

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
FLUMINENSE**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

MODALIDADE PROFISSIONAL

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DA QUEIMA DE
MADEIRA NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS
ORNAMENTAIS**

CAROLINA TAVARES SANCHO MONTEIRO

MACAÉ/RJ

2018

CAROLINA TAVARES SANCHO MONTEIRO

**INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DA QUEIMA DE
MADEIRA NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS
ORNAMENTAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, do Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Fluminense, Campus Macaé, na linha de Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação. Área de atuação: Gestão ambiental das cidades, Gerenciamento de Resíduos e Efluentes.

Orientação: D.Sc. Marcos Antônio Cruz
Moreira

Co-orientação: D.Sc. Angélica da Cunha dos
Santos

MACAÉ/RJ

2018

Incorporação de Resíduo de Cinza da Queima de Madeira na Produção de Tijolos Cerâmicos Ornamentais.

Macaé-RJ, 82 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.

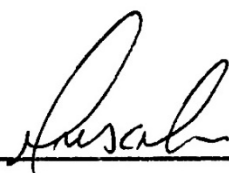
Instituto Federal de Educação, Ciência e tecnologia Fluminense, 2018.

1. Cerâmica
2. Tijolo Ornamental
3. Cinza de Madeira
4. Eucalipto

Dissertação intitulada “Incorporação de Resíduo de Cinza da Queima de Madeira na Produção de Tijolos Cerâmicos Ornamentais”; elaborada por Carolina Tavares Sancho Monteiro 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, Área de Atuação: Gestão ambiental das cidades, Gerenciamento de Resíduos e Efluentes do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense.

Aprovada em 21/05/2018

Banca Examinadora:



Marcos Antonio Cruz Moreira - Orientador

Doutor em Engenharia Elétrica / COPPE-UFRJ

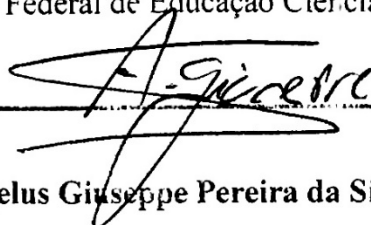
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense - IFF



Angélica da Cunha dos Santos - Coorientadora

Doutora em Engenharia e Ciência dos Materiais (UENF)

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense - IFF



Angelus Giuseppe Pereira da Silva – Examinador Externo

Doutor em Ciências Técnicas (Universidade Técnica de Viena, Austria)

Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF

*Dedico este trabalho à minha família, especialmente à minha mãe
Célia Regina Tavares Sancho Monteiro, por ter me ensinado a importância
da educação na formação do cidadão. Por nunca ter medido esforços e por ter
me apoiado em toda minha vida.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

À minha família e amigos pela colaboração e incentivo. Em especial minha avó Maria Célia Tavares Sancho, meus pais Joserim Monteiro da Silva e Célia Regina Tavares Sancho Monteiro, minha irmã Clarissa Tavares Sancho Monteiro, meu marido Fabiano da Costa Rodrigues e minhas amigas de turma Yasmini Arêas e Mariana Vasconcelos pelas parcerias durante o mestrado.

Ao professor Marcos Antonio Cruz Moreira, meu orientador, pela competência e disposição em auxiliar no que fosse necessário.

À professora Angélica Cunha Santos, pela co-orientação, orientação profissional, amizade e valorosos ensinamentos durante todo o trabalho.

Ao professor José Nilson França de Holanda, da UENF, por ter disponibilizado o laboratório para que trabalhássemos.

Ao Rodolfo Gama, que ofereceu os materiais e amostras utilizadas nesse trabalho.

Ao Instituto Federal Fluminense (IFF), onde cursei o ensino médio, ensino técnico e mestrado, por estar de portas sempre abertas para a minha formação profissional.

*“Sucesso não é o final;
fracasso não é fatal;
a coragem para prosseguir é o que conta.”*
(Winston Churchill)

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

ARTIGO CIENTÍFICO 1

Figura 1 - Fluxograma da usina de reciclagem da fração mineral do RCD de Vinhedo, Estado de São Paulo, Brasil.....	26
Figura 2 - Levantamento de usinas de reciclagem de RCD no país ao longo dos anos.....	27
Figura 3 - Concentração de usinas por estado brasileiro.....	28
Figura 4 - Frequência de realização de ensaios técnicos nos produtos.....	29

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Figura 1 - Fluxograma de execução da pesquisa.....	57
Figura 2 - Difratograma de Raios X de Resíduo de Cinza da Madeira de Eucalipto.....	59
Figura 3- Difratograma de Raios X da massa argilosa.....	61
Figura 4 - Comparação da retração linear dos corpos de prova em três temperaturas.....	63
Figura 5 - Comparação da absorção de água dos corpos de prova em três temperaturas...	64
Figura 6- Curvas de gresificação.....	65
Figura 7- Comparação da porosidade aparente dos corpos de prova em três temperaturas	66
Figura 8 - Comparação da massa específica aparente dos corpos de prova em três temperaturas.....	67
Figura 9 - Comparação da Resistência Mecânica dos corpos de prova em três temperaturas.....	68
Figura 10 - Comparação entre tensão de ruptura à flexão e porosidade aparente.....	69
Figura 11 - Comparação da resistência mecânica dos corpos de prova laboratoriais e comerciais.....	70
Figura 12 – Comparação da absorção de água dos corpos de provas laboratoriais e comerciais.....	71
Figura 13 - Mosaico de corpos de prova confeccionados.....	72
Figura 14 - Corpos de prova rompidos.....	73
Figura 15 - Corpos de prova queimados.....	74

LISTA DE TABELAS

ARTIGO CIENTÍFICO 2

Tabela 1 - Composição química das Matérias-primas.....	60
Tabela 2 - Retração linear na queima (em %) dos corpos de prova.....	62
Tabela 3 - Absorção de água (em %) dos corpos de prova.....	63
Tabela 4 - Porosidade aparente (em %) dos corpos de prova.....	66
Tabela 5 - Massa Específica aparente (em g/cm ³) dos corpos de prova.....	67
Tabela 6 - Tensão de Ruptura à Flexão (MPa) dos corpos de prova.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARTIGO CIENTÍFICO 1

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

AR – Agregado Reciclado

AN – Agregado Natural

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

NBR – Norma Brasileira

ARC – Agregado Reciclado de Concreto

ARM – Agregado Reciclado Misto

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição

a/c – Relação Água/Cimento

f_{ck} – Feature Compression Know – Resistência Característica do Concreto a Compressão

E – Módulo de Elasticidade

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	VIII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	X
1 RESUMO DA DISSERTAÇÃO	11
2 APRESENTAÇÃO ARTIGO CIENTÍFICO 1.....	13
3 OBJETIVOS ARTIGO CIENTÍFICO 1.....	13
4 JUSTIFICATIVA ARTIGO CIENTÍFICO 1.....	14
5 APRESENTAÇÃO ARTIGO CIENTÍFICO 2.....	15
6 OBJETIVOS ARTIGO CIENTÍFICO 2.....	16
7 JUSTIFICATIVA ARTIGO CIENTÍFICO 2.....	16
8 ARTIGO CIENTÍFICO 1.....	17
9 ARTIGO CIENTÍFICO 2.....	41

1 RESUMO DA DISSERTAÇÃO

A crescente produção de resíduos nas mais diversas indústrias tem gerado estudos com o fim de destiná-los corretamente. Nessa destinação, o resíduo pode ser incorporado no ciclo de produção da mesma indústria onde o mesmo foi gerado ou em outros tipos. Além do tipo do “rejeito” a ser incorporado, estuda-se diferentes concentrações, objetivando a incorporação máxima sem afetar propriedades específicas. A indústria da construção civil, por sua versatilidade, proporciona a possibilidade de inserção dos mais diversos tipos de materiais em sua produção, destacando-se como uma área de muitas oportunidades para a reciclagem. Este trabalho estudou duas dessas possibilidades: a utilização de agregados reciclados na produção de concreto e a incorporação de resíduo cinza proveniente da queima da madeira da indústria cerâmica na produção de tijolos ornamentais. Em ambas situações, conclui-se que é possível a substituição do material natural pelo reciclado, desde que respeitadas as concentrações previamente estudadas, a fim de garantir qualidade no produto final.

Palavras-chave: incorporação de resíduos, reciclagem na construção civil, logística reversa.

ABSTRACT

The increasing production of waste in the most diverse industries has generated studies with the purpose of destiny them correctly. In this destination, the residue can be incorporated in the production cycle of the same industry where it was generated or in other types. In addition to the "reject" type to be incorporated, different concentrations are studied, aiming at maximum incorporation without affecting specific properties. The construction industry, because of its versatility, provides the possibility of insertion of the most diverse types of materials in its production, standing out as an area of many opportunities for recycling. This work studied two of these possibilities: the use of recycled aggregates in the production of concrete and the incorporation of gray residue from the burning of the wood of the ceramic industry in the production of ornamental bricks. In both situations, it is concluded that it is possible to substitute the natural material for recycling, provided that the concentrations previously studied are respected, in order to guarantee quality in the final product.

Keywords: incorporation of waste, recycling in construction, reverse logistics.

2 APRESENTAÇÃO DO ARTIGO CIENTÍFICO 1

A crescente quantidade de resíduos de construção civil gerada em cidades do mundo inteiro tem sido uma fonte de preocupação contínua nas questões ambientais, econômicas e sociais. A realização de uma eficiente gestão desse tipo de resíduo é um desafio ao setor administrativo das grandes cidades.

Transformar os resíduos de construção civil em fonte alternativa de matéria prima dentro do próprio setor (logística reversa) apresenta uma gama de oportunidades de acordo com meio científico. Dentre essas, encontra-se a viabilização do emprego de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados em concreto.

A variabilidade apresentada na composição dos agregados é uma das grandes barreiras na sua utilização e as normas que regulamentam tal emprego não são facilmente aplicáveis em usinas de beneficiamento.

Nesse contexto, muitas são as iniciativas do meio científico de estudar, analisar e ensaiar esse tipo de material para concluir a existência de viabilidade para sua utilização. Esse artigo de qualificação teve como finalidade identificar as principais propriedades do agregado reciclado e discernir as que seriam passíveis de uma maior interferência nas características do concreto. Através da revisão de literatura de diversos autores, foram feitas algumas conclusões no que se diz respeito aos melhores métodos para ensaio do material.

3 OBJETIVOS DO ARTIGO CIENTÍFICO 1

a. Geral

Analisar através de uma revisão bibliográfica do estado da arte de agregados reciclados no Brasil, as características e propriedades mais importantes a serem analisadas para formulação de novo concreto.

b. Específicos

- Analisar os tipos de resíduos gerados nas construções brasileiras;
- Discutir a normatização existente para esse tipo de resíduo;
- Descrever os processos de beneficiamento existentes nas usinas privadas e públicas;

- Analisar as propriedades mais importantes ao estudar concretos produzidos através de agregados reciclados, a fim de definir os ensaios necessários para o futuro do projeto.

4 JUSTIFICATIVA DO ARTIGO CIENTÍFICO 1

A utilização de agregados reciclados na construção constitui um grande passo em direção a uma sociedade mais sustentável e ainda cria uma nova oportunidade de mercado para ser explorado. A necessidade de reciclagem para o desenvolvimento sustentável de materiais produzidos a partir dos rejeitos de construções é de grande importância sob a ótica ambiental, pois além de reduzir a utilização de novos materiais, proporciona economia aos construtores. É necessário quebrar os preconceitos e deixar de tratar os resíduos de construção como rejeito, cujo destino ideal seria o aterro, pois os mesmos podem ser reutilizados para diversos meios dentro da construção civil, sendo a construção de blocos de concreto apenas uma das muitas possibilidades.

5 APRESENTAÇÃO DO ARTIGO CIENTÍFICO 2

A empresa A, parceira dessa pesquisa, busca por meio de pequenas modificações tornar o processo produtivo de peças cerâmicas mais sustentável e reduzir os custos de processo. Dentre essas ações situam-se o melhor aproveitamento das jazidas minerais, uso de madeira certificada por empresa de grande porte para a queima, reflorestamento de áreas próximas à empresa com a produção de 200 mil pés de eucalipto, ajustando-se como matriz energética sustentável, evitando o desmate da mata nativa, reduzindo os custos de transporte e diminuindo o custo final do produto. Contudo, dentro do ciclo de produção há a geração de resíduos com grande potencial de utilização (cálcio e potássio) que pode ser transformado em subprodutos do processo e serem incorporados às massas cerâmicas utilizadas.

A madeira de eucalipto é usada nos fornos de queima das indústrias cerâmicas locais para produzir energia na secagem e sinterização dos produtos cerâmicos fabricados. Essa queima gera toneladas de resíduos sólidos na forma de cinzas dependendo da produção média mensal de cada uma delas. A empresa A produz cerca de 25 mil peças por dia. Cada fornada de produtos cerâmicos gera 200 Kg de cinzas, com a produção média de 8 fornadas por mês, gerando um total de 1,6 ton de cinzas. Atualmente, não há na empresa uma disposição adequada das cinzas produzidas nesse processo. Uma parte é estocada em sacos e outra é perdida por disposições irregulares. Os resíduos de cinzas de madeira são excelentes isolantes térmicos e acústicos, podem ser utilizados para corrigir o pH ácido do solo e ser usadas como matéria-prima alternativa no próprio processo produtivo das peças cerâmicas.

Diante das características latentes desse resíduo busca-se incorporar na composição da massa cerâmica diferentes concentrações de cinzas, resultantes da queima da madeira de eucalipto, para confecção de tijolos aparentes, do tipo ornamental. Esses produtos cerâmicos possuem um alto valor agregado no mercado, não requer um controle rigoroso das matérias-primas e das propriedades, atende às demandas arquitetônicas atuais, além de ser um nicho em crescimento no mercado de design. Por sua vez, a análise das propriedades obtidas nas peças cerâmicas ornamentais é menos criteriosa do que seria para fins estruturais, uma vez que não é requerida alta resistência mecânica. Além disso, poderá reduzir algum impacto ambiental e gerar redução de custos no processo produtivo.

O uso de uma logística reversa interna no processo produtivo possibilitaria inicialmente uma disposição mais adequada e eficiente desse resíduo, diminuição da sua geração e simplificação na destinação final. Dessa forma, o resíduo de cinzas da madeira

incorporado na formulação das massas para a confecção de peças cerâmicas voltaria ao ciclo como matéria prima.

6 OBJETIVOS DO ARTIGO CIENTÍFICO 2

a. Geral

Analisar o efeito da incorporação de diferentes concentrações de resíduos de cinzas resultantes da queima de madeira de eucalipto na composição da massa cerâmica argilosa para a produção de tijolos aparentes para uso ornamental de revestimento interno e externo.

b. Específicos

- Caracterizar quimicamente e fisicamente o resíduo de cinza de madeira e a massa argilosa utilizada na produção dos corpos cerâmicos;
- Formular e processar massas cerâmicas com diferentes teores de cinzas (0, 5 e 10%);
- Avaliar as propriedades físicas e mecânicas dos corpos cerâmicos sinterizados;
- Analisar a classe dos produtos obtidos de acordo com as normas brasileiras vigentes;
- Comparar a resistência mecânica à flexão e absorção de água dos corpos de prova obtidos com dois produtos comerciais (Tijolos aparentes ornamentais de duas empresas cerâmicas consolidadas no mercado).

7 JUSTIFICATIVA

A pesquisa sobre a incorporação de resíduo cinza de madeira nas propriedades físicas e mecânicas de produtos cerâmicos pode se tornar uma alternativa tecnológica, de interesse científico porque visa reduzir o impacto ambiental causado pela ausência de disposição adequada do resíduo, a preservação do meio ambiente através da redução na geração de resíduos sólidos e redução de custos da indústria cerâmica local.

8 ARTIGO CIENTÍFICO 1

LOGÍSTICA REVERSA NA CONSTRUÇÃO CIVIL: A INFLUÊNCIA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NAS PROPRIEDADES DO CONCRETO

REVERSAL LOGISTICS IN CIVIL CONSTRUCTION: NA INFLUENCE OF RECYCLED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND DEMOLITION RESIDUES IN THE PROPERTIES OF CONCRETE

C. T. S. Monteiro^{1*}; M. A. C. Moreira^{1*}; A. C. Santos^{2*}

1 Instituto Federal Fluminense – IFF - campus Macaé

Rodovia Amaral Peixoto, km 164, Imboassica, Macaé, Brasil

2 Instituto Federal Fluminense – IFF - campus Campos Centro

Centro Rua Dr. Siqueira, 273 - Parque Dom Bosco, Campos dos Goytacazes, Brasil

RESUMO

A reciclagem dos resíduos de construção e demolição tem sido uma solução adotada no gerenciamento dos mesmos, sendo em sua grande maioria voltada para a produção de agregados reciclados. A geração desses resíduos no Brasil ocorre em quantidade tão significativa que se torna necessário escoá-los adequadamente para minimizar os impactos ambientais e econômicos das deposições ilegais na malha urbana e evitar o esgotamento de aterros. A reciclagem desses resíduos é de grande importância visto seu impacto ambiental, e se faz necessária para proporcionar um desenvolvimento sustentável. Com a normatização ambiental, desde 2002, não se pode descartar esses resíduos de forma indiscriminada, deve-se dar aos mesmos uma destinação final previamente avaliada e sempre que possível, buscar sua reutilização. Os resíduos advindos de construção e demolição representam estoques de materiais que apresentam uma grande variedade de oportunidades, desde tijolos até novo concreto ou argamassa. Este trabalho tem como objetivo, através de uma revisão de literatura, verificar a influência da substituição dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos oriundos da reciclagem de resíduos “cinzas”, formados por argamassa e concreto na fabricação de concreto.

Palavras-chave: resíduos de construção e demolição, reciclagem na construção civil, logística reversa na construção civil.

**REVERSAL LOGISTICS IN CIVIL CONSTRUCTION: NA INFLUENCE OF
RECYCLED AGGREGATES FROM CONSTRUCTION AND
DEMOLITION RESIDUES IN THE PROPERTIES OF CONCRETE**

C. T. S. Monteiro^{1*}; M. A. C. Moreira^{1*}; A. C. Santos^{2*}

1 Instituto Federal Fluminense – IFF - campus Macaé

Rodovia Amaral Peixoto, km 164, Imboassica, Macaé, Brasil

2 Instituto Federal Fluminense – IFF - campus Campos Centro

Centro Rua Dr. Siqueira, 273 - Parque Dom Bosco, Campos dos Goytacazes, Brasil

ABSTRACT

The recycling of construction and demolition waste has been a solution adopted for his management, usually incorporated in the production of recycled aggregates. The generation of this waste in Brazil is so big that it is necessary disposing it correctly in order to minimize the environmental and economic impacts of the illegal depositions in the city and to avoid the exhaustion of landfills. Recycling these wastes is quite important because of their environmental impact, and it is also necessary to provide sustainable development. With the recent environmental standards, since 2002, it isn't possible anymore to scrap these wastes in anywhere, they must be given a final destination previously evaluated and whenever possible, looking for reuse. Waste from construction and demolition represents material disposal that present a wide range of opportunities that goes from bricks to new concrete or mortar. This study intend to provide a holistic view of the influence of the replacement of natural aggregates by recycled coarse aggregates in concrete properties.

Keywords: construction and demolition waste, recycling in construction, reverse logistics in construction.

1. INTRODUÇÃO

Uma nova abordagem para a reciclagem é o conceito de *urban mining*. O termo denota a reutilização de materiais de áreas urbanas. Isso é baseado no fato de que grandes estoques de materiais são incorporados nas cidades, particularmente em prédios e infraestruturas, mas também em áreas de aterro. Esses estoques representam um grande potencial de recurso que podem se tornar disponíveis para reuso. (BRUNER, 2011)

A extração e processamento dos materiais durante a mineração urbana é fortemente baseado na viabilidade econômica. Entretanto, em algumas atuais estratégias de reciclagem de materiais, questões políticas e sociais podem conduzir a práticas de logística reversa. (COSSU *et al.*, 2015). Oportunidades oferecidas para a recuperação de materiais de diferentes fluxos de resíduos são discutidos por vários autores. Os resíduos advindos de construção e demolição representam estoques que apresentam uma grande variedade de oportunidades (novo concreto, agregados reciclados, tijolos de argila, cerâmica, dentre outros).

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são produzidos ao longo da vida útil de um projeto, envolvendo construção, uso/manutenção e demolição. Durante o estágio de uso/manutenção, resíduos são raramente gerados, a não ser que sejam feitas reformas (Su *et al.*, 2012). A geração de RCD ocorre em quantidade tão significativa no Brasil que se torna necessário escoá-los adequadamente para minimizar os impactos ambientais e econômicos das deposições ilegais da malha urbana e evitar o esgotamento de aterros.

Estima-se que metade do material gerado pelo setor da construção civil seja depositada irregularmente em meio urbano, ocasionando gastos na ordem de milhões para as prefeituras municipais darem destino adequado a esses RCD (GUSMÃO, 2008). A forma de gerenciamento aplicada no Brasil e no exterior pelo poder público é a limpeza repetitiva de áreas de deposição ilegal dentro da malha urbana e posterior destinação a aterros municipais (PINTO, 1999; SCHNEIDER, 2003). Alguns efeitos são esperados desta deposição irregular: proliferação de insetos e roedores, assoreamento de córregos, entupimento de galerias, contaminação de águas subterrâneas, dentre outros.

A busca por soluções que impliquem o aumento da produtividade e diminuição do desperdício na construção civil é de extrema importância no atual contexto de desenvolvimento urbano. A quantidade de RCD gerada em um município brasileiro pode variar de 54% a 70% do total dos resíduos sólidos urbanos (BUTTLER, 2007). No Brasil,

a geração de RCD per capita foi estimada em 500 kg/hab.ano, média para algumas cidades brasileiras (PINTO, 1999).

No Brasil, o gerenciamento desses resíduos está previsto na resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) nº 307 do ano de 2002, direcionando ao município a definição de uma política municipal para RCD, priorizando a reciclagem da geração de origem mineral, que representa 90% da massa desse resíduo.

Normalmente, a reciclagem da fração mineral de RCD gera agregados para pavimentação e material de enchimento para aterros. O emprego na fabricação de produtos à base de cimento é menor. Tanto no Brasil como em outros países, a maior parte do mercado de agregados é voltada para o emprego em concretos e em argamassas. No Brasil, a reciclagem de toda fração mineral de RCD ocuparia apenas cerca de 20% do mercado de produtos à base de cimento (ÂNGULO, 2006).

A massificação da incorporação de agregados reciclados (ARs) diminuiria os impactos ambientais da indústria de concreto, por exemplo devido à redução das deposições de aterros, menor extração de pedreiras e distâncias de transporte reduzidas, além disso, o emprego desses agregados é importante para ampliar mercado e gerar produtos de maior valor, contribuindo para o aumento dos índices de reciclagem.

A produção mundial de agregados naturais (ANs) no ano de 2015 foi de 48.3 bilhões de toneladas (Freedonia, 2012). As pesquisas na área de utilização dos AR têm aumentado e atualmente os estudos não estão focados apenas nas propriedades do concreto, mas também na avaliação de durabilidade e comportamento reológico em estruturas de concreto.

Segundo Pinto (1999), algumas cidades brasileiras como São Paulo, Ribeirão Preto, Salvador, Belo Horizonte e São José do Rio preto fazem a reciclagem dos agregados e ainda que se considere o custo de todos os componentes necessários no processo - instalação de usina de reciclagem, manutenção, água, luz, mão de obra, juros, dentre outros - o custo do AR é menor que o natural.

Em contrapartida, as normas que regulamentam a incorporação dos AR ainda são muito conservadoras pois foram criadas com dados de experimentos antigos, feitos quando o conhecimento das propriedades dos ARs ainda não tinha sido desenvolvido como atualmente, e os procedimentos atuais como compensação de água durante a mixagem não era comum. As limitações que as normas impõem são muito restritivas e não refletem o conhecimento atual. Além disso, os agentes construtores são cautelosos quando na utilização desse material, uma vez que os ARs normalmente são vistos com uma alta dispersão de propriedades e comportamentos previsíveis.

Sendo assim, o objetivo dessa pesquisa é, através de uma revisão bibliográfica, verificar a influência da substituição dos ANs por reciclados nas propriedades do concreto (estado fresco e endurecido), afim de definir as características que exerçam maior influência no comportamento mecânico do mesmo.

2. RESÍDUOS NA CONSTRUÇÃO CIVIL

São necessários procedimentos sistematizados para a produção de AR e sua utilização na construção civil. Existem características físicas e químicas comuns aos diferentes tipos de ARs aplicáveis em argamassas e concreto e a partir da identificação de algumas dessas características, e da fixação de valores e limites para cada uma delas, é possível garantir a qualidade nas aplicações (LIMA *et al.*, 1999).

2.1 Composição e Caracterização dos Agregados Reciclados

Para a caracterização dos ARs, alguns métodos podem ser utilizados, tais como a análise granulométrica, a análise química, a análise mineralógica, a análise termogravimétrica, a separação por densidade empregando líquidos densos e a determinação da massa específica aparente e da absorção de água dos agregados (ANGULO, 2005). Dentre essas propriedades, as que mais apresentam influência na resistência do concreto são a massa específica e a absorção de água.

No Brasil, a tecnologia construtiva normalmente aplicada (concreto armado) favorece o desperdício na execução das novas edificações quando comparadas com as empregadas em países mais desenvolvidos (estruturas metálicas) em função dos processos de racionalização e de modulação na construção lá empregados e da maior industrialização desse setor nesses países. Como resultado disso, enquanto em países desenvolvidos a média de geração de resíduos provenientes de novas edificações encontra-se abaixo de 100kg/m², no Brasil este índice gira em torno de 300 kg/m² edificado (IBAM, 2001).

Segundo Cabral (2007), várias são as fontes geradoras dos resíduos na construção civil, podendo-se destacar:

- Perdas no processo construtivo por deficiência de tecnologia utilizada, baixa qualidade de mão de obra, nível de detalhamento nos projetos, má qualidade dos produtos empregados, falta de gestão na obra, dentre outros fatores, são perdas que geram desperdício de material, que geram entulho;
- Crescimento populacional desenfreado e demanda por novas moradias;
- Demolição de edificações com vida útil exaurida.

No Brasil, estima-se que em média 65% do material descartado é de origem mineral, 13% madeira, 8% plásticos e 14% de outros materiais. As construtoras são responsáveis pela geração de 20 a 25% desse entulho, sendo que o restante provém de reformas e de obras de autoconstrução, conforme Techne (2001) citado por Vieira (2003).

A composição dos resíduos de construção e demolição é variável. Essa variabilidade é em função da região, da época, do tipo de edificação a ser construído, da empresa e do método construtivo aplicado, dentre outros fatores. Se o resíduo for de construção, a composição depende do estágio da obra, gerando mais concreto na fase de confecção da estrutura e cerâmica nas fases de acabamento. Essa variabilidade influencia na característica dos agregados reciclados produzidos.

As deposições ilegais de RCD normalmente ocorrem em função de custo com transportes. Embora existam leis que proíbam tal atividade, a mesma só se torna mais efetiva quando também é mais interessante economicamente. Para isso, é necessária inserção de pontos de coleta estrategicamente posicionados dentro da malha urbana, para minimização de custos com transporte (PINTO, 1999 apud ÂNGULO, 2005).

Para Terry (2004) citado por CABRAL (2007), a legislação é o maior fator que afeta o gerenciamento de resíduos na indústria da construção civil. Sem uma legislação efetiva em vigor e principalmente uma forte fiscalização, não é possível alcançar o sucesso no gerenciamento de resíduos.

“Nenhuma sociedade poderá atingir o desenvolvimento sustentável sem que a construção civil, que lhe dá suporte, passe por profundas transformações” (JOHN, 2001)

Se faz necessário que novas práticas de gestão e gerenciamento dos resíduos sejam adotadas. Um exemplo foi adotado na cidade de San Jose, Estados Unidos, onde os construtores, para receberem o alvará de construção, eram obrigados a fazer um depósito em dinheiro, sendo o valor calculado em função da área a ser construída ou reformada.

Tal quantia era somente devolvida após demonstração pelo construtor do quanto de RCD foi evitado que fosse depositado em aterro (BROVIAK, 2005 apud CABRAL, 2007).

Um grande fator facilitador da reciclagem dos RCD é a prática de segregação na fonte. Se a mesma não é aplicada, pode impossibilitar a reciclagem por motivos de contaminação *in situ*, no transporte ou no destino final. Na Europa, o RCD reciclável não pode ser depositado em aterros sanitários (WILSON, 1996 apud ÂNGULO, 2005; HENDRIKS, 2000) ou, quando a legislação permite que isso aconteça, a operação envolve altas taxas (HOBBS; HURLEY, 2001 apud ÂNGULO 2005).

Deve-se gerenciar adequadamente o RCD com o objetivo de minimizar seus impactos ambientais e econômicos nas cidades. Para Ângulo (2005), algumas ações são essenciais para a efetividade da reciclagem, são elas:

- Evitar as deposições irregulares por meio de regulamentação, mas também diminuição de custos de transportes, possibilitando aos geradores pontos localizados estrategicamente na cidade onde os mesmos possam depositar os resíduos;
- Triagem dos resíduos na origem, afim de aumentar a reciclabilidade;
- Estimular a reciclagem por meio de especificações, decretos e normas técnicas que encorajem a utilização em mercados competitivos.

2.2 Abordagem Normativa e Legislativa

Muitos países investem em um sistema formal de gerenciamento de resíduos de construção e demolição, e quase todas as políticas incluem a reciclagem dos mesmos. No Brasil, geralmente o sistema é composto por companhia para transporte, pontos de coleta para pequenos e grandes geradores e aterros, incluindo ou não as usinas de beneficiamento do resíduo (PINTO, 1999).

Em 2002, foi homologada a resolução CONAMA 307, obrigando os grandes geradores públicos e privados a desenvolverem e implantar um plano de gestão de RCD, com isso, a reciclagem ganhou uma força extra.

Segundo a Resolução 307 do CONAMA (2002), os resíduos de construção civil são:

“Os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliças ou metralha (CONAMA, 2002).”

Além de estabelecer diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, essa resolução faz uma série de definições dos termos técnicos e sinaliza que geradores devem ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos, e, secundariamente, a redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (CONAMA, 2002).

É feita uma classificação dos resíduos da construção civil em quatro classes: classe A os reutilizáveis como agregados; classe B os resíduos recicláveis para outra destinação que não sejam na própria obra; classe C são os resíduos onde a reciclagem não é economicamente viável ou não existe tecnologia para o processo e classe D são resíduos perigosos tais como tintas e óleos.

Após esse primeiro movimento de homologação da resolução, iniciaram-se nas grandes cidades a implantação dos planos em canteiros, e com o apoio da área acadêmica, normas técnicas foram elaborados e publicadas. Em 2004 foram publicadas cinco normas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT):

- NBR 15112: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros: Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15115: Agregados de resíduos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação: Procedimentos;
- NBR 15116: Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: Requisitos.

A norma NBR 15116:2004 classifica os agregados em dois tipos: agregado reciclado de concreto (ARC) cujo teor de fragmentos à base de cimento e rochas é maior que 90% e agregado reciclado misto (ARM) quando esse teor é menor que 90%. Essa classificação é feita visualmente, separando os materiais cerâmicos dos cinzas.

A dificuldade para qualquer aplicação está no controle da variabilidade das características físicas ou na presença de impurezas ou contaminantes (MIRANDA *et al.*, 2009). Por isso, tanto no Brasil quanto no exterior, o uso do RCD reciclado como agregado em atividades de pavimentação ganhou popularidade, uma vez que as exigências de qualidade como produto são menores do que quando utilizadas em concreto (HENDRIKS, 2000).

2.3 Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição

Economicamente, a reciclagem de RCD será atrativa quando os produtos reciclados tiverem custo e qualidade menores ou comparáveis aos naturais. Sendo assim, os materiais reciclados serão mais competitivos em regiões onde houver escassez de materiais naturais e áreas para aterros (TAM e TAM, 2006).

Muitos autores apontam esse fato quando se discute a evolução da reciclagem de RCD num panorama mundial. Alguns países europeus e o Japão, por exemplo, possuem políticas mais elaboradas e consolidadas, podendo ser justificado em razão da carência de espaço físico para criação de aterros e densidade demográfica.

Na Bélgica, os resíduos são transformados em agregados reciclados e reutilizados nos serviços de pavimentação, com uma economia de até 45% nos custos dos projetos, sendo que 70% dessa economia está relacionado a diminuição dos custos de transportes, 20% da aquisição do material de menor valor e 10% do não pagamento das taxas para despejo de resíduos em aterros (HANSEN, 1992 apud CABRAL, 2007).

A prática da construção civil no Brasil se baseia em uma cultura imediatista, onde grande parte dos construtores priorizam completar a construção no menor tempo possível a diminuir a velocidade da obra para possibilitar a reciclagem e segregação de materiais. Na maioria dos canteiros de obras, todos os funcionários trabalham para finalizar o mais rápido possível, e não para completar o serviço entregando as fases com sucesso. Em alguns deles, os funcionários são bonificados ao finalizarem o trabalho em um tempo mais curto que o previsto.

No Reino Unido, o balanço financeiro aponta que o custo para transformação dos resíduos em agregados reciclados está se tornando mais barato que o custo da deposição

desses resíduos e compra de novos agregados. Isso se deve ao aumento de taxas para deposição dos resíduos em aterros e à introdução de impostos sobre os agregados (DHIR *et al.*, 2004).

Segundo Ângulo *et al.* (2003), a reciclagem de RCD é, de forma simplificada, um beneficiamento mineral. Na usina, não existe alteração da estrutura interna do mineral como reações químicas, metalúrgicas ou cerâmicas. Dentre as operações, usualmente a britagem é empregada na reciclagem de RCD. Ela pode ser repetida diversas vezes e reduz a partícula por meio de ação mecânica externa como força de impacto (britagem por impacto) ou força de compressão (britagem por mandíbula). Normalmente é um processo realizado a seco e é dificultado pela heterogeneidade e anisotropia dos resíduos (CHAVES, 1996 apud ÂNGULO, 2005).

Atualmente existem na Europa usinas com um único estágio para diminuição de partículas, mas no Brasil é mais usual esse processo feito em dois estágios, com mandíbula e impacto ou vice-versa (HENDRIKS, 2000).

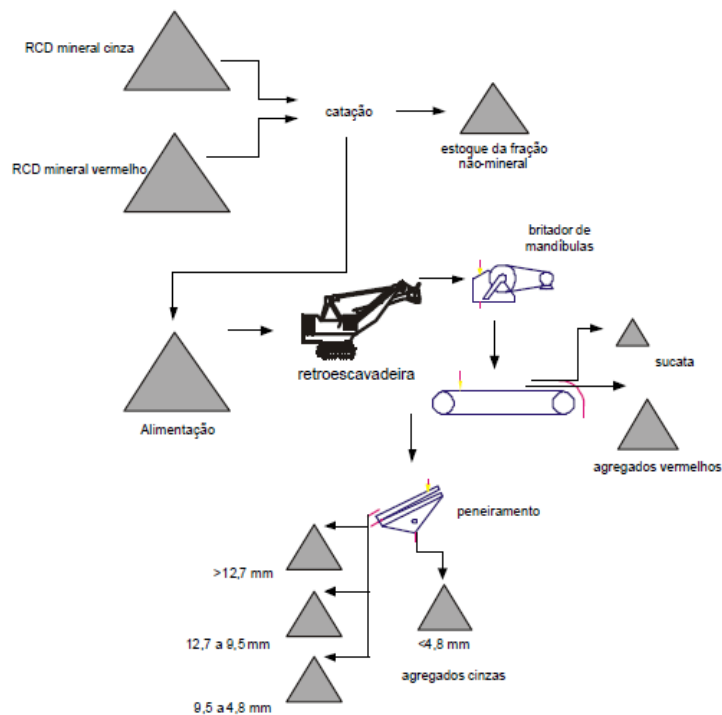


Figura 1 - Fluxograma da usina de reciclagem da fração mineral do RCD de Vinhedo, Estado de São Paulo, Brasil. Fonte – Ângulo (2005)

A maioria das usinas de reciclagem classificam a fração mineral do RCD por cores: cinza (cimento predominante) e vermelho (cerâmica vermelha predominante). Segundo Miranda *et al.* (2009), as primeiras usinas de reciclagem instaladas no Brasil foram pela prefeitura de São Paulo, SP (1991), de Londrina, PR (1993), e de Belo Horizonte, MG (1994). No ano de 1999, Pinto (1999) confirmou a relevância do tema, pontuando que o RCD pode corresponder a mais de 50% da massa dos resíduos sólidos municipais, trazendo um novo olhar à abordagem. Após o ano de 2002, com a resolução CONAMA 307, houve um crescimento no número de usinas.

Em 2009, existiam cerca de 48 usinas instaladas no país, sendo que metade eram públicas. Nesse mesmo ano, a reciclagem de RCD era estimada em 4,8% e havia uma previsão de crescimento no mercado de usinas móveis (MIRANDA *et al.*, 2009).

A política Nacional de Resíduos Sólidos nº 12305 de agosto de 2010 e a última regulamentação por meio do decreto nº 7404 de dezembro de 2010, um novo marco no setor de resíduos de construção foi promovido, dando força à gestão e reciclagem de RCD (ABRECON, 2015).

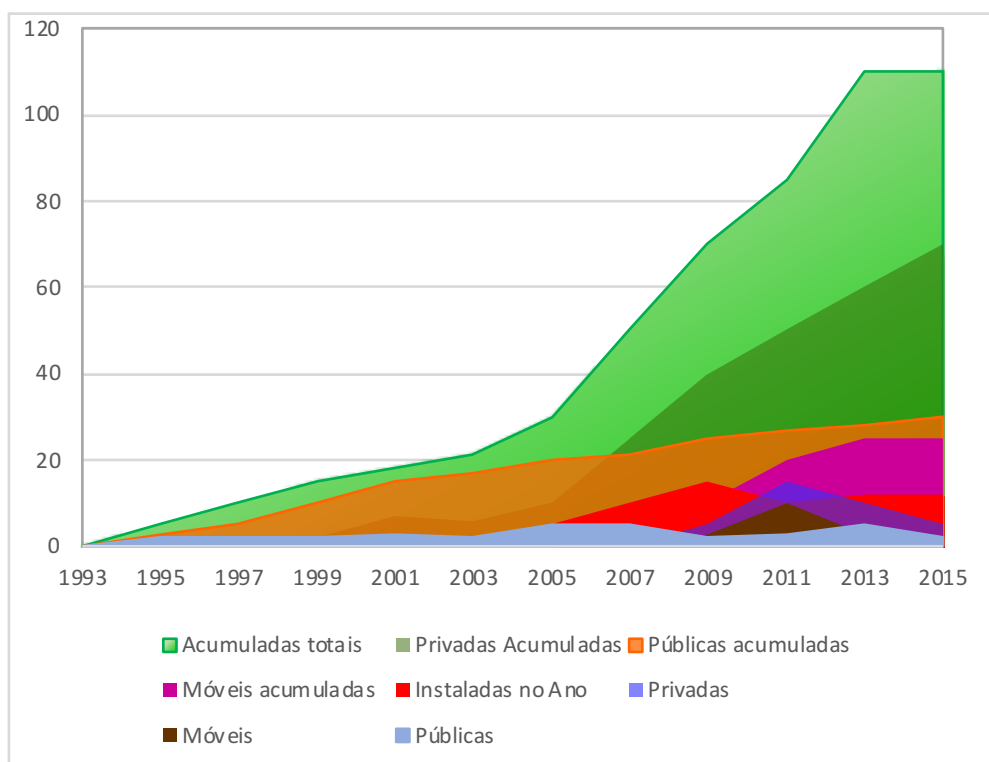


Figura 2 - Levantamento de usinas de reciclagem de RCD no país ao longo dos anos.
Fonte – Adaptado de ABRECON (2015)

Segundo os dados levantados pela ABRECON (2015) conforme mostrado na Figura 2, até 2002 havia um índice de crescimento de 3 novas usinas por ano, totalizando 16 usinas instaladas no país ao final deste ano. Após a resolução CONAMA 307, essa taxa chegou a 9 usinas por ano até o ano de 207. De 2008 a 2013 observou-se um aumento de até 10,6 usinas por ano, mas de 2013 a 2015 observou-se uma estabilidade nessa quantidade de usinas.

Apesar da quantidade de usinas ter aumentado significativamente após a resolução CONAMA 307 (2002), a capacidade brasileira potencial de produção de agregados reciclados está muito abaixo da geração de RCD em todo o país (MIRANDA *et al.*, 2009).

É importante pontuar que esse panorama nacional demonstrado na Figura 3, é apresentado para 105 usinas que responderam ao questionário, mas sabe-se que a quantidade nacional de usinas é de pelo menos 310 e que, inclusive, existem usinas na região Norte, apesar de não listadas.

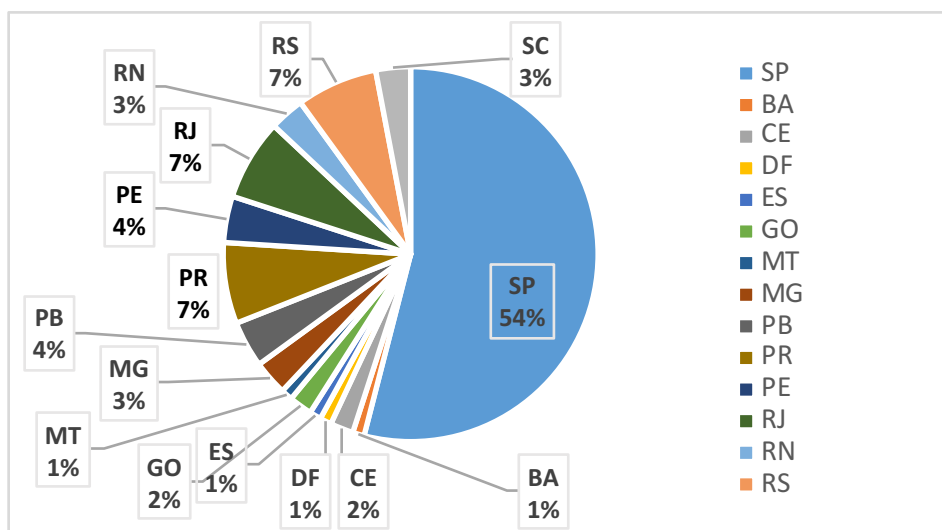


Figura 3 - Concentração de usinas por estado brasileiro. Fonte – Adaptado de ABRECON (2015)

Segundo os dados de Miranda *et al.* (2009), até 2002 a maior parte das usinas era do setor público, porém, após esse ano esse quadro mudou. Em 2008 cerca de metade das usinas pertenciam à iniciativa privada. Com base nas 105 usinas que responderam à pesquisa, 83% pertenciam à iniciativa privada, 10% à gestão pública e 7% público-privada.

De acordo com o mesmo autor, o aumento de usinas privadas decorre da perspectiva dos empresários de essa ser uma boa alternativa de investimento, com baixo capital inicial e alta taxa de retorno.

A maior parte das usinas está concentrada nas cidades de maior porte, entretanto, a presença de 12% das usinas em cidades com menos de 100 mil habitantes indica que o negócio pode ser viável mesmo em cidades de pequeno porte (ABRECON, 2015).

As usinas fixas ainda são maioria no país (74%), mas pode-se afirmar que houve um crescimento na quantidade de usinas móveis. Quanto aos processos de reciclagem, a maior parte das usinas são semelhantes, compostas por retroescavadeira, alimentador vibratório, transportadores de correia, britador de mandíbula ou impacto, separador magnético permanente ou eletroímã e peneira vibratória.

Conforme demonstrado na Figura 4, infelizmente ainda não faz parte do cotidiano da maior parte das usinas a realização de ensaios de controle tecnológico, mas as que vêm realizando tem como motivos: preocupação com qualidade, exigência do consumidor e interesse de divulgar as propriedades dos agregados produzidos.

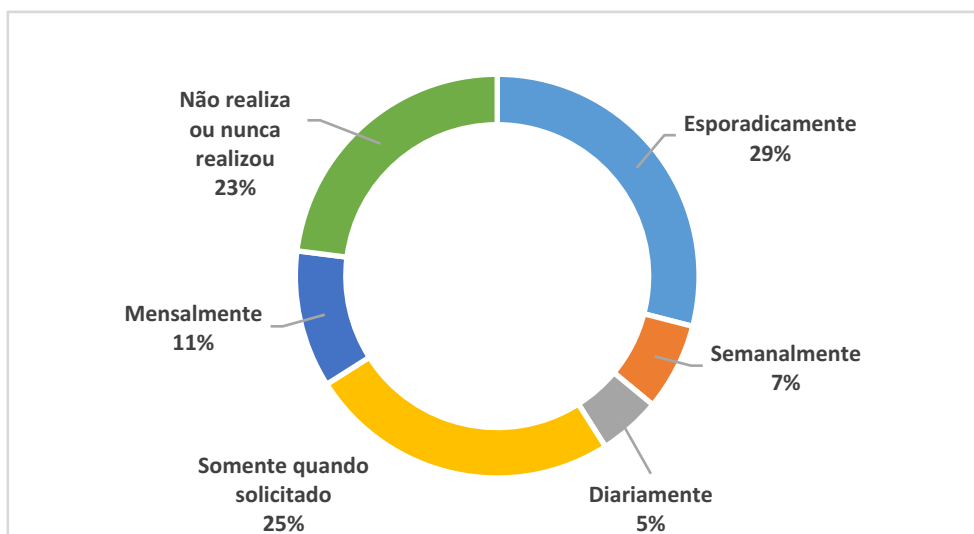


Figura 4 - Frequência de realização de ensaios técnicos nos produtos. Fonte: Adaptado de ABRECON (2015)

3. CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS

Dentre as características mais importantes a serem analisadas para utilização do AR em concretos estão a granulometria, absorção de água, a forma e a textura, a resistência à compressão e módulo de elasticidade (MEHTA *et al.*, 1994)

Os RCD são heterogêneos e apresentam características que dependem muito dos tipos de materiais que chegam às centrais de processamento, os processos construtivos, por exemplo, podem interferir na qualidade do material gerado. Por esse motivo, é de extrema importância o estudo do comportamento do AR em diferentes regiões (RODRIGUES *et al.*, 2014).

3.1 Composição Granulométrica

A granulometria exerce influência sobre a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, e os ARs tendem a ser um pouco mais grossos que os ANs, resultando em um maior módulo de finura (LEITE, 2001). Essas características estão relacionadas ao material e ao tipo de britador utilizado no beneficiamento.

A forma e as propriedades da superfície dos agregados reciclados exercem influência sobre a curva tensão-deformação e sobre o módulo de deformação dos concretos com ele gerados (XIAO, 2005 apud CABRAL, 2007).

Segundo Shulz *et al.* (1992) citado por Cabral (2007), a granulometria desejável para os agregados reciclados a serem utilizados na produção de concretos só pode ser alcançada através de sucessivas britagens do resíduo. Com relação à forma das partículas, a desejável somente pode ser alcançada através de uma britagem primária seguida de uma secundária. Porém, sob o ponto de vista econômico, uma única britagem é o melhor processo.

3.2 Massa Específica

Alguns resultados encontrados na literatura mostram que a separação por densidade é uma técnica eficiente para separar os agregados reciclados em subgrupos de diferentes porosidades, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similar. Esses resultados indicam uma densidade mínima em torno de 2,2 a 2,3 kg/dm³. A partir desse limite, os agregados reciclados possuem teores elevados de rochas e teores baixos de cerâmica vermelha, resultando em concretos com comportamento mecânico semelhante ao dos concretos com agregados naturais (ANGULO, 2005).

Segundo Hansen (1992) citado por Cabral (2007), os valores de massa específica do agregado reciclado de concreto variam entre 2,12kg/dm³ a 2,70 kg/dm³. O autor conclui que esses valores são mais baixos quando comparados aos agregados naturais e atribui essa característica à presença da argamassa aderida às partículas do AR.

A revisão de literatura mostrou resultados muito variáveis, reforçando o fato de que deve haver muito cuidado durante a execução dos ensaios de caracterização de novos materiais, sempre acompanhados por normas regulamentadoras.

3.3 Absorção de Água

Comparado aos agregados naturais, onde a absorção de água é praticamente nula, os AR possuem absorções de água bem maiores. Esse aumento é atribuído à argamassa aderida aos AN do concreto que foi reciclado, uma vez que uma é bem mais porosa que a outra (Cabral, 2007 apud Hansen, 1986).

Segundo Schulz et al. (1992), em até 30 minutos de submersão em água, os AR absorvem 76% de toda a água que absorveriam em 24 horas, enquanto que para 4 horas de submersão, esse valor sobe para 94%.

Assim como acontece na maioria das outras propriedades dos AR, não existe consenso sobre as diferenças e valores das taxas de absorção dos AR miúdos e graúdos. A variabilidade da composição e porosidade do RCD e a forma de beneficiamento dos mesmos são os prováveis motivadores. O fato é que os AR possuem absorções mais elevadas que os AN, e isso deve ser levado em consideração na confecção de concretos.

4. CONCRETO FABRICADO COM AGREGADO RECICLADO

Estudos recentes foram desenvolvidos buscando analisar a influência dos agregados reciclados nas propriedades mecânicas do concreto e sua aplicação em elementos com função estrutural (AREZOUMANDI *et al.*, 2015 apud ARAÚJO, 2016; PACHECO *et al.*, 2015). Esses trabalhos mostram a possibilidade de substituição de 50% a 100% dos agregados naturais pelos agregados reciclados sem prejuízo das propriedades mecânicas do concreto. Para isso, o fator mais importante é o emprego de agregados reciclados de alta qualidade e oriundos de resíduos cinzas.

4.1 Trabalhabilidade e Relação água/cimento

Concretos produzidos com agregados reciclados de RCD apresentam perda de trabalhabilidade e aumento do consumo de cimento, o que provavelmente ocorre devido à alta absorção de água desse material, tornando a mistura mais seca e, conseqüentemente, menos trabalhável (ÂNGULO, 2005; ZORDAN, 1997).

Estudos apontam que é viável a utilização de agregado reciclado de RCD para a produção de concretos (LEITE, 2001). Contudo, a relação água/cimento (a/c) deve ser levada em consideração, já que é um dos principais fatores que afetam a resistência à compressão dos agregados reciclados (CABRAL, 2010).

Uma vez que o agregado reciclado possui uma absorção de água maior que o agregado natural, os concretos confeccionados com agregado reciclado tem que levar isso em consideração. De Brito *et al.* (2016) utilizou um método de compensação de água que fixava o *slump* (ensaio de abatimento do concreto) em 120 ± 10 mm como referência, com o objetivo de manter a trabalhabilidade. Se necessário, a relação a/c era modificada para atender esse critério. A relação a/c foi calculada com o teor de umidade e a absorção de água do agregado reciclado.

Quando comparados em uma faixa de resistência com os agregados convencionais, os concretos com agregados reciclados normalmente necessitam de uma menor relação a/c para atingir resistências semelhantes à dos convencionais, o que gera uma maior durabilidade aos concretos. (CABRAL, 2007)

Na pesquisa de Carrijo (2005), o emprego de agregados reciclados na faixa de densidade de 2,2 a 2,5 kg/dm³, em comparação ao concreto com agregados naturais, não resultou em aumento significativo em consumo de cimento em concretos com resistências semelhantes. Com menores densidade, as relações consumo/resistência foram altas, tornando os concretos menos vantajosos economicamente.

Ângulo (2005) em seu estudo, concluiu que as medidas de absorção de água e de porosidade do concreto estavam realmente relacionadas à porosidade teórica anteriormente prevista por uma simplificação do modelo de Powers, na qual a retração química, retração por secagem e o ar aprisionado dos concretos foram desprezados. Essas características foram mais influenciadas pela porosidade (relacionada a massa específica aparente) do que pela relação a/c.

A separação por densidade foi uma técnica que reduziu a heterogeneidade da composição de fases do agregado. Constatou-se que a mesma foi eficiente para separar os agregados de acordo com as porosidades, gerando concretos com comportamento mecânico e absorção de água similares.

4.2 Resistência à compressão

Os concretos fabricados com agregado reciclado apresentaram apenas pequena redução na resistência à compressão quando comparados ao concreto de referência. O concreto com 50% de substituição não sofreu grande influência, mas os com 100% apresentaram pequenas quedas de valores de f_{ck} (Feature Compression Know – Resistência Característica do Concreto a Compressão), mas não reduzindo mais que 2%. Houve queda do módulo de elasticidade com o incremento de agregado reciclado na mistura. Aos 91 dias ficou em torno de 5% de redução no concreto de 50% de substituição e 15% de redução para os concretos com 100%. Atribuiu-se esse resultado à diminuição de massa específica do agregado (RODRIGUES *et al.*, 2014) e ÂNGULO (2005).

Segundo Xiao *et al.* (2005), a forma da curva tensão-deformação para concretos produzidos com agregados reciclados é bastante similar à de concretos convencionais, o que leva a conclusão que as estruturas possam ser dimensionadas de acordo com a teoria da plasticidade.

O artigo de Brito *et al.* (2016) foi o primeiro experimento feito de grande escala de agregados reciclados em estruturas de concreto, o mesmo utilizou agregado reciclado obtido de estruturas pré-moldadas para molde de novas estruturas. Alguns testes realizados foram também o primeiro a serem feitos em estruturas feitas com agregado reciclado.

O estudo deste autor foi feito como crítica às normas “super cautelosas” criadas antes dos conhecimentos em concreto feito com agregado reciclado serem desenvolvidos. O mesmo utilizou procedimentos feitos por construtores, afim de avaliar a diferença entre os resultados em ambiente de laboratório e real ambiente de construção.

Após realizados os *slump* testes e definidas as relações a/c , concluiu-se que as misturas que não utilizaram superplastificante tinham o mesmo teor de água. Isso já era esperado, uma vez que os índices de formas de agregados naturais e agregados reciclados são semelhantes, daí a perda de capacidade de trabalho seria principalmente causada pela maior absorção de água do agregado reciclado.

As resistências à compressão não foram significativamente afetadas pela incorporação do agregado reciclado, provavelmente pela alta qualidade do agregado utilizado. Em contrapartida, o módulo de elasticidade foi fortemente afetado por essa incorporação. Entretanto, devido a origem (concreto de alta qualidade, com uma matriz de cimento robusta) do agregado reciclado de concreto, a argamassa era de maior qualidade que a maioria das argamassas existentes nos RAs. Portanto, a redução do módulo de elasticidade no estudo de Brito *et al.* (2016) foi menor do que na maior parte

dos outros (10% onde a maioria encontra 30%), porque, por razões físicas, essa redução é proporcional ao grau de conteúdo de argamassa.

A aplicação de AR em concretos estruturais requer um controle no momento de dosagem e estudos aprofundados em relação à durabilidade desse material. Nesse sentido, devem ser consideradas outras propriedades que não foram avaliadas no estudo de Ângulo (2005), como retração, fluência, permeabilidade e durabilidade de concretos produzidos com RCC.

A norma brasileira é mais conservadora e só recomenda o emprego dos agregados reciclados em concretos com resistência mecânica de até 15 MPa. As normas holandesas e alemãs admitem o uso em concretos com resistência acima de 25 Mpa.

Ângulo (2005) concluiu que as classificações do RCD mineral como resíduos de concreto, alvenaria ou mistos, não garantem agregados reciclados com composição e propriedades físicas constantes, o que dificulta sua inserção no mercado de agregados. O autor pontuou que a catação manual pode resultar em agregados graúdos de RCD reciclados com teores de materiais não-minerais de até 3,5% da massa.

4.3 Módulo de Elasticidade

Análises de propriedades do concreto no estado fresco e endurecido são de extrema importância como forma de “prever” o comportamento e garantir a segurança da estrutura futuramente. Uma dessas propriedades não é tão estudada pelos autores como a resistência a compressão o é: o módulo de Young (módulo de elasticidade/deformação).

Este módulo tem origem na energia de ligação entre os átomos do material e divide-os em aproximadamente duas classes: flexíveis e rígidos. O valor do módulo de elasticidade é utilizado no cálculo estrutural para prever flechas máximas admissíveis, garantindo um limite no grau de fissuração de peças de concreto.

O comportamento do módulo de deformação/elasticidade dos concretos está relacionado ao agregado. Quando o agregado for mais deformável, o concreto produzido com este será mais deformável e apresentará flechas maiores que as observadas nos concretos convencionais.

Segundo Ujike (2000) citado por Cabral (2007), é observada uma redução no módulo de deformação quando comparado o concreto produzido com agregados naturais aos reciclados. Essa redução é observada principalmente quando são produzidos concretos reciclados de baixa relação água/cimento.

Lamond *et al.* (2002) citando o *Building Contractor Society of Japan* (1978) aponta que a substituição em conjunto dos agregados miúdos e graúdos pelo reciclado podem reduzir o módulo de elasticidade de 25 a 40%, enquanto que a substituição apenas do agregado graúdo pode ocasionar uma diminuição de 10 a 33%.

A porosidade é uma das propriedades que mais afetam o módulo de elasticidade do concreto. Isso se deve ao fato de que a porosidade do agregado determina sua rigidez, o que, por sua vez, controla a capacidade do agregado de resistir à deformação da matriz (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Os concretos reciclados, no geral, apresentam diminuição do módulo de elasticidade com o incremento de agregado miúdo reciclado em sua mistura (EVANGELISTA; BRITO, 2007).

Esse fator é atribuído à relação a/c, à porosidade, ao teor e à massa específica dos agregados reciclados, que são algumas das variáveis que mais influenciam os valores do módulo de elasticidade. Por exemplo, quanto maior for a relação a/c e o teor de agregado reciclado utilizado na produção do concreto, menor será o valor do módulo de elasticidade (CARRIJO, 2005; LEITE, 2001).

Yang *et al.* (2008) realizaram experimentos com diferentes traços de concreto (variando massa específica e absorção de água) com o objetivo de verificar a influência da substituição. Com relação às características nos estados fresco e endurecido, chegou-se a algumas conclusões: diminuição do abatimento quanto maior a taxa de absorção do agregado; diminuição de resistência a compressão e módulo de elasticidade quanto maior a taxa de absorção do agregado reciclado.

Kang *et al.* (2014) citado por Araújo *et al.* (2016) em sua pesquisa de aplicação estrutural dos agregados reciclados, variou a substituição de 15 a 50%, cuidando para que o agregado reciclado apresentasse massa específica próxima à do natural. Os autores observaram redução de até 25% na resistência a compressão com substituição de 30 a 50%. Sendo assim, foi sugerida uma limitação de substituição de até 30%.

Ângulo (2005) encontrou valores de E (módulo de Young) até 46% inferiores para os concretos reciclados, e o autor relacionou o resultado à influência da porosidade do agregado. Os resultados apontaram que a adoção de um teor de argamassa seca fixo (em massa), prática usual num estudo de dosagem convencional, implica um aumento de volume, quando são utilizados teores crescentes de agregados miúdos reciclados. Observou-se que, para a amostra de agregado reciclado estudado nesta pesquisa, foi possível a produção de concretos, sendo o teor 50% de substituição de AR o mais adequado.

De acordo com as conclusões apresentadas por diversos autores nesse capítulo, fica claro que é possível a produção de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. É primordial, entretanto, o beneficiamento adequado e atenção à dosagem dos constituintes do mesmo. Sabe-se que esses concretos provavelmente não apresentarão um desempenho tão bom quanto os produzidos com agregados naturais, caso alguns cuidados não sejam tomados.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas últimas duas décadas, o estudo da utilização dos resíduos de construção e demolição teve grandes avanços, principalmente com o desenvolvimento de novas leis e normas, possibilitando assim um fechamento do ciclo de vida dos materiais utilizados na construção civil.

Como alternativa ao depósito de resíduos da construção em aterros sanitários, o uso de agregados reciclados cria uma nova oportunidade de mercado a ser explorada e também favorável ao meio ambiente.

A falta de metodologia padronizada nos estudos revisados neste trabalho, levam a conclusões muito variadas e até divergentes sobre este assunto. No entanto, a maioria deles leva à resultados satisfatórios no que se diz respeito às propriedades do concreto fabricado com agregados reciclados.

Pode-se dizer que todos têm uma conclusão em comum: as limitações impostas pelas normas são demasiadamente restritivas e não refletem os conhecimentos atuais, visto que desde que as mesmas foram desenvolvidas, muitos estudos foram feitos. Além disso, os construtores são cautelosos em utilizar esse material porque os RAs são normalmente vistos como tendo uma grande dispersão em suas propriedades e um comportamento imprevisível.

A reciclagem dos Resíduos da Construção Civil (RCC) é de fundamental importância ambiental, no sentido de que os referidos resíduos retornem como substituição a novas matérias-primas que seriam extraídas do meio ambiente. Entretanto, ainda é vista de maneira negativa pela construção civil as iniciativas que se referem à pesquisa de novas tecnologias que aparentemente não se traduzem em grandes vantagens financeiras, não havendo grande mobilização do setor.

O aumento de usinas de beneficiamento de resíduos mostra uma evolução para o gerenciamento de RCD, porém, ainda é grande a diferença entre a quantidade de usinas

públicas e privadas. É preciso que o setor público estabeleça o gerenciamento de RCD conforme definido pela CONAMA 307 e assim, aumente o número de usinas.

Por fim, é comum a todos os estudos de análises de propriedades de RCD a discussão sobre as diferenças nas propriedades do AR quando comparados ao AN. É fato que o controle tecnológico desse tipo de material deve ser muito mais minucioso que o feito com os AN, uma vez que eles caracterizam um material novo, ainda pouco estudado, analisado e difundido de uma forma geral.

Em todos os estudos analisados, fica clara a necessidade de estudar o material nas diversas regiões brasileiras. Por motivos variados, como diferentes composições usuais do concreto, técnicas construtivas, processo de segregação, beneficiamento e reciclagem. Sendo assim, é de extrema importância que sejam feitas pesquisas nesse sentido nas mais variadas cidades, objetivando assim a difusão da reciclagem.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos**. 2005. 149 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

ARAÚJO, D. L. et al. Influência de Agregados Reciclados de Resíduos de Construção em Propriedades Mecânicas do Concreto. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, 8 fev. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12.112: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos – Áreas de transbordo e triagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação.

_____. NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros: Diretrizes para projeto, implantação e operação.

_____. NBR 15114: Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação.

_____. NBR 15115: Agregados de resíduos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação: Procedimentos.

_____. NBR 15116: Agregados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural: Requisitos.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEOMLIÇÃO (ABRECON). Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015. Presidente: Hewerton Bartoli. Autor e elaboração: UFPR – Universidade Federal do Paraná. Miranda L. F R.

BRUNNER, P.H. – **Urban Mining – A Contribution to Reindustrializing the City** – 2011

BUTTNER, A. M. **Uso de agregados reciclados de concreto em blocos de alvenaria estrutural**. 2007. 499 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Estruturas) -- Escola de Engenharia de São 15 a 17 junho de 2016 Porto Alegre, RS Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, SP, 2007.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C. C.; RIBEIRO, J. L. D. **Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete**. Construction and Building Materials, Vol. 24, p. 421-430, 2010.

CABRAL, A.E.B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. São Carlos-SP, 2007. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. 2005. 146 f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 307. Brasília, 2002.

COSSU, R.; WILLIAMS, I.D. – **Urban Mining: Concepts, terminology, challenges** – p.1-3, 2015.

DE BRITO, J. et al. Structural, material, mechanical and durability properties and behaviour of recycled aggregates concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 6, p. 1–16, jun. 2016.

DHIR, R.; PAINE, K; DYER, T. Recycling construction and demolition wastes in concrete. **Concrete**, March, p. 25-28, 2004^a.

EVANGELISTA L, B. J. Mechanical behavior of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement e Concrete Composites** 2007;29:397–401.

Freedonia, World construction aggregates, in Industry Study No. 2838. 2012, The Freedonia Group: Cleveland, Ohio, USA. 334 p.

GUSMÃO, A. D. **Manual de Gestão dos Resíduos da Construção Civil**. Recife: Gráfica Editora, 2008. 140 p.

HENDRIKS, C.F. **The building cycle**. Holanda: Aeneas, 2000. 231p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Gestão integrada de resíduos sólidos: manual gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Coordenação técnica: Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro, 2001.

JOHN, V. M. Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção. In: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção / Organizado por Alez Pires Carneiro, Irineu Antônio Schaldach de Brum e José Clodoaldo da Silva Cassa. Salvador. EDUFBA; 312p.; 2001; p.27-45

LAMONG, J. F.; CAMPBELL, R. L.; CAMPBELL, T. R., CAZARES, J. A.; GIRALDI, A.; HALCZAK, W.; HALE, H. C.; JENKINS, N. J.; MILLER, R.; SEABROOK, P.T. Removal and reuse of hardened concrete. **ACI Materials Journal**, May-June, p. 300-325, 2002

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos Com Agregados Reciclados de Resíduos da Construção e Demolição**. Porto Alegre, 2001. 290 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Porto Alegre, 2001.

LIMA, J. A. R.; SILVA, L.F. “**Utilização e Normalização de Resíduos de Construção Reciclado no Brasil**”. In: II Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, 1999a, Porto Alegre, Anais, p. 168-171.

MEHTA, K. P.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MIRANDA, L.F.R. et al. (2009). A Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição no Brasil: 1986 – 2008. **Revista Ambiente Construído**. Porto Alegre. V.9, n.1, p57-71. Jan/mar.

PINTO, T. P. Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo-SP, 1999. 2033 p. Tese (Doutorado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

RODRIGUES, C. R. DE SÁ; FUCALE, S. Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v.14, n.1, p. 99-111, jan./mar. 2014.

SCHNEIDER, D. M. Transporte de resíduos de construção e demolição na cidade de São Paulo. 2003. 103p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, Ch. H. Recyclinf of masonry rubble. In: **Recycling os Demolished Concrete and Masonry**, RILEM Technical Committee Report N. 6, Editor: T. C. HANSEN, E & FN SPON, London, p. 164-255, 1992.

SU, X., ANDOH, A.R., CAI, H., PAN, J., KANDIL, A., SAID, H.M., 2012. **GIS-based dynamic construction site material layout evaluation for building renovation projects**. *Autom. Constr* 27, 40–49.

TAM, V. W. Y.; TAM, C. M. A review on the viable technology for construction waste recycling. **Resources, Conservatiomnd and Recycling**. Vol. 47, p. 209-221, 2006.

VIEIRA, G. L. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. Porto Alegre-RS, 2003. 151p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, Ch. Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. **Cement and Concrete Research**, Vol. 35, pg. 1187-1194, 2005.

YANG, K. H.; CHUNG, H. S.; ASHOUR, A. F. **Influence of Type and Replacement Level of Recycled Aggregates on Concrete Properties**. *ACI Materials Journal*, V. 105, No. 3, p. 289-296, 2008.

ZORDAN, S. E. **A Utilização do Entulho Como Agregado, na Confecção de Concreto**. Campinas, 1997. 156 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

9 ARTIGO CIENTÍFICO 2

INCORPORAÇÃO DE RESÍDUO DE CINZA DA QUEIMA DE MADEIRA NA PRODUÇÃO DE TIJOLOS CERÂMICOS ORNAMENTAIS

INCORPORATION OF WOOD BOTTOM ASH RESIDUE IN ORNAMENTAL CERAMIC BRICKS PRODUCTION

C. T. S. Monteiro^{1*}; M. A. C. Moreira^{1*}; A. C. Santos^{2*}

1 Instituto Federal Fluminense – IFF - campus Macaé
Rodovia Amaral Peixoto, km 164, Imboassica, Macaé, Brasil
Instituto Federal Fluminense – IFF - Campos Campus Centro
Centro Rua Dr. Siqueira, 273 - Parque Dom Bosco, Campos dos Goytacazes, Brasil

RESUMO

A indústria brasileira de cerâmica tem como seu principal combustível para secagem e sinterização a lenha de madeira, especialmente eucalipto. Esse tipo de geração de energia pode ser considerado limpo desde que a madeira não seja ilegalmente colhida de origem nativa e que o resíduo gerado nesse processo seja corretamente manejado. As indústrias cerâmicas de Campos dos Goytacazes geram toneladas desses resíduos na forma de cinzas, sendo os mesmos mantidos no local de origem para posterior deposição ilegal. A incorporação desse resíduo em produtos cerâmicos estruturais requer um eficaz controle tecnológico, dificultando sua aplicação. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é analisar o efeito da incorporação de diferentes concentrações desse tipo de resíduo cinza no processo de fabricação de tijolos para uso ornamental de revestimento, do tipo tijolos aparentes. As matérias primas foram coletadas na Cerâmica A Campos dos Goytacazes (RJ), passando por processos de beneficiamento e preparação das massas cerâmicas com incorporação de 0%, 5% e 10% de resíduo. O processo de formação das peças foi o de prensagem a seco e as amostras foram submetidas a três temperaturas de queima: 800°C, 940°C e 1050°C em um ciclo de queima rápido com taxa de 25°C/min. Os resultados experimentais indicaram que a incorporação dos resíduos teve influência positiva nas propriedades quando comparadas aos produtos comerciais vendidos pela Cerâmica A. Os melhores valores resultaram da incorporação de 5% de resíduo, porém, com 10% de incorporação resíduo as propriedades ainda se mostraram melhores quando comparadas aos produtos comerciais.

Palavras-chave: cinza, lenha, cerâmica vermelha, tijolo ornamental.

INCORPORATION OF WOOD BOTTOM ASH RESIDUE IN ORNAMENTAL CERAMIC BRICKS PRODUCTION

C. T. S. Monteiro^{1*}; M. A. C. Moreira^{1*}; A. C. Santos^{2*}

1 Instituto Federal Fluminense – IFF - campus Macaé
Rodovia Amaral Peixoto, km 164, Imboassica, Macaé, Brasil
Instituto Federal Fluminense – IFF - Campos Campus Centro
Centro Rua Dr. Siqueira, 273 - Parque Dom Bosco, Campos dos Goytacazes, Brasil

ABSTRACT

The Brazilian ceramic industry uses wood, especially eucalyptus, as main fuel for drying and sintering its products. This type of energy generation can be considered clean as long as the wood is not illegally harvested from a native forest and the waste generated in that process is properly managed. The ceramic industries from Campos dos Goytacazes generate tons of this waste in the form of ash, which is stored at the place of generation for later illegal disposal. The incorporation of this waste in structural ceramic products requires an effective technological control, making it difficult to be applied. In this context, the objective of this work is to analyze the effect of the incorporation of ash waste in different concentrations to the manufacturing process of bricks for ornamental use, also known as facing bricks. The raw materials were collected at Cerâmica A in Campos dos Goytacazes (RJ), then submitted to processing and preparation of the ceramic masses with 0%, 5% and 10% of waste incorporation. The specimens were formed by dry pressing and then they were fired in three different temperatures: 800°C, 940°C and 1050°C in a fast firing cycle using a rate of 25°C/min. The experimental results indicated that the incorporation of the ash had a positive influence on the properties when compared to the commercial products sold by Cerâmica A. The best values resulted from the incorporation of 5% of waste, however with 10% waste incorporation, the properties were still better when compared to commercial products.

Keywords: ash, firewood, red ceramics, ornamental bricks.

1. INTRODUÇÃO

Sem uma boa gestão de resíduos sólidos, não se pode construir uma cidade sustentável e habitável. Além de soluções técnicas, existem impactos climáticos, de saúde e segurança, bem como considerações sociais importantes, para que as pessoas e as sociedades sejam encorajadas a reduzir e reciclar o lixo (ONU, 2016).

Os impactos ambientais e sociais gerados pela quantidade produzida e pelo descarte inadequado dos resíduos sólidos gerados impõem a necessidade de soluções eficazes para sua gestão adequada. Os resíduos de cinzas de madeira gerados na indústria de cerâmica vermelha para a confecção de produtos cerâmicos são descartados de acordo com sua caracterização. Segundo Peterson *et al.* (2016) apud Borlini (2005), a cinza pode atuar como fundente e contribuir para melhorar as propriedades de queima, como o aumento da resistência mecânica, redução de porosidade e redução de absorção de água. Apesar disso, as concentrações de fundentes e refratários devem ser dosadas proporcionalmente nas massas cerâmicas de forma que atendam as características dos produtos, pois uma concentração fora dos padrões pode gerar perda de estabilidade dimensional e deformações.

A maioria das empresas do setor cerâmico faz uso de uma série de processos geradores de resíduos que são dispostos na natureza sob a forma de gás, líquido ou sólido, ocasionando impactos ambientais. Em compensação, através da incorporação desses resíduos na fabricação dos produtos cerâmicos, essas empresas podem contribuir direcionando-os para uma correta disposição através da reciclagem.

Neste sentido, a implantação da logística reversa através da incorporação de cinzas de madeira ao corpo cerâmico revela-se como uma grande oportunidade para oferecer uma alternativa sustentável ao destino desse resíduo. O sistema logístico reverso consiste em uma ferramenta cujo intuito é viabilizar técnica e economicamente as cadeias reversas, de forma a contribuir para a promoção de sustentabilidade da cadeia produtiva.

Dentro desse contexto, pode-se utilizar um conjunto de técnicas de reprocessamento e produção com a finalidade de reaproveitar os resíduos em um novo ciclo de processo para a produção de outro material. Assim, as cinzas que previamente eram consideradas rejeitos, transformam-se em resíduos e atuam como matéria prima na confecção de outros materiais no mesmo local.

As cinzas são resíduos provenientes do processo de queima da madeira utilizada como combustível nos fornos de sinterização dos produtos cerâmicos. A pesquisa fundamenta-se na incorporação de diferentes concentrações de resíduos de cinzas de madeira na massa argilosa para a produção de revestimento cerâmico de paredes do tipo

tijolo aparente para ser usado em ambientes externos e internos. Através do controle dos parâmetros de processo e das características químicas das matérias-primas, busca-se produzir um protótipo que possua características visuais e propriedades adequadas ao uso.

Os tijolos aparentes são comumente conhecidos como “bricks” ou briquetes. A expressão “brick” tem sido usada no Brasil para definir as plaquetas que, quando assentadas na parede, oferecem o mesmo visual de tijolo maciço aparente. Segundo Bianchi (2017), nos últimos três anos, os fabricantes passaram a produzir peças mais finas e com aparência mais natural, alavancando a demanda por esse acabamento. O conceito de design eco-positivo surgiu com o objetivo de doutrinar uma sociedade a ter um impacto mais restaurador que prejudicial ao meio ambiente, cujo objetivo na maioria das vezes é que o material tenha uma aparência rústica. Esses modelos são utilizados para forrar divisórias internas, fachadas, churrasqueiras, dentre outros, a fim de que se obtenha um efeito ainda mais real. Além disso, torna a obra mais limpa, pois muitos dispensam a utilização do rejunte.

O setor industrial da cerâmica apresenta grande variedade de produtos e processos produtivos. A cadeia produtiva é constituída de diferentes tipos de estabelecimentos, com características distintas quanto aos níveis de produção, qualidade dos produtos, índices de produtividade e grau de mecanização. O setor pode ser dividido nos seguintes segmentos: cerâmica vermelha ou estrutural, materiais de revestimento, materiais refratários, louça sanitária, louças e porcelanas de mesa, isoladores elétricos de porcelana, cerâmica artística (decorativa e utilitária), filtros cerâmicos de água para uso doméstico, cerâmica técnica, isolantes térmicos, cal e cimento, estes últimos devido a suas especificidades, pouco contabilizadas no setor (ANFACER, 2012).

Na região de Campos dos Goytacazes-RJ, encontra-se instalado um dos mais importantes polos de cerâmica vermelha do estado do Rio de Janeiro. Academicamente, ao longo dos anos, as características das argilas locais vêm sendo estudadas em busca de uma aplicação mais consistente dentro do processo de fabricação e do seguimento das normas que regem a qualidade dos produtos fabricados. Diante de um mercado consumidor mais rigoroso, da busca de melhores resultados de produção e maior retorno financeiro, algumas empresas do setor de produtos cerâmicos planejam e desenvolvem parâmetros de processo, atentam-se em pesquisas de novas formulações, processamentos e criação de novos produtos atendendo as exigências de qualidade e padronização. Grande parte dos estudos objetivam a utilização do produto final na construção civil, em forma de tijolos ou blocos. Para que isso seja possível, é necessário que o material atinja

características exigíveis para sua fabricação, normatizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Diversos estudos apontam a dificuldade em alcançar e controlar as propriedades físicas e mecânicas, uma vez que o método de incorporação altera o comportamento da estrutura do material. À luz dessa dificuldade, essa pesquisa objetiva analisar a utilização do resíduo cinza de madeira para a confecção de um tipo de revestimento cerâmico ornamental. As plaquetas ou “bricks” cerâmicos têm potencial de incorporar resíduos durante sua fabricação, visto que sua demanda não é a mesma que seria para fins estruturais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Indústria da Cerâmica Vermelha

No Brasil, a indústria da cerâmica vermelha é composta por 6.903 empresas, gerando um faturamento de R\$ 18 bilhões/ano. Responsável por 4,8% da indústria da construção civil e 90% das alvenarias e coberturas construídas no Brasil, gera cerca de 293 mil empregos diretos e 900 mil indiretos (ANICER, 2018). Tendo como atividade a produção de uma grande variedade de materiais, como blocos de vedação e estruturais, tijolos maciços, telhas, lajotas, tubulações, cerâmica ornamental, revestimentos e utensílios domésticos, o segmento dessa indústria integra o ramo de produtos de minerais não-metálicos da Indústria de Transformação, fazendo parte juntamente com outras indústrias como a de cerâmica de sanitários, indústria cimenteira e vidreira, compondo o conjunto de cadeias produtivas da Construção Civil (CABRAL *et al.*, 2012).

O pólo cerâmico de Campos dos Goytacazes é um dos mais importantes do estado do Rio de Janeiro, correspondendo a cerca de 40% da produção e das unidades produtivas (MAIA, 2012 apud PEDROTI *et al.*, 2011). Em geral, as unidades produtivas são empresas de pequeno e médio porte, que produzem tijolos, blocos cerâmicos, lajotas e telhas. Isso se dá pela existência de importantes depósitos de argilas na cidade, que vêm sendo explorados pelos ceramistas locais de forma empírica há décadas

A argila é responsável pela cor vermelha da cerâmica, sendo essa cor o principal aspecto para sua caracterização. Ela apresenta como características compostos metálicos e não metálicos tais como oxigênio, silício, alumínio, ferro, magnésio, potássio e sódio, que se arranjam em estruturas tridimensionais no estado iônico e cujo interesse se encontra no peso, resistência mecânica, resistência ao desgaste, absorção de água e

duração (CRUZ, 2012 apud NASCIMENTO, 2007). Dependendo da sua formação geológica e localização de extração a mesma pode possuir elevado teor de partículas inferiores a 2 μ m, o que confere elevada plasticidade ao ser misturada com água (MAIA, 2012 apud DUTRA *et al.*, 2006; GOMES, 1988).

Os materiais cerâmicos são fabricados normalmente pela composição de duas ou mais matérias primas, aditivos e água. A mistura de argilas se dá pela necessidade de encontrar um patamar específico para a plasticidade, misturando argila de alta plasticidade com a menos plástica, com granulometria alta e rica em quartzo. Grande parte da massa é feita de forma empírica, buscando uma composição que proporcione as características necessárias para a técnica empregada para dar forma às peças (MOTTA *et al.*, 2001).

O processo de produção da cerâmica vermelha se inicia na extração, normalmente realizada a céu aberto em jazidas de argila com máquinas e equipamentos apropriados. Grande parte das matérias primas utilizadas pela indústria é natural, encontrando-se em depósitos espalhados na crosta terrestre. Após a mineração, os materiais são beneficiados e o processo de fabricação tem início após essas operações (ABCERAM, 2018). O sazonalidade consiste na estocagem da argila extraída por um período maior que seis meses, objetivando a decomposição da matéria orgânica e diminuição de tensões causada pela quebra de ligações químicas (CRUZ, 2012 apud ARRUDA *et al.*, 2007).

A seleção do método de formação das peças cerâmicas se fará dependendo de fatores econômicos, características requeridas e geometria do produto. Os mais utilizados segundo a ABCERAM (2018) são: colagem, prensagem, extrusão e torneamento. A colagem consiste em verter uma suspensão num molde de gesso ou resina porosa, até que a água contida na suspensão seja absorvida pelo gesso e as partículas sólidas se acomodem ao molde, formando um produto com a forma do molde. Na prensagem, a massa é comprimida através de uma prensa dentro de uma matriz ou molde. No processo de extrusão, a massa plástica é colocada e uma máquina extrusora, onde é compactada e forçada por um pistão, através de um bocal com determinado formato. Essa etapa pode ser uma etapa intermediária, seguindo-se do torneamento, onde a peça irá adquirir seu formato final.

Por fim, a secagem tem o objetivo de eliminar a água proveniente da etapa de preparação da massa, sendo feita em secadores em temperaturas variáveis entre 50°C e 150°C (ABCERAM, 2018). As propriedades finais do processo cerâmico são adquiridas na queima, pois durante essa fase, ocorrem reações, transformações químicas e físicas,

conferindo ao corpo cerâmico as propriedades para sua utilização (MAIA, 2012 apud PINHEIRO, 2009).

Com a capacidade de interferir de forma expressiva na qualidade do produto final, transformando o produto de forma irreversível, o processo de queima é um estágio de extrema importância na produção da cerâmica vermelha (GUIMARÃES, 2017 apud MÁZ, 2006). Dentro deste, estão compreendidas três etapas: pré sinterização, sinterização e resfriamento. A sinterização é a etapa mais complexa do processo, pois para se alcançar as propriedades desejadas, é requerido um significativo conhecimento prévio do material e do processo utilizado (DUTRA, 2007 apud REED, 1995).

Na fase crua, as partículas estão conectadas pela plasticidade. Acima de 700 °C, os fundentes (os óxidos de potássio, sódio e ferro, entre outros) formam um líquido de alta temperatura, ou seja, vitrificam e consolidam as partículas. A sinterização do corpo cerâmico por fase líquida, pode ser comparada à formação de "soldas internas" entre as partículas do composto cerâmico. Com o resfriamento do corpo, o líquido entre as partículas sólidas internas forma "pontos de solda". Quanto mais elevada é a temperatura de queima, maior é a quantidade de líquido que se forma e a malha dos pontos de solda internos se torna cada vez mais densa (GUIMARÃES, 2017 apud MÁZ, 2005).

Até 900°C, quando se inicia a retração por sinterização, ocorrem algumas transformações: a água coloidal, proveniente da matéria orgânica e a de constituição são eliminadas e, a partir do momento da perda desta última, as propriedades argilosas são perdidas de modo irreversível (GUIMARÃES, 2017 apud MÁZ, 2005). A partir de 700°C, a resistência atinge um mínimo tolerável e dependendo das matérias-primas, em uma queima entre 900°C e 950°C, quando ocorre a retração por sinterização, um bloco pode resistir de 6 a 10 MPa, o que é considerado alta resistência. Quando a temperatura é elevada acima de 1000°C, ocorre a vitrificação, ou seja, uma reorganização dos cristais, formando uma nova estrutura cristalina, fechamento dos poros, diminuição de absorção da água e aumento de resistência mecânica.

Com um ciclo de queima adequado é possível obter um produto de melhor qualidade e com menor consumo de energia térmica, aumentando a produtividade e diminuindo custos de produção. No Brasil, atualmente, a maioria dos ciclos de queima dos produtos da cerâmica tem duração em torno de 24 horas. Entre as principais dificuldades da inserção do ciclo de queima rápido na indústria está o fato das argilas serem heterogêneas, contendo matéria orgânica e ferro, que contribuem de maneira negativa na aceleração do ciclo de queima e na utilização do carvão vegetal como combustível (DUTRA *et al.*, 2009).

No estudo feito por Dutra *et al.* (2009), foram submetidas três tipos de amostras a três temperaturas de queima em ciclo tradicional e rápido e ao comparar o ciclo tradicional ao ciclo rápido destacaram-se algumas tendências gerais: a absorção de água permaneceu praticamente constante ou com pouca variação; a retração linear foi maior no ciclo de queima tradicional, principalmente para as temperaturas de 950°C e 1050°C; a resistência mecânica foi maior no ciclo de queima rápida, devido, possivelmente, à maior quantidade de fases amorfas e menor quantidade de poros fechados.

Pinto *et al.* (2005) utilizaram uma formulação para obtenção dos corpos de prova e os mesmos foram queimados em temperaturas de 1080 até 1160°C, utilizando-se dois ciclos de queima distintos: um lento e um rápido. Comparando os resultados obtidos para os dois ciclos de queima estudados, observou-se que o parâmetro de retração linear permaneceu praticamente inalterado. No entanto, a absorção de água apresentou menores valores em toda faixa de temperatura quando foi utilizado o ciclo de queima lento. Esse comportamento foi relacionado ao maior tempo de exposição das peças na máxima temperatura de sinterização e, conseqüentemente, ao incremento da cinética das reações quando se utiliza o ciclo de queima lento. Foi verificado que as peças queimadas no ciclo de queima lento apresentaram valores de tensão de ruptura superiores. Este comportamento foi relacionado ao maior tempo de exposição dos corpos cerâmicos nas máximas temperaturas de queima quando se utiliza o ciclo de queima tradicional.

Entre os principais problemas ocasionados durante a queima rápida está o aparecimento do defeito do tipo “coração negro”, ocasionado principalmente pela presença de matéria orgânica. Em quantidades elevadas, o ferro, normalmente encontrado como hematita (Fe_2O_3), também pode causar problemas, pois quando reduzido, pode ser responsável pela coloração escura e prejudica as características estéticas da peça cerâmica (CAVA, 1997 apud DUTRA, 2007). Outro possível problema oriundo da queima rápida são as fissuras, normalmente causadas pela elevada pressão no interior da peça, causada por formação dos gases.

Destacando-se como o principal combustível utilizado na indústria cerâmica, a madeira é empregada na secagem e queima das peças. Outros tipos de combustíveis podem substituir a lenha na realização dessas operações, é o caso do óleo diesel, carvão, gás natural, dentre outros. Em determinadas regiões, devido à sua abundância, o custo da lenha é inferior aos demais, tornando-a principal fonte de calor das cerâmicas dessas áreas (CRUZ, 2012).

O Brasil é o maior produtor mundial de carvão vegetal, tendo a madeira dos eucaliptos como sua principal matéria-prima. No Balanço Energético Nacional publicado

em 2009 pelo Ministério de Minas e Energia do Brasil, no ano de 2008, o carvão vegetal correspondeu a 2,75% do consumo de todos os energéticos no País, quando expressos em toneladas equivalentes de petróleo (FOELKEL, 2018). O potencial do eucalipto como substrato para produção de energia apresenta uma tendência a uma sinergia crescente. Das biomassas florestais, o Eucalipto destaca-se devido à sua fácil adaptação a diferentes solos e, por sua vez, é utilizado para a geração de energia em diferentes configurações que envolvem espaçamentos entre árvores e diferentes ciclos de corte (GONZALEZ, 2014).

Há algumas décadas, a produção brasileira de carvão vegetal vem utilizando de forma extrativista muitos dos próprios recursos naturais florestais disponíveis no País. Em 1976, cerca de 90% do carvão vegetal produzido no Brasil era obtido da madeira de matas nativas brasileiras. Com o crescimento da oferta de madeira para atender aos diversos setores econômicos (siderurgia, cerâmicas, etc), a situação está se invertendo. Atualmente, há uma predominância da origem de madeira de florestas plantadas sobre às de matas naturais. Entretanto, a agressão aos biomas brasileiros ainda é uma questão preocupante, fazendo com que as exigências e fiscalizações, principalmente pelo IBAMA, façam os usuários de carvão vegetal utilizarem madeiras de plantações florestais (FOELKEL, 2018).

A questão da plantação florestal é o que foi desmatado anteriormente para que a nova plantação desse lugar. O plantio do eucalipto visando a produção de madeira deve ser planejado respeitando-se as Áreas de Preservação Permanente (APP) e Reserva Legal (RL), necessárias para manutenção da sustentabilidade e da qualidade ambiental dos agroecossistemas. Segundo a EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), os plantios florestais de espécies exóticas, com a finalidade de produção e corte, localizados fora das APPs e RL, são isentos de apresentação de projetos, vistoria técnica e licenciamento ambiental para sua implantação, o que, provavelmente, possibilita o desmatamento pré reflorestamento.

“O sucesso para o uso energético da lenha e do carvão vegetal no Brasil está no preço desse biocombustível. Não há fonte de energia tão barata quanto a biomassa energética no País. Independentemente de seu preço, o carvão vegetal pode e deve ser considerado um biocombustível renovável, sustentável e limpo. Isso caso se resolvam dois de seus graves problemas: o uso de madeira de origem nativa ilegalmente colhida e a utilização do trabalho de muitos brasileiros de forma socialmente injusta e ilegal” (Foelkel, 2018).

Além dos problemas citados anteriormente pelo autor, o uso de carvão vegetal gera um resíduo cinza que deve ser adequadamente descartado, tendo como ponto de partida a sua classificação, objetivando seu correto manejo. Tal classificação se baseia na presença de algumas substâncias perigosas que constam na norma e em testes laboratoriais complementares, onde parâmetros químicos são analisados nos extratos lixiviados e solubilizados dos resíduos estudados.

2.1.1 Revestimentos Cerâmicos

O segmento de Revestimento Cerâmico, como é conhecido, engloba todos aqueles produtos cerâmicos na forma de placas usados na construção civil para revestimento de pisos e paredes, de ambientes internos e externos (ABCERAM, 2018).

No Brasil, seja pela abundância de matérias-primas ou pela herança cultural portuguesa, de quem adquirimos o gosto por azulejos, o uso de revestimentos cerâmicos tornou-se um costume antigo e corrente. Não é à toa que o país está entre os cinco principais consumidores desse tipo de material e é um dos maiores produtores do setor, com capacidade instalada de 600 milhões de m² anuais. Se no passado as placas cerâmicas estavam restritas às áreas úmidas de uma construção, hoje são encontradas nos mais diferentes ambientes, como residências, escritórios, indústrias e áreas externas, incluindo amplas fachadas. O mercado oferece uma imensa variedade em formatos, cores, texturas e acabamentos superficiais. (PINI, 2005). As principais funções desses revestimentos são proteger e decorar. Proteger a base e a estrutura da construção, como os pisos e a parede, e decorar, dando acabamento ao ambiente, proporcionando conforto visual e estético.

A escolha de um revestimento cerâmico para o ambiente é um fator muito importante, pois o mesmo não promove apenas beleza, mas possui também a função de proteger a estrutura da edificação. Diferenciar placa cerâmica para piso ou parede, por exemplo, significa diferenciar resistência à abrasão e carga de ruptura. As solicitações para azulejo em geral não requisitam maiores cuidados, sendo aceitável a resistência mínima à ruptura de 15N/mm² (ABNT, 1997). Dependendo da finalidade, características como absorção de água, expansão por umidade, resistência ao ataque químico e a manchas, dentre outros, devem ser consideradas.

A utilização do revestimento cerâmico no piso implica na observação de características não exigidas para paredes. O tráfego de pessoas, a resistência à abrasão, tipos de carga e a possibilidade de impacto são características que irão definir a resistência à ruptura necessária. Outro fator importante a ser considerado é o coeficiente de atrito,

dado em função do escorregamento no chão. Esses são os primeiros requisitos para uso de revestimentos cerâmicos em pisos, devendo ser complementados com outras variáveis: local residencial ou público, industrial ou especial, seco ou úmido (ABNT, 1997).

O revestimento em ambientes externos requer características mais complexas quando comparadas ao uso interno. Internamente, as exigências dependem basicamente se é piso ou parede, seco ou úmido, residencial ou público, industrial ou especial. No caso externo, a placa cerâmica se encontra exposta às alterações de clima, que irão requerer do material baixa absorção de água e baixa expansão por umidade. Se o revestimento estiver sujeito a baixas temperaturas é importante que o mesmo seja resistente ao congelamento. Além disso, o ensaio de resistência à gretagem é sempre exigido e a resistência à mancha e ao ataque químico são também importantes em função deste revestimento estar sujeito aos agentes atmosféricos.

As funções dos revestimentos de fachadas são: proteger a edificação de chuvas, preservando a estrutura e dar um acabamento estético à edificação. Fatores como localização geográfica devem ser considerados na hora da escolha, pois se a região for chuvosa, deverá ser resistente à água, assim como de muito sol, resistente à perda de coloração (Silva *et al.*, 2015).

A indústria de materiais cerâmicos tem, aos poucos, ampliado a oferta e variedade de seus produtos, seja por acesso facilitado à tecnologia europeia, por impulso da moda ou por pressão de clientes por soluções mais sustentáveis. Com relação ao design, após anos tentando reproduzir rochas naturais, os fabricantes têm procurado situações mais desafiadoras como imitar superfícies cimentadas, metais, madeiras, tecidos e papéis de parede (PINI, 2009).

Nos últimos anos, a indústria brasileira de revestimentos cerâmicos, representada pela ANFACER (Associação Nacional dos Fabricantes de Cerâmica para Revestimentos, Louças Sanitárias e Congêneres) atingiu o estado da arte em termos tecnológicos, com design atualizado e alta produtividade. Ocupando a segunda posição do mercado em produção e consumo de revestimentos cerâmicos, o país tem ampla participação em fóruns mundiais do setor, tendo reconhecida a qualidade e capacidade produtiva (ANFACER, 2018).

A busca por produtos que atendam às exigências do mercado de qualidade, durabilidade e impacto ambiental ainda é dificultada por serem poucos os fornecedores que estão alinhados à necessidade de minimizar impactos ambientais dos processos produtivos. Além de otimização de processos produtivos, o gerenciamento de resíduos

sólidos pode ser feito através de logística reversa interna, trazendo melhorias como diminuição de custo com materiais e correta destinação dos resíduos.

Pesquisas mostram dificuldade perante a incorporação de resíduos em revestimentos cerâmicos que terão papel estrutural, uma vez que com concentrações de resíduos mais altas, a resistência mecânica diminui consideravelmente, podendo não atingir os valores requeridos por norma. As cerâmicas de função ornamental, por sua vez, permitem uma incorporação mais alta de resíduos, uma vez que possuem baixas exigências com relação a essas características, apresentando papel puramente estético.

2.1.2 Legislação e Normatização

Segundo a ANFACER (2018), existe no setor de revestimentos cerâmicos uma concorrência desleal, provocada pela existência no mercado interno, de produtos de baixa qualidade, com processos de fabricação deficientes, principalmente no que diz respeito à etapa de queima, muito importante para a definição das características do revestimento. De acordo com a Associação, alguns fabricantes reduzem o tempo de permanência no forno com o intuito de reduzir custos e aumentar a produção, gerando produtos de qualidade inferior. Sendo comercializados com preços mais baixos, esses produtos tendem a atrair o cliente que utiliza o preço como fator determinante no momento da compra (INMETRO, 2018).

O Brasil dispõe, no âmbito do Sistema Brasileiro de Certificação, da infraestrutura necessária à certificação desse produto, ou seja, o Inmetro credenciou laboratórios para realização de ensaios e criou o Centro Cerâmico do Brasil (Organismo de Certificação) para certificar que os produtos sejam fabricados de acordo com as normas brasileiras. Por não envolver aspectos de segurança e saúde, o processo de certificação é de caráter voluntário e, atualmente, existem apenas 12 empresas no setor que submeteram seus produtos ao processo de certificação. Sendo assim, apenas doze fabricantes têm a qualidade do produto que oferece ao mercado avaliada pelo órgão certificador (INMETRO, 2018).

Ainda não existe normatização brasileira para a produção de tijolos cerâmicos ornamentais, produtos esses que se diferem das placas cerâmicas (pisos ou azulejos) tanto em propriedades requeridas quanto em aplicação.

Segundo a NBR 13816 (ABNT, 1997), placas cerâmicas para revestimento são:

“Material composto de argila e outras matérias primas inorgânicas, geralmente utilizadas para revestir pisos e paredes, sendo conformadas por extrusão (representada pela letra A) ou por prensagem (representada pela letra B), podendo também ser conformadas por outros processos (representados pela letra C). As placas são então secadas e queimadas à temperatura de sinterização. Podem ser esmaltadas ou não esmaltadas, em correspondência aos símbolos GL (*glazed*) ou UGL (*unglazed*), conforme ISO 13006. As placas são incombustíveis e não são afetadas pela luz.”

A classificação de acordo com a NBR 13817 (ABNT, 1997) é baseada nos 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. Além disso, conforme citado anteriormente, são classificadas pelos métodos de fabricação, recebendo diferentes letras (A, B ou C) dependendo do processo de conformação.

Em função do uso específico, as placas cerâmicas devem ser submetidas a ensaios preconizados pela NBR 13818 (ABNT, 1997). Para os diferentes tipos de usos, que não estejam declarados na mesma, existem quadros de características que sinalizam os ensaios necessários para determinado uso (Ex. piso interno/externo, parede interno/externo) e os limites atingíveis para cada um desses grupos. Diferenciar placa cerâmica de utilização em piso ou parede significa diferenciar resistência à abrasão e carga de ruptura. As solicitações da placa cerâmica para a parede não requisitam maiores cuidados ou resistência mínima à ruptura tão alta quanto a placa para o piso.

Apesar de não existir normatização para a fabricação dos tijolos cerâmicos ornamentais, existem resíduos resultantes deste processo cuja destinação depende de sua classificação. Quando a madeira de eucalipto é submetida à combustão, a mesma perde seu carbono orgânico, deixando um resíduo denominado cinzas. Nessas cinzas estão alguns elementos minerais que a madeira recebeu do solo durante a vida da árvore, podendo alguns elementos como o N e o P não estarem em sua totalidade, pois se perdem

parcialmente na queima a altas temperaturas. Nas cinzas, há chance de existir um residual de carbono orgânico pela queima incompleta (FOELKEL, 2018).

Segundo Resende (2013), as cinzas provenientes da queima de combustíveis de origem vegetal é um problema recorrente, pois devido ao custo e disponibilidade, a madeira ainda é muito usada. Especificamente retratando a realidade do Sul do Brasil e o beneficiamento da soja, o mesmo pontua que a quantidade de resíduo gerado deste processo tornou-se um problema, uma vez que o mesmo possui reatividade com o solo, sendo usado como corretivo, mesmo que de forma empírica. Os trabalhos e estudos realizados por Gonzalez (2014), mostram que havia um comprometimento local com o meio ambiente, mesmo sem o devido conhecimento da capacidade de absorção de resíduos pela Terra como um todo. Acreditava-se, que o aumento de resíduos oriundos da indústria de transformação poderia ser facilmente dissipado por meio de uma distribuição de águas e gases poluídos por uma área tão grande quanto possível.

De acordo com Nolasco *et. al* (1999), o efeito benéfico das cinzas quando espalhadas na superfície do solo é resultado de sua composição química e, principalmente, da solubilização dos macronutrientes Ca, K e Mg e de micronutrientes, concluindo que as mesmas contém minerais valiosos e podem ser utilizadas como fertilizante. Em contrapartida, trabalhos de Gonzalez (2014) e Vaske (2012) mostraram que devido à natureza altamente concentrada das mesmas e com a presença de óxidos de metais alcalinos como o cálcio e o potássio, por exemplo, elas tendem a apresentar um pH muito alto, tornando-se necessário e até mesmo desejável, que sejam distribuídas uniformemente e em camadas superficiais no solo. Na Suécia, segundo Gonzalez (2014) apud. Pitman (2006), a dose máxima permitida de cinzas de madeira é de 3 toneladas por hectare.

A NBR 10004 (ABNT, 1987) classifica os resíduos como perigosos ou não perigosos. A norma envolve a identificação do processo ou atividade que lhes deu origem, de seus constituintes, das características e a comparação destes constituintes com umas listagens de resíduos cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é previamente conhecido.

Para essa classificação, são analisados os seguintes fatores: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade. De todos estes, o que pode classificar as cinzas de lenha de eucalipto em perigosos é a corrosividade, quando as mesmas apresentarem pH inferior ou igual a 2, superior ou igual a 12,5, ou quando sua mistura com água, na proporção de 1:1 em peso, produzir uma solução que apresente pH inferior a 2, superior ou igual a 12,5. Caso isso ocorra, é necessário que exista um maior cuidado ao destinar o resíduo.

O tipo de lenha mais utilizado nas indústrias cerâmicas de Campos dos Goytacazes (RJ) é proveniente do eucalipto. O consumo médio é de 0,4m³/milheiro, a densidade é 0,4t/m³ e uma ordem de 3% de geração de cinzas, totalizando 300t/mês (Borlini, 2005). Estudos de incorporação dessas cinzas em diferentes segmentos têm sido discutido por diversos autores.

Vaske (2012) estudou a incorporação das cinzas de eucalipto ao concreto/argamassa. A composição química da cinza era de 48,99% de CaO e o pH da cinza com valores maiores ao admitido por norma, o que a classificou como resíduo perigoso, se mostrou semelhante ao do concreto, logo, não concorrendo para alterações em seu meio alcalino. Os resultados dos ensaios realizados pelo autor, mostraram que a cinza poderia ser utilizada como adição ao concreto, com efeito predominante de filler, trazendo benefícios econômicos, técnicos e ambientais. Resende (2013) também estudou a incorporação ao cimento e constatou através dos ensaios que a qualidade do composto produzido praticamente não foi alterada, viabilizando a substituição para eliminar um passivo ambiental das empresas geradoras desse tipo de resíduo.

Gomes (2016), avaliou a valorização do resíduo cinza na produção de piso cerâmico. Foram formuladas massas contendo 0; 2,5; 5 e 10% de resíduo em substituição do quartzo e os resultados provaram ser possível a incorporação. Peterson *et al.* (2016) propôs a avaliação da adição da cinza da lenha de eucalipto (0, 1 a 5%) em cerâmica estrutural e após os resultados, afirmaram a possibilidade da incorporação nessas proporções, associando ao fato de que o elevado teor de CaO teria efeito fundente acima de 1100°C. Os autores observaram um aumento de porosidade e diminuição da resistência à flexão, propondo um estudo a concentrações maiores.

Santos (2016) também estudou a incorporação das cinzas na cerâmica vermelha, utilizando concentrações de até 20%. Com base nos seus resultados, sugeriu-se a substituição em peso de até 15% para a fabricação de uma cerâmica vermelha de qualidade, pois a partir desse valor, o peso do resíduo em cinza de serragem influenciaria negativamente na resistência mecânica.

O contexto do crescente aumento pela procura de energias e combustíveis alternativos, somado à pressão pelo desenvolvimento sustentável, faz com que sejam relevantes os estudos que possibilitem um melhor aproveitamento de resíduos. De acordo com Gonzalez (2014), a energia proveniente da queima do eucalipto pode ser considerada renovável a partir do seu correto manejo, desde o momento de seu plantio e cuidados com o solo até a destinação dos substratos residuais.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia da pesquisa foi baseada na rota de processamento tradicionalmente empregada na indústria de cerâmica vermelha. A Figura 1 apresenta, de forma resumida, o fluxograma com as fases de execução da pesquisa:

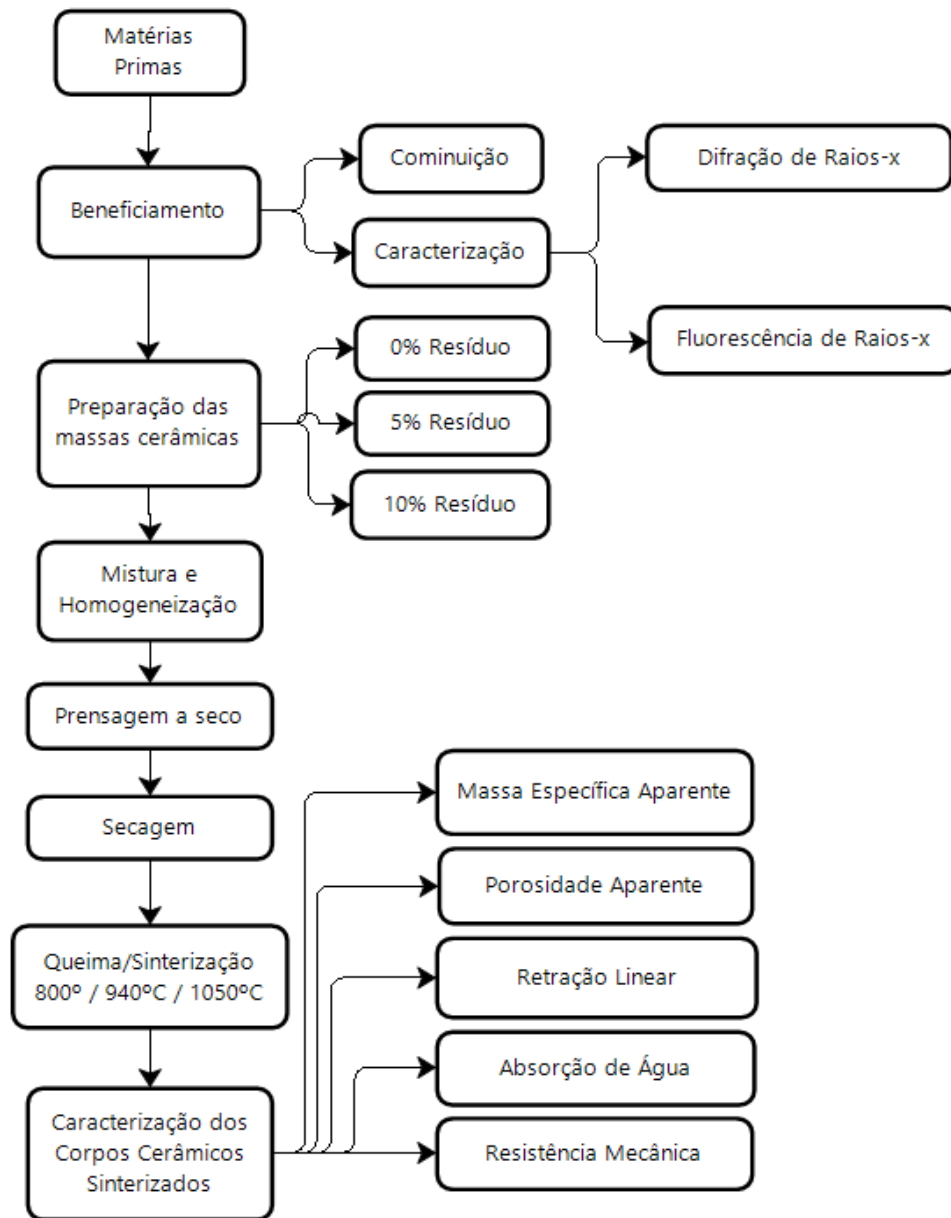


Figura 1 - Fluxograma de execução da pesquisa

Para a preservação das empresas que colaboraram com a pesquisa foi estabelecido que a empresa A trata-se de uma empresa da região norte fluminense, no município de

Campos dos Goytacazes – RJ, e a empresa B trata-se de uma empresa do leste fluminense, localizada em São Gonçalo - RJ, ambas consolidadas no mercado.

Foram utilizadas como matérias-primas uma massa cerâmica argilosa caulínica usada pela empresa Cerâmica A, no município de Campos dos Goytacazes – RJ e o resíduo da cinza de madeira de eucalipto produzido durante o processo de queima dos corpos cerâmicos na empresa. A massa argilosa utilizada corresponde à uma mistura de duas argilas e areia quartzosa. É formulada na empresa, sendo misturada com 20% da argila vermelha, 60% da argila clara e 20% de areia quartzosa, laminada e estocada.

No beneficiamento das matérias primas realizou-se a secagem da massa cerâmica argilosa em estufa à 110°C por um período mínimo de 24 horas. Posteriormente, foram submetidas ao destorroamento, cominuição e peneiramento com fração < 60 mesh (0,250mm). O resíduo de cinza da queima de madeira foi submetido ao peneiramento com mesma fração granulométrica usada na massa argilosa eliminando impurezas. As matérias-primas foram caracterizadas quimicamente e mineralogicamente na forma de pó. A composição química foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X (Shimadzu, modelo EDX 700). A identificação das fases cristalinas das cinzas foi realizada por difração de raios X (DRX, Shimadzu, modelo XDR 7000), operando com radiação Cu-K α na velocidade de 1,5° por minuto, varredura de 2 θ 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.

As formulações dos corpos de prova foram preparadas com massa cerâmica argilosa com incorporações de 0, 5 e 10% em massa de resíduo de cinzas. As composições 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, totalizando a confecção de 48 amostras e submetidas à secagem em estufa a 110 °C por 24 h. A queima dos corpos de prova foi feita em forno elétrico tipo mufla, com temperaturas finais de 800, 940 e 1050°C utilizando-se alta taxa de aquecimento (25°C/min) e isoterma de 120 min na temperatura de patamar. O resfriamento foi feito por convecção natural, desligando-se o forno. Os corpos de prova cerâmicos queimados foram caracterizados, submetidos a ensaios físicos e mecânicos 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 das propriedades foram medidas as características geométricas (largura, altura e comprimento) dos corpo-de-prova utilizando-se um paquímetro com sensibilidade mínima de 0,01 mm.

Para fins de comparação com produtos comerciais, 10 Tijolos Aparentes Ornamentais da empresa A e 10 Tijolos Aparentes Ornamentais da empresa B foram selecionados e submetidos aos testes de resistência mecânica à flexão e absorção de água, seguindo a mesma metodologia aplicada aos corpos de prova confeccionados. Os resultados obtidos serviram de parâmetros para análise dos corpos de prova obtidos com a incorporação do resíduo de cinza.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das matérias primas

4.1.1 Difração de Raios X e Fluorescência de Raios X

A Figura 2 mostra o difratograma de raios X para o resíduo de cinza da queima de madeira de eucalipto. Os resultados indicam que a principal fase mineral presente no resíduo é a calcita (CaCO_3). Na Tabela 1, o resultado da composição química do resíduo de cinzas confirma o elevado teor de CaO . Os principais componentes presentes nas cinzas são o óxido de cálcio (CaO), óxido de silício (SiO_2), alumina (Al_2O_3) e K_2O .

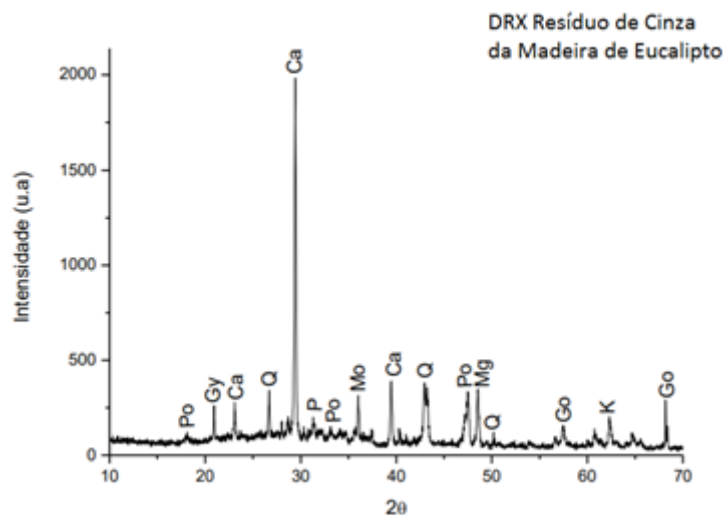


Figura 2 - Difratograma de Raios X de Resíduo de Cinza da Madeira de Eucalipto. Onde Q=Quartzo; Ca=Calcita; Go=Goetita; Gy=Gypsum; K=Caulinita; Mo=Montmorilonita; Mg=Sulfato de magnésio hidratado; P=Fosfato de Cálcio; Po=Portlandit.

Tabela 1 - Composição química das Matérias-primas.

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	CaO	P ₂ O ₅	MnO	*PF
Massa Argilosa	52,20	28,07	3,46	1,31	1,20	0,64	0,37	0,30	0,11	0,04	12,33
Cinza	9,55	6,63	4,38	7,35	0,83	10,19	-	40,77	-	0,72	17,30

A perda ao fogo das cinzas está associada à decomposição de carbonatos e eliminação de água de hidróxidos, conforme constituição mineralógica (Figura 2 e Tabela 2). A perda ao fogo da massa argilosa é menor do que as cinzas, e pode estar relacionada à presença de componentes voláteis de matéria orgânica, sulfatos, sulfetos e carbonatos (SANTOS, 1975). Porém, ocorre principalmente devido à perda da água de constituição dos argilominerais, principalmente da caulinita e a água associada aos hidróxidos existentes (gibbsita e goethita).

Percebe-se na Tabela 2 que o teor de Fe₂O₃ nas matérias primas usadas estão entre 1% e 5%. O teor relativamente baixo de Fe₂O₃ conferiu uma coloração bege-rosácea aos corpos cerâmicos confeccionados após a queima. Observa-se que a massa argilosa possui baixos teores de óxidos fundentes (K₂O, Na₂O, CaO e MgO), típico de argilas cauliniticas (Tabela 2). Em teores mais elevados facilitam a formação de fase líquida, atuando no processo de empacotamento das partículas, conseqüentemente, aumenta a retração linear no processo de queima (CARGNIN et al., 2011).

A Figura 3 mostra o difratograma de raios X para a massa argilosa. Os picos apresentados indicam a presença das principais fases cristalinas: Caulinita (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O), Quartzo (SiO₂), Mica Muscovita (KAl₂Si₃AlO₁₀(OH,F)₂), Gibbsita Al(OH)₃ e Feldspato potássico (K₂O.Al₂O₃ .6SiO₂). Concomitantemente, os resultados da análise química na Tabela 1 confirmam o elevado teor de quartzo e caulinita no gráfico de difração de raios x. Os mesmos mostram que mais de 80% da composição da massa argilosa corresponde às fases minerais SiO₂ e Al₂O₃, confirmando que composição da argila é predominantemente Caulinitica (Al₂O₃.2SiO₂.2H₂O), formando os aluminossilicatos. A caulinita confere plasticidade na massa e resistência mecânica das peças conformadas, já o quartzo é a principal impureza presente nas argilas, atuando como matéria-prima não plástica e inerte durante a queima.

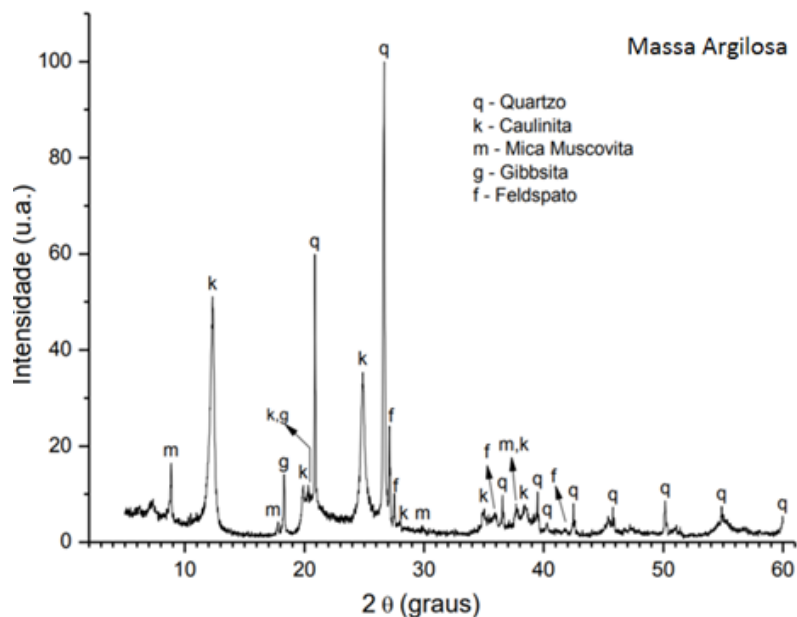


Figura 3- Difratoograma de Raios X da massa argilosa

A identificação de gibbsita no difratograma da massa argilosa (Figura 3) indica que a alumina (Al_2O_3) está presente na estrutura dos argilominerais e também na forma de hidróxidos. O hidróxido de alumínio (gibbsita) contribui para o aumento da refratariedade das argilas e da perda de massa durante a queima (HOLANDA *et al.*, 2000). A presença de Al_2O_3 aumenta a refratariedade da massa argilosa e o SiO_2 confere maior trabalhabilidade, diminui o tempo de secagem e a retração na queima (HOLANDA e PINHEIRO, 2010). De acordo com Millogo *et al* (2011) sua presença pode causar perda de resistência mecânica no material cerâmico sinterizado porque tende a aumentar o coeficiente de dilatação. A goetita (Fe_2O_3) representa o teor de ferro presente na massa argilosa.

4.1.2 Retração Linear da Queima

A Tabela 2 contém os resultados da retração linear de queima dos corpos de prova queimados com suas médias e desvios padrões na temperatura de queima. É interessante que os valores estejam próximos e apresentem um baixo desvio padrão, garantindo que a queima não influencie na constância e qualidade do produto final.

Tabela 2 - Retração linear na queima (em %) dos corpos de prova

Temperatura (°C)	Retração Linear (%)		
	0% Resíduos	5% Resíduos	10% Resíduos
800	0,42 ± 0,07	0,46 ± 0,05	0,63 ± 0,03
940	0,32 ± 0,09	1,04 ± 0,08	1,18 ± 0,10
1050	1,02 ± 0,19	1,88 ± 0,04	1,55 ± 0,14

De acordo com a Tabela 3 e o gráfico da Figura 4, a retração linear aumentou com o aumento da temperatura em todas as amostras, independente da quantidade de resíduo cinza. Na Figura 4 observa-se que a 940°C há um aumento considerável da retração linear para 5 e 10% de resíduo. Esse fato pode estar associado ao início do processo de sinterização das partículas da massa argilosa. O aumento da temperatura de queima para 1050°C favorece o mecanismo de sinterização de fluxo viscoso com a presença de fase líquida, tendo como resultado o aumento da velocidade do processo de sinterização resultando em maior valor de retração linear e conseqüentemente, a maior densificação dos corpos de prova cerâmicos. A fase líquida está associada ao alto percentual de óxidos fundentes (CaO, MgO e K₂O) presentes na composição do resíduo de cinzas. Considerando a maior temperatura de queima nas três diferentes composições, observa-se que a retração linear foi ligeiramente maior para a composição com 5% de resíduo. Os resultados indicam que efeito da incorporação do resíduo de cinza de serragem de madeira tende a aumentar a retração linear e, conseqüentemente, os processos de densificação tendem a ser favorecidos. Santos (2016) também observou um aumento da retração com o aumento de temperatura de queima, porém, o mesmo observou uma retração linear maior a partir de 900°C, resultado do processo de sinterização. Vale ressaltar que o autor submeteu as matérias primas a peneiramento em peneira de 40 mesh e utilizou um ciclo de queima lento.

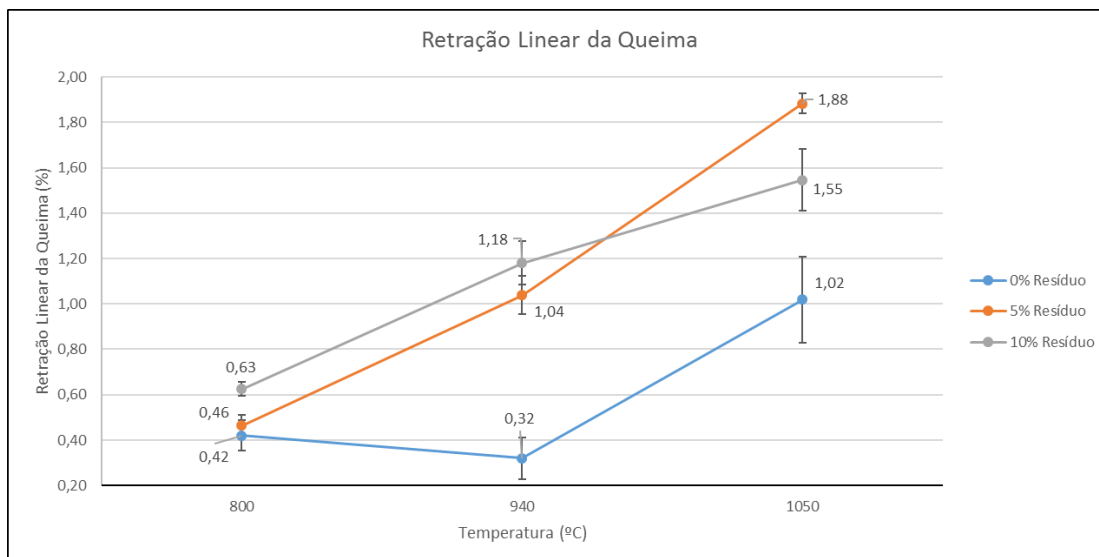


Figura 4 - Comparação da retração linear dos corpos de prova em três temperaturas

4.1.3 Absorção de água

A absorção de água é a propriedade que simboliza a capacidade de um material absorver a água que o envolve, aumentando assim a sua massa. Na tabela 3 são apresentados os valores de absorção de água das amostras em função da quantidade de resíduo e temperatura de queima.

Tabela 3 - Absorção de água (em %) dos corpos de prova

Temperatura (°C)	Absorção de Água (%)		
	0% Resíduos	5% Resíduos	10% Resíduos
800	19,61 ± 0,23	20,46 ± 0,10	21,92 ± 0,21
940	19,60 ± 0,16	19,56 ± 0,22	20,97 ± 0,13
1050	18,22 ± 1,24	17,72 ± 0,28	20,28 ± 0,27

A Figura 5 compara graficamente a absorção de água dos corpos de prova cerâmicos queimados em diferentes temperaturas. Observa-se que a absorção de água é influenciada pela temperatura de queima e pela incorporação do resíduo de cinza da queima de madeira. Considerando a mesma concentração de resíduo em temperaturas diferentes de queima, nota-se que para as concentrações de 5% e 10% de resíduo, houve uma diminuição na absorção de água. Na concentração de 0% a absorção de água se mantém estável até a 940°C e com o aumento da temperatura até 1050°C, há uma redução em função da ocorrência do processo de sinterização mais efetivo, densificando os corpos de prova. A absorção de água foi menor para uma concentração de resíduo em 5% na maior temperatura de queima.

Aumentando a quantidade de resíduo para 10% na mesma temperatura de queima (1050°C) percebe-se que houve um aumento de absorção de água. Apesar do aumento de óxidos fundentes na composição em função do aumento da quantidade de cinzas, também há um aumento na quantidade de matéria orgânica presente, o que desfavorece a densificação dos corpos de prova pelos gases liberados na queima, aumentando a quantidade de poros abertos. Peterson *et al.* (2016) encontrou resultado similar em sua pesquisa, notando que com o acréscimo da cinza, aumentava-se a quantidade de poros na amostra, relacionando o fato à liberação de CO₂ durante a etapa de sinterização.

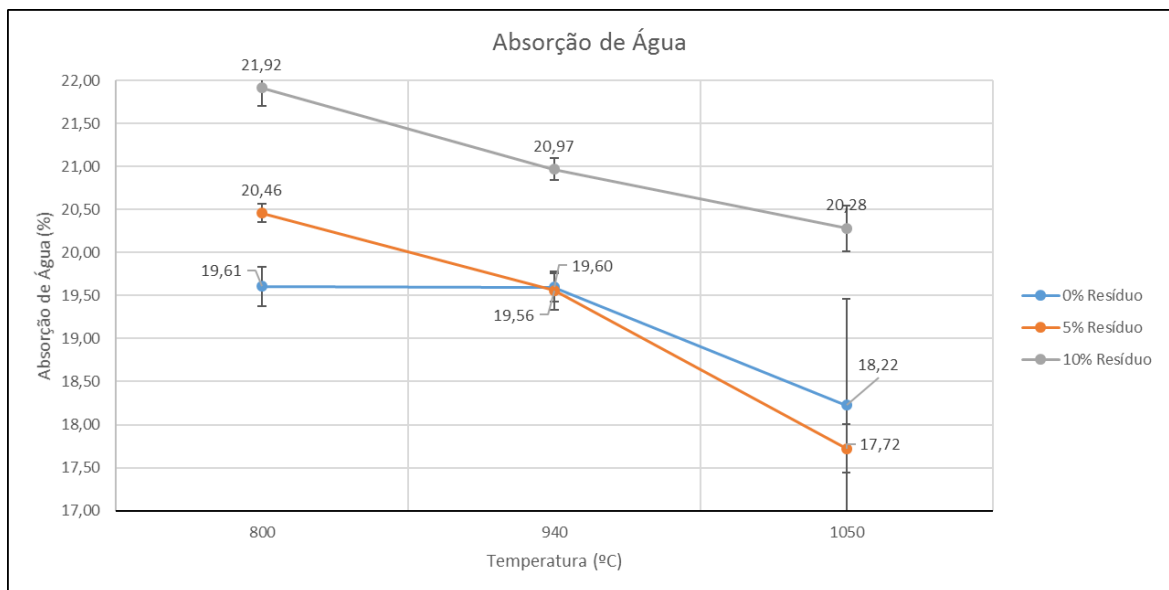


Figura 5 - Comparação da absorção de água dos corpos de prova em três temperaturas

O comportamento da absorção de água está relacionado à microestrutura do material. Segundo (GUIMARÃES, 2017), esta propriedade determina o nível de porosidade aberta das peças cerâmicas, e seu incremento pode ocorrer pelos seguintes motivos: baixo grau de empacotamento dos corpos de prova, elevada perda de massa durante a queima e baixo teor de óxidos fundentes.

4.1.4 Curvas de gresificação

Representando simultaneamente as variações da absorção de água e retração linear da peça com a temperatura de queima, as curvas de gresificação foram construídas para acompanhar o processo de densificação das massas (GUIMARÃES, 2017).

A Figura 6 mostra as curvas de gresificação dos corpos de prova cerâmicos ensaiados. Nota-se que o comportamento tanto para a absorção de água quanto a retração linear é similar em todo intervalo de temperatura. No processamento industrial, a retração linear na queima ótima é menor que 1,5% sendo aceitável entre 1,5 a 3% (GUIMARÃES, 2017 apud DONDI, 2006).

De acordo com a NBR 15270-3 (ABNT, 2005), os valores de absorção de água aceitáveis para blocos de vedação são de 8 a 22% e para telhas, o máximo aceitável é de 20% (ABNT NBR 15310, 2005).

Os resultados obtidos demonstram que os blocos cerâmicos ensaiados estão situados dentro da faixa aceitável tanto para a retração linear da queima quando para a absorção de água.

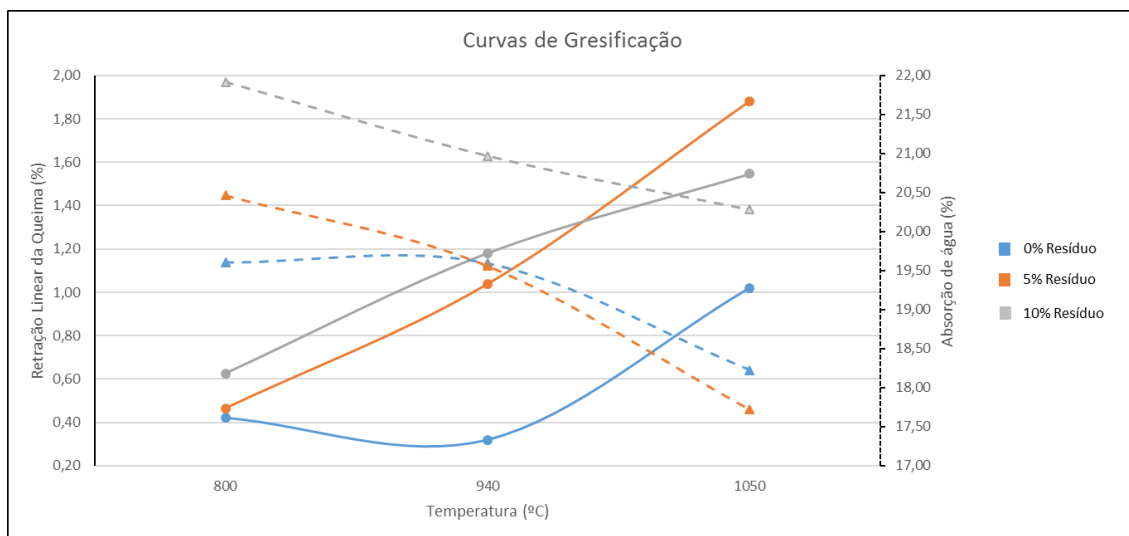


Figura 6 - Curvas de gresificação dos corpos de prova ensaiados

4.1.5 Porosidade aparente das peças cerâmicas

Representando a quantidade de poros abertos presentes na amostra, a tabela 4 apresenta os valores de porosidade aparente das peças cerâmicas estudadas, com suas respectivas concentrações e desvios padrões nas temperaturas de queima.

Tabela 4 - Porosidade aparente (em %) dos corpos de prova

Temperatura (°C)	Porosidade Aparente (%)		
	0% Resíduos	5% Resíduos	10% Resíduos
800	34,38 ± 0,0,35	35,50 ± 0,17	37,19 ± 0,16
940	34,60 ± 0,22	34,73 ± 0,22	36,18 ± 0,19
1050	32,92 ± 1,82	32,26 ± 0,35	35,41 ± 0,36

Na figura 7, observa-se que a porosidade aparente dos corpos de prova cerâmicos também é influenciada tanto pela temperatura de queima, quanto pela incorporação do resíduo de cinza da queima de madeira. O comportamento da porosidade aparente foi semelhante ao da absorção de água, apresentando uma tendência de diminuição da porosidade com o aumento da temperatura. Na concentração de 0%, a porosidade aparente apresenta um acréscimo até a temperatura de 940°C e uma diminuição de 940°C a 1050°C, em função da sinterização, com a densificação dos corpos de prova. Para a concentração de 5%, houve o menor valor de porosidade aparente na temperatura de queima máxima a 1050°C. Com a substituição de 10% de resíduo, observa-se a diminuição da porosidade aparente em todas as temperaturas de queima, mesmo após a temperatura de início de sinterização. Os resultados de Santos (2016) também mostraram uma oscilação parecida para esses dois parâmetros.

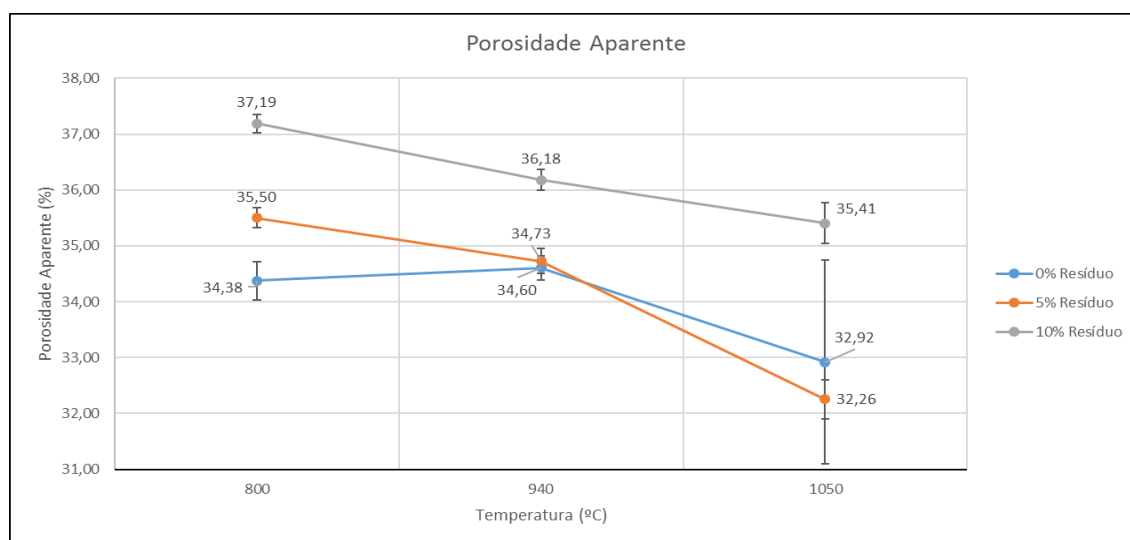


Figura 7- Comparação da porosidade aparente dos corpos de prova em três temperaturas

4.1.6 Massa Específica Aparente

A Tabela 5 mostra os resultados da massa específica aparente dos corpos de prova cerâmicos queimados. A massa específica aparente é a razão entre o corpo de prova seco e seu volume aparente, sendo influenciada tanto pela temperatura de queima, quanto pela incorporação do resíduo de cinza da queima de madeira. A figura 8 demonstra, conforme esperado, que o aumento da temperatura de queima aumentou a densificação das peças cerâmicas produzidas para todas as concentrações de resíduos, sobretudo a partir de 940°C, devido ao processo de sinterização. Os menores valores de massa específica aparente foram atingidos na concentração de 10% de resíduo, em todas as temperaturas de queima, provavelmente provocados pela maior concentração de matéria orgânica, gerando diminuição da densificação. Efeitos de sinterização e perda de massa nessa concentração (10%) e nessa temperatura (1050°C) passam a ser concorrentes. A concentração de 5% de resíduo atingiu o maior valor de massa específica aparente a 1050°C, demonstrando a densificação pós sinterização.

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

Temperatura (°C)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)		
	0% Resíduos	5% Resíduos	10% Resíduos
800	1,75 ± 0,01	1,74 ± 0,04	1,70 ± 0,01
940	1,77 ± 0,00	1,78 ± 0,01	1,73 ± 0,02
1050	1,81 ± 0,01	1,82 ± 0,01	1,75 ± 0,01

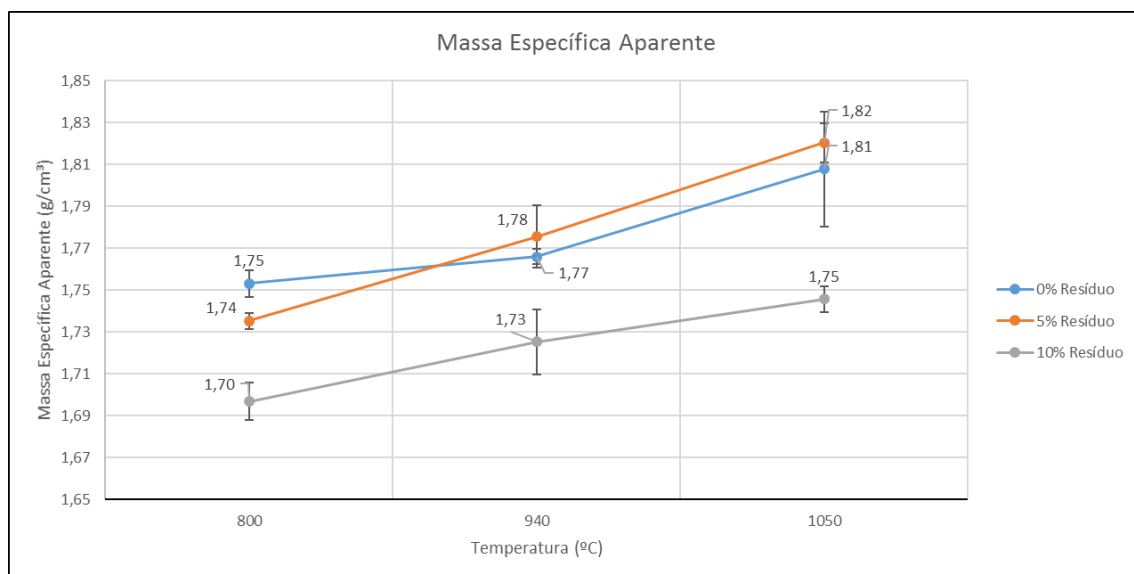


Figura 8 - Comparação da massa específica aparente dos corpos de prova em três temperaturas

4.1.7 Resistência Mecânica

Na tabela 6 estão os resultados dos ensaios de resistência mecânica das amostras, indicando a capacidade de suportar esforços exercidos por cargas que podem levar a fissuras e rupturas.

Tabela 6 - Tensão de Ruptura à Flexão (MPa) dos corpos de prova

Temperatura (°C)	Tensão de Ruptura à Flexão (MPa)		
	0% Resíduos	5% Resíduos	10% Resíduos
800	1,31 ± 0,15	2,31 ± 0,14	2,59 ± 0,31
940	1,48 ± 0,12	2,32 ± 0,05	2,71 ± 0,16
1050	1,62 ± 0,16	3,02 ± 0,27	2,54 ± 0,24

De forma geral, a resistência à flexão de três pontos dos corpos de prova cerâmicos também é influenciada tanto pela temperatura de queima, quanto pela incorporação do resíduo de cinza da queima de madeira. Considerando a concentração de 0% de incorporação de resíduo, a resistência mecânica teve um aumento quase linear de acordo com a elevação de temperatura. Para as amostras com 5% de incorporação, houve um pequeno crescimento da temperatura de 800°C para 940°C, mas um aumento considerável acima de 940°C, atingindo a maior resistência na temperatura de 1050°C de todas as concentrações. Com 10% de resíduo, a resistência mecânica apresentou aumento comparando os valores a 800°C e 940°C, porém, acima de 940°C houve um decréscimo considerável, provavelmente devido à presença de matéria orgânica.

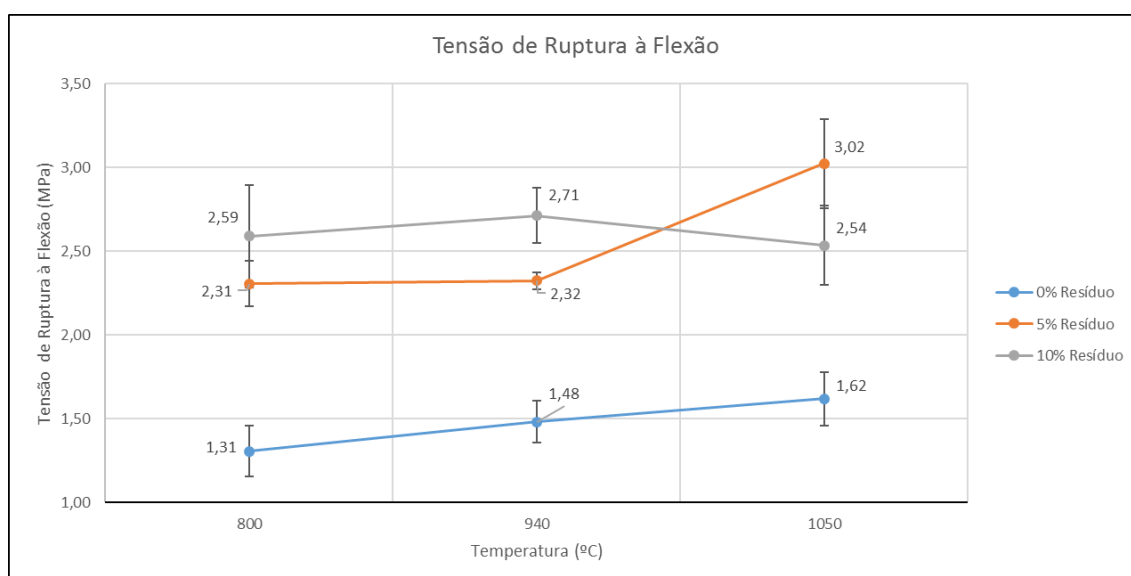


Figura 9 - Comparação da Resistência Mecânica dos corpos de prova em três temperaturas

Os resultados de resistência mecânica corroboram com as propriedades tecnológicas apresentadas anteriormente. É interessante destacar que os ensaios foram realizados com alta taxa de aquecimento dos corpos de prova (25°C/min), o que não é realizado comumente nas indústrias cerâmicas. Guimarães (2017) avaliou o ciclo de queima nas propriedades tecnológicas das cerâmicas vermelhas utilizando altas taxas de aquecimento. Dentre os resultados obtidos a taxa de 15°C/min foi apontada como a mais favorável às propriedades tecnológicas avaliadas.

A figura 10 compara o comportamento da tensão de ruptura à flexão em relação à porosidade aparente. Pode-se observar que para as concentrações de 5% e 10% de resíduo, a redução da porosidade aparente coincide com o aumento da tensão de ruptura à flexão de acordo com a elevação da temperatura. Os melhores resultados finais (1050°C) foram para a concentração de 5%, por mais que a 940°C o material com incorporação de 10% de resíduo estava apresentando um melhor comportamento. Isso está relacionado ao fato de que, por mais que o aumento da incorporação de cinzas proporcione um aumento de óxidos fundentes, o que teoricamente deveria aumentar a densificação, esse material também possui matéria orgânica, desfavorecendo essa propriedade. Sendo assim, a 1050°C os corpos de prova com incorporação de 0% de resíduo apresentaram os menores valores de resistência, devido à ausência das cinzas e o aumento de óxidos fundentes, mas a 10% de resíduo não apresentaram os maiores valores, uma vez que o incremento de cinza proporcione aumento de matéria orgânica.

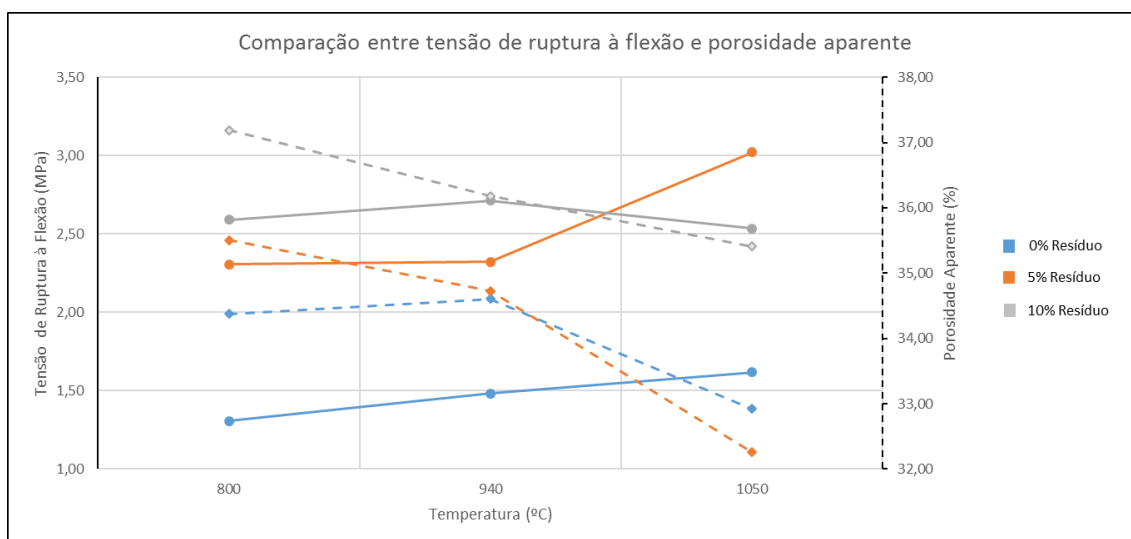


Figura 10 - Comparação entre tensão de ruptura à flexão e porosidade aparente

4.2 Comparação dos corpos de prova confeccionados com produtos comerciais

Os produtos comerciais foram ensaiados para resistência mecânica e absorção de água. As Figuras (11) e (12) respectivamente, demonstram os resultados obtidos.

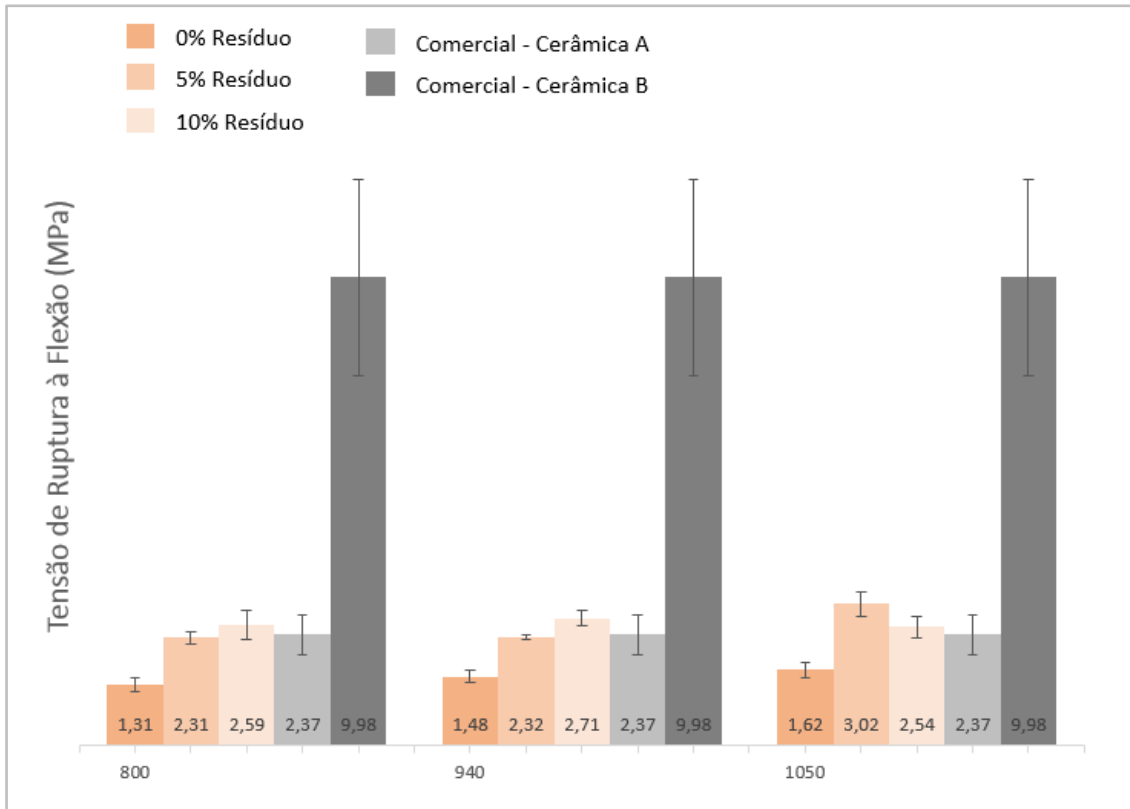


Figura 11- Comparação da Resistência Mecânica dos corpos de provas laboratoriais e comerciais

Pode-se observar uma considerável diferença com a relação de resistência mecânica do produto comercial da Cerâmica B aos demais. Essa discrepância se dá pelo fato desse tijolo cerâmico ornamental conter cimento em sua massa, possibilitando o processo de secagem através da cura do mesmo e aumentando consideravelmente a resistência. Além disso, o mesmo possui os constituintes em diferentes granulometrias, favorecendo o processo de densificação. Os tijolos cerâmicos ornamentais da empresa A possuem uma composição bem próxima aos corpos de prova confeccionados na pesquisa, porém, sem a quantidade de resíduo. A empresa A utiliza para a queima dos tijolos cerâmicos ornamentais uma temperatura em torno de 940°C e uma baixa taxa de aquecimento (2°C/min).

Percebe-se que a maioria das amostras com adição de resíduos cinzas apresentaram resistência mecânica superior ao produto comercial da Cerâmica A, que

utiliza como matéria prima apenas as argilas. Em todas as temperaturas de queima a resistência mecânica manteve-se acima dos produtos da empresa A. Considerando as diferentes temperaturas de queima e as diferentes concentrações, nota-se que a 940°C tem-se o maior valor de resistência mecânica. Nesse ponto, também confere uma resistência maior do que a empresa A e sugere que, para essas condições, essa é a melhor temperatura de queima, coincidindo com a mesma aplicada pela empresa A. Sendo assim, os resultados indicam a possibilidade de incorporação de resíduos cinzas nesses produtos comerciais.

A Figura 12 abaixo compara a absorção de água dos corpos de prova cerâmicos confeccionados em função da quantidade de resíduo de cinzas incorporado e da temperatura com os produtos comerciais das empresas A e B.

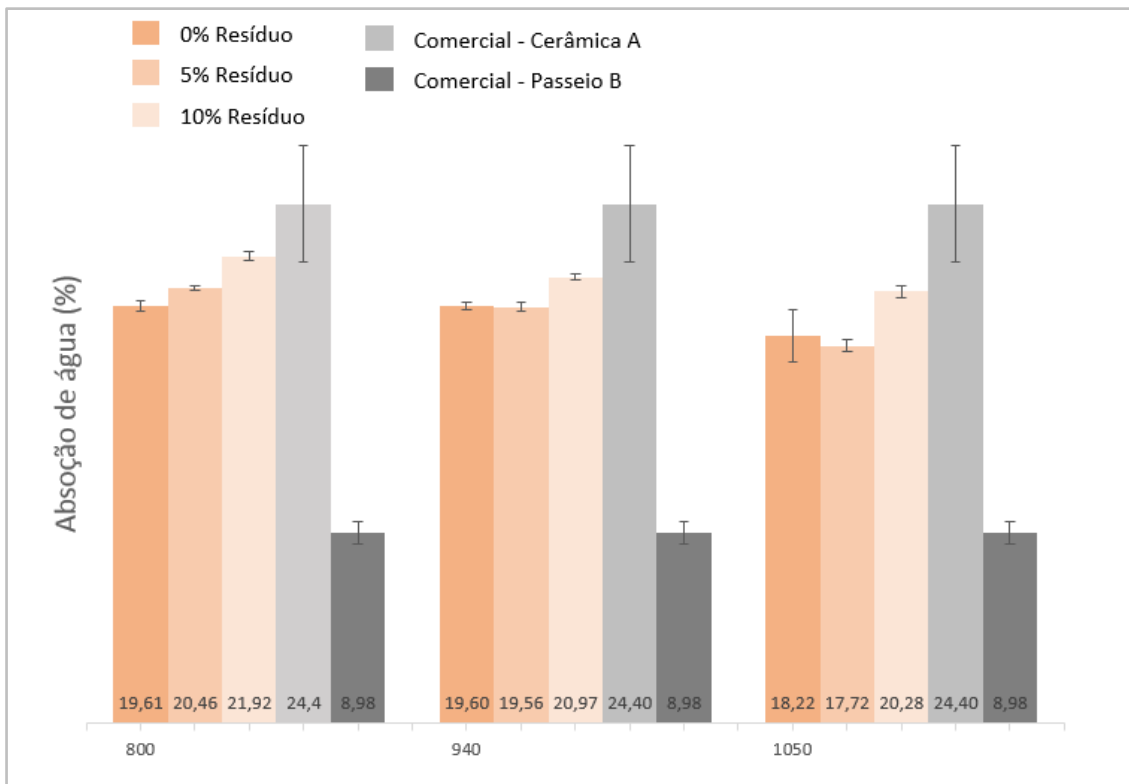


Figura 12 - Comparação da Absorção de Água dos corpos de provas laboratoriais e comerciais

Percebe-se que o aumento da temperatura de sinterização dos corpos de prova cerâmicos tende a diminuir a absorção de água nas diferentes composições de resíduo cinzas. Considerando a maior temperatura de queima, 1050°C, o corpo de prova com 5% de resíduo de cinzas apresentou o melhor resultado de redução na absorção de água. Os corpos de prova da cerâmica A apresentaram maiores valores de absorção de água que os

corpos de prova laboratoriais em todas as temperaturas. Os corpos de prova da cerâmica B apresentaram os menores valores de absorção de água, provavelmente em função das suas características de composição combinada com a ação impermeabilizante do cimento.

A Figura 13 mostra os mosaicos para todas as amostras ensaiadas no laboratório com a incorporação do resíduo de cinzas da madeira.

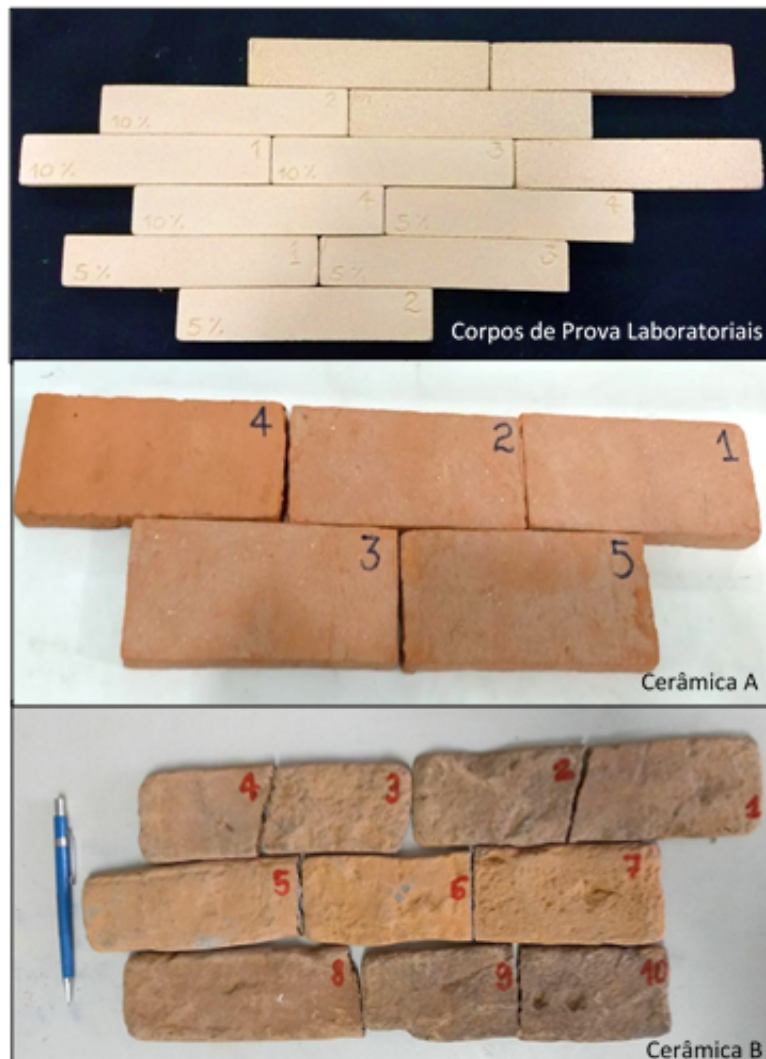


Figura 13 - Mosaico de todas as amostras ensaiadas

Os corpos de prova da Cerâmica B apresentam uma rusticidade maior que os demais, provavelmente pelo método de conformação das peças, podendo ser conformados artesanalmente, em matrizes de silicone ou extrudados e no final tendo a sua superfície alterada com rolos de laminação. Os corpos de prova da Cerâmica A são conformados artesanalmente, manifestando assim uma irregularidade superior à dos laboratoriais, que se mostram os mais uniformes, uma vez que foram conformados por prensagem uniaxial.

A Figura 14 mostra a diferença granulométrica entre as amostras analisadas.



Figura 14 - Corpos de prova rompidos

Os corpos de prova laboratoriais tiveram suas matérias primas peneiradas em 60 mesh, possuindo uma granulometria mais refinada e uniforme. As amostras da Cerâmica A se mostram menos uniforme e mais grosseiras, assim como as da Cerâmica B, que demonstram ser ainda mais heterogêneas que as demais, tendo partículas grosseiramente maiores. Dessa forma, as altas taxas de resistência mecânica e baixas de absorção de água para os corpos de prova da Cerâmica B podem estar associadas, além da adição de cimento, ao empacotamento das partículas que os constituem, pois com a correta relação e proporção do tamanho adequado dos materiais particulados, os vazios são preenchidos com partículas menores.

A Figura 15 apresenta imagens dos corpos de prova queimados na temperatura de 940°C e com taxa de queima de 25°C/min. Observa-se que ocorreu uma variação de tonalidade nas superfícies da amostra, mas sem formação de bolhas, trincas ou aparecimento de “coração negro”. De acordo com Dutra (2007) apud. Albero (1991), a causa principal do efeito das manchas é a carência de oxigênio na parte interior da peça,

produzido pela redução do óxido de ferro. Porém, notou-se que nas diferentes temperaturas de queima e na forma de disposição dos corpos de prova no forno pode haver diferença na homogeneidade da coloração final. Observou-se um aumento no número de corpos de prova manchados com o aumento da temperatura de queima e a mudança na disposição dentro do forno. Inicialmente os corpos de prova foram dispostos deitados dentro do forno, posteriormente foram dispostos conforme a Figura 15. É possível que com o aumento da temperatura, aumento da concentração de resíduos na composição e um menor espaçamento entre os corpos de prova, tenha dificultado a saída do maior volume de gases liberados na queima. Mais testes posteriores serão necessários para uma melhor investigação. A uniformidade em relação à tonalidade dos produtos comerciais é um fator importante considerando inovação e decoração com produtos de qualidade.



Figura 15 - Corpos de prova queimados

5. CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados apresentados, pode-se concluir que o objetivo da pesquisa foi alcançado. Foi demonstrado que a incorporação de diferentes concentrações de resíduos de cinzas resultantes da queima de madeira de eucalipto pode ser utilizada na composição da massa cerâmica utilizada para produção de tijolos aparentes para uso ornamental. Comparando os resultados obtidos dos corpos de prova laboratoriais com as plaquetas rústicas vendidas comercialmente pela empresa A, conclui-se que os resultados com incorporação são ainda ligeiramente melhores. Contudo, considerando dentre as diferentes concentrações de resíduo aplicadas, a concentração com 5% apresentou os melhores resultados de todas as propriedades tecnológicas investigadas. Porém, na retração linear com a adição de 10% de resíduo de cinzas, a diferença dos resultados não foi destoante.

Focando em uma aplicação para tijolos aparentes para uso ornamental de revestimento interno e externo, onde o nível de resistência mecânica, absorção de água, retração linear e porosidade não são determinantes para a rejeição do produto em comparação com as placas cerâmicas para revestimentos (pisos, azulejos), pode-se avaliar a viabilidade prática, econômica e social positiva dessas incorporações nos produtos comerciais. Diferentemente das placas cerâmicas para revestimentos que possuem normas internacionais e nacionais (ISO 13006, ISO 10545, NBR 13816 - NBR 13817 - NBR 13818) norteadores em relação às propriedades, ensaios requeridos e certificação desses materiais ao final da produção, os tijolos aparentes para uso ornamental de revestimento interno e externo ainda não possuem normalização brasileira.

As propriedades tecnológicas foram influenciadas pela diferença de temperatura de queima e quantidade de incorporação de resíduo de cinzas. Maiores temperaturas de sinterização possibilitam a formação de fase líquida dos fundentes presentes nas cinzas da madeira (óxidos de sódio (Na_2O) e potássio (K_2O)), favorecendo o processo de densificação e, conseqüentemente maior resistência mecânica. Mostrou-se possível a utilização de taxas de aquecimento mais rápidas, possibilitando redução de custo na produção industrial, porém, para utilização como tijolos ornamentais, o efeito da variação de tonalidade deve ser analisado com maior precisão.

O estudo da incorporação de resíduos apresentou uma alternativa viável para a empresa A, parceira dessa pesquisa, destinar corretamente as cinzas da madeira de eucalipto, provenientes do seu próprio processo produtivo. Além de possibilitar a redução de custos no processo, a logística reversa interna possibilita a classificação do tipo de energia utilizada como “limpa”, uma vez que se tenha as lenhas originadas em plantações

de eucalipto, logo, de reflorestamento, e os substratos residuais incorporados nos próprios produtos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA – ABC – ABCERAM. Disponível em: <www.abceram.org.br>. Acesso em 10 maio 2018.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2005) **Telhas – Terminologia, requisitos e métodos de ensaio**: NBR 15310. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2005) **Componentes Cerâmicos Parte 3: Blocos cerâmicos para alvenaria estrutural e vedação – Métodos de ensaio**: NBR 15270-3. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (2004) **Resíduos sólidos - Classificação**: NBR 10004. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997) **Placas Cerâmicas para Revestimento - Terminologia**: NBR 13816. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997) **Placas Cerâmicas para Revestimento - Classificação**: NBR 13817. Rio de Janeiro-RJ.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1997) **Placas Cerâmicas para Revestimento – Especificações e Métodos de Ensaio**: NBR 13818. Rio de Janeiro-RJ.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA CERÂMICA - ANICER.

Dados do setor. Disponível em: <<http://www.anicer.com.br>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

ANFACER – Associação Nacional de Fabricantes de Cerâmica para Revestimento. História da Cerâmica: Origem da Cerâmica no Brasil. Disponível em: <<http://www.anfacer.org.br>>. Acesso em: 08 de março de 2018.

BIANCHI, R. **Parece tijolinho, mas não é**: Uma seleção de revestimentos com os respectivos preços que imitam o material rústico. 12/05/2017. Disponível em: <<https://arquiteturaeconstrucao.abril.com.br/materiais/parece-tijolinho-mas-nao-e/>>. Acesso em: 10 de março de 2018.

Borlini, M. C. *et al.* **Cinza da lenha para aplicação em cerâmica vermelha. parte I: características da cinza.** 2005, vol.51, n.319, pp. 192-196.

Brasil. Decreto Nº 97.632, de 10 de abril de 1989. Dispõe sobre a regulamentação do Artigo 2º, inciso VIII, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e dá outras providências, Brasília,DF. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/d97632.htm>. Acesso em: Abril, 2018.

Brasil. Decreto Nº 88.351, de 1 de junho de 1983. Regulamenta a Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, e a Lei nº 6.902, de 27 de abril de 1981, que dispõem, respectivamente, sobre a Política Nacional do Meio Ambiente e sobre a criação de Estações Ecológicas e Áreas de Proteção Ambiental, e dá outras providências., Brasília,DF. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-88351-1-junho-1983-438446-publicacaooriginal-1-pe.html>>. Acesso em: Abril, 2018.

Cabral, Marsis et al. **A Indústria de Cerâmica Vermelha e o Suprimento Mineral no Brasil: Desafios para o Aprimoramento da Competitividade.** Cerâmica Industrial, [s.l.], v. 17, n. 1, p.36-42, 2012. Editora Cubo.

Cargnin, M.; Souza, S. M. A. G.; Souza, A. A. U.; NONI, A. J. **Determinação de parâmetros cinéticos da sinterização de revestimentos cerâmicos de monoqueima do tipo BIIa,** Revista Cerâmica Industrial, v. 57 p. 461-466, 2011.

Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA (1986). Resolução nº 001 de 23 de janeiro de 1986. Diário Oficial da União.

Cruz, F. J. R. **Utilização de Cinza de Aveloz de Fornos Cerâmicos Para Produção de Tijolos e Telhas,** 2012. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia de Materiais Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Natal.

DONDI, M., **Caracterização Tecnológica dos Materiais Argilosos: Métodos Experimentais e Interpretação dos Dados,** Revista Cerâmica Industrial, p. 36-40, 2006.

Dutra, R. P. S. **Efeito da velocidade de aquecimento nas propriedades de produtos da cerâmica estrutural**, 2007. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Civil e Ambiental, Universidade Federal do Pernambuco – Centro Acadêmico do Agreste, Recife.

Dutra, R. P. S.; Varela, M. L.; Nascimento, R. M.; Gomes, U. U; Martinelli, A. E.; Paskocimas, C. A., **Estudo comparativo da queima rápida com a queima tradicional nas propriedades de materiais cerâmicos de base argilosa**. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 55, n. 333, p. 100-105, 2009.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA - Perguntas e Respostas - Eucalipto. Disponível em: <<http://https://www.embrapa.br/florestas/transferecia-de-tecnologia/eucalipto/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: maio de 2018.

Foelkel, C.. Eucalyptus Online Book & Newsletter. Disponível em: <www.eucalyptus.com.br>. Acesso em abril de 2018.

Gomes, C.F. (1988) Argilas - o que são e para que servem. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 475p.

Gomes, F.P. S., (2016) **Valorização de Resíduo Cinza de Serragem de Madeira na Produção de Piso Cerâmico Vitrificado**. Dissertação de Mestrado do Programa de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense- UENF, Campos dos Goytacazes.

Gonzalez, A. D. **Caracterização e análise comparativa de cinzas provenientes da queima de biomassa**, 2014. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, São Paulo.

Guimarães, C. A. O. **Avaliação do Ciclo de Queima nas Propriedades Tecnológicas de Cerâmica Vermelha**, 2017. Dissertação de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências e Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense - UENF, Campos dos Goytacazes.

Holanda, J. N. F.; Souza G. P.; Thurler, L. M. **Avaliação de Algumas Propriedades Mecânicas de Argilas Cauliníticas da Região de Campos dos Goytacazes/RJ.** CBECIMAT - Congresso Brasileiro De Engenharia E Ciência Dos Materiais, 14, Anais p. 09701 a 09710, São Pedro/SP, 2000.

Holanda, J. N. F.; Pinheiro, B. C. A.; **Efeito da temperatura de queima em algumas propriedades mecânicas de cerâmica vermelha.** Revista Cerâmica Industrial, v. 56, p. 237-243, 2010.

INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). Brasil – Informações ao Consumidor: Produtos Analisados – Revestimentos Cerâmicos (pisos e azulejos). Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/produtos/revestimentos.asp>>. Acesso em: Maio de 2018.

Lei Federal nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6938.htm>. Acesso em: Abril de 2018.

LUCENA, M. M. **Efeito da introdução de resíduos de cinza de forno cerâmico em massa para cerâmica estrutural.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2007.

Maia, F.S. (2012) **Avaliação de Massas Cerâmicas, Processamento e Propriedades dos Produtos de Cerâmica Vermelha do Polo Cerâmico de Campos dos Goytacazes.** Dissertação de Mestrado do Programa de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense- UENF, Campos dos Goytacazes.

Millogo, Y. M.; Seynou, R.; Ouedraogo, K.; Traore, J. “Firing transformations and properties of tiles from a clay from Burkina Faso”, Appl. Clay Sci. 51 p. 499, 2011.

Motta, J. F. M.; Zanardo, A., Cabral, M.J., **As Matérias-Primas Cerâmicas. Parte I: O Perfil das Principais Indústrias Cerâmicas e Seus Produtos,** Revista cerâmica Industrial. 2001. p. 29 e 32.

Nakamura, J. **Tecnologia**: Em pisos, paredes ou fachadas, especificação de revestimento cerâmico deve considerar classificação e característica do material, como índice de absorção de água, resistência, mecânica, química e a manchas. Abril/2015. Disponível em: <<http://au17.pini.com.br/arquitetura-urbanismo/133/em-pisos-paredes-ou-fachadas-especificacao-de-revestimento-ceramico-deve-22715-1.aspx>>. Acesso em: Março de 2018.

Nakamura, J. **Tecnologia**: Debate: Revestimentos cerâmicos. Maio/2009. Disponível em: <<http://au17.pini.com.br/arquitetura-urbanismo/182/debate-revestimentos-ceramicos-134781-1.aspx>>. Acesso em: Março de 2018.

Nolasco, A. M.; Guerrini, I. A.; Benedetti, V. **Uso de resíduos urbanos e industriais como fonte de nutrientes e condicionadores de solos em plantios florestais**. In: Simpósio de Fertilização e Nutrição Florestal, 1999, Piracicaba.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Priorização de Gestão de Resíduos Sólidos nas Cidades Aumenta, diz Banco Mundial**. Estados Unidos, 2016. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/>>. Acesso em: 14 de junho de 2017.

PETERSON, M. *et al.* **Estudo da Incorporação de Cinza Proveniente da Queima de Lenha de Eucalipto na Formulação de Massa de Cerâmica Vermelha de uma Indústria de Cerâmica Estrutural do Sul Catarinense**. Revista da Unifebe, n.15.

Resende, D. S. **Estudo do efeito da incorporação de cinzas de cavaco de eucalipto como material cimentício suplementar**, 2014. Tese de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP, Minas Gerais.

Pinto, M. F.; Sousa, J. G.; Holanda, J. N. F.; **Efeito do ciclo de queima sobre as propriedades tecnológicas de uma massa cerâmica vermelha para revestimento poroso**. Revista Cerâmica Industrial, São Paulo, v. 51, 2005.

Santos, P. S. **Tecnologia de Argilas: aplicada às argilas brasileiras**, Universidade de São Paulo, v. 2: Aplicações, São Paulo/SP, 1975.

Santos, F., (2016) **Influência do Resíduo de Cinza de Serragem de Madeira nas Propriedades Técnicas de Cerâmica Vermelha**. Dissertação de Mestrado do Programa de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense-UENF, Campos dos Goytacazes.

Silva, M. N. P.; Silva, M. N. P.; Barrionuevo, B. U. S.; Feitosa, I. M; Silva, G. S., D. O. Revestimentos Cerâmicos e suas aplicabilidades. **Cadernos de Graduação**, Maceió, v. 2, 2015.

Vaske N. R. (2012) **Estudo Preliminar da Viabilidade da Cinza proveniente de Filtro Multiciclone pela Combustão de Lenha de Eucalipto em Caldeira Fumotubular como Adição ao Concreto**. Tese de Doutorado do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Rio Grande do Sul.

Vieira, C. M. F., Monteiro, S. N. (2009). Incorporation of solid wastes in red ceramics – **an updated review**. *Revista Matéria*, v. 14, n. 3, p. 881-905.