até o momento é pago apenas pelos fabricantes e importadores. Segundo a ANIP (2015), a Reciclanip, associção sem fins lucrativos, tem por missão assegurar a sustentabilidade do processo de coleta e destinação de pneus inservíveis de responsabilidade dos fabricantes de pneus, em todas as regiões do país, atuando de forma responsável nas áreas ambiental, social e econômica.

Figura 4 - Organização da gestão dos resíduos de pneus em fim de vida, na Europa em 2015



Fonte: Adaptado de ETRMA (2015)

O Programa funciona em âmbito nacional, a partir da celebração de convênios de cooperação mútua, com instalação dos pontos de coleta, locais cobertos disponibilizados e controlados pelas prefeituras municipais e outros parceiros, para onde são levados os pneus recolhidos pelo serviço público, ou descartados voluntariamente pelo munícipe e por empresas. A partir desses pontos de coleta, a Reciclanip recolhe os pneus considerados inservíveis e os encaminha para a destinação final ambientalmente adequada, realizada por empresas devidamente autorizadas e licenciadas pelos órgãos ambientais.

O desenvolvimento de um sistema de logística reversa de produtos e embalagens em final de vida útil, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, tornou-se obrigatório para fabricantes, distribuidores e importadores a partir da aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), em 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), o que torna o papel da Reciclanip com os pneus inservíveis mais relevante.

Segundo dados da ANIP (2015), a forma mais comum de destinação dos pneus inservíveis é como combustível alternativo para a indústria de cimento, que correspondeu a 69,7% do total em 2014. Em segundo lugar está a fabricação de granulado e pó de borracha para utilização em artefatos de borracha, ou asfalto-borracha, respondendo por 17,8% da destinação. Na sequência, está a laminação, que utiliza o pneu inservível como matéria-prima para fabricar solado de sapato, dutos fluviais, que representam 6,0%. O aço corresponde a 6,5% e é também reaproveitado na fabricação do cimento ou pela indústria siderúrgica.

O uso do pneus como combustível alternativo, ou seja, seu coprocessamento, nos fornos de clínquer[1] proporciona o aproveitamento térmico e a valorização energética deste resíduo, o que reduz o uso de combustíveis fósseis não-renováveis, além disso, o aço contido nos pneus e as cinzas resultantes da queima podem ser incorporados ao clínquer. Dentre outras vantagens da substituição dos combustíveis tradicionais, tais como coque de petróleo, por pneus inservíveis, estão a menor geração de SO_2 e NO_x, redução do custo de produção do cimento, menor formação de dioxinas e furanos devido ao elevado tempo de residência em um ambiente alcalino e com presença de sulfatos, característicos do processo de produção do cimento (LAGARINHOS, 2011).

Se aproveitando do poder calorífico do resíduo de pneu, o estudo realizado por Faria (2015) avaliou a incorporação do resíduo de pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha e verificou que houve economia energética durante a fase de sinterização dos produtos cerâmicos e menor tempo de queima, o que é um atrativo para os ceramistas, gerando maior produtividade e lucratividade em relação ao gasto energético. Pode-se associar essa vantagem à possibilidade de uma destinação adequada de passivo ambiental e à economia de biomassa, pois a maior parte da energia provém de lenha, serragem e cavaco. Porém, o estudo ressalta a necessidade de pensar no tratamento e minimização dos gases produzidos pela queima do resíduo. O reaproveitamento de resíduos como insumos energéticos ou misturados à massa cerâmica possui a vantagem de diminuição de rejeitos e de consumo de biomassa. Entretanto, alguns resíduos, durante a queima, podem desprender gases tóxicos dependendo de sua constituição.

No Brasil, não há uma resolução específica para as emissões atmosféricas produzidas por fornos cerâmicas, pois a atividade de fabricação de produtos cerâmicos é considerada de potencial poluidor pequeno. A mais útil para essa avaliação é a Resolução CONAMA nº 316/02, que dispõe sobre procedimentos e critérios para o licenciamento e para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, considerando que os sistemas de tratamento térmico de resíduos são

[1] O clínquer, constituinte básico do cimento, resulta da queima de rochas calcárias e argilosas em um forno rotativo a 1450º C. A ele, é adicionado de 3 a 6% de gesso a fim de controlar a cinética de hidratação do cimento (MARQUES, 2000).

fontes potenciais de risco ambiental e de emissão de poluentes perigosos. Ela define os limites de emissão para vários poluentes, inclusive dioxinas e furanos (0,5 ng/Nm^3 expressos em TEQ - total de toxicidade equivalente da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina)) (BRASIL, 2002).

O prosseguimento deste trabalho de pesquisa terá como objetivo principal avaliar a o aproveitamento do resíduo de pó de borracha, proveniente da recauchutagem de pneus usados, destinado à incorporação em cerâmica vermelha, sob o ponto de vista ambiental verificando a emissão de gases durante a queima da mistura e a presença de metais pesados no produto final.

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido às características físico-químicas das matérias-primas cerâmicas, às grandes variedades de composições, às particularidades do processamento cerâmico e ao elevado volume de produção, a indústria cerâmica tem se mostrado como uma importante alternativa para a reciclagem e reaproveitamento de resíduos sólidos.

Dessa forma, muitos estudos em diversas instituições têm buscado verificar o tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de utilização e o efeito da incorporação de resíduos nas propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas, conciliando aspectos econômicos e ambientais. Grande parte dos estudos estão concentrados em instituições próximas aos polos produtores de cerâmicos.

Para que o resultado das pesquisas chegue à rotina de produção das indústrias cerâmicas, e estas desfrutem de todas as vantagens da utilização de resíduos como matéria-prima alternativa na fabricação de seus produtos, é necessário que haja investimento nestas tecnologias e divulgação mais clara e precisa dos resultados obtidos.

Como a maioria das indústrias cerâmicas são de pequeno e médio porte, o custo do resíduo tem papel preponderante na viabilidade da utilização dos resíduos no processo do fabricação, devendo o ceramista considerar se haverá economia significativa de matéria-prima tradicional, de energia, além de melhora na qualidade da cerâmica.

Neste trabalho, de revisão da literatura, observou-se que houve uma retração no setor cerâmico no Estado do Rio de Janeiro nos últimos anos, com diminuição no número de indústrias, no número de peças produzidas e nos valores de receita. O cenário pode ser encarado como uma oportunidade de busca por processos mais eficientes energeticamente e menores gastos com matérias-primas.

Ambientalmente, a incorporação de resíduos pode ser mais restritiva, devendo-se verificar os níveis das emissões geradas durante a queima da cerâmica vermelha e realizar testes de lixiviação/solubilização no produto final. A análise da incorporação de resíduos de pó de borracha à cerâmica vermelha sob a ótica ambiental, com a análise de gases emitidos durante a fase de sinterização e a verificação da presença de metais pesados no produto final será o objetivo da fase seguinte deste trabalho.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M. C. Utilização de resíduo de serragem de rocha ornamental com tecnologia de fio diamantado em cerâmica vermelha. 2012. 132f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

AREIAS, I. O. R. Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) do município de Campos dos Goytacazes - RJ em cerâmica vermelha. 2015. 119f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. Disponível em: <http://abceram.org.br/>. Acesso em jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, 2015. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br>. Acesso em: 19 jul. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10004: Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004a, 71p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10007: Amostragem de Resíduos. Rio de Janeiro. ABNT, 2004b, 25p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP. Produção e vendas 2016. Disponível em: <http://www.anip.com.br/index.php?cont=conteudo>. Acesso em 24 jun. 2017.

BABISK, M. P. Incorporação de lama vermelha em cerâmica vermelha. 2015. 196f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeir, Campos dos Goytacazes, 2015.

BARBIERI, J. C. Gestão Ambiental Empresarial: conceitos, modelos e instrumentos. 3 Ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2011.

BERTOLLO, S. M.; JÚNIOR, J. L. F.; SCHALCH, V. Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. In: XVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, 2002. Cancún, México. 27 a 31 de Outubro de 2002. 8p.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999. Determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res99/res25899.html>. Acesso em: 15 jun. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial da União em 01 de outubro de 2009. Brasília, DF

_____. Instrução Normativa nº 1, de 18 de março de 2010. Disponível em : <https://servicos.ibama.gov.br/ctf/manual/html/IN_01_2010_DOU.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2017.

_____. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010a. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 11 jun. 2017.

_____. Decreto no 7.404 de 23 de dezembro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.305 de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 23 dez. 2010b. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 11 jun. 2017.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.sinir.gov.br/web/guest/plano-nacional-de-residuos-solidos>. Acesso em: 22 jul. 2017.

CAMARGO, C. N. O. Avaliação do lodo amarelo de ETA para incorporação em cerâmica vermelha. 2014. 101f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

CAMPOS, P. S. Aproveitamento industrial da borracha de pneu reciclada (a reciclagem do resíduo 160103 da L.E.R). 2006. Dissertação (mestrado). Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2006.

CASAGRANDE, M. C; SARTORA, M. N.; GOMESA, V.; DELLAA, V. P.; HOTZAA, D.; OLIVEIRA, A. P. N. Reaproveitamento de Resíduos Sólidos Industriais: Processamento e Aplicações no Setor Cerâmico. Cerâmica Industrial, 13 (1/2), Janeiro/Abril de 2008.

CARDOSO, A. P. Tecnologia da cerâmica vermelha no norte do Paraná aplicada na produção de componente para alvenaria estrutural. 1995. 140f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. Recycling of Industrial and Urban Wastes in Brick Production: A Review (Part 1), Tile & Brick Int., 13: 218-225, 1997.

DRM-RJ – Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços. Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro 2014. 102f. Rio de Janeiro, RJ: 2014.

EUROPEAN TYRE AND RUBBER MANUFACTURER ASSOCIATION – ETRMA. End-of-life Tyre Report 2015. Disponível em: < http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf>. Acesso em: 5 jul.2017.

FARIA, K. C. P. Avaliação da adição de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades e microestruturas de cerâmica vermelha. 2011. 100 f. Dissertação (mestrado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

FARIA, J. S. Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha. 2015. 125f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG). Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha. Belo Horizonte: FIEMG, 2013. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 21 set. 2016.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE - FEAM. Plano de ação para adequação ambiental e energética das indústrias de cerâmica vermelha no Estado de Minas Gerais / Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 142 p.

GAIDZINSKI, R. (2006). Estudo do Sazonamento de Argilas para a Utilização na Indústria Cerâmica. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P., What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management, Washington, v.15, Março de 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv45351.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA - IPEA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Industriais – Relatório de Pesquisa, 2012. Disponível em: < http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2017.

KYTE, R. Foreword. What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management, Washington, v.15, p. 7, Março de 2012.

LAGARINHOS C. A. F. Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa. 2011. 291p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2011.

MARQUES, M. Coprocessamento em fornos de cimento. Revista Gerenciamento Ambiental, n. 6, 1999.

MORAIS, A. S. C. Incorporação de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha. 2013. 179f. Tese (doutorado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

MOTHÉ, A. V. Utilização de lama de alto-forno em cerâmica vermelha. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

MOTTA, F. G. A cadeia de destinação dos pneus inservíveis – o papel da regulação e do desenvolvimento tecnológico. Ambiente & Sociedade, Campinas, v. XI, n. 1, p. 167-184, 2008.

NETO, E. L. E. Destinação final dos resíduos sólidos urbanos no estado do Rio de Janeiro e a aplicação dos instrumentos de regulamentação e controle ambiental: uma abordagem crítica. Dissertação de Mestrado em Saúde Pública - Fundação Oswaldo Cruz. Escola Nacional de Saúde Pública, 2006.

SANTOS, G. M. Estudo do comportamento térmico de um forno túnel aplicado à indústria de cerâmica vermelha. 2001. 113f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Boletim de Inteligência, Dezembro de 2015. Construção Civil: Cerâmica Vermelha. Disponível em: <http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2017.

SILVA, J. E. O. Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil. 2007. 74f. Dissertação (mestrado) – Centro Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2007.

SILVA, M. G. Avaliação da incorporação combinada dos resíduos de cascalho de perfuração de poço de petróleo e de polimento do porcelanato em cerâmcia vemelha. 2012. 157f. Tese (doutorado) – Centro Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.

SOARES, A. I. C. C. R. Caracterização Físico-Química de Anomalias em Pneus – Criação de um protocolo de testes forenses. 2015. 112f. Dissertação (mestrado) – Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal, 2015.

SOUZA, E. T. A.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Revestimento cerâmico com granito e argila caulinítica. Cerâmica, São Paulo, v. 50, n. 314, p.122-127, 2004.

UNITED NATIONS - Department of Economic and Social Affairs. World Population Prospects: the 2017 revision. Disponível em: <https://www.un.org/development/desa/publications/world-population-prospects-the-2017-revision.html>. Acesso em: 23 jul. 2017.

VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. (2007). Características e efeito da fração granulométrica < 2 μm no comportamento de queima de uma argila. Cerâmica 53, 249-254.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTO CERÂMICO ORNAMENTAL PRODUZIDO COM A ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE PNEU

EVALUATION OF ORNAMENTAL CERAMIC COATING PRODUCED WITH THE ADDITION OF TIRE RESIDUES

Mariana Vasconcelos Ferreira de Araújo - IFFluminense/PPEA
Angélica da Cunha dos Santos - IFFluminense/PPEA

RESUMO

A incorporação de resíduos de atividades industriais em produtos cerâmicos é uma tecnologia alternativa para reduzir impactos ambientais em diferentes áreas. Este aproveitamento pode trazer alguns benefícios para a indústria de cerâmica vermelha, como a redução do custo e da quantidade de matéria prima utilizada, a redução do consumo de combustível durante a queima, além de evitar que estes resíduos tenham destinação ambientalmente inadequada. O resíduo do pneu em final de vida útil é considerado um resíduo combustível, por apresentar poder calorífico relativamente alto atribuído à matéria orgânica presente em sua composição. Quando adicionados às massas cerâmicas, os resíduos combustíveis podem provocar formação de grande quantidade de poros devido a sua possível volatização durante a queima e, consequente, diminuição da resistência mecânica do produto. O objetivo desta pesquisa é analisar o efeito da incorporação de diferentes concentrações de resíduo de pneus na fabricação de revestimentos cerâmicos para usos não estruturais, do tipo plaquetas de tijolos aparentes. Para isso, foram confeccionados corpos de prova com incorporações do resíduo de 0; 0,5; 1; 1,5 e 2% em massa argilosa proveniente da empresa X, localizada em Campos dos Goytacazes/RJ. O resíduo de pneu foi disponibilizado pela empresa Y, localizada em Juiz de Fora/MG. Os corpos de prova foram prensados com pressão uniaxial de 20 MPa e queimadas a 1050 e 1150ºC. Posteriormente, as propriedades tecnológicas dos produtos, como retração linear, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão, foram analisadas. Os resultados obtidos indicaram que, de forma geral, a incorporação dos resíduos de pneu influenciou favoravelmente as propriedades quando comparadas aos produtos comercializados pela empresa X.

Palavras-chave: Cerâmica vermelha; Propriedades mecânicas; Tijolo aparente

ABSTRACT

The incorporation of waste from industrial activities into ceramic products is an alternative technology to reduce environmental impacts in different areas. This use can bring some benefits to the red ceramics industry, such as reducing the cost and the quantity of raw material, reducing fuel consumption during firing, and preventing the inadequate environment disposition of these wastes. The end-of-life tire residue is considered a fuel residue, because of its relatively high calorific value attributed to the organic matter present in its composition. When added to the ceramic masses, fuel wastes can cause the formation of large amounts of pores due to their possible volatilization during firing stage, consequently, reducing mechanical resistance of the product. The objective of this work is to analyze the effect of incorporating different concentrations of tire waste in the manufacture of ceramic coatings for non-structural uses, such as facing bricks. For this reason, specimens were prepared by incorporating 0; 0.5; 1 1.5 and 2% of the residue in the clay from company X, located in Campos dos Goytacazes/RJ. The tire residue was provided by company Y, located in the city of Juiz de Fora/MG. The specimens were pressed with a one-axial pressure of 20 MPa and fired at 1050 and 1150 ºC. Subsequently, the technological properties of the products, such as linear shrinkage, water absorption, apparent porosity and flexural stress at rupture, were analyzed. The results indicated that, in general, the incorporation of tire residues influenced the properties when compared to the products marketed by company X.

Keywords: *Red ceramic. Mechanical properties. Facing brick .*

1. INTRODUÇÃO

O setor cerâmico é bastante heterogêneo e amplo, verificando-se a existência de diferentes tipos de estabelecimentos, difereciando-se quanto à capacidade de produção, à qualidade dos produtos, aos níveis de produtividade e ao grau de mecanização. Encontra-se dividido em vários segmentos em função da matéria-prima utilizada, das propriedades e áreas de utilização dos produtos. Segundo a ABCERAM (2018), em geral, adota-se a seguinte classificação: materiais de revestimento (placas cerâmicas); cerâmica branca; materiais refratários; isolantes térmicos; fritas e corantes; abrasivos; vidro, cimento e cal; cerâmica de alta tecnologia ou cerâmica avançada; e cerâmica vermelha. Esta última, que será o foco deste trabalho, **co**mpreende aqueles materiais com

coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno.

As cerâmicas vermelhas têm como principal matéria prima a argila com presença de ferro, titânio e outros elementos metálicos em sua composição que proporcionam a esse material a coloração avermelhada típica (MEDEIROS *et al.*, 2014). A argila apresenta boa plasticidade, elevada resistência mecânica após queima adequada para uma série de aplicações, técnicas de processamento simples e disponibilidade em grandes quantidades (VIEIRA, 2000). Há uma grande variabilidade de composição de argilas, que dão origem a produtos com propriedades proporcionamente variáveis.

O processo de produção da cerâmica vermelha é composto pelas seguintes etapas, extração da argila nas jazidas, preparação da massa, conformação das peças, secagem, queima, estocagem e/ou transporte para o consumidor.

As empresas do setor cerâmico, em sua maioria, constituem uma cadeia de processo geradora de resíduos que são dispostos na natureza sob a forma de gás, líquido ou sólido, gerando impactos ambientais. Em contrapartida, essas empresas podem minimizar esses impactos inserindo os resíduos oriundos de outras áreas e do seu próprio processo produtivo na fabricação dos produtos cerâmicos, direcionando-os para uma correta disposição por meio da reciclagem (MEDEIROS *et al.*, 2014).

Muitos estudos vêm sendo realizados a fim de verificar a incorporação de diferentes resíduos na cerâmica vermelha. Outros buscam basicamente verificar se uma determinada massa argilosa é adequada ou não para fabricação de cerâmica vermelha. Lamentavelmente, como estes trabalhos ficam restritos ao ambiente acadêmico, o produto cerâmico brasileiro ainda apresenta valores de resistência mecânica inferiores aos recomendados pelas normas técnicas. Isso é devido ao fato de que grande parte das empresas fabricantes são de pequeno e médio portes, não possuindo recursos financeiros para investir no controle e na melhoria de seus processos, e a uma fiscalização deficiente dos produtos comercializados.

As propriedades mecânicas dos produtos de cerâmica vermelha dependem da composição das argilas e das condições de processamento empregados. A temperatura de queima, particularmente, é um parâmetro de processamento que influencia bastante as propriedades mecânicas (PINHEIRO, 2010).

No presente trabalho, objetiva-se avaliar a possibilidade de incorporação do resíduo de pó de borracha, proveniente da recauchutagem de pneus usados, em cerâmica vermelha para uso ornamental, como os tijolos aparentes, para ser usado em paredes externas e internas. Especificamente, busca-se verificar as propriedades físicas e mecânicas de peças cerâmicas fabricadas em laboratório com incorporações do resíduo de 0; 0,5; 1; 1,5 e 2% em massa argilosa, queimadas a 1050 e 1150ºC. A massa argilosa é proveniente da empresa X, localizada em Campos

dos Goytacazes/RJ. Busca-se, ainda, comparar as propriedades tecnológicas obtidas com as de produtos comercializados pela empresa X.

O resíduo de pneu, uma das matérias primas deste trabalho, caracteriza-se como um resíduo combustível, segundo a classificação proposta por Dondi *et al*.(1997) e Vieira e Monteiro (2009). Conforme a NBR 10004/2004, o resíduo de pneus pode ser classificado como sendo não-perigoso Classe II A – não-inerte, por apresentar teores de metais (zinco e manganês) no extrato solubilizado superiores aos padrões estabelecidos por esta mesma norma (BERTOLLO *et al.*, 2002).

O tijolo aparente tem se estabelecido no mercado por ser prático, versátil e oferecer uma estética rústica marcante, além de se adaptar bem quando combinado com outros materiais na construção.

Outra tendência forte de mercado é o *ecodesign*, que se apresenta como forma de desenvolver ou adaptar produtos a fim de minimizar os seus impactos no meio ambiente. O aproveitamento de resíduos na indústria cerâmica pode ser um bom caminho para a fabricação de produtos mais eco-positivos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 – Cerâmica Vermelha

Cerâmica vermelha tem significado amplo, compreendendo aqueles materiais com coloração avermelhada empregados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno. As lajotas muitas vezes são enquadradas neste grupo, porém a melhor classificação às enquadra em Materiais de Revestimento. (ABCERAM, 2018)

No que se refere à matéria-prima, o setor de cerâmica vermelha utiliza basicamente argila comum. A massa é tipo monocomponente, constituindo-se só de argila, e pode ser denominada de simples ou natural (MOTTA, 2001). As razões para isto são suas características, como plasticidade, resistência mecânica após queima adequada para uma série de aplicações, por possibilitar a aplicação de técnicas de processamento simples, e também pela sua disponibilidade em grandes quantidades (VIEIRA *et al.*, 2000).

A plasticidade é uma propriedade fundamental que permite que massas argilosas alcancem a consistência plástica adequada para serem conformadas pelo processo de extrusão (VIEIRA *et al.*, 2007).

Segundo Motta (2001), as argilas empregadas em cerâmica vermelha, como recurso mineral apresentam alto valor locacional, ou seja, devem necessariamente estar situadas nas proximidades das unidades produtoras de cerâmicas. Assim, a distribuição dessas unidades é controlada pelas ocorrências dos depósitos de argila. Os principais pólos cerâmicos do Brasil estão localizados nos estados das regiões Sul e Sudeste.

Segundo Vieira *et al.* (2000), é possível obter, geralmente, produtos de cerâmica vermelha com variadas argilas, situadas praticamente em qualquer lugar do mundo e que permitam utilizar diferentes técnicas de processamento. Entretanto, os produtos obtidos apresentarão propriedades também diferentes. Os autores ressaltam que cada região produtora deve se adequar às suas condições sociais, econômicas e tecnológicas e definir o que se quer produzir e para qual consumidor.

Uma quantidade maior de argilominerais de granulometria muito fina irá conferir maior plasticidade à argila, sendo esta denominada argila "gorda". A plasticidade provém da forma das partículas, coloidais, que possuem boa coesão entre si. As argilas "gordas" possuem facilidade na moldagem das peças, com baixo consumo de energia e reduzido desgaste dos equipamentos. A utilização somente destas argilas em cerâmica vermelha pode trazer problemas de processamento, dificultando a etapa de conformação e secagem. Por serem pouco permeáveis, a difusão da água do centro para a superfície da peça é dificultada, o que causa secagem diferencial com o aparecimento de tensões, deformações e trincas. Por outro lado, geralmente peças produzidas com estas argilas apresentam uma resistência mecânica a verde e a seco satisfatória (VIEIRA *et al.*, 2007).

As argilas com menor teor de argilominerais são denominadas "magras", apresentando baixa plasticidade. As argilas "magras" possuem baixa resistência no estado após a secagem e baixa retração linear. A utilização de composições com maiores quantidades de argilas "magras" provoca maior desgaste nos equipamentos. Geralmente, elas são usadas para a correção da plasticidade das argilas que apresentam plasticidade muito alta (CARDOSO, 1995).

Além dos argilominerais, segundo Gaidzinski (2006), as argilas geralmente contêm outros materiais como matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, pirita, mica, calcita, dolomita e outros minerais residuais, e podem conter também minerais não cristalino.

No segmento cerâmico, são relacionados os fabricantes e produtos destinados à construção civil. Conforme dados do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE, 2015), esta indústria representa 4,8% da indústria da construção civil, gera cerca de 300 mil

empregos diretos e 1,5 milhão de empregos indiretos e fatura 18 bilhões de reais anualmente. Mensalmente, as 9.071 pequenas empresas que compõem o setor produzem um total de 1,3 bilhão de telhas e 4 bilhões de blocos de vedação e estruturais (SEBRAE, 2015).

Segundo dados do Sebrae (2015), a região Sudeste do Brasil é responsável por 44,4% da produção nacional de cerâmica vermelha. Nessa região, estão instaladas a maior parte das empresas, correspondendo a 36,9% do total.

O pólo cerâmico de Campos é o maior produtor de cerâmica vermelha do Estado do Rio de Janeiro. O município de Campos dos Goytacazes, localizado na região norte do Estado, apresenta uma grande reserva de argilas, que motivou o desenvolvimento da indústria de cerâmica vermelha. O pólo de Campos, que engloba os municípios de Campos dos Goytacazes, São João da Barra e Cardoso Moreira, produziu o equivalente a 61,6% da produção de argila do Estado do Rio de Janeiro em 2012 (DRM-RJ, 2014).

Segundo Vieira (2003b), a massa cerâmica de Campos apresenta uma composição mineralógica com excessivo percentual de fração “argila” que é de predominância caulinítica. Foi observada a presença de hidróxido de alumínio que contribui para aumentar a refratariedade da massa e elevar a perda ao fogo.

O polo de Campos foi responsável por 70% da produção de peças de cerâmica vermelha do Estado em 2017, atribuída a 120 indústrias. A produção teve predomínio de blocos de vedação, que possuem menor valor agregado, e receita estimada em 256 milhões de reais (21,33 milhões de reais/mês) (DRM-RJ, 2014).

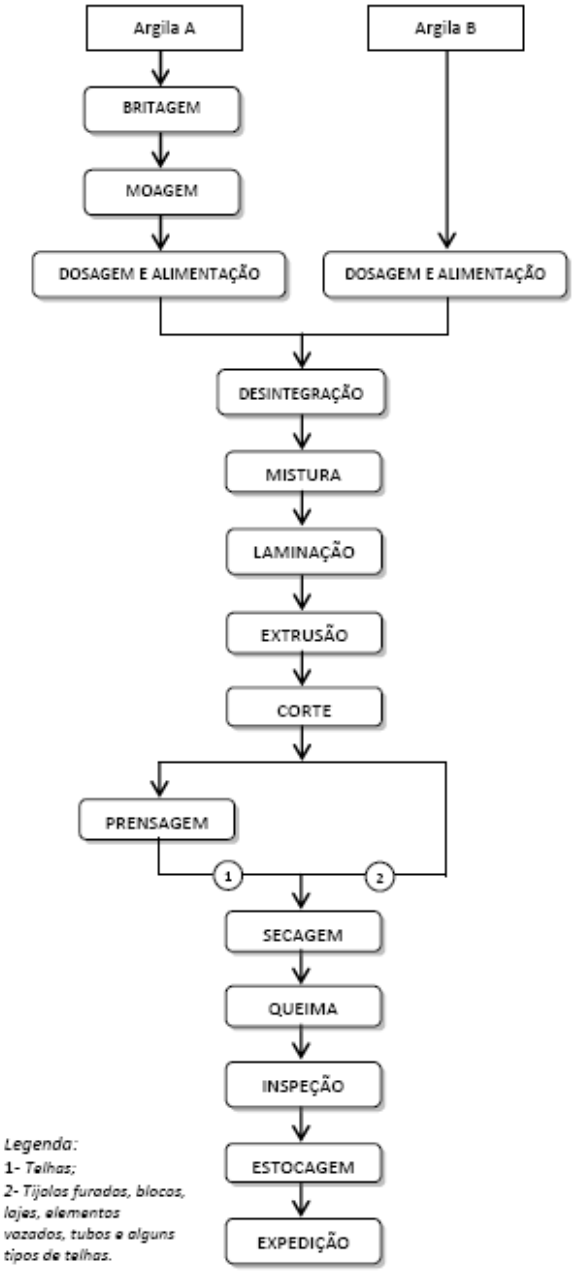
2.2 – Processo de Fabricação de Cerâmica Vermelha

Os processos de fabricação empregados pelos diversos segmentos cerâmicos assemelham-se parcial ou totalmente, envolvendo, essencialmente, as mesmas etapas. O setor que mais se diferencia quanto a esse aspecto é o de fabricação do vidro. As diferenças entre os processos derivam do tipo de peça a ser fabricada ou material desejado (ABCERAM, 2018).

A cadeia produtiva da indústria cerâmica é caracterizada por duas etapas distintas: a primária, que envolve exploração e explotação da matéria prima (neste caso, a argila) e a de transformação, que envolve a elaboração do produto final (SEBRAE, 2008). De um modo geral, os processos de fabricação consistem basicamente em: seleção, dosagem e preparação da matéria-prima e da massa, formação das peças, tratamento térmico e acabamento. No processo de fabricação, muitos produtos

são submetidos a esmaltação e decoração (ABCERAM, 2018). O fluxograma (Figura 1) ilustra o processo produtivo de cerâmicas vermelhas.

Figura 1: Fluxograma do processo de fabricação de cerâmicas vermelhas



Fonte: Adaptado de ABCERAM (2018).

O processo produtivo da cerâmica vermelha tem início na extração da argila, que ocorre a céu aberto, preferencialmente nos meses de menor precipitação de chuvas, podendo ser realizada manualmente ou mecanizada, utilizando escavadeiras, pás carregadeiras, trator de esteira com lâmina, entre outros equipamentos (FIEMG, 2013).

Durante o recebimento da argila extraída, é recomendado que uma amostra da argila seja coletada na primeira e na última carga para realização de ensaios de resíduo. Assim, pode-se

identificar algum problema ainda na etapa de campo, em vez de identificá-lo somente após a secagem ou queima (FIEMG, 2013). No entanto, na maioria das cerâmicas do Brasil, isso não é observado, devido à falta de conhecimento ou à falta de recursos para investimento nessa fase.

No recebimento, a argila deve ser armazenada em pequenos lotes cobertos com uma lona plástica com o objetivo de acelerar o processo de decomposição da matéria orgânica e sais solúveis. A matéria-prima deve ser armazenada em camadas para facilitar a mistura no momento de sua retirada das pilhas de estocagem (FIEMG, 2013). Segundo estudos de Gaidzinski (2006), a utilização do sistema de formação de pilhas de estocagem de argila resulta em melhorias significativas no processo de fabricação de produtos cerâmicos, pois além de tornar a matéria-prima mais uniforme, também melhora as suas propriedades tecnológicas. A autora observou melhorias nas propriedades das matérias-primas, como plasticidade, resistência mecânica e absorção de água, o que confere aumento na qualidade do produto final. Além disso, verificou-se que existem determinadas épocas do ano mais favoráveis para a realização deste processo, chamado sazonamento, na região em que seu estudo foi realizado. Sendo mais favorável no período de outubro a maio, período este em que tanto a temperatura média quanto o índice pluviométrico apresentam-se mais elevados.

Após o sazonamento, a matéria-prima será submetida às etapas de transformação: preparação da massa, conformação das peças, secagem e tratamento térmico.

A preparação da massa consiste na mistura dos diferentes tipos de argila, água e resíduos, quando aplicáveis. As matérias-primas devem ser desagregadas ou moídas de acordo com a granulometria e, algumas vezes, passam por processos de purificação. Segundo Motta (2001), a formulação da massa busca, geralmente de forma empírica, uma composição ideal de plasticidade e fusibilidade, para fornecer trabalhabilidade e resistência mecânica na queima. Geralmente, a massa é constituída da mistura de uma argila “gorda” com uma argila “magra”. A primeira é caracterizada pela alta plasticidade, granulometria fina e composição essencialmente de argilominerais, a segunda apresenta grande quantidade de quartzo e é menos plástica, podendo ser caracterizada também como material redutor de plasticidade.

A produção de uma boa massa cerâmica é uma etapa importante para obter um produto de alta qualidade, para minimizar as perdas e, consequentemente, melhorar o desempenho ambiental do processo. Pode-se conseguir grandes benefícios como mais de 35% de economia do consumo de energia, aumento de 25% na produtividade, redução de cerca de 40% dos índices de deformação (FIEMG, 2013).

A massa é então encaminhada para a etapa de laminação, que irá desagregar os torrões e homogeneizar a massa e promover o direcionamento de partículas das argilas. A qualidade da laminação determina a qualidade do acabamento dos produtos, evita perdas e pode levar a uma

redução no consumo de energia na queima, pois a granulometria do material diminui (FIEMG, 2013).

Em seguida, encaminha-se para a etapa de conformação. Existem pelo menos quatro métodos de conformação, que são: tornearia, colagem, extrusão e prensagem. A seleção do método específico vai depender das características e geometria do produto, condições de trabalho das massas, do tamanho das peças, das dificuldades de fabricação, das tolerâncias especificadas e do fator econômico (MAIA, 2012).

A conformação de produtos de cerâmica vermelha para a construção civil como tijolos, blocos cerâmicos e telhas pode ser realizada por extrusão e prensagem (MAIA, 2012).

A extrusão consiste em forçar, por pressão, a massa a passar através de uma matriz apropriada ao tipo de peça a ser produzida. A extrusora recebe a massa preparada para ser compactada e forçada por meio de um pistão ou eixo helicoidal através da matriz (FIEMG, 2013). As peças são cortadas e retiradas manualmente ou automaticamente, inspecionadas visualmente, selecionadas e encaminhadas para a etapa de secagem. As peças defeituosas podem ser reintroduzidas na etapa de preparação de massa (FIEMG, 2013).

No outro método de conformação, a prensagem, o processo é baseado na compactação, por meio da aplicação pressão, de um pó granulado (massa) contido no interior de uma matriz rígida ou de um molde flexível (MAIA, 2012).

Na etapa de secagem, o objetivo é o de eliminar a água, utilizada para conferir plasticidade à massa nas etapas de preparação e posterior conformação. É uma etapa bastante delicada e complexa no processo de fabricação de cerâmica vermelha. É comum ocorrerem defeitos de secagem nas peças e que são perceptíveis somente após a queima. A compreensão dos mecanismos envolvidos na secagem permite por exemplo, uma melhor compreensão dos defeitos e da forma de como evitá-los (VIEIRA, 2003a).

Existem dois tipos de secagem utilizados pelas cerâmicas: natural e artificial. Cada um com suas vantagens e desvantagens relacionadas a custos, produtividade, exigência de conhecimento técnico.

Após a secagem, o produto deve ter resistência suficiente para a sua manipulação durante o acabamento e o transporte até a etapa de queima.

Na operação de queima, as peças adquirem suas propriedades finais, necessárias à sua utilização. Esse tratamento térmico é responsável por uma série de transformações físico-químicas das peças como: perda de massa, desenvolvimento de novas fases cristalinas, formação de fase vítrea e a sinterização dos grãos. Os produtos são submetidos a temperaturas elevadas que, para a maioria dos produtos, situa-se entre 800º C a 1.000º C, em fornos contínuos ou intermitentes que operam em

três fases. A primeira compreende o aquecimento da temperatura ambiente até a temperatura desejada, seguida pela manutenção durante certo tempo na máxima temperatura da curva de queima e posterior resfriamento até temperaturas inferiores a 200º C (FIEMG, 2013).

Após a etapa de queima, as peças serão retiradas do forno e inspecionadas para retirada das que apresentarem defeitos.

A queima é considerada a etapa mais onerosa da fabricação de cerâmica devido ao elevado custo para o suprimento da fonte térmica. A queima industrial de cerâmicas requer grande quantidade de energia, consumindo altos volumes de combustível. Este combustível pode ser óleo, gás ou lenha, sendo a última mais acessível às cerâmicas brasileiras (VIEIRA, 2003b).

A energia consumida no setor de cerâmica em 2016 foi estimada em 4,3 milhões de tep[2]. A participação da lenha como fonte energética foi de 48,7% de todo o consumo de energia pelo setor cerâmico, seguida pelo gás natural (31%) (MME, 2017).

A seleção do forno depende da eficiência de produção desejada, do investimento necessário e combustível utilizado. Os fornos são classificados em intermitentes e contínuos. Dentre os fornos intermitentes mais utilizados no Brasil estão os Fornos Caieira, o Paulistinha (retangular), o Abóboda ou redondo, o Vagão e o Metálico. Todos apresentam vantagens e desvatagens. Os fornos Caieira e Paulistinha necessitam de menor investimento para implantação, porém apresentam baixa produtividade e alto percentual de peças não conformes (FIEMG, 2013).

Dentre os fornos contínuos mais utilizados nacionalmente estão o Forno Hoffmann e o Forno Túnel. Apesar de apresentarem boa produtividade e bom rendimento energético, requerem elevado investimento na sua construção (FIEMG, 2013).

Durante a queima, um conjunto bastante complexo de reações físico-químicas se processam no interior da massa cerâmica argilosa, dependendo da temperatura de queima (SANTOS, 1989 *apud* PINHEIRO, 2010).

Em estudos realizados por Pinheiro (2010) para avaliar algumas propriedades mecânicas de peças de cerâmica vermelha queimadas a 850ºC, 950ºC e 1050ºC, foi observado que, para temperaturas de queima até cerca de 950ºC, obtém-se uma microestrutura porosa mais adequada à fabricação de tijolos e blocos cerâmicos. Para que eles possam ser usados no processo construtivo de forma adequada, estes produtos precisam ser notadamente mais porosos. Enquanto que, para temperaturas superiores a 950ºC, a microestrutura resultante apresenta-se suave e mais densa, o que favorece a produção de telhas e tubos. Uma importante propriedade técnica para estes produtos cerâmicos é a impermeabilidade, que exige uma microestrutura notadamente mais densa.

[2] tep = toneladas equivalentes de petróleo, onde 01 tep = 41,87 x 1 bilhão J = 10 x 10 bilhões cal = 11,63 MWh

2.3 – Impactos ambientais na indústria de cerâmica vermelha

Vários impactos ambientais são gerados na cadeia produtiva dos produtos cerâmicos. Os seus diversos produtos e processos produtivos são consumidores de recursos naturais e energia, bem como produzem grande quantidade de resíduos (CPRH, 2010). Assim, os principais impactos ambientais relacionados à indústria de cerâmica vermelha estão geralmente associados a degradação das áreas de extração da argila, consumo energético, geração de resíduos sólidos decorrentes de perdas por falhas na qualidade do produto, emissão de poluentes atmosféricos e gases de efeito estufa. Esses fatores podem ser verificados nas diferentes etapas do sistema produtivo (FIEMG, 2013).

A extração de argila é uma atividade que gera diversos impactos sobre o meio ambiente. Dentre os impactos físicos estão a poluição do ar devido à emissão de material particulado fino proveniente das vias de acesso, a erosão do solo devido à exposição do mesmo a águas pluviais, o assoreaemnto de cursos d'água e a emissão de ruídos provenientes das dragas, caminhões e maquinários (FIEMG, 2013). A extração também pode causar o afloramento do lençol freático. Tem-se ainda o impacto biótico relacionado à supressão da vegetação para dar início à mineração da argila.

Durante as diversas fases da produção, são gerados resíduos como as cinzas provenientes da queima de combustível nos fornos, o material cru não conforme, o produto final fora de especificação e os resíduos comuns recicláveis. A quantidade de cinzas gerada dependerá do tipo de combustível utilizado e da tecnologia do forno cerâmico. Se o carvão mineral ou outro combustível fóssil for utilizado na queima, as cinzas deverão ser armazenadas em caçambas e não devem ser aplicadas no solo, pois podem apresentar alto teor de enxofre e ferro. Já as cinzas provenientes da queima de biomassa (lenha, serragem, cavaco, entre outros) podem ser dispostas diretamente sob o solo e não possuem especificação de armazenagem, todavia recomenda-se que seja feita em caçambas também (FIEMG, 2013). Há estudos para o aproveitamento das cinzas resultante da queima de biomassa adicionadas à mistura cerâmica.

O material cru não conforme pode ser reinserido no próprio processo, porém gera-se mais uma atividade, reduz-se a produtividade, aumenta-se a perda energética, gerando custos adicionais. O ideal é que o processo seja melhor controlado e este resíduo não seja gerado ou sua geração ao máximo minimizada (FIEMG, 2013).

O setor cerâmico é um grande consumidor de energia, tendo forte impacto ambiental em razão do uso intensivo de lenha. A lenha representou quase 50% de todo o consumo de energia pelo

setor cerâmico no ano de 2016 (MME, 2017). A Tabela 1 apresenta o consumo de energia em % pelo setor de cerâmica no período de 2011 a 2016.

Tabela 1 – Consumo de energia pelo setor de cerâmica do Brasil de 2011 a 2016 (em %)

FONTES	2011	2012	2013	2014	2015	2016
LENHA	50,5	51,2	51,9	52,3	50,1	48,7
GÁS NATURAL	27,3	27,4	26,7	26,4	28,7	31,0
ÓLEO COMBUSTÍVEL	2,6	2,3	2,5	2,0	1,3	1,1
ELETRICIDADE	7,2	7,5	7,5	7,4	7,3	7,5
OUTRAS	12,3	11,6	11,4	11,9	12,6	11,6

Fonte: Adaptado de BRASIL (2017)

Dentre os problemas ambientais causados pela sua queima estão a produção de cinzas, óxidos de enxofre, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio, causadores de chuva ácida e de danos à camada de ozônio. Além disso, a lenha apresenta baixo rendimento energético, que impacta na qualidade e nos padrões técnicos dos produtos, resultando em até 30% de perda (SEBRAE, 2008).

A alteração da qualidade do ar em relação à queima é minimizada com a utilização de gás natural, que vem aumentando nos últimos anos conforme dados da Tabela 1. A sua utilização aumenta a eficiência da sinterização das peças, diminuindo a quantidade de peças defeituosas por queima ineficaz (gradiente de temperatura do forno), diminui o lançamento de material particulado e CO_2 na atmosfera, porém aumenta-se o uso de um combustível não renovável (combustível fóssil) (SANTOS JR, 2017).

Em conclusão de seus estudos, Santos Jr (2017) considera que o impacto sobre o meio ambiente de maior significância está na etapa de extração, sendo necessário uma vigilância significativa sobre a utilização desse recurso sob pena de que o passivo ambiental das empresas e, por conseguinte, do setor cresça. Esse impacto poderá ser tanto menor quanto for a capacidade do setor na utilização de novas matrizes como matéria prima, ou mesmo a diminuição do uso das argilas com a incorporação de outros materiais na massa cerâmica, principalmente aqueles que sejam considerados resíduos de outros setores.

O aproveitamento de resíduos sólidos de outras indústrias traz outros benefícios para a indústria de cerâmica vermelha como a redução do consumo de combustível, além de evitar que estes resíduos tenham destinação ambientalmente incorreta.

2.4- Resíduos na indústria cerâmica

A indústria cerâmica é considerada hoje um dos setores que mais reciclam resíduos, sejam eles industriais ou urbanos. Os estudos sobre a incorporação de resíduos em cerâmica vermelha têm se tornado cada vez mais frequentes e grande de alvo interesse científico. Isto se deve às características físico-quimicas das matérias-primas cerâmicas, ao fato da grande demanda de matéria-prima e sua grande produção (MENEZES, 2002) e à plasticidade e composição variável das massas argilosas (DONDI *et al.*, 1997), facilitando a incorporação de vários resíduos.

O aproveitamento de resíduos sólidos industriais como insumo na indústria cerâmica pode reduzir os custos e a quantidade de matérias-primas utilizadas e reduzir o consumo de combustível e energia. Além disso, o processo produtivo, geralmente, não sofre grandes modificações com a introdução do resíduo na massa cerâmica. E ainda há a possibilidade de inertizar resíduos poluentes na matriz cerâmica sinterizada.

Assim, vários estudos têm sido desenvolvidos nos últimos anos a fim de verificar a viabilidade da incorporação de resíduos nas cerâmicas vermelhas e a facilidade de implementação para o produtor, visto que grande parte das indústrias são de pequeno porte e de nível tecnológico reduzido.

Em seus estudos sobre resíduos industriais, Vieira e Monteiro (2009) apresentaram uma revisão atualizada dos avanços tecnológicos relacionados à incorporação de diferentes tipos de resíduos sólidos em cerâmica vermelha. Assim, as três categorias propostas foram:

- Resíduos combustíveis;
- Resíduos fundentes;
- Resíduos que afetam as propriedades cerâmicas.

Os resíduos combustíveis são aqueles que apresentam poder calorífico relativamente alto devido à matéria orgânica presente em sua composição. De acordo com Menezes e colaboradores (2002), a utilização desses resíduos por parte das indústrias cerâmicas pode ocorrer por incorporação dos resíduos à massa cerâmica ou na mistura com os combustíveis responsáveis pela queima do corpo cerâmico, podendo trazer economia de energia da ordem de 45%. No entanto, apresenta limitações quanto à porosidade do produto final e às emissões atmosféricas. Essa categoria inclui resíduos da indústria de papel, lama de alto forno e resíduos derivados da extração e refino de petróleo (VIEIRA E MONTEIRO, 2009).

Os resíduos fundentes são assim denominados, pois apresentam uma quantidade relativamente alta de óxidos alcalinos, como K_2O e Na_2O, que em reação com a sílica e a alumina promovem a formação de fase líquida que facilita a densificação e melhora a compactação das

cerâmicas (Vieira e Monteiro, 2009). Nessa categoria os autores incluem resíduo de serragem de rochas ornamentais, vidro e cinzas.

Vieira e Monteiro (2009) caracterizaram os resíduos que afetam as propriedades cerâmicas e não se enquadram nas duas categorias anteriores, por não forneceram poder calorífico nem conter substâncias fundentes. A categoria de resíduos que afetam as propriedades cerâmicas, os autores incluem o chamote, resíduos de mineração, lodo de tratamento de água, lodo de curtumes, areias de fundição e restos de construção e demolição.

Menezes e colaboradores (2002) evidenciam que a utilização de resíduos combustíveis adicionados às massas cerâmicas pode provocar sensível diminuição da resistência mecânica do corpo, além da formação de grande quantidade de poros com a volatilização do combustível na queima. A utilização desses resíduos pode ainda alterar a composição mineralógica do produto, caso não ocorra a adequada oxidação dos resíduos durante a queima, deixando carbono na massa, o qual pode atuar como agente redutor durante o restante da queima.

Dondi *et al*. (1997) alerta que, além das economias de energia durante a queima, os principais efeitos das adições incluem aumento da porosidade e a diminuição da resistência mecânica do mesmo. Em termos de quantidade de resíduos que podem ser utilizadas em corpos cerâmicos, as incorporações são bastante modestas, quase nunca mais do que 10% em massa.

Conforme a classificação proposta por Dondi *et al*.(1997) e Vieira e Monteiro (2009), o resíduo da borracha de pneu proveniente da recauchutagem de pneus usados, objeto de estudo deste trabalho, é um resíduo combustível.

A legislação vigente, a Resolução CONAMA nº 416 de 30 de setembro de 2009, estabelece que as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível para cada pneu novo comercializado para o mercado de reposição (BRASIL, 2009).

Segundo dados do Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), 53.411.924 pneus novos foram colocados no mercado de reposição em 2016 (IBAMA, 2017). Ao final de sua vida útil, esses e outros milhares de pneus já em circulação serão considerados inservíveis, podendo se transformar em um grande passivo ambiental.

O resíduo de pneus pode ser classificado, conforme NBR 10004/2004, como sendo não-perigoso Classe II A – não-inerte, por apresentar teores de metais (zinco e manganês) no extrato solubilizado superiores aos padrões estabelecidos por esta mesma norma (BERTOLLO *et al.*, 2002). Análises químicas realizadas por Canova (2008) e Faria (2015) verificaram a presença de metais pesados, como o chumbo e o cromo total, embora estes tenham apresentado valores não muito expressivos segundo os autores.

O valor do poder calorífico superior (PCS) do resíduo pó de borracha encontrado por Faria (2015) foi de 9281 kcal/kg. Esse valor de PCS está próximo aos valores descritos por Lagarinhos *et al*. (2008), Dourado (2011) e Dondi *et al*. (1997b). Segundo Faria (2015), a presença de elevado percentual de carbono indica que a combustão do material ocorre rapidamente e a liberação de energia durante o processo de queima torna o pó de borracha um resíduo importante para o processo de queima da cerâmica pois, durante esse processo há economia de energia e menor tempo de queima. Consequentemente, tem-se uma economia de biomassa, pois a maior parte da energia provém de lenha, serragem e cavaco.

Pode-se associar essa vantagem à possibilidade de uma destinação adequada de um passivo ambiental, com a possível inertização deste resíduo por meio do seu encapsulamento no produto cerâmico. Essa última possibilidade deve ser verificada com a realização de ensaios de lixivização e solubilização.

2.5- Novas tendências em revestimentos cerâmicos

Resumidamente, os revestimentos cerâmicos são aqueles materiais, na forma de placas usados na construção civil para revestir paredes, pisos, bancadas e piscinas de ambientes internos e externos (ABCERAM, 2018).

O Brasil é atualmente o terceiro maior consumidor e produtor mundial de revestimentos cerâmicos, atrás apenas de China e Itália. Os revestimentos italianos são reconhecidos pelo design, os chineses pelo preço e os brasileiros transitam em um mistura, que traz design aliado a preços competitivos. Isso faz com que a produção brasileira de revestimentos seja reconhecida internacionalmente (ASPACER, 2018).

A indústria de revestimentos cerâmicos constitui um segmento da indústria de transformação, do ramo de minerais não-metálicos, e tem como atividade a produção de pisos e azulejos. Representa, juntamente com a cerâmica estrutural vermelha (tijolos, telhas e outros refratários), as louças e o vidro, uma cadeia produtiva que faz parte do complexo industrial de materiais de construção. As placas cerâmicas são aplicadas em revestimento de pisos e paredes de ambientes industriais, comerciais, residenciais e em locais públicos. São constituídas de uma grande variedade de matérias-primas, que se apresentam em dois tipos principais, ou seja, os materiais argilosos e os não-argilosos. Conforme já dito, os materiais argilosos apresentam grande variedade de tipos e composições utilizados na produção da massa. Para se obter a composição desejada, são utilizadas misturas de diversos tipos e características distintas. Já os materiais não-argilosos são utilizados em

mistura com argilas, quando estas não os contêm. Servem para formar o esqueleto do corpo cerâmico ou para promover a fusão da massa. Os compostos minerais normalmente utilizados são quartzo, feldspato e calcário.

As principais características técnicas dos revestimentos cerâmicos são: absorção de água, abrasão superficial, resistência às manchas, resistência a ataques ácidos, dureza e choque térmico. A tonalidade é um fator importante no produto, pois devido às características das matérias-primas naturais, corantes, queima e outros fatores que fazem parte do processo de fabricação do revestimento cerâmico, podem ocorrer ligeiras variações no padrão de cor. As variações podem ocorrer de um lote para outro ou até mesmo dentro do mesmo lote de produção. Cada padrão de cor é, na verdade, uma faixa estreita de tonalidades próximas, compostas entre elas quando examinadas em painel, adequadamente misturadas e distribuídas. Algumas empresas do setor investem no processo produtivo, visando à redução de variações de tonalidades aos menores índices possíveis, objetivando uma variação nos padrões para 10 a 15 tons máximos para seus produtos (BNDES, 2006).

O conceito de revestimento também está relacionado à sua função, que se constitui nos requisitos de desempenho. No caso de revestimentos de paredes, pode-se dizer que eles devem cumprir requisitos como a proteção dos elementos de vedação dos edifícios; requisitos de estabilidade, conforto higrotérmico e acústico, estanqueidade à água e aos gases, segurança ao fogo e higiene, juntamente com as vedações; requisitos de regularização das superfícies dos elementos de vedação (conforto tátil e visual); requisitos de estética e valorização econômica; além da relação custo x benefício (ESQUEVIEL, 2001).

Os requisitos aplicáveis vão variar dependendo do uso do revestimento. Para paredes externas, por exemplo, o requisito de estanqueidade será fundamental. Enquanto que, para parades internas, os requisitos conforto térmico e/ou acústico serão prioritários.

O mercado consumidor atual tem buscado por produtos de revestimento mais rústicos e com variação de cores. A variação da tonalidade de cada plaqueta de revestimento caracteriza um produto exclusivo, trazendo contemporaneidade e personalidade à construção.

Para atender ao mercado, os fabricantes têm produzido tanto tijolos maciços para revestimento de paredes quanto plaquetas cerâmicas, com menor espessura. Em muitos casos, o consumidor opta pelas plaquetas em função da praticidade de colocação, tempo de obra reduzido e da possibilidade de opções de *design* diferenciado e inovação oferecidos. Os altos custos por metro quadrado das plaquetas cerâmicas justificam sua produção.

Nesse contexto, o revestimento de tijolo à vista ou tijolo aparente tem se estabelecido no mercado por ser prático, versátil e oferecer uma estética marcante. Ele se adapta bem quando combinado com outros materiais na construção.

Outra tendência forte de mercado é o *ecodesign* que se apresenta como uma forma de desenvolver produtos, ou adaptar produtos já existentes, buscando minimizar os seus impactos no meio ambiente, seja pela redução de algum material ou pela sua eliminação ou substituição. A busca das empresas pelo *ecodesign* vem crescendo pelo fato delas manifestarem o interesse de melhorar o desempenho ambiental de seus produtos. Percebe-se uma busca por mercados de consumidores mais conscientes, que se preocupam com a questão ambiental e como as empresas tratam o assunto no seu processo produtivo.

Assim, a prática do *ecodesign* é essencial às empresas que reconhecem a importância da responsabilidade ambiental, por promover uma melhor reputação da empresa perante sociedade, reduzir custos, diminuir os riscos e a geração de resíduos, melhorar a inovação de produtos, atraindo novos consumidores (BAKSHI; FIKSEL, 2003 *apud* CASTRO; ROZENFELD, 2014).

Segundo Pigosso (2008) *apud* Castro & Rozenfeld (2014), os principais motivadores da adoção do *ecodesign* são: legislações em vigor mais rigorosas e que contemplam o ciclo de vida dos produtos e seus resíduos; redução de custos resultantes do melhor uso dos recursos e da redução dos resíduos industriais; aumento da conscientização do consumidor; maiores oportunidades de negócios e crescente preocupação com o desempenho ambiental dos produtos.

Há um grande interesse acadêmico na incorporação de diversos resíduos à cerâmica vermelha e avaliação dos seus efeitos nas propriedades finais dos produtos. Dessa forma, muitos estudos em diversas instituições acadêmicas têm buscado verificar o tipo e quantidade de resíduo, tecnologia e processos de utilização e as alterações provocadas nas propriedades físicas e mecânicas das cerâmicas, conciliando aspectos econômicos e ambientais. Grande parte dos estudos estão concentrados em instituições próximas aos polos produtores de cerâmicos.

Entre os estudos realizados, podem-se citar a utilização de resíduos de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar (FARIA, 2011), lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (AREIAS, 2015), resíduo de serragem de rocha ornamental (AGUIAR, 2012), rejeitos de construção civil (SILVA, 2007), lodo amarelo de Estação de Tratamento de Água (CAMARGO, 2014), lama vermelha (BABISK, 2015), resíduos de cascalho da perfuração de petróleo combinado com resíduos de polimento do porcelanato (SILVA, 2012), lama de alto-forno (MOTHÉ, 2008), resíduo de vidro de lâmpada fluorescente (MORAIS, 2013) e resíduos de pó de borracha de pneus inservíveis (FARIA, 2015). Muitos desses trabalhos estão voltados para o polo cerâmico de Campos dos Goytacazes/RJ.

2.6- Legislação e Normatização

A adequação ambiental de uma indústria pressupõe o conhecimento das leis e normas que regem o setor. As legislações que dispõem sobre o controle de poluição ambiental e as normas técnicas aplicáveis à poluição do solo, da água e do ar devem ser devidamente respeitadas para o bom funcionamento do negócio e preservação da qualidade do ambiente.

As empresas de micro e pequeno porte, especialmente, têm problemas para se adequarem as normas e a legislação ambiental exigidas quando da implantação de atividades cerâmicas, sobretudo no que se refere a exploração de argila para a fabricação de cerâmicas vermelhas.

O aproveitamento pelo regime de licenciamento, ou de autorização e concessão de argilas usadas na produção de cerâmica vermelha é regulado pela Lei nº 6.567 de 24/09/1978. Ela dispõe sobre regime especial para exploração e o aproveitamento das substâncias minerais que especifica e dá outras providências, como o regime de licenciamento. Além da argila, a lei permite o aproveitamento de: areias, cascalhos e saibros para utilização imediata na construção civil; rochas e outras substâncias minerais para paralelepípedos, guias, sarjetas, moirões e afins; e rochas, quando britadas para uso imediato na construção civil e os calcários empregados como corretivo de solo na agricultura (BRASIL, 1978).

A Portaria Nº 155, de 12 de maio de 2016, traz regulamentos quanto ao regime de licenciamento, aprova a Consolidação Normativa do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) e revoga os atos normativos consolidados (BRASIL, 2016).

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o órgão responsável pela normalização técnica no país, fornecendo a base necessária ao desenvolvimento tecnológico brasileiro. Dentre os benefícios da normatização, podem-se citar um melhor conhecimento e controle dos impactos ambientais, a garantia da conformidade com as exigências legais e a melhoria contínua da percepção e do comportamento ambientais (SEBRAE, 2012).

No caso da indústria de cerâmica, existe várias normas técnicas para cada subsetor produtivo. Atentando para estas normas e utilizando adequadamente a matéria prima, o produtor pode não só aumentar sua produtividade, como também garantir uma estabilidade e sustentabilidade ao seu empreendimento (SEBRAE, 2012). No subsetor de placas cerâmicas para revestimentos, as normas aplicáveis são: NBR 13816, NBR 13817 e NBR 13818.

A NBR 13816 (ABNT, 1997a) define os termos relativos às placas cerâmicas para revestimento, esmaltadas e não esmaltadas. Segundo esta norma, o revestimento cerâmico é definido como conjunto formado entre as placas cerâmicas, a argamassa de assentamento e o rejunte. As placas cerâmicas são definidas como material composto de argila e outras matérias primas

inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformadas por extrusão ou por prensagem, podendo também ser conformadas por outros processos. As placas são sumetidas à secagem e à queima à temperatura de sinterização. Podem ser esmaltadas ou não esmaltadas. As placas são incombustíveis e não são afetadas pela luz.

A NBR 13817 (ABNT, 1997b) classifica as placas cerâmicas para revestimentos, com o objetivo de promover a especificação correta para o seu uso. A classificação é feita conforme os seguintes critérios: esmaltação, método de fabricação, grupos de absorção de água, classes de resistência à abrasão superficial, classes de resistência ao manchamento, classes de resistência ao ataque de agentes químicos e aspecto superficial ou análise visual.

A NBR 13818 (ABNT, 1997c) estabelece as especificações, métodos de ensaio e critérios de aceitação para as placas cerâmicas de revestimento. Elas devem ser submetidas a ensaios específicos em função dos usos declarados nos catálogos ou infomativos das empresas fabricantes, e os resultados comparados aos definidos na norma.

Os revestimentos de tijolo aparente, ainda não são muito utilizados no Brasil, apesar do interesse por esses produtos vir crescendo no mercado brasileiro. Esse revestimento não está abrangido pelas normas regulamentadoras acima citadas. A falta de regulamentação leva a uma grande heterogeineidade e má qualidade dos produtos.

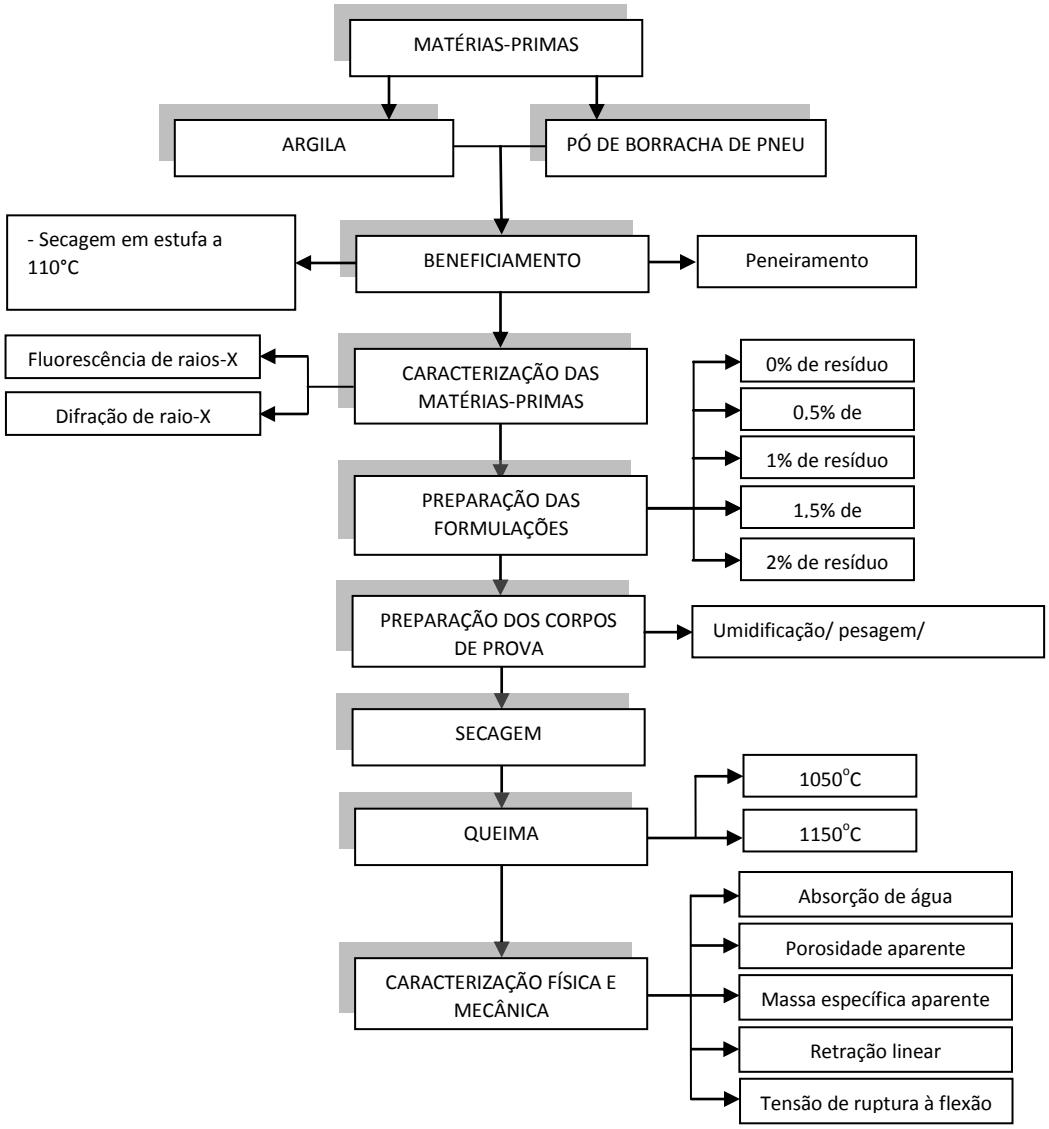
Na Europa, a normas relativas à construção passaram por transição e estandardização nas últimas décadas, com o objetivo de homogenizar as terminologias, métodos, materiais e critérios exigenciais dos diversos países constituintes da União Europeia. A norma EN 771-1:2011, intitulada "Especificações para unidades de alvenaria - Parte 1: Tijolos cerâmicos para alvenaria", define as características e as tolerâncias exigidas na construção de alvenarias, resistente ou não resistente, à vista ou rebocada (CARVALHO, 2015). Assim, a norma abrange os tijolos aparentes, também chamados de tijolos face à vista.

Conforme a NP EN 771-1, os tijolos cerâmicos são assim classificados em tijolos LD (*low density*), unidades cerâmicas com massa volumétrica seca bruta inferior ou igual a 1000kg/m^3, para utilização em alvenarias protegidas; e tijolos HD (*high density*), com massa volumétrica seca bruta maior que 1000kg/m^3. Como o tijolo face à vista deve ficar visível, seja no interior ou no exterior das construções, ele enquadra-se na classificação de "unidades HD" (CARVALHO, 2015).

3- MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, serão descritos os materiais utilizados e os métodos empregados no desenvolvimento deste trabalho. A metodologia baseia-se no processo produtivo empregado na indústria cerâmica tradicionalmente. A Figura 2 apresenta o fluxograma experimental desenvolvido.

Figura 2: Fluxograma das etapas envolvidas neste projeto



Os objetos de análise foram caracterizados e fabricados conforme metodologia difundida para caracterização de cerâmicos. As fases de caracterização das matérias-primas incluem o beneficiamento, além das caracterizações química, mineralógica e física.

A fim de preservar a identidade das empresas cerâmicas que colaboraram com a pesquisa foi definido que a empresa X trata-se de uma empresa da região norte fluminense, no município de Campos dos Goytacazes /RJ, a empresa Y refere-se a uma empresa localizada na cidade de Juiz de Fora/MG, todas consolidadas no mercado.

Foram utilizadas como matérias primas uma massa cerâmica argilosa e o resíduo de pó de borracha gerado no setor de recauchutagem de pneu. A massa argilosa utilizada é composta por argilas cauliníticas do município de Campos dos Goytacazes/RJ, proveniente da empresa X, correspondendo à uma mistura de duas argilas e areia quartzosa. É elaborada na empresa, sendo misturada com 20% da argila vermelha e 60% da argila clara e 20% de areia quartzosa, laminada e estocada. O resíduo de pó de borracha de pneu utilizado nesta pesquisa foi disponibilizado pela empreza Y.

Na etapa de beneficiamento das matérias-primas, realizou-se a secagem da massa cerâmica argilosa em estufa à 110ºC por um período mínimo de 24 horas. Posteriormente, a massa foi submetida ao destorroamento, cominuição e peneiramento com fração < 60 mesh (0,250mm). O resíduo de pó de borracha de pneu disponibilizado por uma empresa de beneficiamento passou por um processo de peneiramento também com fração < 60 mesh (0,250mm), para que partes de granulometria grosseira fossem retiradas. Em seguida, iniciou-se o processo de preparação das amostras a serem enviadas para ensaios de caracterização.

A massa argilosa foi caracterizada quimicamente e mineralogicamente na forma de pó. A composição química foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (Shimadzut, modelo EDX 700). A análise mineralógica qualitativa dos minerais presentes na massa argilosa foi realizada por difração de raios X (DRX, Shimadzu, modelo XDR 7000), operando com radiação Cu-Kα na velocidade de 1,5º por minuto, varredura de 2θ de 10 a 70 graus. As fases cristalinas foram identificadas por comparação entre as intensidades e as posições dos picos de Bragg com aqueles das fichas padrão JCPDS-ICDD.

A preparação dos corpos de prova foi realizada com incorporações de 0, 0,5, 1, 1,5 e 2% de resíduos de pó de borracha de pneu na massa cerâmica argilosa. As formulações foram homogeneizadas a seco em moinho de bolas durante 30 minutos e umedecidas a 8% em massa.

Os corpos de prova foram compactados por prensagem uniaxial a 20 MPa, em matriz retangular nas dimensões 114,0 mm x 25,4 mm x 11,0 mm, totalizando a confecção de 36 amostras e submetidas à secagem em estufa a 110 ºC por 24 h. Para a sinterização dos corpos de prova, foi utilizado um forno laboratorial elétrico tipo mufla, com temperaturas de patamar de 1050 e 1150^{o}C, e taxa de aquecimento de 2°C/min). Os corpos de prova foram mantidos na temperatura de patamar por 120 min. Posteriormente, foram resfriados por convecção natural, desligando-se o forno.

Os corpos de prova cerâmicos sinterizados foram caracterizados física e mecanicamente, sendo submetidos a ensaio visual para verficar variações na tonalidade do produto, ensaios para determinação de retração linear, massa específica aparente, absorção de água, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão em três pontos. Para a determinação da retração linear, foram medidas as

características geométricas (largura, altura e comprimento) dos corpos de prova com o auxílio de um paquímetro com sensibilidade mínima de 0,01 mm.

Os corpos de prova também foram submetidos à comparação com produtos comerciais provenientes da empresa X, servindo de parâmetro para a análise dos corpos de prova obtidos com a incorporação dos resíduos de pó de borracha de pneu.

Para a realização da comparação, os produtos comerciais, 10 tijolos aparentes ornamentais da empresa X foram selecionados e submetidos aos testes de resistência mecânica à flexão e absorção de água, utilizando a mesma metodologia aplicada aos corpos de prova confeccionados.

4- RESULTADOS E DISCUSSÃO

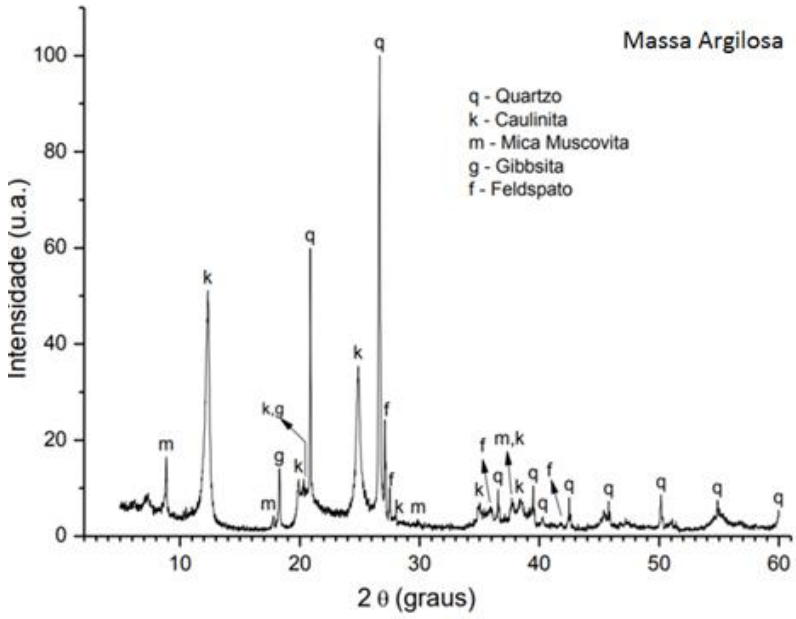
4.1 - Caracterização das matérias primas

4.1.1 - Difração de Raios X e Fluorescência de Raios X

A Figura 3 apresenta o difratograma de Raio X da massa argilosa utilizada neste trabalho. Podem ser observados picos de difração predominantes correspondentes à caulinita ($Al_2O_3.2SiO_2.2H_2O$), ao quartzo (SiO_2), à gibsita ($Al(OH)_3$), à mica muscovita ($KAl_2Si_3AlO_{10}(OH,F)_2$) e ao feldspato potássico ($K_2O.Al_2O_3.6SiO_2$).

A massa argilosa é predominantemente composta por caulinita e quartzo. Os resultados da Tabela 2 confirmam que a maior parte da massa corresponde às fases minerais SiO_2 e Al_2O_3. A caulinita é responsável pela plasticidade nas argilas estudadas. O quartzo se constitui como a principal impureza presente nas argilas, atua como material inerte diminuindo a plasticidade do material. A presença de gibsita indica que nem toda a alumina está na estrutura dos argilominerais conforme observado por Oliveira e Holanda (2004). Segundo estes, a gibsita é um mineral que contribui para aumentar a perda ao fogo, a refratariedade das argilas e a perda de massa durante a queima. A mica muscovita é um mineral de morfologia lamelar que pode ocasionar o aparecimento de defeitos nas peças cerâmicas segundo Vieira (2008). Desde que apresente tamanho de partícula reduzido, ela pode atuar como fundente devido à presença de óxidos alcalinos. O feldspato se constitui como impureza nas argilas e apresenta características fundentes.

Figura 3 - Difratograma de Raios X da massa argilosa.



A Tabela 2 apresenta a composição química da massa argilosa. Observa-se que a composição química predominante é dada pela presença de sílica (SiO_2) e alumina (Al_2O_3) os quais estão em sua maior parte combinados formando os aluminossilicatos como por exemplo, a caulinita e a a mica muscovita. Nota-se que o teor de óxidos corantes é baixo, principalmente o Fe_2O_3 responsável por conferir a coloração vermelha ou amarelada na maioria das argilas. Sendo baixo, confere coloração bege-rosácea aos produtos após a queima. Esse óxido é responsável por reduzir a plasticidade, mas também diminui a retração e facilita a secagem (FARIA, 2015).

Já os óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) apresentam baixa concentração. Em teores mais elevados, eles promovem a formação de fase líquida, atuando no processo de empacotamento das partículas, consequentemente, aumentando a retração linear no processo de queima (CARGNIN *et al.*, 2011).

Os óxidos de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O) possuem caracterísiticas fundentes.

Foi observada uma considerável perda ao fogo (PF) de 12,33%, que está associada à perda de material devido ao aumento de temperatura e, basicamente, indica o teor de matéria orgânica presente na massa argilosa e à água intercalada (SANTOS, 1989).

Tabela 2 - Composição química das Matérias primas (Fluorescência).

Massa Argilosa (%)	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	K_2O	TiO_2	MgO	Na_2O	CaO	P_2O_5	MnO	*PF
	52,20	28,07	3,46	1,31	1,20	0,64	0,37	0,30	0,11	0,04	12,33

4.1.2 - Retração Linear da Queima e Absorção de Água das peças cerâmicas

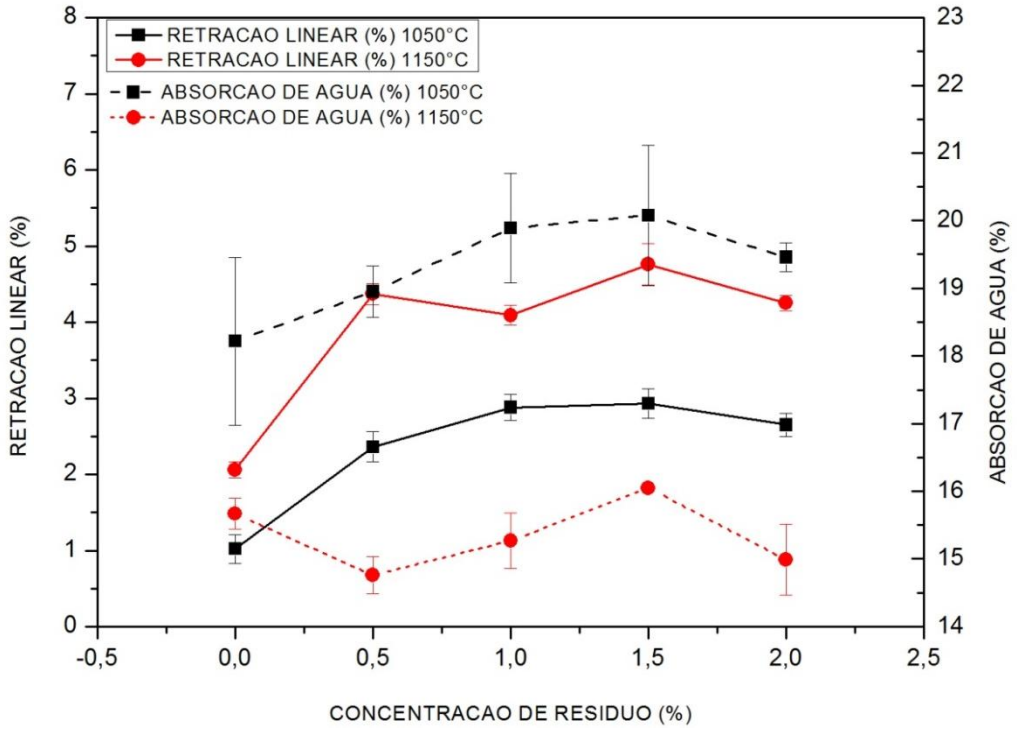
A Figura 4 apresenta o comportamento da retração linear da queima e a absorção das peças cerâmicas em função das temperaturas de queima a 1050 ºC e 1150 ºC.

De acordo com a Tabela 3, de modo geral, é possível observar que o aumento da temperatura de queima leva ao aumento da retração linear. Verifica-se que a incorporação de maiores porcentagens de resíduo de borracha nas massas queimadas a uma mesma temperatura não provocou grandes variações na retração linear. As peças cerâmicas se mantiveram bem uniformes, de forma similar aos resultados dos estudos realizados por Faria (2015). Um aumento mais significativo da retração foi observado com a incorporação de 0,5% de resíduo nas duas temperaturas de queima experimentadas. Observou-se também que o aumento da temperatura influenciou mais na retração linear do que o aumento da concentação de resíduo na massa promovendo a sinterização das partículas de massa argilosa. Porém, a influência do aumento da temperatura foi maior para as concentrações de 0 e 0,5% de resíduo na massa.

Tabela 3 - Retração linear na queima (em %) dos corpos de prova.

Temperatura (ºC)	**Retração Linear (%)**				
	0% Resíduos	**0,5% Resíduos**	**1% Resíduos**	**1,5% Resíduos**	**2% Resíduos**
1050 ^{0}C	1,02±0,19	2,36 ±0,2	2,88±0,17	2,93±0,19	2,65±0,15
1150 ^{0}C	2,06±0,11	4,37±0,14	4,09±0,13	4,76±0,27	4,25±0,1

Figura 4 – Retração linear e absorção de água para massas cerâmicas queimadas a 1050ºC e 1150ºC.



A Tabela 4 apresenta os valores obtidos para a absorção de água dos corpos de prova em função da quantidade de resíduo incorporada e temperatura de queima.

De acordo com a Figura 4 e a Tabela 4, é possível observar que o aumento da temperatura promove a redução na absorção de água para todas as massas cerâmicas. Verificou-se um aumento da absorção de água com o aumento da quantidade de resíduo incorporado na temperatura de 1050ºC, exceto na incorporação de 2%. Esse aumento também foi verificado por Faria (2015). Ele está associado ao aparecimento de porosidade aberta em função da queima do carbono e dos hidrocarbonetos presentes no resíduo.

A diminuição da absorção de água foi verificada na incorporação de 2% tanto à temperatura de 1050ºC quanto a 1150ºC. Nesse última, a diminuição foi mais pronunciada. Esse fato pode estar associado à maior quantidade de resíduo ter ocupado os vazios existentes, diminuindo a porosidade aparente.

Tabela 4 - Absorção de água (em %) dos corpos de prova.

Temperatura (ºC)	**Absorção de Água (%)**				
	0% Resíduos	**0,5% Resíduos**	**1% Resíduos**	**1,5% Resíduos**	**2% Resíduos**
1050 ^{0}C	18,22±1,24	18,95±0,38	19,89±0,81	20,08±1,04	19,46±0,21
1150 ^{0}C	15,67±0,23	14,76±0,27	15,27±0,41	16,05±0,05	14,99±0,52

Segundo os padrões de qualidade e as classes estabelecidas pela NBR 13818 para os revestimentos cerâmicos, os produtos fabricados enquadram-se na classe Poroso (BIII), que apresenta absorção de água maior que 10%, podendo ser utilizados em revestimentos de parede e fachadas.

4.1.3 - Massa Específica Aparente

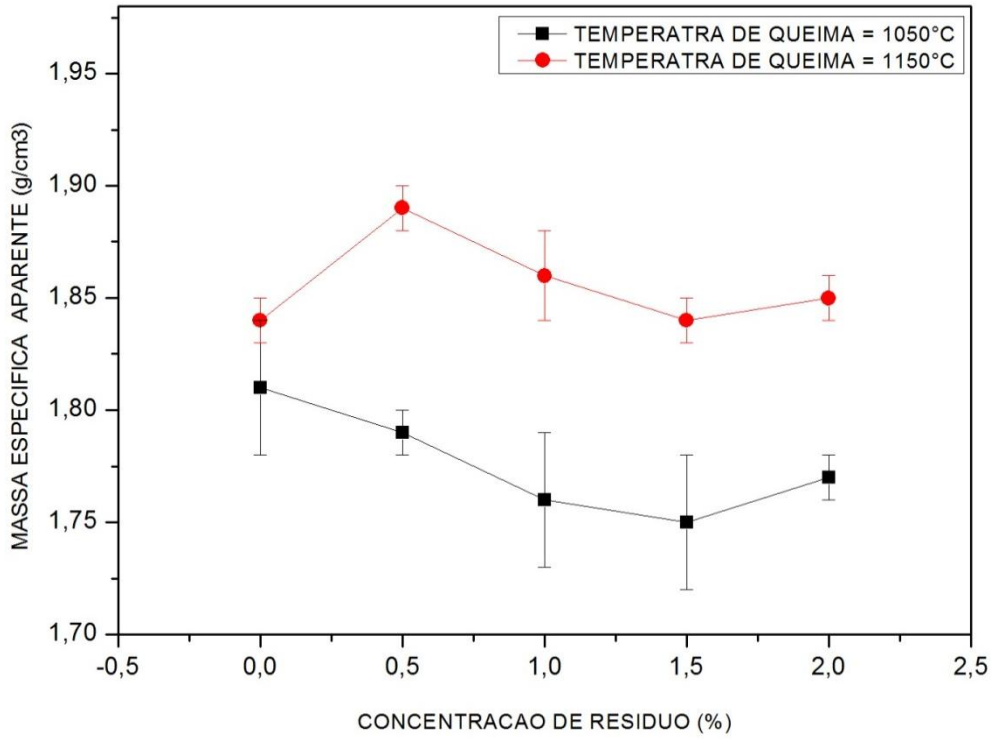
A massa específica aparente é a razão entre a massa do corpo de prova e seu volume. A massa específica aparente está diretamente ligada à porosidade aparente e à absorção de água das peças queimadas, sendo que quanto menores esses valores, maiores serão os valores de massa específica. Quanto maior a densificação do produto durante a queima, menos vazios existirão nas peças queimadas e maiores serão suas massas específicas.

A Figura 5 e a Tabela 5 mostram os resultados da massa específica aparente dos corpos de prova cerâmicos queimados. A massa específica aparente é influenciada pela temperatura de queima, o que pode ser verificado na Figura 5. O aumento da temperatura de queima aumentou a densificação das peças cerâmicas produzidas para todas as incorporações de resíduos utilizadas, consequentemente, aumentou a massa específica aparente. Em relação à variação das concentrações de resíduos, a massa específica aparente variou pouco. Observou-se um discreto decréscimo da massa específica aparente com o aumento das incorporações, exceto nos produtos com 2% de resíduo. Houve um pequeno aumento da massa específica com aumento da porcentagem de resíduo de 1,5% para 2% em ambas as temperaturas de queima. Isso reforça os resultados encontrados para a absorção de água dos produtos com o mesmo teor de resíduo de borracha.

Tabela 5 - Massa Específica aparente (g/cm³) dos corpos de prova.

Temperatura (ºC)	**Massa Específica Aparente (g/cm3)**				
	0% Resíduos	**0,5% Resíduos**	**1% Resíduos**	**1,5% Resíduos**	**2% Resíduos**
1050 ^{0}C	1,81 ± 0,03	1,79±0,01	1,76±0,03	1,75±0,03	1,77±0,01
1150 ^{0}C	1,84±0,01	1,89±0,01	1,86±0,02	1,84±0,01	1,85±0,01

Figura 5 – Massa específica aparente a temperaturas de queima de 1050ºC e 1150ºC.



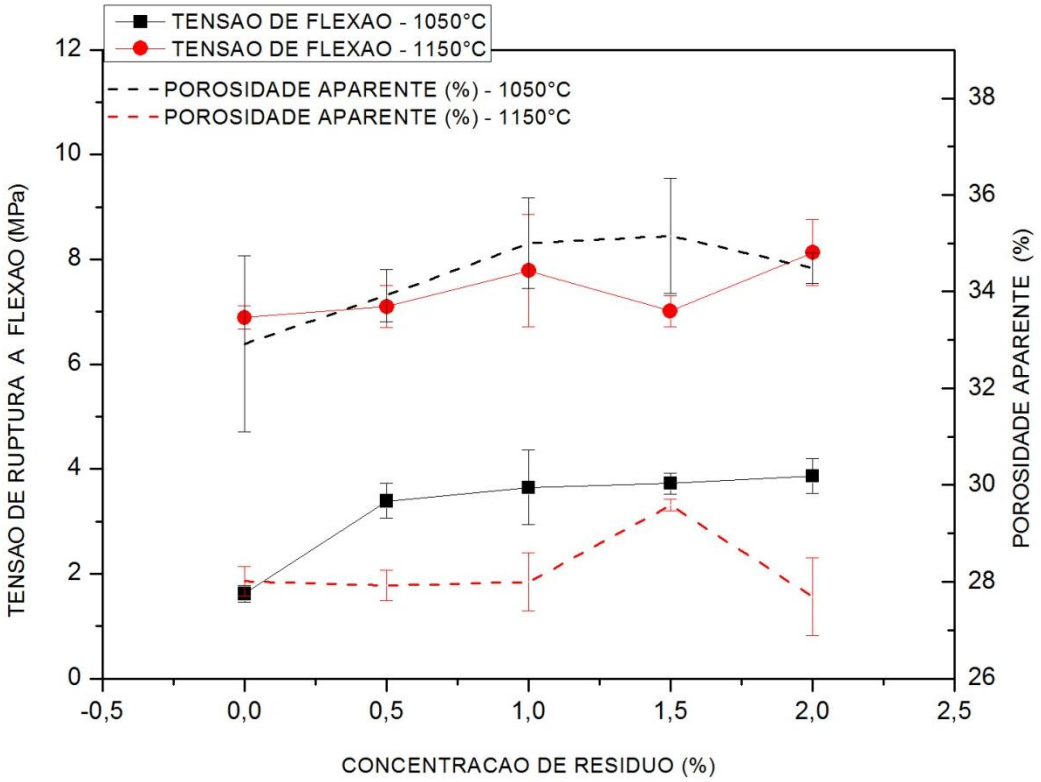
4.1.4 - Tensão de ruptura à flexão e Porosidade Aparente das peças cerâmicas

Na Figura 6 está representada a porosidade aparente e a tensão de ruptura à flexão das peças cerâmicas queimadas a temperaturas de 1050ºC e 1150ºC. A porosidade aparente é definida como o percentual volumétrico de porosidade aberta existente na amostra. Pela análise da Figura 6 e da Tabela 6, é possível observar que as incorporações são afetadas de acordo com a temperatura de queima. A porosidade aparente também é influenciada pela temperatura de queima. O aumento da temperatura de queima aumentou a densificação das peças cerâmicas produzidas para todas as incorporações de resíduos utilizadas, consequentemente, diminuiu a porosidade aparente. O comportamento da porosidade aparente foi semelhante ao da absorção de água. Verificou-se um aumento da porosidade aparente com o aumento da quantidade de resíduo, exceto na incorporação de 2%, em ambas as temperaturas de queima. A 1150ºC, a diminuição foi mais evidente. Esse fato pode estar associado à reação do resíduo, que encontra-se em maior quantidade nesse caso, com a massa argilosa, ocupando os vazios existentes, podendo ter sido encapsulado e aumentando assim a densificação do produto.

Tabela 6 - Porosidade aparente (%) dos corpos de prova.

Temperatura (ºC)	**Porosidade Aparente (g/cm3)**				
	0% Resíduos	**0,5% Resíduos**	**1% Resíduos**	**1,5% Resíduos**	**2% Resíduos**
1050 ^{0}C	32,92 ± 1,82	33,92± 0,54	35±0,93	35,15±1,19	34,49±0,31
1150 ^{0}C	28,01±0,31	27,92±0,32	28±0,60	29,58±0,12	27,69±0,80

Figura 6 – Porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão para massas cerâmicas queimadas a 1050ºC e 1150ºC.



A tabela 7 apresenta os resultados dos ensaios de tensão de ruptura à flexão, representando a resistência mecânica dos corpos de prova, que é a capacidade de suportar esforços exercidos por cargas que podem levar a fissuras e rupturas.

De forma geral, a tensão de ruptura à flexão também é influenciada tanto pela temperatura de queima, quanto pela incorporação do resíduo de borracha. De acordo com a Figura 6 e a Tabela 7, a elevação da temperatura acarreta no aumento do valor da tensão de ruptura. Observa-se que, com o aumento do teor de resíduo na massa cerâmica, houve um aumento da resistência mecânica tanto à

temperatura de 1050ºC quanto a 1150ºC. Uma exceção ocorreu no aumento da concentração de 1% para 1,5% de resíduo a 1150ºC.

Conforme a Figura 6, que compara o comportamento da tensão de ruptura à flexão em relação à porosidade aparente, é possível verificar que apesar da porosidade aparente ter aumentado com a incorporação do resíduo de borracha, a resistência mecânica dos produtos também aumentou. Isso pode ser atribuído ao fato do resíduo de borracha ter conferido plasticidade à massa cerâmica, melhorando suas propriedades mecânicas.

O valor de tensão de ruptura à flexão mais significativo é observado para os produtos com 2% de resíduo incorporado à temperatura de queima de 1150ºC, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Tensão de Ruptura à Flexão (MPa) dos corpos de prova.

Temperatura (ºC)	Tensão de Ruptura à Flexão (MPa)				
	0% Resíduos	**0,5% Resíduos**	**1% Resíduos**	**1,5% Resíduos**	**2% Resíduos**
1050 ^{0}C	1,62 ± 0,16	3,39±0,33	3,65±0,71	3,72±0,20	3,86±0,33
1150 ^{0}C	6,89 ± 0,22	7,10±0,40	7,78±1,07	7,01±0,30	8,13±0,63

Observa-se que todas as massas cerâmicas com adição de resíduos utilizadas e sinterizadas a 1050ºC atingem os valores especificados nas normas para a fabricação de tijolos maciços, que são de 2,0 MPa. Todas as massas sinterizadas a 1150ºC apresentam valores de resistência mecânica para a obtenção de blocos cerâmicos e telhas, que são de 5,5 MPa e 6,5MPa (VIEIRA, 2000).

4.1.5 - Ensaio visual

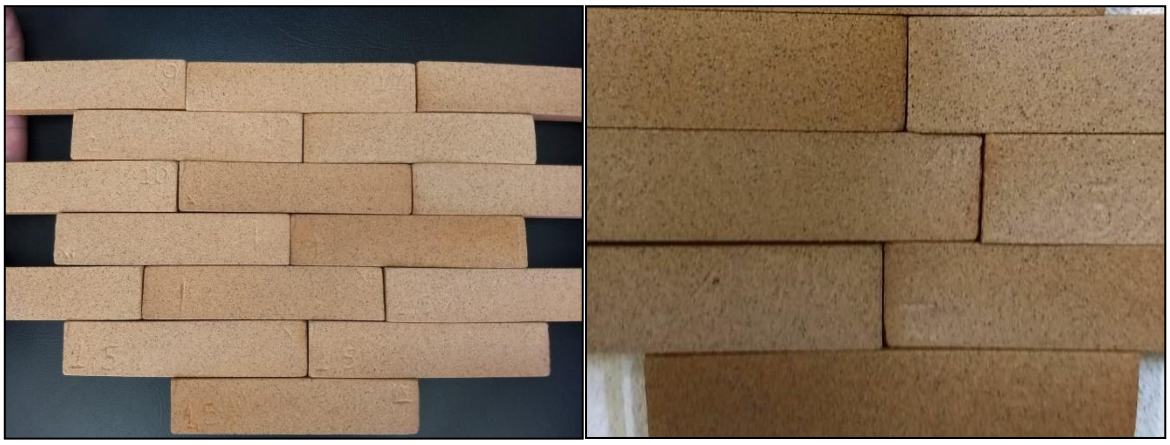
As Figuras 7 e 8 apresentam um mosaico com os corpos de prova queimados a 1050ºC e 1150ºC, respectivamente. É possível observar certa uniformidade na tonalidade dos produtos, mesmo com diferentes teores de resíduo de borracha incorporados. Verifica-se também uniformidade da disposição dos pontos de cor escura, atribuídos ao resíduo, sobre os corpos de prova, o que comprova a homogeneização das formulações durante a etapa de preparação das amostras.

A tonalidade é considerada um fator importante no produto, conferindo qualidade. Algumas empresas do setor investem no processo produtivo, visando a redução de variações de tonalidades aos menores índices possíveis. Os corpos de prova sinterizados a 1150ºC apresentaram coloração

mais avermelhada, um indicativo da mudança de composição das fases com o aumento da temperatura de queima.

Figura 7 – Mosaico com corpos de prova sinterizados a 1050ºC

Figura 8 – Mosaico com corpos de prova sinterizados a 1150ºC



4.2 - Comparação com produtos comerciais

Os produtos comerciais provenientes da Cerâmica X foram submetidos a ensaios de resistência mecânica e de absorção de água. Os resultados foram comparados aos obtidos para os corpos de prova fabricados com diferentes incorporações de resíduo de borracha.

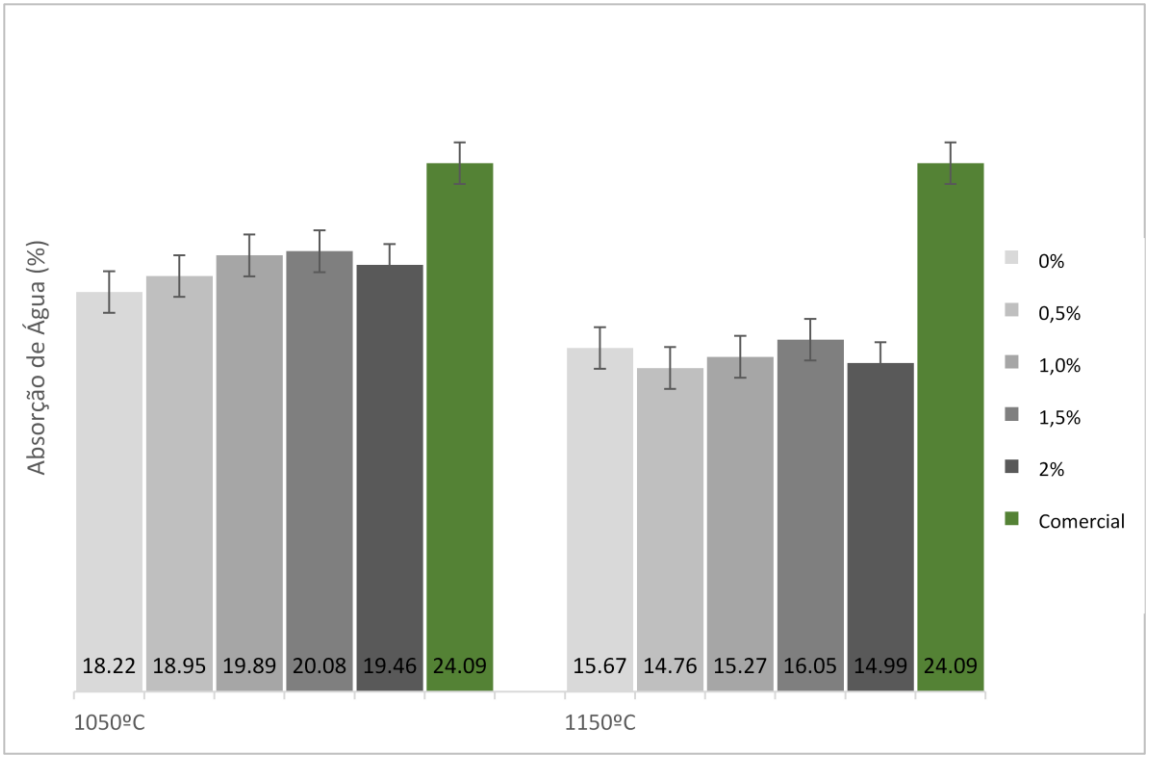
Os tijolos comerciais apresentam composição bem similar à dos corpos de prova laboratoriais, que se diferenciam pela adição dos resíduos de borracha. A temperatura de queima utilizada pela Cerâmica X está em torno de 940ºC e a taxa de aquecimento é baixa, cerca de 2ºC/min. A Figura 9 apresenta amostras dos tijolos comerciais da Cerâmica X.

Figura 9 - Tijolos comerciais fornecidos pela Cerâmica X.

A Figura 10 compara a absorção de água dos corpos de prova cerâmicos confeccionados em função do teor de resíduo de borracha incorporado e da temperatura de queima com os produtos comerciais das empresas X.

Percebe-se que o aumento da temperatura de sinterização dos corpos de prova cerâmicos tende a diminuir a absorção de água nas diferentes incorporações de resíduo de borracha. Verificou-se um aumento da absorção de água com o aumento da quantidade de resíduo incorporado na temperatura de 1050ºC, exceto na incorporação de 2%. Todos os corpos de prova laboratoriais em todas as temperaturas apresentaram valores menores de absorção de água que os corpos prova da Cerâmica X. Isso pode ser explicado pelo fato das temperaturas de queima dos corpos de prova laboratoriais ser mais elevada que a utilizada pela Cerâmica X.

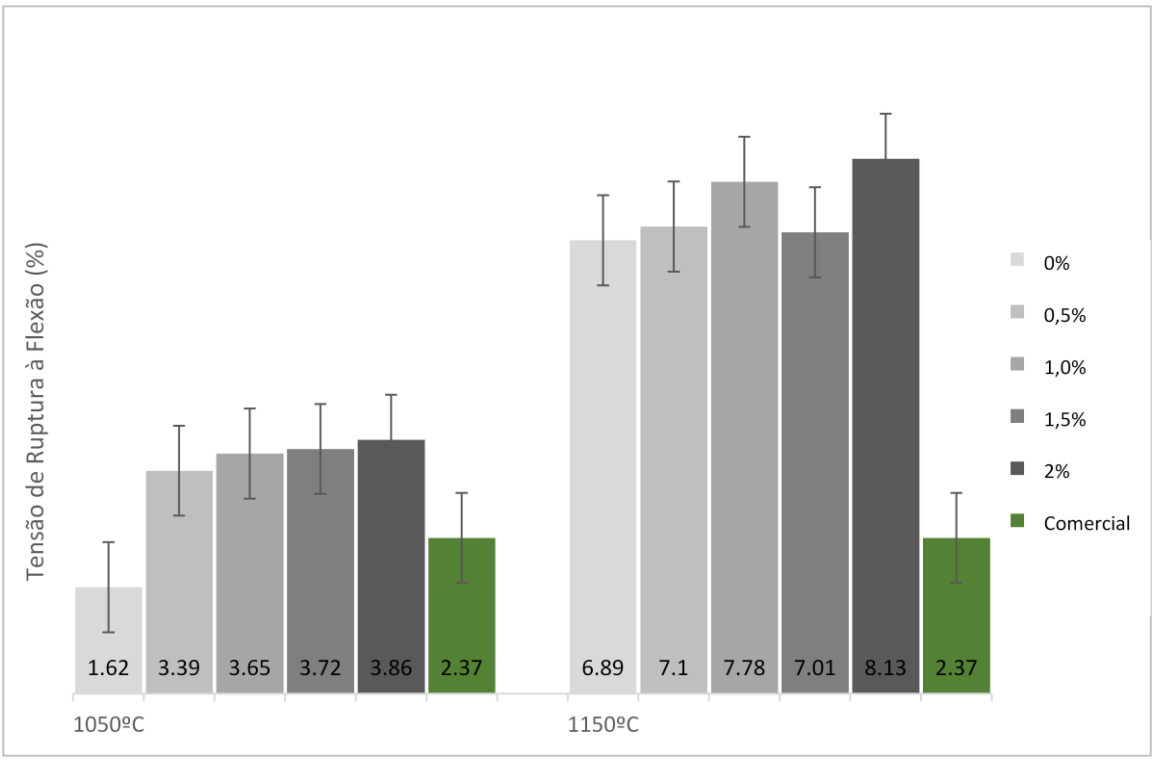
Figura 10- Comparação da Comparação da Absorção de Água dos corpos de provas laboratoriais e comerciais



A Figura 11 apresenta a comparação da resistência mecânica dos corpos de prova cerâmicos laboratoriais sinterizados em diferentes temperaturas com os produtos comerciais.

Percebe-se que a maioria das amostras com a incorporação de resíduos de borracha apresentaram resistência mecânica superior ao produto comercial da Cerâmica X. Em ambas as temperaturas de queima, a resistência mecânica manteve-se acima dos produtos da empresa X. Isso pode ser explicado pelo fato das temperaturas de queima dos corpos de prova laboratoriais ser mais elevada que a utilizada pela Cerâmica X. Para corroborar com essa possibilidade, destaca-se a grande diferença entre os valores de resistência obtidos a 1150ºC e o produto comercial., inclusive entre o corpo de prova com 0% de resísuo e o tijolo da Cerâmica X.

Figura 11- Comparação da Tensão de ruptura à flexão dos corpos de provas laboratoriais e comerciais



Os corpos de prova da Cerâmica X são conformados artesanalmente, apresentando assim uma irregularidade maior que à dos corpos de prova laboratoriais, que foram conformados por prensagem uniaxial e, portanto, mais uniformes. As matérias primas utilizadas na fabricação dos corpos de prova laboratoriais foram peneiradas em 60 mesh, possuindo uma granulometria mais refinada e uniforme que as peças da Cerâmica X. Isso também pode explicar o desempenho dos corpos de prova comercias em relação aos laboratoriais nos ensaios de absorção de água e de tensão de ruptura à flexão.

5- CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que, de um modo geral, quanto ao comportamento de queima, o incremento da temperatura aumentou a retração linear, diminuiu a absorção de água e aumentou a resistência mecânica das peças cerâmicas confeccionadas.

Sob o ponto de vista das propriedades tecnológicas, foi demonstrado que a incorporação de diferentes concentrações de resíduos de borracha de pneu pode ser utilizada na composição da massa cerâmica utilizada para produção de tijolos aparentes para uso ornamental. Na comparação dos resultados obtidos para os corpos de prova laboratoriais com aqueles obtidos para as plaquetas rústicas comercializadas pela empresa X, concluiu-se que o desempenho das peças confeccionadas em laboratório foi superior para todas as concentrações de resíduo adicionadas à massa. Considerando as diferentes concentrações de resíduo, a massa cerâmica com 2% apresentou os melhores resultados para a retração linear de queima, absorção de água, porosidade aparente e resistência mecânica em ambas as temperaturas experimentadas. Porém, é preciso avaliar também amostras queimadas em torno de 940ºC, temperatura tipicamente utilizada pela Cerâmica X no seu processo produtivo.

Foi verificado que a incorporação do resíduo de borracha até 1,5% influenciou na microestrutura dos corpos cerâmicos, tornando-os mais porosos.

A tonalidade das peças queimadas não sofreu variações significativas com o aumento da adição de resíduo de borracha à massa. A variação foi mais perceptível com o aumento da temperatura de queima.

Foi constatado que a incorporação do resíduo de borracha influencia nas propriedades tecnológicas de queima (retração linear, massa específica aparente, absorção de água, porosidade aparente e resistência à compressão). Porém, para a retração linear e a massa específica aparente, a variação observada com o aumento da incorporação foi pequena. Em geral, as peças se mantiveram bem uniformes.

Quanto à resistência mecânica, observou-se que todas as formulações com resíduos utilizadas e sinterizadas a 1050ºC atingiram os valores especificados nas normas para a fabricação de tijolos maciços, que são de 2,0 MPa. Todas as massas sinterizadas a 1150ºC apresentam valores de resistência mecânica para a obtenção de blocos cerâmicos e telhas, que são de 5,5 MPa e 6,5MPa, respectivamente.

Finalmente, com base nos resultados obtidos neste trabalho, tecnicamente é possível a destinação final do resíduo de borracha em cerâmica vermelha ornamental.

Pode-se considerar a viabilidade prática, econômica e social das incorporações de resíduos em produtos comerciais, como os tijolos aparentes de uso ornamental para revestimentos internos e externos. Esses produtos não apresentam níveis de exigência elevados para a resistência mecânica, a retração linear, a absorção de água e porosidade quando comparados a placas cerâmicas para revestimento (pisos e azulejos). Essas últimas são normatizadas nacional e internacionalmente

quanto às propriedades e aos requeridos. No Brasil, não há normas regulamentadoras para os tijolos aparentes para uso ornamental em paredes internas e externas.

A incorporação de resíduo de borracha pode ser uma alternativa viável para a empresa X. Porém, é preciso verificar se o mesmo teria custo muito baixo para o ceramista. É necessário ainda verificar a inertização do resíduo na cerâmica, por meio de ensaios solubilização e lixiviação, a fim de verificar presença de metais pesados no extrato. Essas verificações serão realizadas como continuidade deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE – CPRH. O setor ceramista e o meio ambiente: guia prático para o licenciamento ambiental. Recife: CPRH, 2010. 17p.

AGUIAR, M. C. Utilização de resíduo de serragem de rocha ornamental com tecnologia de fio diamantado em cerâmica vermelha. 2012. 132f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

AREIAS, I. O. R. Incorporação de lodo da estação de tratamento de esgoto (ETE) do município de Campos dos Goytacazes - RJ em cerâmica vermelha. 2015. 119f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

ASPACER – Associação Paulista das Cerâmicas de Revestimento. Revista Aspacer Julho/Agosto de 2018. Ano X, n. 104. Disponível em: < https://pt.calameo.com/read/000071680bd256cb46514>. Acesso em: 8 set. 2018

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABCERAM. Disponível em: <http://abceram.org.br/>. Acesso em jun. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13816: Placas Cerâmicas para Revestimento - Terminologia. Rio de Janeiro, ABNT, 1997a, 4p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13817: Placas Cerâmicas para Revestimento - Classificação. Rio de Janeiro, ABNT, 1997b, 3p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 13818: Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificações e Métodos de Ensaio. Rio de Janeiro, ABNT, 1997c, 78p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT NBR 10004: Classificação de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, ABNT, 2004, 71p.

BABISK, M. P. Incorporação de lama vermelha em cerâmica vermelha. 2015. 196f. Tese (Doutorado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeir, Campos dos Goytacazes, 2015.

BAKSHI, B. R.; FIKSEL, J. The Quest for Sustainability: Challenges for Process Systems Engineering. AIChE Journal., v. 49, n. 6, p. 1350-1358, 2003 *apud* CASTRO; ROZENFELD, 2014.

Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES. Panorama do Setor de Revestimentos Cerâmicos – Área industrial. Setembro de 2006. Disponível em: < https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15303>. Acesso em: 6 set. 2018.

BERTOLLO, S. M.; JÚNIOR, J. L. F.; SCHALCH, V. Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos. In: XVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, 2002. Cancún, México. 27 a 31 de Outubro de 2002. 8p.

BRASIL. Lei Nº 6.567, de 24 de setembro de 1978. Dispõe sobre regime especial para exploração e o aproveitamento das substâncias minerais que especifica e dá outras providências. Brasília, DF. Disponivel em: < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6567.htm>. Acesso em: Agosto, 2018.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial da União em 01 de outubro de 2009. Brasília, DF.

_____. Ministério do Meio Ambiente. Departamento Nacional De Produção Mineral – DNPM. Portaria nº 155, de 12 de maio de 2016. Aprova a Consolidação Normativa do DNPM e revoga os atos normativos consolidados. Disponível em: < http://www.dnpm.gov.br/acesso-a-informacao/legislacao/portarias-do-diretor-geral-do-dnpm/portarias-do-diretor-geral/portaria-dnpm-no-155-de-2016>. Acesso em: 15 ago. 2017.

_____. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional, 2017. Ano base 2016. Disponível em http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/balanco-energetico-nacional>. Acesso em 25 ago. 2018.

CAMARGO, C. N. O. Avaliação do lodo amarelo de ETA para incorporação em cerâmica vermelha. 2014. 101f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2014.

CARDOSO, A. P. Tecnologia da cerâmica vermelha no norte do Paraná aplicada na produção de componente para alvenaria estrutural. 1995. 140f. Dissertação (mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995.

CARVALHO, D. S. F. Prevenção de anomalias em alvenaria de tijolo face à vista. 2015. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2015.

CASTRO, M. S.; ROZENFELD, H. Perfil da pesquisa científica brasileira em ecodesign: uma análise dos anais do ENEGEP de 2004 a 2013. In: XXXIV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2014. Curitiba, Brasil, 07 a 10 de outubro de 2014.

DONDI, M.; MARSIGLI, M.; FABBRI, B. Recycling of Industrial and Urban Wastes in Brick Production: A Review (Part 1), Tile & Brick Int., 13: 218-225, 1997.

DRM-RJ – Departamento de Recursos Minerais do Estado do Rio de Janeiro – Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Energia, Indústria e Serviços. Panorama Mineral do Estado do Rio de Janeiro 2014. 102f. Rio de Janeiro, RJ: 2014.

ESQUEVIEL, J. F. T. Avaliação do uso de revestimentos cerâmicos de fachada em edifícios residenciais multifamiliares em São Paulo: Estudo de caso Região Sul – 1994 1998. Dissertação (mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2001.
FARIA, K. C. P. Avaliação da adição de resíduo de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar nas propriedades e microestruturas de cerâmica vermelha. 2011. 100 f. Dissertação (mestrado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2011.

FARIA, J. S. Incorporação de resíduo pó de borracha de pneus inservíveis em cerâmica vermelha. 2015. 125f. Dissertação (mestrado) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2015.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG). Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha. Belo Horizonte: FIEMG, 2013. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 21 set. 2016.

GAIDZINSKI, R. (2006). Estudo do Sazonamento de Argilas para a Utilização na Indústria Cerâmica. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Rio de Janeiro-RJ.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS – IBAMA. Relatório Pneumáticos 2017 – Resolução Conama nº 416/09 (ano base 2016) / Diretoria de Qualidade Ambiental. Brasília: Ibama, 2017, 77 p.

LAGARINHOS, C. A. F.; TENÓRIO, J. A.S. Tecnologias Utilizadas para a Reutilização, Reciclagem e Valorização Energética de Pneus no Brasil. Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 18, n. 2, p. 106-118, 2008.

MAIA, F.S. Avaliação de Massas Cerâmicas, Processamento e Propriedades dos Produtos de Cerâmica Vermelha do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes. 2012. 97f. Dissertação (mestrado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2012.

MEDEIROS, F. K. Produção de tijolos maciços e placas cerâmicas de revestimento com adição de óleo lubrificante usado. Cerâmica Industrial, 19 (2) Março/Abril, 2014.

MENEZES, R. R. *et al*. Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas. Cerâmica, v. 48, n. 306, p. 92-101, 2002.

MORAIS, A. S. C. Incorporação de resíduo de vidro de lâmpada fluorescente em cerâmica vermelha. 2013. 179f. Tese (doutorado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2013.

MOTHÉ, A. V. Utilização de lama de alto-forno em cerâmica vermelha. 2008. 100f. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, 2008.

MOTTA, J. F. M.; ZANARDO, A.; CABRAL JUNIOR, M. As matérias primas cerâmicas. Parte I: O perfil das principais indústrias cerâmicas e seus produtos. Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 6, n. 2, p. 28-39, 2001.

PIGOSSO, D.C.A. Integração de métodos e ferramentas do ecodesign ao processo de desenvolvimento de produtos. Monografia (Graduação) - Universidade de São Paulo. 167f. São Carlos, 2008 *apud* CASTRO; ROZENFELD, 2014.

PINHEIRO, B.C.A.; HOLANDA, J.N.F. Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha. Cerâmica 56, 237-243, 2010.

SANTOS, P. S. Ciência e tecnologia de argilas, V. 1. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda., 1989 *apud* PINHEIRO 2010.

SANTOS JR, E.L. *et al.* Avaliação de impacto ambiental da indústria cerâmica estrutural como ferramenta da Produção Mais Limpa. In: 6th International Workshop – Advances in Cleaner Production. São Paulo, 2017.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Estudos de Mercado SEBRAE/ESPM. Setembro de 2008. Cerâmica Vermelha para construção: Telhas, Tijolos e Tubos. Relatório completo. Disponível em: <http://www.sebraemercados.com.br/wp-content/uploads/2015/09/ESTUDO-CERAMICA-VERMELHA.pdf>. Acesso em 27 ago. 2018.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Ideias de negócios sustentáveis: Indústria de Cerâmica, 2012. Disponível em: < https://bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/DAE283F41BE5021E83257A330051237B/$File/NT0004771E.pdf>. Acesso em 02 set. 2018.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Boletim de Inteligência, Dezembro de 2015. Construção Civil: Cerâmica Vermelha. Disponível em: <http://www.bibliotecas.sebrae.com.br/chronus/ARQUIVOS_CHRONUS/bds/bds.nsf/b877f9b38e787b32594c8b6e5c39b244/$File/5846.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2018.

SILVA, J. E. O. Desenvolvimento de cerâmica vermelha utilizando rejeitos da construção civil. 2007. 74f. Dissertação (mestrado) – Centro Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2007.

SILVA, M. G. Avaliação da incorporação combinada dos resíduos de cascalho de perfuração de poço de petróleo e de polimento do porcelanato em cerâmcia vemelha. 2012. 157f. Tese (doutorado) – Centro Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2012.

VIEIRA, C. M. F.; HOLANDA, J. N. F.; PINATTI, D. G. Caracterização de massa cerâmica vermelha utilizada na fabricação de tijolos na região de Campos dos Goytacazes-RJ. Cerâmica, v. 46, n. 297, p. 14-17, 2000. Disponível em

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132000000100003&lng=en&nrm=iso&tlng=pt>. Acesso em: 07 set. 2018.

VIEIRA, C.M.F., FEITOSA, H.S., MONTEIRO, S.N. Avaliação da secagem de cerâmica vermelha através da curva de Bigot - Cerâmica Industrial, p. 42-46, 2003a.

VIEIRA, C.M.F., SOARES, T.M., MONTEIRO, S.N. Massas cerâmicas para telhas: características e comportamento de queima. Cerâmica 49, 245-250, 2003b.

VIEIRA, C. M. F.; TERRONES, L. A.; SÁNCHEZ, R.; MONTEIRO, S. N. Características e efeito da fração granulométrica < 2 μm no comportamento de queima de uma argila. Cerâmica 53, 249-254, 2007.

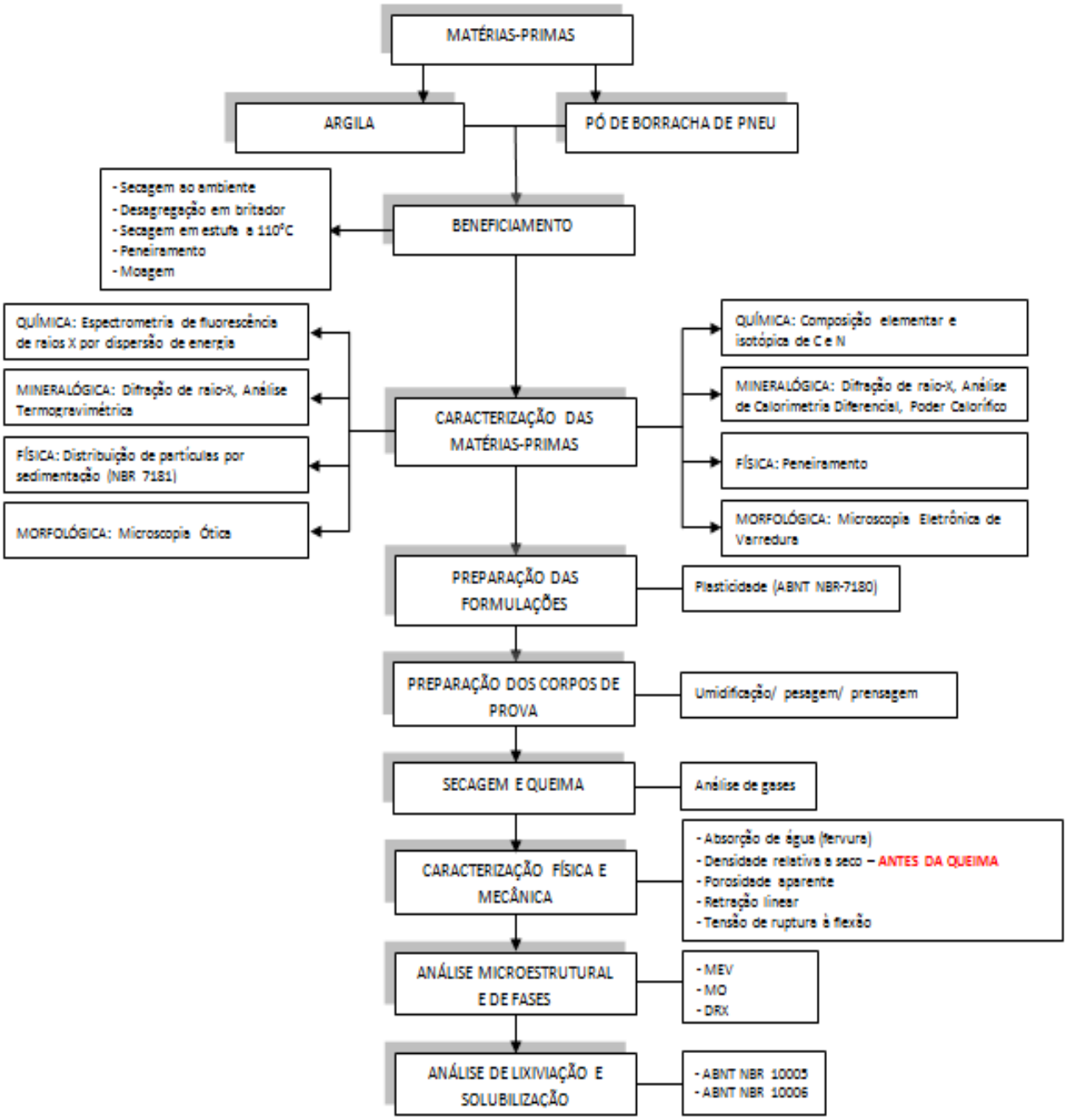
VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Incorporation of solid wastes in red ceramics - an updated review. Revista Matéria, v. 14, n. 3, p. 881 – 905, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO DO TRABALHO

Tarefas	Trimestres							
	Ano 1				Ano 2			
	1	2	3	4	5	6	7	8
Verificação de dados disponíveis e aplicabilidade do projeto		x						
Visita técnica a cerâmicas e contato com o benefeciadora de borracha de pneu			x	x				
Revisão Bibliográfica		x	x	x	x	x	x	x
Elaboração de artigo técnico e submissão à revista científica indexada				x	x			
Beneficiamento e Caracterização das matérias-primas					x			
Moagem da massa cerâmica Classificação granulométrica das matérias-primas Preparação das formulações					x			
Preparação dos corpos de prova Secagem e queima Análise de gases					x	x		
Caracterização dos corpos de prova queimados Análise microestrutural e de fases						x		
Ensaios de lixiviação e solubilização							x	
Tratamento dos resultados					x	x	x	x
Elaboração do 2º artigo técnico							x	
Escrita da dissertação			x	x	x	x	x	x
Defesa da dissertação								x

APÊNDICE B – FLUXOGRAMA DAS ETAPAS EXPERIMENTAIS ENVOLVIDAS NO PROJETO



APÊNDICE C - ARTIGO PUBLICADO EM SCIENTIATEC: REVISTA DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO IFRS

Coprocessamento de pneus inservíveis na indústria cimenteira

Mariana Vasconcelos Ferreira de Araújo
Instituto Federal Fluminense (IFFluminense)
(marifaraujo@gmail.com)

Resumo: O pneu inservível é atrativo como combustível alternativo ao coque de petróleo e carvão mineral na indústria cimenteira devido ao seu elevado poder calorífico. A recuperação de energia contida nos resíduos contribui para a conservação de combustíveis fósseis não renováveis, reduzindo os custos de fabricação, pois os resíduos combustíveis são mais baratos do que qualquer combustível fóssil tradicional. A grande vantagem da utilização de pneus como resíduo combustível seria sua total destruição, em função das elevadas temperaturas de processo. As cinzas que seriam o resíduo resultante da queima são incorporadas ao cimento, em substituição a outras matérias-primas. Porém, o coprocessamento de pneus gera gases nocivos como monóxido de Carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), além de dioxinas e furanos. Neste trabalho, pretende-se identificar as normas para licenciamento da incineração ou coprocessamento de resíduos industriais, especificamente o pneu inservível, e os padrões para emissões de dioxinas e furanos no Brasil e no mundo. Além de identificar na literatura se o aumento da vida útil do pneu, que diminuiria a geração de pneus inservíveis, causa impactos em outras fases do seu ciclo de vida, inclusive na sua utilização como combustível.

Palavras-chave: Aproveitamento energético; Poluição atmosférica; Regulações.

Co processing of inservible tires in the cement industry

Abstract: The inservible tire is attractive as an alternative fuel replacing petcoke and mineral coal in the cement industry due to its high calorific value. The recovery of energy contained in wastes contributes to the conservation of non-renewable fossil fuels, reducing manufacturing costs, because fuel wastes are cheaper than any traditional fossil fuel. The great advantage of using tires as fuel waste would be their total destruction, due to the high process temperatures. The ashes that would be the residue resulting from the burning are incorporated into the cement, replacing other raw materials. However, the co processing of tires generates harmful gases such as carbon monoxide (CO), sulfur oxides (SO x), nitrogen oxides (NO x), as well as dioxins and furans. The objective of this work is to identify the regulations and standards for licensing the incineration or co processing of industry wastes, specifically the end-of-life tires, and the limit values for emissions of dioxins and furans in Brazil and worldwide. In addition, this work intends to identify in literature whether the improve of the tire useful life, which would reduce the generation of waste tires, may impact other phases of its life cycle, including its use as alternative fuel.

Keywords: energy recovery, air pollution, regulations.

1. INTRODUÇÃO

Até a década de 1960, pouca ou nenhuma preocupação era dirigida às questões ambientais, que eram consideradas secundárias em relação à maximização dos lucros financeiros imediatos, com raras exceções. A partir desta década, com a publicação do livro “Primavera Silenciosa” por Rachel Carson em 1962, considerado o primeiro alerta mundial contra o uso de pesticidas, motivou-se e inspirou-se a criação de agências de proteção e movimentos ambientalistas em vários países. Um pouco mais tarde, com a criação do Clube de Roma em 1968 e a divulgação do relatório “Limites do Crescimento” em 1972, cientistas, instituições e empresas se conscientizaram que esse regime de produção industrial e crescimento acima de tudo levava a Terra ao colapso (MEADOWS *et al.*, 1972).

No final da década de 1980, a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD) publicou o documento “Nosso Futuro Comum” ou, como é bastante conhecido, Relatório Brundtland, o qual apresentou um novo olhar sobre o desenvolvimento. O documento utilizou o termo “desenvolvimento sustentável” para descrever a forma como as atuais gerações satisfazem as suas necessidades sem, no entanto, comprometer a capacidade de as gerações futuras suprirem as suas próprias (WCED, 1987). No presente trabalho, será utilizado o termo ”sustentabilidade”, que é o mais aplicado por vários estudiosos atualmente.

A sustentabilidade constitui um dos maiores desafios da humanidade, sendo necessária uma mudança na abordagem do desenvolvimento. Um dos principais problemas a ser enfrentado é a geração e o acúmulo de resíduos sólidos que se encontram no estado sólido ou semi-sólido e resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004). O acúmulo é creditado a décadas de descuido com a questão, sendo tratada apenas como uma consequência inevitável do desenvolvimento econômico, como é o caso dos pneus.

A grande quantidade de pneus inservíveis descartados, no Brasil e no mundo, fez com que este se constituísse em um problema de impacto ambiental, em função da sua composição e durabilidade, bem como do seu volume e compressibilidade.

Entende-se como pneus inservíveis aqueles que não possuem mais nenhuma possibilidade de recauchutagem ou recapagem. Eles poluem o solo, a água, o ar, o mar e contribuem para uma séria questão de saúde pública atual, pois podem acumular água favorecendo a profileração do *Aedes aegypti*, mosquito transmissor de doenças como dengue, zika e chikungunya.

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 258/99 determinou que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos fossem obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis (BRASIL, 1999). Revogada, posteriormente, pela publicação da Resolução nº 416/09 e adicionadas à instituição do Política Nacional de Resíduos Sólidos em 2010, tem-se buscado soluções para o gerenciamento dos pneus inservíveis.

Os pneus, ao final de sua vida útil, podem ser utilizados como combustível alternativo e, quando reciclados, podem ser transformados em tapetes para automóveis, solado de sapato, pisos industriais, pisos de quadras esportivas, borrachas de vedação. O pó gerado na recauchutagem e seus restos moídos podem ser usados na composição de asfalto de maior elasticidade e durabilidade.

A utilização dos pneus inservíveis como combustível alternativo em fornos de cimento, também chamado de coprocessamento, tem sido a alternativa de destinação mais buscada no Brasil e em outros países. O coprocessamento proporciona o aproveitamento térmico e a valorização energética deste resíduo, o que reduz o uso de combustíveis fósseis não-renováveis. Além disso, o aço contido nos pneus e as cinzas resultantes da queima podem ser incorporados ao cimento. Porém, alguns fatores legais e ambientais devem ser observados neste processo, como a geração de gases nocivos como monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), além de dioxinas e furanos.

Há ainda a busca por métodos mais “verdes” de produção dos pneus, com o desenvolvimento de alternativas sustentáveis a fim de prolongar a sua vida útil, levando a uma menor geração de pneus inservíveis, por meio de adição de sílica e silano à composição.

Com este trabalho, objetiva-se identificar as normas para licenciamento da utilização ou coprocessamento de resíduos industriais, especificamente o pneu

inservível, e os padrões estabelecidos por lei para emissões de dioxinas e furanos no Brasil e no mundo. Busca-se também identificar, por meio de revisão da literatura, se, apesar de diminuir a geração de pneus inservíveis, o aumento da vida útil do pneu poderia causar impactos em outras fases do seu ciclo de vida, inclusive, na sua utilização como combustível alternativo.

2. MÉTODO

A metodologia utilizada neste trabalho foi a revisão da literatura e a busca de dados secundários, por meio de consulta a livros, artigos e outras fontes de caráter científico já publicadas.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Pneus

O pneu é o produto da combinação de matérias-primas e processos e o elemento de contato entre o veículo e a via sobre a qual este trafega. A primeira iniciativa de definição de pneus por uma legislação foi estabelecida pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 258/99 que considerava:

- pneu ou pneumático: todo artefato inflável, constituído basicamente por borracha e materiais de reforço utilizados para rodagem em veículos automotores e bicicletas. Esta definição foi atribuída em nova redação pela Resolução n° 301/02;
- pneu ou pneumático novo: aquele que nunca foi utilizado para rodagem sob qualquer forma;
- pneu ou pneumático reformado: todo pneumático que foi submetido a algum tipo de processo industrial com o fim específico de aumentar sua vida útil de

rodagem em meios de transporte, tais como recapagem, recauchutagem ou remoldagem;

- pneu ou pneumático inservível: aquele que não mais se presta a processo de reforma que permita condição de rodagem adicional.

Os principais polímeros utilizados no processo de fabrico dos pneus são a borracha natural, derivada da seiva das árvores *Hevea brasiliensis*, e a borracha sintética, derivada do petróleo. A elas são adicionados químicos como negro de fumo, sílica, enxofre, além de susbstâncias aceleradoras, plastificantes, antioxidantes e antiozonantes, para conferir suas propriedades específicas e bastante variáveis. Além da matéria-prima polimérica, os pneus são compostos por tecido de náilon e aço. A composição dos pneus varia com o fabricante, com sua aplicação e exigências de performance (ANIP, 2016).

O negro de fumo é um dos aditivos principais dos pneus, ao qual é atribuída a função de aumento da resistência do borracha. Trata-se de um pó de carvão muito fino, derivado da fuligem recolhida a partir de óleo queimado. Ele que confere a cor escura característica da borracha.

A adição de enxofre à borracha, processo conhecido como vulcanização, diminui sua viscosidade e aumenta a resistência. Isso ocorre porque os átomos de enxofre criam ligadas “cruzadas” entre as moléculas da borracha, impedindo-as de se movimentar. Essa adição também torna a borracha resistente à temperatura (SOARES, 2015). A vulcanização é um processo quase que irreversível e faz com que um pneu leve em média 600 anos para se degradar se disposto inadequadamente no meio ambiente.

Segundo dados da Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos (ANIP), foram produzidos anualmente, em média, mais de 63 milhões de pneus nos últimos 11 anos no Brasil. Em 2016, somando todas as categorias (carga, passeio, moto, agrícola e outros), a produção foi de 67.870.350 pneus (ANIP, 2016). Ao final de sua vida útil, esses milhares de pneus serão considerados inservíveis, podendo se transformar em um grande passivo ambiental.

O resíduo de pneus pode ser classificado, conforme NBR 10004/2004, como sendo não-perigoso Classe II A – não-inerte, por apresentar teores de metais (zinco e

manganês) no extrato solubilizado superiores aos padrões estabelecidos por esta mesma norma (BERTOLLO *et al.*, 2002).

Considerando que os pneus inservíveis dispostos inadequadamente constituem passivo ambiental, que resulta em sério risco ao meio ambiente e à saúde pública, com a Resolução CONAMA nº 258/99, foi introduzido o princípio da responsabilidade do produtor e do importador pela coleta e destinação final ambientalmente adequada a esses pneus. Essa resolução estabeleceu, ainda, os prazos e quantidade a serem atendidos (BRASIL, 1999a).

A partir de 1º de janeiro de 2002, para cada quatro pneus produzidos ou importados (novos ou reformados), as empresas fabricantes e as importadoras deveriam dar destinação final a um pneu inservível. A partir de 1º janeiro de 2003, a relação passou a ser de dois pneus produzidos ou importados (novos ou reformados) para um pneu inservível com destinção final adequada. A partir de 1º de janeiro de 2004, as empresas fabricantes e as importadoras deveriam dar destinação final a um pneu inservível para cada pneu produzido ou importado novo e, no caso de pneus reformados importados, para cada quatro, cinco pneus inservíveis deveriam ter destinação final por parte dos importadores. A partir do primeiro dia do ano de 2005, a relação cresceu para cada quatro pneus produzidos ou importados novos, cinco pneus usados deveriam ter destinação final e, para cada 3 pneus importados reformados de qualquer tipo, as importadoras deveriam dar destinação final a quatro pneumáticos inservíveis (BRASIL, 1999a). Depois da publicação da Resolução, 26 de agosto de 1999, ficou proibida a disposição de pneumáticos inservíveis em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos baldios ou alagadiços, e a queima a céu aberto (BRASIL, 1999a).

A Resolução CONAMA nº 416, de 30 de setembro de 2009, revoga as Resoluções nº 258/1999 e nº 301/2002, dispondo sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, além de dar outras providências. Ela traz outras definições para pneus, para destinação ambientalmente adequada, para pontos de coleta e para central de armazenamento. Ela estabelece que as empresas fabricantes ou importadoras deverão dar destinação adequada a um pneu inservível para cada pneu novo comercializado para o mercado

de reposição, sendo a quantidade convertida em peso para efeito de controle e fiscalização, considerando o fator de desgaste de 30% (trinta por cento) sobre o peso do pneu novo produzido ou importado. Fica determinado por esta Resolução que os fabricantes e importadores de pneus novos devem declarar ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA, em uma periodicidade máxima de 01 (um) ano, por meio do Cadastro Técnico Federal - CTF, a destinação adequada dos pneus inservíveis. Esta determinação também é atribuída aos destinadores. (BRASIL, 2009)

A Instrução Normativa nº 1, de 18 de março de 2010, que está relacionada à Resolução CONAMA N.º 416/2009, institui os procedimentos necessários ao seu cumprimento e apresenta algumas determinações considerando que a referida Resolução demanda ao IBAMA determinadas atividades fundamentais para a sua implementação (BRASIL, 2010a).

Na Europa, também é proibida a disposição em aterros de pneus inteiros a partir de 2003 e de pneus triturados a partir de 2006, resultado da Diretiva Europeia 1999/31/CE, de 26 de Abril de 1999. Assim, os Estados-Membros ficam obrigados a concentrarem os seus esforços na responsabilidade ambiental e em recolher e tratar adequadamente os seus pneus usados. Não existe nenhum regulamento europeu específico para recolher e tratar pneus usados. Cada Estado-Membro poderá escolher o seu próprio sistema de gestão dentre os três tipos existentes na Europa que são: o sistema de responsabilidade do produtor, o sistema de taxas e o sistema de mercado livre. Os países podem mudar de um sistema de gestão para outro (VALORPNEU, 2017).

No sistema de responsabilidade do produtor, os fabricantes ficam responsáveis por recolher e tratar adequadamente os pneus em final de vida e ao Estado cabe definir a estrutura reguladora que irá enquadrar a gestão destes resíduos. Em países que escolheram esta opção de sistema de gestão, os fabricantes criam um setor de atividade especializada nesta área, que é representado por uma ou mais entidades gestoras. No ato de compra de um pneus novo, é cobrado um valor de contarapartida que serve para financiar este sistema e que, dependendo do país, pode estar ou não visível na fatura.

No sistema de taxas, um imposto determinado pelo Estado é cobrado aos fabricantes de pneus e normalmente é repassado ao comprador. Este valor será usado para finaciar a coleta e o tratamento de pneus em final de vida. Assim, fica a cargo do Estado o processamento dos pneus e a remuneração dos operadores desse serviço.

Para o sistema de mercado livre, o Estado define os objetivos de coleta e tratamento de pneus usados, mas não determina nenhum responsável direto por esta gestão. O detentor final dos pneus usados fica responsável por destiná-lo adequadamente. Assim, os operadores de coleta e tratamento competem uns com os outros e são livres para promover práticas de valorização a custo otimizado.

Segundo a Valorpneu (2017), entidade gestora em Portugal, o sistema de responsabilidade do produtor é o que apresenta meios e resultados mais eficientes para alcançar o objetivo de coleta e tratamento de 100% dos pneus usados.

A Figura 1 mostra a organização da gestão dos resíduos de pneus em fim de vida na Europa em 2015 e o ano em que o modelo de gerenciamento de responsabilidade foi definido nos respectivos países que o adotam.

A maior parte dos países europeus utilizam o sistema de responsabilidade do produtor. Esse grupo de países inclui Noruega, Turquia e 19 países da União Europeia, sendo eles: Suécia, Finlândia, Estônia, Letônia, Lituânia, Polônia, República Tcheca, Eslováquia, Hungria, Romênia, Bulgária, Grécia, Holanda, Bélgica, França, Itália, Eslovênia, Portugal e Espanha (ETRMA, 2015). Esse modelo é seguido de diversas maneiras, desde um sistema em que uma única empresa de gestão lida com a coleta e tratamento do pneu em final de vida útil em um país, como em Portugal, Holanda e Suécia, podendo haver também várias empresas de gestão, como ocorre na Itália, França e Espanha; ou ainda, por meio de responsabilidade individual do produtor, caso da Hungria (ETRMA, 2015).

O sistema de taxas é aplicado na Dinamarca e na Croácia, sendo financiado por um imposto cobrado sobre os produtores de pneumáticos e, posteriormente, repassado ao consumidor. Cada país é responsável pela gestão desses resíduos (ETRMA, 2015). Já o sistema de mercado livre é adotado na Áustria, Suíça, Alemanha, Reino Unido e em alguns países do sudeste da Europa (ETRMA, 2015).

Nos Estados Unidos, o sistema implementado é o de mercado livre, não existe uma legislação federal regulamentadora e cada estado possui sua própria legislação para pneus. Segundo Campos (2006), alguns estados têm fundos específicos para lidar com os resíduos de pneus usados, baseados em taxas cobradas, outros proíbem o comerciante de pneus de cobrar taxas adicionais para a destinação dos pneus usados. Em alguns estados, é proibida a deposição de pneus inteiros em aterros enquanto em outros, a de pneus triturados.

Figura 1: Organização da gestão dos resíduos de pneus em fim de vida na Europa em 2015

Fonte: Adaptado de ETRMA, 2015

3.2 Principais destinações dos pneus inservíveis

A Associação Nacional da Indústria de Pneumáticos - ANIP é uma entidade representa as empresas fabricantes de pneumáticos de todo o Brasil desde 1960. Nesse contexto, para atuar na coleta e destinação de pneus inservíveis, procedimento que redunda no atendimento da finalidade ambiental já expressa na revogada Resolução 258/99 do CONAMA, as indústrias de pneumáticos valem-se de instrumentos implantados pela ANIP, que criou o Programa Nacional de Coleta e Destinação de Pneus Inservíveis. Esse programa, que contava em 2014 com a participação de 834 pontos de coleta em todos os estados do país e no Distrito Federal, tornava necessária a constituição de uma entidade exclusivamente dedicada à gestão e aprimoramento dos trabalhos sobre o pós-consumo dos pneumáticos. Assim, foi criada em 2007 a Reciclanip, com base no modelo europeu, com a diferença que nos países da Europa o custo é compartilhado entre os diversos participantes da cadeia e, no Brasil, até o momento é pago apenas pelos fabricantes e importadores. Segundo a ANIP (2015), a Reciclanip, associção sem fins lucrativos, tem por missão assegurar a sustentabilidade do processo de coleta e destinação de pneus inservíveis de responsabilidade dos fabricantes de pneus em todas as regiões do país, atuando de forma responsável nas áreas ambiental, social e econômica.

O Programa funciona em âmbito nacional, a partir da celebração de convênios de cooperação mútua, com instalação dos pontos de coleta, locais cobertos disponibilizados e controlados pelas prefeituras municipais e outros parceiros, para onde são levados os pneus recolhidos pelo serviço público, ou descartados voluntariamente pelo munícipe e por empresas. A partir desses pontos de coleta, a Reciclanip recolhe os pneus considerados inservíveis e os encaminha para a destinação final ambientalmente adequada, realizada por empresas devidamente autorizadas e licenciadas pelos órgãos ambientais.

O desenvolvimento de um sistema de logística reversa de produtos e embalagens em final de vida útil, de forma independente do serviço público de limpeza urbana e de manejo dos resíduos sólidos, tornou-se obrigatório para fabricantes, distribuidores e importadores a partir da aprovação da Política Nacional de Resíduos

Sólidos (PNRS), em 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010b), o que torna o papel da Reciclanip com os pneus inservíveis mais relevante.

Segundo dados da ANIP (2015), a forma mais comum de destinação dos pneus inservíveis é como combustível alternativo para a indústria de cimento, que correspondeu a 69,7% do total em 2014. Em segundo lugar, está a fabricação de granulado e pó de borracha para utilização em artefatos de borracha, ou asfalto-borracha, respondendo por 17,8% da destinação. Na sequência, está a laminação, que utiliza o pneu inservível como matéria-prima para fabricar solado de sapato, dutos fluviais, que representam 6,0%. O aço corresponde a 6,5% e é também reaproveitado na fabricação do cimento ou pela indústria siderúrgica.

3.2.1 Coprocessamento de pneu inservível e outros resíduos

O uso do pneus como combustível alternativo, ou seja, seu coprocessamento, nos fornos de clínquer[1] proporciona o aproveitamento térmico e a valorização energética deste resíduo, o que reduz o uso de combustíveis fósseis não-renováveis, além disso, o aço contido nos pneus e as cinzas resultantes da queima podem ser incorporados ao clínquer. Dentre outras vantagens da substituição dos combustíveis tradicionais, tais como coque de petróleo, por pneus inservíveis, estão a menor geração de SO_2 e NO_x, redução do custo de produção do cimento, menor formação de dioxinas e furanos devido ao elevado tempo de residência em um ambiente alcalino e com presença de sulfatos, característicos do processo de produção do cimento (LAGARINHOS, 2011).

As disposições, procedimentos, critérios básicos e aspectos técnicos específicos de licenciamento ambiental para as atividades de coprocessamento de resíduos em fornos rotativos de clínquer, para a fabricação de cimento estão contidos na Resolução CONAMA nº 264/99. Nela estão estabelecidos os limites máximos de emissão atmosférica de alguns poluentes para essas atividades, dentre eles: hidrocarbonetos totais, monóxido de carbono e metais pesados, como chumbo, mercúrio e cádmio. Os

[1] O clínquer, constituinte básico do cimento, resulta da queima de rochas calcárias e argilosas em um forno rotativo a 1450º C. A ele, é adicionado de 3 a 6% de gesso a fim de controlar a cinética de hidratação do cimento (MARQUES, 2000).

limites de emissão dos poluentes poderão ser mais restritivos, a critério do Órgão Ambiental local, em função de particularidades regionais. (BRASIL, 1999b).

A Resolução nº 264 do CONAMA também estabelece quais parâmetros de processo e emissões atmosféricas devem ser monitoradas continuamente e que os relatórios de monitoramento devem ser encaminhados ao Órgão Ambiental competente de acordo com a freqüência solicitada (BRASIL, 1999b).

A Resolução CONAMA nº 316/02 dispõe sobre procedimentos e critérios para o licenciamento e para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, levando em consideração que o princípio da precaução é fundamental para o desenvolvimento sustentável e que os sistemas de tratamento térmico de resíduos são fontes potenciais de risco ambiental e de emissão de poluentes perigosos. Ela define os limites de emissão para vários poluentes, inclusive dioxinas e furanos (0,5 ng/Nm^3 expressos em TEQ - total de toxicidade equivalente da 2,3,7,8 TCDD (tetracloro-dibenzo-para-dioxina)) em complemento à Resolução nº 264/99 do CONAMA que não apresenta esses valores para o co-processamento de resíduos em fornos rotativos de produção de clínquer (BRASIL, 2002).

Nos Estados Unidos, sob a autoridade do *Clean Air Act*, a Agência de Proteção Ambiental Americana (*Environmental Protection Agency – EPA*) promulgou, em maio de 1999, padrões nacionais de emissão para fornos de cimenteiras novos e já existentes. As regulações específicas para dioxinas e furanos foi de limite de 0,2 ng I-TEQ/m^3 (KARSTENSEN, 2007).

Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), uma grande variedade de resíduos substitutos de combustível são utilizados na fabricação de cimento, a saber: solventes; resíduos oleosos e resíduos têxteis; óleos usados (de carro e fábricas); pneus usados e resíduos de picagem de veículos; graxas, lamas de processos químicos e de destilação; resíduos de empacotamento e de borracha; resíduos plásticos, de serragem e de papel; lama de esgoto, ossos de animais e grão vencidos; lama com alumina (alumínio); lamas siderúrgicas (ferro); areia de fundição (sílica); resíduos da fabricação de vidros (flúor); gesso, cinzas e escórias (ABCP, 2016).

Na União Europeia, a Diretiva 2000/76/CE de 4 de Dezembro de 2000, relativa à incineração de resíduos, tem por objetivo prevenir ou, na medida do possível, reduzir ao

mínimo os efeitos negativos no ambiente, em especial a poluição resultante das emissões para a atmosfera, o solo e as águas superficiais e subterrâneas, bem como os riscos para a saúde humana resultantes da incineração e coincineração de resíduos. Ela determina os valores-limite de emissões totais de poluentes para fornos de cimento de coincineração de resíduos, conforme mostra o Quadro 1. Os valores-limite de emissão para o monóxido de carbono podem ser fixados pela autoridade competente (EUROPEAN UNION, 2000).

Quadro 1: Valores-limite de emissões para fornos de cimento de coincineração de resíduos

Poluente	C[a]
Poeiras totais	30
HCl	10
HF	1
NO_x	500[b] / 800[c]
Cd + Tl	0,05
Hg	0,05
Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni, V	0,5
Dioxinas e furanos	0,1
SO_2	50[d]
COT	10[d]

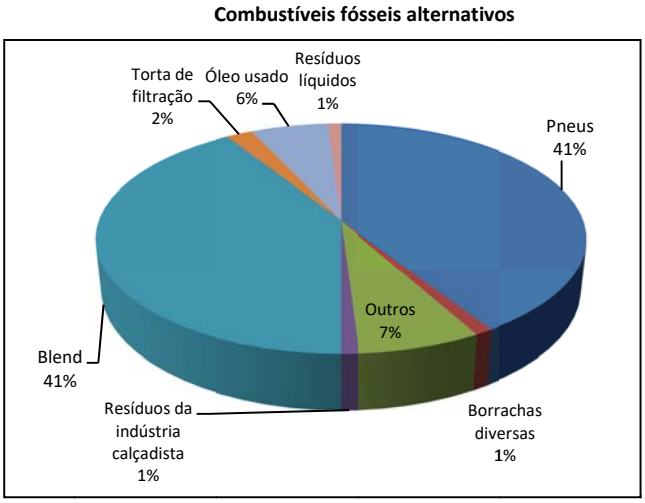
a- Todos os valores expressos em mg/m3, exceto dioxinas e furanos expressos em ng/m3
b- Para novas instalações
c- Para instalações já existentes
d- A autoridade competente pode autorizar isenções nos casos em que o COT e o SO_2 não resultem da incineração de resíduos.

Fonte: Diretiva 2000/76/CE, União Europeia

Ainda segundo a ABCP (2016), em 2015, das 57 plantas integradas que possuem fornos rotativos para a produção de clínquer, 38 são plantas integradas com fornos rotativos licenciados para o coprocessamento de resíduos, representando 67% do parque industrial brasileiro. Dentre os substitutos de combustíveis, destacam-se os pneus inservíveis e o blend de resíduos ambos apresentando 41% do total em toneladas, conforme Figura 2. Já o coprocessamento de pneus inservíveis em fornos de

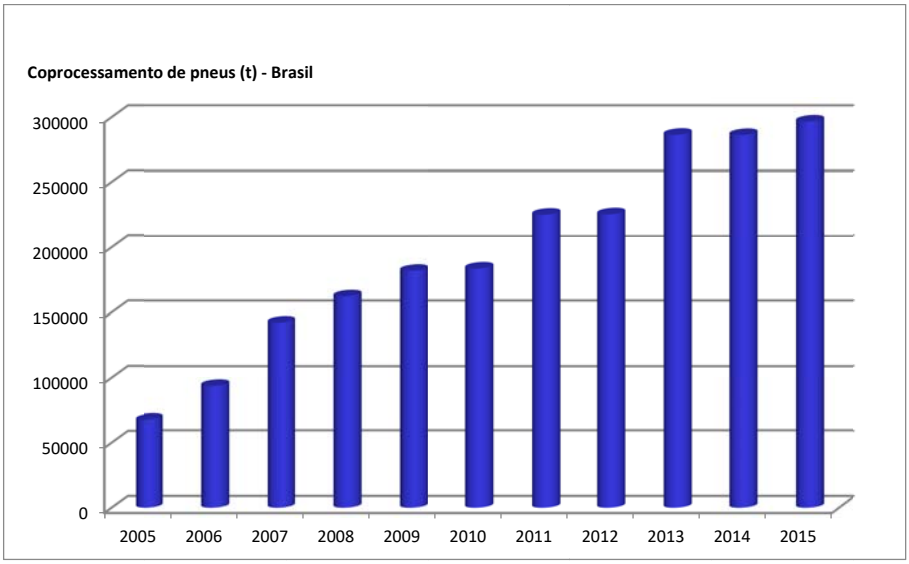
cimento vem crescendo por ser considerado uma forma de destruição de toneladas de passivo ambiental. A evolução do coprocessamento é mostrado na Figura 3.

Figura 2: Combustíveis fósseis alternativos utilizados na fabricação de cimento



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2016

Figura 3: Evolução do coprocessamento de pneus no Brasil de 2005 a 2015



Fonte: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2016

Segundo dados de 2015 da Associação Europeia de Cimentos (CEMBUREAU), em termos de recuperação de energia, 39% dos combustíveis primários do forno de cimento (principalmente coque de petróleo e óleo) na União Europeia são substituídos por combustíveis alternativos. Desses combustíveis, 5,4% são originários da biomassa de resíduos (como farinha de animais, resíduo de madeira, lodo de esgoto e serragem) e 33,4% de outros resíduos (por exemplo, resíduos de pneus, óleo usado, solventes). Em 2050, 60% da energia do forno poderia ser fornecida por combustíveis alternativos, levando a uma redução de 27% nas emissões de CO2 do combustível e economizando 7,7 milhões de toneladas (Mt) anualmente de carvão e coque de petróleo e 6 milhões de toneladas anualmente de matérias-primas. A CEMBUREAU também oferece suporte sobre como desenvolver o uso de combustíveis alternativos e biomassa de resíduos (CEMBUREAU, 2015).

Nos Estados Unidos em 2015, foram fabricados 279,7 milhões de pneus novos. Segundo dados da Associação de Fabricantes de Pneus dos Estados Unidos (*U.S. Tire Manufacturer Association*), neste mesmo ano, 117,31 milhões de pneus inservíveis foram reaproveitados energeticamente, o que corresponde a 48% do total gerado, sendo 45,97 milhões (753,37 mil toneladas) destinados ao coprocessamento em fornos de clínquer (USTIRES, 2017).

3.3 Pneu “verde”

Os pneus são produtos e composições de alta tecnologia. É um desafio para os desenvolvedores de pneus dominar o que eles chamam de "triângulo mágico" formado pelos objetivos conflitantes de aderência molhada, resistância à abrasão e resistência ao rolamento.

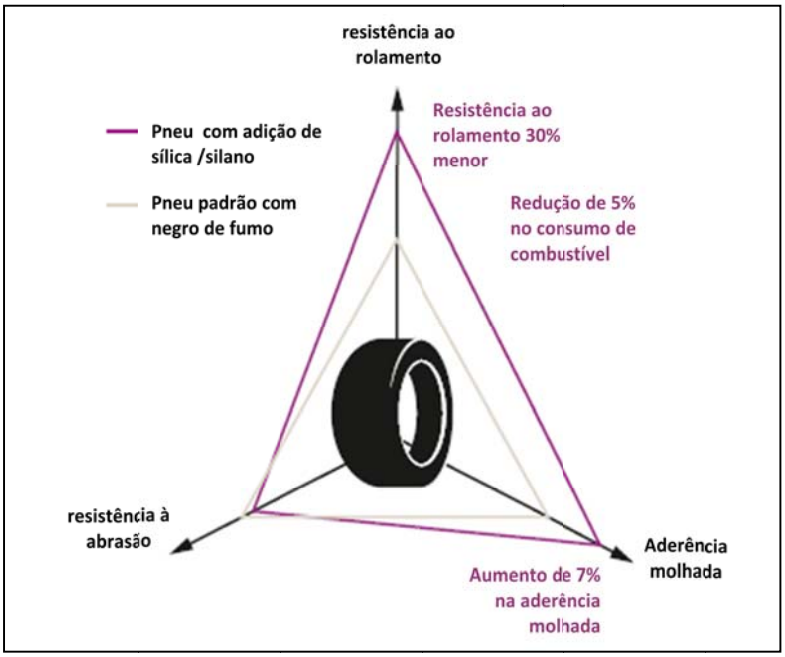
No passado, os pneus estavam equipados com negros de fumo e borracha de E-SBR (butadieno-estireno polimerizado por emulsão), assim a melhora em um dos vértices do triângulo resultava em uma deterioração da propriedade correspondente de outro vértice (EVONIK, 2017).

Recentemente, tem-se introduzido a sílica para substituir o negro de fumo na mistura para a fabricação de pneus. Com a introdução das marcas de borracha S-SBR

(butadieno-estireno polimerizado por solução) e da tecnologia Sílica/ Silano, tornou-se possível melhorar a resistência ao rolamento e a aderência molhada ao mesmo tempo e, dessa forma, desenvolver pneus de baixa resistência ao rolamento, também conhecidos como "pneus verdes", sem concessões em Segurança. A Figura 4 mostra a comparação entre os dois “triângulos mágicos”. Os pneus verdes oferecem uma durabilidade comparável à classe de borracha E-SBR com base em negro de fumo, têm uma aderência significativamente melhor - especialmente em condições úmidas - e reduzem o consumo de combustível (EVONIK, 2017). Além da economia no consumo de combustível, há uma menor emissão de poluentes pelos veículos, e ainda menor geração de resíduos ao longo do tempo, visto que a durabilidade dos pneus aumenta.

Segundo a EVONIK, a sílica atua como um enchimento ativo e o silano é adicionado para unir quimicamente a borracha S-SBR e a sílica. No entanto, segundo Campos (2006), esta substituição pode ter consequências negativas no potencial de valorização energética do resíduo, pois diminui o valor energético da borracha e aumenta o teor de cinzas gerado durante o coprocessamento. Durante o coprocessamento de resíduos em fornos de cimento, parte das cinzas geradas é incorporada à massa. No entanto, não é claro o percentual máximo admitido na mistura, e as cinzas adicionais podem se tornar um outro passivo ambiental.

Figura 4: Comparação entre pneus pneus padrão e pneus com adição de Sílica/Silano



Fonte: Adaptado de *Tyre go green – A life cycle assessment* (EVONIK, 2017)

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Lagarinhos (2011), em estudo acerca da logística reversa dos pneus usados no Brasil, observou que a mesma já era exigida pela Resolução CONAMA nº 416/2009, com a possibilidade da realização de acordos setoriais para facilitar sua implementação. Porém, não está prevista a retirada dos pneus inservíveis, que já constituíam um passivo ambiental, de aterros, lixões, rios, entre outros.

Para o autor, a logística reversa é um elo de fundamental importância no gerenciamento de pneus inservíveis, bem como seu dimensionamento para os fabricantes e importadores, devido ao custo da coleta, transporte e destinação destes resíduos para o cumprimento das metas estabelecidas (LAGARINHOS, 2011).

O estudo aponta que os fabricantes e importadores de pneus não realizam um trabalho em conjunto para desenvolver um modelo de logística reversa que reduza os custos; aumente a quantidade de pneus ainda servíveis para as empresas de reforma, por meio da seleção e triagem nos pontos de coleta; e aumente a quantidade de inservíveis para atender às empresas de beneficiamento e às de coprocessamento.

Souza (2011) também aponta que no Brasil a triagem e a classificação dos pneus usados são realizadas de forma dispersa, nos próprios geradores de pneu inservível. Em outros países, o procedimento, geralmente, se realiza de forma centralizada, classificando e encaminhando os pneus para os destinos adequados. A triagem e classificação descentralizadas, por não garantirem um padrão nacional, podem ocasionar o encaminhamento de pneus ainda em condição de uso e/ou remanufatura para reciclagem, reduzindo assim sua vida útil.

As dificuldades da logística como um todo do pneu ainda são apontadas pela ANIP. A Associação destaca a importância do transporte para o ciclo. O pneu, por ser

um produto volumoso e pesado, cujo transporte é concentrado no modal rodoviário, seu custo em todo o ciclo é significativo para a indústria, desde a matéria-prima ao inservível descartado, agravado pelos custos relacionados à logística brasileira, como impostos sobre o frete, taxas de pedágio, alto índice de roubo de carga e qualidade das estradas brasileiras, que tornam o produto ainda menos competitivo. Como melhoria no ambiente institucional, a ANIP propões a desoneração do processo de logística reversa dos pneus inservíveis e redistribuição do custo (ANIP, 2015).

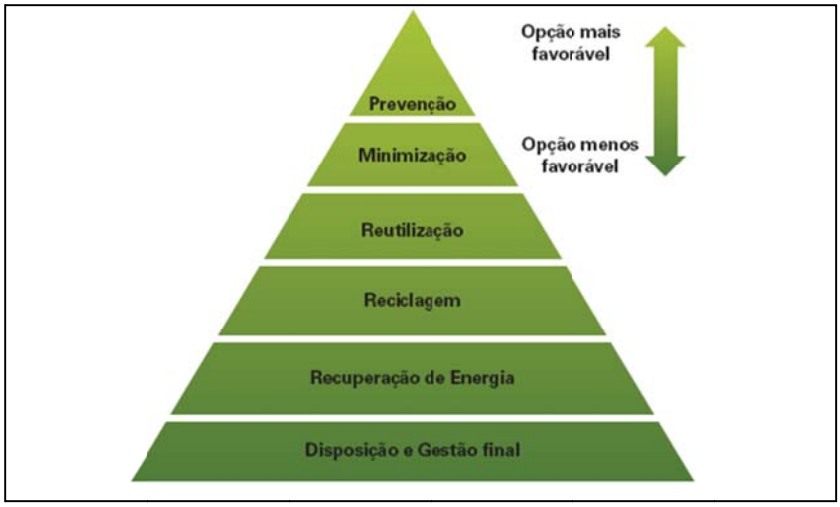
Além de todas as dificuldades da logística reversa dos penus inservíveis, foi contatado que no Brasil havia 834 pontos de coleta em 2014, número baixo comparado aos 5.570 municípios. Segundo o IBAMA (2016), dos municípios com mais de 100 mil habitantes, onde deveria ser implantado pelo menos um ponto de coleta conforme a Resolução CONAMA 416/09, em 11 não há pontos de coleta.

A ANIP (2015) relata que nem todos os importadores cumprem a obrigação legal de recolher os pneus inservíveis de sua responsabilidade, de acordo com as metas anuais estabelecidas pelo IBAMA. A partir do Relatório de Pneumáticos publicado anualmente pelo IBAMA, em que são consolidadas as insformações fornecidas pelos fabricantes e importadores sobre os volumes de pneus inservíveis destinados, a ANIP constatou que, no acumulado de 2009 a 2013, foi gerado um passivo de cerca de 150 mil toneladas de pneus inservíveis de responsabilidade dos importadores que não cumpriram sua obrigação legal. Assim, como melhoria no ambiente microeconômico, a ANIP propôs o equacionamento do passivo gerado pelo não cumprimento das metas de destinação de pneus inservíveis por tradings e distribuidores independentes de pneus importados. Ela propôs que, para os importadores que não cumprem suas metas de recolhimento e destinação, seja criada uma taxa ambiental paga previamente à importação e que os custos da logística reversa seja compartilhado entre distribuidores, revendedores, destinadores, consumidores finais de pneus, poder público, fabricantes e importadores.

O coprocessamento em fornos de cimenteiras é a destinação mais comum de destinação dos pneus inservíveis, correpondendo a 69,7% do total gerado segundo a ANIP (2015). Porém, na pirâmide de priorização do gerenciamento de resíduos sólidos, representada na Figura 5, esta é a umas das opções “menos nobres”. É preciso

desenvolver, paralelamente, formas de prevenção a fim de evitar a geração de resíduos e de minimização da demanda por matérias-primas, opções mais favoráveis.

Figura 5: Pirâmide de priorização do gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Guia Técnico Ambiental da Indústria Cerâmica (FIEMG, 2013)

Os fabricantes e importadores, responsáveis pela adequada destinação dos pneus inservíveis gerados, necessitam apresentar um certificado de destinação que comprove tal destinação ao IBAMA anualmente, conforme a legislação. Em virtude disso, geralmente as empresas que possuem potencial para reaproveitar esse resíduo em seu ciclo produtivo recebem um valor monetário por tonelada para destinar corretamente os pneus inservíveis, fornecendo em troca disso o certificado de destinação de pneus inservíveis. Souza (2011), no decorrer de seu estudo, verificou em pesquisa de campo, a existência de um mercado de venda de certificados, em que as empresas que processam o pneu inservível e/ou o utilizam como substituto em seu ciclo produtivo obtém o certificado de destinação correta do pneu inservível e o comercializa com as empresas que deste necessitam. Souza (2011) aponta essa constatação como uma distorção, em que o gerador necessita custear o transporte do pneu inservível até o ponto de coleta, sem receber nenhuma remuneração para isso,

enquanto o usuário do resíduo além de reduzir seu consumo de matéria prima ainda é remunerado por tal utilização.

Os valores de emissões atmosféricas gerados nas indústrias de cimento dependem das matérias-primas e combustíveis utilizados no processo, da temperatura e os níveis de oxigênio aplicados. Alguns autores, a exemplo de Lagarinhos (2011), indicam que o coprocessamento de pneus inservíveis em substituição a combustíveis tradicionais, tais como o coque do petróleo, nos fornos dessas indústrias, geram menores emissões de SO_2 e NO_x e de dioxinas e furanos.

Porém, para Milanez (2007), há fragilidades institucionais das agências ambientais e limitada capacidade técnica nos países periféricos para que o coprocessamento de resíduos industriais em fornos de cimento no Brasil seja considerado como uma atividade adequada. O autor alguns problemas de saúde ocupacional e ambiental que justificam sua consideração. Ele defende um fortalecimento dos mecanismos de fiscalização e dos canais de participação social, para que Estado, empresários e sociedade possam reavaliar e rediscutir os riscos e as incertezas este tipo de destinação para os resíduos industriais.

Outro aspecto, pontuado por Santi e Sevá (2004), que deve ser levado em consideração nas discussões e, principalmente, nas decisões sobre a escolha dos combustíveis e sobre os riscos aceitáveis no processo de fabricação de cimento com emprego de resíduos é o Princípio da Precaução. Segundo eles, os entes públicos apresentam uma postura atrasada em relação aos riscos e sua disseminação para a saúde humana e para o meio ambiente em larga escala.

No entanto, como ressaltado por Rocha e Lemme (2013), é necessário ter cautela ao se utilizar do Princípio da Precaução para não invalidar a aplicação de novas tecnologias de produção ou mesmo tecnologias não usuais.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No Brasil, com a proibição da destinação final inadequada de pneus inservíveis, tais como a disposição em aterros sanitários, mar, rios, lagos ou riachos, terrenos

baldios ou alagadiços, e queima a céu aberto em 1999, e com a obrigatoriedade da coleta e destinação destes pneus inservíveis, pelos fabricantes e importadores em 2002, a tecnologia mais utilizada para a destinação tem sido o coprocessamento em fornos de clínquer.

O coprocessamento de resíduos vem sendo cada vez mais utilizado, por motivações ambientais e energéticas. A substituição de combustíveis tradicionais, tais como o coque de petróleo, por resíduos como os de pneu inservível em fornos de clínquer reduz o custo do processo, visto que estes últimos apresentam preço inferior ao dos primeiros. Ambientalmente, o coprocessamento de pneus inservíveis é uma alternativa de eliminação de resíduos de grandes volume e peso que poderiam ter destinação de maior impacto ambiental, como a disposição em aterros.

A utilização destes resíduos como combustíveis alternativos em fornos de clínquer é regulamentada pela Resolução CONAMA nº 264/99. Porém, percebe-se ainda fragilidades legais na sua regulação, na concessão de licenças e falhas na fiscalização devido a limitações institucionais das agências ambientais.

Foi observado na literatura que também ainda há muito a melhorar na fase de logística reversa dos pneus inservíveis, antes de eles chegarem aos fornos de cimento. A logística reversa deste resíduo no Brasil, responsabilidade dos fabricantes e importadores, é dispersa e a triagem e classificação ainda é falha.

As experiências internacionais no coprocessamento de resíduos se mostraram mais amadurecidas. Inclusive, com limites de emissão atmosférica mais restritivos que os praticados no Brasil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP. **Panorama do coprocessamento** – *Brasil 2016*. Disponível em: <http://coprocessamento.org.br/cms/wp-content/uploads/2017/01/Panorama-coprocessamento_2016-1.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR 10004: **Classificação de Resíduos Sólidos**. Rio de Janeiro, ABNT, 2004, 71p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP. **Livro branco da indústria de pneus – uma política industrial para o setor**. São Paulo, 2015. Disponível em: < http://www.anip.com.br/arquivos/f8201-white-book-versao-final.pdf>. Acesso em: 24 jun. 2017.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PNEUMÁTICOS - ANIP. **Produção e vendas 2016**. Disponível em: <http://www.anip.com.br/index.php?cont=conteudo>. Acesso em 24 jun. 2017.

BERTOLLO, S. M.; JÚNIOR, J. L. F.; SCHALCH, V. **Benefícios da incorporação de borracha de pneus em pavimentos asfálticos**. In: XVIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental. 2002.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, **Resolução nº 258, de 26 de agosto de 1999**. Determina que as empresas fabricantes e as importadoras de pneumáticos ficam obrigadas a coletar e dar destinação final ambientalmente adequada aos pneus inservíveis. Publicada no DOU no 230, de 2 de dezembro de 1999. Brasília, 1999a.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA **Resolução nº 264, de 26 de agosto de 1999**. Dispõe sobre Licenciamento de fornos rotativos de produção de clínquer para atividades de co-processamento de resíduos. Publicada no DOU no 54, de 20 de março de 2000. Brasília, 1999b.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA **Resolução nº 316, de 29 de outubro de 2002**. Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos. Publicada no DOU no 224, de 20 de novembro de 2002. Brasília, 2002.

_____. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, **Resolução nº 416, de 30 de setembro de 2009**. Dispõe sobre a prevenção à degradação ambiental causada por pneus inservíveis e sua destinação ambientalmente adequada, e dá outras providências. Publicada no Diário Oficial da União em 01 de outubro de 2009. Brasília, 2009.

_____. **Instrução Normativa nº 1, de 18 de março de 2010**. Brasília, 2010a. Disponível em : <https://servicos.ibama.gov.br/ctf/manual/html/IN_01_2010_DOU.pdf>. Acesso em: 23 jun. 2017.

_____. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, 2010b.

CAMPOS, P. S. **Aproveitamento industrial da borracha de pneu reciclada (a reciclagem do resíduo 160103 da L.E.R).** 2006. Dissertação (mestrado). Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2006.

CEMBUREAU - The European Cement Association. **Activity report 2015**. Brussels, 2015. Disponível em: <https://cembureau.eu/news-views/publications/2015-activity-report/>. Acesso em: 13 jul 2017.

ETRMA – European Tyre and Rubber Manufacturers' Association. **End-of-life Tyre Report 2015**. Brussels, 2015. Disponível em:

<http://www.etrma.org/uploads/Modules/Documentsmanager/elt-report-v9a---final.pdf>. Acesso em: 05 jul 2017.

EUROPEAN UNION. **Directive 1999/31/EC of the European Parliament and of the Council on the landfill of waste**. April 26, 1999. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999L0031&from=PT>. Acesso em: 13 jul. 2017.

EUROPEAN UNION. *Directive 2000/76/EC of the European Parliament and of the Council on the incineration of waste*. December 4, 2000. Disponível em: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32000L0076&from=PT>. Acesso em: 13 jul. 2017.

EVONIK. **Tires Go Green – A Life Cycle Assessment**. 2017. Disponível em: < http://ultrasil.evonik.com/sites/lists/RE/DocumentsSI/Tires-go-gree-a-life-cycle-assesment-EN.pdf>. Acesso em 24 jun. 2017.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS (FIEMG). **Guia técnico ambiental da indústria de cerâmica vermelha**. Belo Horizonte: FIEMG, 2013. Disponível em <http://www.feam.br/images/stories/producao_sustentavel/GUIAS_TECNICOS_AMBIENTAIS/guia_ceramica.pdf>. Acesso em: 03 jul. 2017.

Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - IBAMA. **Relatório pneumáticos: Resolução Conama nº 416/09: 2016 (ano-base 2015).** 76p. Brasília, 2016.

KARSTENSEN, K. H. **A Literature Review on Co-processing of Alternative Fuels and raw Materials and Hazardous Wastes in Cement Kilns**. 2007. Disponível em: < http://www.aitec-ambiente.org/Portals/2/docs/pubblici/Documenti/Raccolta%20bibliografica/Coprocessing%20literature%20review%202007.pdf>. Acesso em 25 jul. 2017.

LAGARINHOS, C.; TENÓRIO, J.. Reutilização, reciclagem e valorização energética de pneus no Brasil. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, v. 18, n. 2, p.106-118, 2008.

LAGARINHOS C. A. F. **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa**. 2011. 291p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. São Paulo, 2011.

MARQUES, M. Coprocessamento em fornos de cimento. **Revista Gerenciamento Ambiental**, n. 6, 1999.

MARQUES, L. M. L. **Coprocessamento de resíduos industriais em fornos de clinquer - Aspectos do desempenho ambiental associados aos metais pesados**. 2000. 135f. Dissertação (mestrado) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MEADOWS, D. H.; MEADOWS, D. L.; RANDERS, J. **Limites do crescimento: um relatório para o projeto Clube de Roma sobre o dilema da humanidade**. In: Limites do crescimento: um relatório para o projeto Clube de Roma sobre o dilema da humanidade. Perspectiva, 1972.

MILANEZ, B. **Co-incineração de resíduos industriais em fornos de cimento: problemas e desafios**. IX Encontro Nacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente. Universidade Positivo, Curitiba, 2007.

ROCHA, M. S. R.; LEMME, R. F. F. **Inventário do Ciclo de Vida do Pneu Inservível como Combustível em Fornos de Cimenteiras, sob a Ótica das Emissões de CO_2**. 2013. 79p. Escola Politécnica – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

SANTI, A. M. M.; SEVÁ FILHO, A. **Combustíveis e Riscos Ambientais na Fabricação de Cimento; Casos na Região do Calcário ao Norte de Belo Horizonte e Possíveis Generalizações**. In: II Encontro Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade – ANPPAS. Campinas, SP, Brasil, 2004.

SOARES, A. I. C. C. R. **Caracterização Físico-Química de Anomalias em Pneus – Criação de um protocolo de testes forenses**. 2015. 112f. Dissertação (mestrado) – Instituto Superior Técnico. Lisboa, Portugal, 2015.

SOUZA, C. D. R. **Análise da Cadeia de Valor Aplicada a Cadeias Logísticas Reversas. Uma Contribuição ao Reaproveitamento de Pneus Inservíveis**. 2011. 111p. Dissertacão (mestrado). Programa de Engenharia de Transporte – COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

U.S. Tire Manufacturers Association - 2015 U.S. **Scrap Tire Management Summary.** Washington, DC. May 2017. Disponível em: < https://www.ustires.org/system/files/scraptire_summ_2015_05_2017_Final_USTMA.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2017.

VALORPNEU - Sociedade de Gestão de Pneus. **A Gestão de pneus usados na Europa**. 2017. Disponível em: < http://www.valorpneu.pt/artigo.aspx?lang=pt&id_object=336&name=A-Gestao-de-Pneus-Usados-na-Europa>. Acesso em: 24 mai. 2017.

WCED, **World Commission on Environment and Development**. Our Common Future. Oxford, U.K.: *Oxford University Press*, 1987.