

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**FERNANDA MEIRELES HACKBART**

**MATERIAL PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE LODO DE  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, LAMA DE POLIMENTO DE  
MÁRMORE E RESÍDUO DE PRODUÇÃO DE CAL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CURITIBA**

**2015**

FERNANDA MEIRELES HACKBART

**MATERIAL PARA CONSTRUÇÃO CIVIL A PARTIR DE LODO DE  
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA, LAMA DE POLIMENTO DE  
MÁRMORE E RESÍDUO DE PRODUÇÃO DE CAL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito principal para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Civil” – Área de Concentração: Materiais da Construção Civil.

Orientador: Prof. Vsévolod Mymrine, PhD.

CURITIBA

2015



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao Prof. DSc. Vsévolod Mymrine pelo apoio incondicional durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos laboratórios de prensas e de microscopia eletrônica de varredura da UTFPR e, ao LAMIR (Laboratório de Minerais e Rochas) da UFPR, pela colaboração no desenvolvimento das análises químicas e mineralógicas.

Agradeço ao Prof. Dr. Haroldo de Araujo Ponte e ao Prof. Dr. André Nagalli que fizeram parte da banca examinadora, pela contribuição a este trabalho.

## RESUMO

HACKBART, F. M. Material para a construção civil a partir de lodo de estação de tratamento de água, lama de polimento de mármore e resíduos de produção de cal. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

O crescimento populacional acelerado é o grande motivador para o desenvolvimento do setor da construção civil e o aumento na demanda por água potável, tendo como consequência, um aumento gradativo na geração de resíduos sólidos. Dessa forma, este trabalho foi realizado com o intuito de reciclar resíduos industriais e municipais incorporando-os em materiais para a construção civil. O compósito produzido a partir de lodo de estação de tratamento de água e lama de polimento de mármore, aplicando resíduo de produção de cal como ligante, foi avaliado quanto ao seu desempenho mecânico e sua estrutura morfológica. As matérias-primas foram caracterizadas quanto sua composição química, mineralógica, morfológica, granulométrica e, também, o teor de umidade. Com os materiais caracterizados, foram desenvolvidas nove composições variando-se o teor de lodo de estação de tratamento de água entre 25 e 50%, o teor de lama de polimento de mármore entre 35 e 50% e o resíduo de produção de cal entre 10 e 30%. Os compósitos foram submetidos a ensaios de resistência mecânica, absorção de água, análise química, mineralógica e morfológica. Os materiais desenvolvidos apresentaram, no 3° dia de cura, valor de resistência mecânica máxima de 4,65 MPa, no 7° dia 6,36 MPa, no 14° dia 6,74 MPa, no 28° dia 5,98 MPa, no 60° dia 8,52 MPa, no 90° dia 11,75 MPa e no 180° dia 12,06 MPa. Os valores de absorção de água aos 28 dias de cura variaram de 16,27 a 26,32% e aos 90 dias, de 13,57 a 23,56%.

**Palavras-chave:** Lodo de estação de tratamento de água. Lama de polimento de mármore. Resíduo da produção de cal. Materiais de construção civil. Novos materiais.

## ABSTRACT

HACKBART, F. M. Construction material from water treatment sludge, marble polish mud and lime production waste. 2015. Dissertation (MSc. in Materials Engineering) - Graduate Program in Civil Engineering, Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2015.

The rapid population growth is the great motivator for the development of the construction industry and the increased demand for drinking water, resulting in a gradual increase in the generation of solid waste. Thus, this work was carried out in order to recycle industrial and municipal wastes incorporating them into materials for civil construction. The composite produced from water treatment sludge and marble polishing mud, applying lime production waste as a binder, was evaluated for its mechanical performance and its morphological structure. The raw materials were characterized for their chemical composition, mineralogy, morphology, particle size and also the moisture content. With the featured materials nine compositions have been developed varying the content of the water treatment sludge between 25 to 50%, marble polishing mud between 35 to 50% and the lime production waste between 10 to 30%. The composites were subjected to mechanical strength tests, water absorption, chemical and mineralogical composition and morphology. The developed materials presented, on the 3<sup>rd</sup> day of hydration, maximum strength value of 4.65 MPa, the 7<sup>th</sup> day 6.36 MPa, on the 14<sup>th</sup> day 6.74 MPa, the 28<sup>th</sup> day 5.98 MPa, on the 60<sup>th</sup> day 8.52 MPa at 90<sup>th</sup> day 11.75 MPa and 180<sup>th</sup> day 12.06 MPa. The water absorption values after 28 days of hydration ranged from 16.27% to 26.32% and after 90 days, from 13.57% to 23.56%.

**Keywords:** Water treatment sludge. Marble polishing mud. Lime production waste. Construction materials. New materials.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Sistema de tratamento de água convencional. ....	17
Figura 2 - Material fino em suspensão (a) e ilha de vegetação decorrente ao assoreamento (b). ....	19
Figura 3 – Distribuição da produção de cal no Brasil. ....	23
Figura 4 – Extração de calcário, Ibirité – MG. ....	25
Figura 5 - Etapas e principais produtos na indústria de rochas ornamentais. ....	28
Figura 6 - Jazida de mármore branco. ....	31
Figura 7 - Disposição inadequada de resíduos do beneficiamento de mármore. ....	31
Figura 8 - Comparação de resistência à compressão do cimento de referência e das misturas. ....	33
Figura 9 - Fluxograma do programa experimental. ....	36
Figura 10 - Matérias-primas: LETA (a), LPM (b) e RPC (c). ....	36
Figura 11 - Curva Granulométrica do LETA utilizado na pesquisa. ....	37
Figura 12 - Composição mineralógica do LETA por DRX. ....	38
Figura 13 – Imagens resultantes da análise de microscopia eletrônica de varredura do LETA: 500x (a) e 5.000x (b). ....	39
Figura 14 - Curva Granulométrica da LMP utilizada na pesquisa. ....	40
Figura 15 - Composição mineralógica da LPM por DRX. ....	41
Figura 16 - Imagem resultante da análise de microscopia eletrônica de varredura da LPM: 5.000x (a) e 10.000x (b). ....	42
Figura 17 - Curva Granulométrica do RPC utilizado na pesquisa. ....	43
Figura 18 - Composição mineralógica do RPC por DRX. ....	44
Figura 19 - Imagem resultante da análise de microscopia eletrônica de varredura da RPC: 4.000x (a) e 10.000x (b). ....	45
Figura 20 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão até o 180º dia. ....	53
Figura 21 - Morfologia na composição 1: mistura inicial (a), 3 dias (b), 28 dias (c), 90 dias (d) com aumento de 5.000x. ....	55
Figura 22 - Morfologia na composição 7: mistura inicial (a), 3 dias (b), 28 dias (c), 90 dias (d) com aumento de 3.000x e 5.000x. ....	58
Figura 23 - Análise mineralógica da composição 1 nos diferentes tempos de cura. ....	60
Figura 24 - Análise mineralógica da composição 7 nos diferentes tempos de cura. ....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resistência à compressão e à tensão do cimento com agregado leve....	20
Tabela 2 - Composição de diferentes RPC e cal virgem.....	24
Tabela 3 - Classificação do mármore em função dos teores de MgO e CaO. ....	27
Tabela 4 - Proporção dos componentes das misturas para a produção do cimento.	33
Tabela 5 – Composição química do LETA por FRX (%). ....	38
Tabela 6 – Resultados da microanálise química por EDS do LETA (%). ....	39
Tabela 7 - Composição química do LPM através de FRX (%). ....	41
Tabela 8 - Resultados da análise de EDS da LPM (%). ....	42
Tabela 9 - Composição química do RPC por FRX (%). ....	44
Tabela 10 - Resultados da microanálise química por EDS do RPC (%). ....	45
Tabela 11 - Composições iniciais.....	46
Tabela 12 - Resultados de resistência à compressão uniaxial.....	51
Tabela 13 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria. ....	52
Tabela 14 - Absorção de Água.....	54
Tabela 15 - Microanálise química por EDS da mistura inicial da composição 1 (Figura 21 a). ....	56
Tabela 16 - Microanálise química por EDS da composição 1 após 90 dias (Figura 21 d). ....	57
Tabela 17 - Microanálise química por EDS da mistura inicial da composição 7 (Figura 22 a). ....	59
Tabela 18 - Composição mineralógica da composição 1 (continua). ....	60
Tabela 19 - Composição mineralógica da composição 1 (conclusão).....	61
Tabela 20 - Composição mineralógica da composição 7 (continua). ....	62
Tabela 21 - Composição mineralógica da composição 7 (conclusão).....	63

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
	<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>13</b>
	1.1.1 Objetivo Geral .....	13
	1.1.2 Objetivos Específicos .....	13
	<b>1.2 Justificativa .....</b>	<b>13</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>15</b>
	<b>2.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA).....</b>	<b>15</b>
	2.1.1 Definição .....	15
	2.1.2 Caracterização .....	16
	2.1.3 Produção.....	17
	2.1.4 Composição Química.....	18
	2.1.5 Impactos Ambientais.....	19
	2.1.6 Estado da Arte .....	20
	<b>2.2 Resíduos da produção de cal (RPC) .....</b>	<b>21</b>
	2.2.1 Definição .....	21
	2.2.2 Caracterização .....	22
	2.2.3 Produção.....	22
	2.2.4 Composição Química.....	24
	2.2.5 Impactos Ambientais.....	25
	2.2.6 Estado da Arte .....	26
	<b>2.3 Lama de Polimento de Mármore (LPM).....</b>	<b>27</b>
	2.3.1 Definição .....	27
	2.3.2 Caracterização .....	27
	2.3.3 Produção.....	28
	2.3.4 Composição Química.....	29
	2.3.5 Impactos Ambientais.....	30
	2.3.6 Estado da Arte .....	32

<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais .....</b>	<b>36</b>
3.1.1	Lodo de Estação de Tratamento de Água.....	37
3.1.2	Lama de Polimento de Mármore .....	40
3.1.3	Resíduo de Produção de Cal .....	43
<b>3.2</b>	<b>Preparação e Produção dos Compósitos .....</b>	<b>46</b>
3.2.2	Confeção dos Corpos de Prova .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>51</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização das Composições Desenvolvidas .....</b>	<b>51</b>
4.1.1	Resistência à Compressão Uniaxial.....	51
4.1.2	Absorção de Água.....	53
4.1.3	Análise das Composições Seleccionadas.....	55
4.1.3.1	Estrutura Morfológica da Composição 1 .....	55
4.1.3.2	Estrutura Morfológica da Composição 7 .....	57
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>65</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>66</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A água, além de ser essencial para sobrevivência tanto dos seres humanos quanto da fauna e da flora, apresenta uma vasta variedade de aplicações, do ponto de vista industrial, tais como: solvente, fluido de refrigeração, matéria-prima, agente de limpeza, meio de transporte, entre outros (OLIVEIRA, 2003). No Brasil, grande parte dos recursos hídricos encontra-se fora dos padrões de potabilidade, tornando-se indispensável seu tratamento (OLIVEIRA *et al.*, 2004).

Durante o processo de tratamento de água, produtos químicos são adicionados para remoção de impurezas e eliminação de microrganismos, acarretando na produção de resíduo, denominado lodo de estação de tratamento de água (LETA).

Com o crescimento populacional acelerado a demanda por água potável aumenta, gerando, assim, grandes quantidades de LETA.

Outra consequência do crescimento populacional é o desenvolvimento do setor da construção civil, que cresce de forma paralela, gerando grandes quantidades de resíduos como cimento e cal residual, pó e fragmento de pedras e rochas, material cerâmico, entre outros, representando cerca de 60% de todos os resíduos sólidos urbanos (PATRICIO *et al.*, 2013).

A indústria da construção civil é a maior consumidora de recursos naturais e, também, uma das maiores geradoras de resíduos (UTLU *et al.*, 2006).

Devido à grande quantidade de resíduos sólidos industriais e municipais produzidos, leis, normas e regulamentos estão cada vez mais restritivos quanto à disposição dos mesmos no meio ambiente tornando-se obrigatório o gerenciamento adequado desses resíduos.

No Brasil, podem ser citadas as resoluções 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, e 357 (complementada e alterada pela Res. 430 (CONAMA, 2011), que estabelece condições para o lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora, direta ou indiretamente nos corpos hídricos.

Com o intuito de aumentar a eficiência e o desempenho de edificações visando, assim, adequar a indústria da construção civil aos conceitos de

sustentabilidade, nações tecnologicamente desenvolvidas, tais como, Holanda, Alemanha, Bélgica, França e Japão, já vem estudando formas de utilizar resíduos como matéria-prima na produção de materiais para a construção civil há mais de 60 anos (ÂNGULO *et al.*, 2004; PATRICIO *et al.*, 2013).

As principais razões que motivam essas pesquisas são: esgotamento de matérias-primas não renováveis, menores emissões de poluentes, redução do consumo de energia, melhoria na saúde e segurança da população e, redução de custo (JOHN, 2000).

Resíduos, tais como, lodo de estação de tratamento de água (LETA), lama de polimento de mármore (LPM) e resíduos da produção de cal (RPC) vem sendo estudados e aplicados como: agregados em concreto (HUANG; WANG, 2013; KITOUNI; HOUARI, 2013; HEBHOUB *et al.*, 2011; SALES *et al.*, 2010; SOUZA, 2010; SALES; SOUZA, 2009; ALGIN; TURGUT, 2008; TURGUT, 2007; HUANG *et al.*, 2005; GALETAKIS; RAKA, 2004), compostos cerâmicos (KIZINIEVIC *et al.*, 2013; ANWAR *et al.*, 2011; TEIXEIRA *et al.*, 2011; MONTERO *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2005), cerâmica vermelha (WOLFF *et al.*, 2015; BILGIN *et al.*, 2012; HEGAZY *et al.*, 2012; DHANAPANDIAN *et al.*, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2008; OLIVEIRA; HOLANDA, 2008; SABOYA *et al.*, 2007; TURGUT; ALGIN, 2007; MELLO, 2006), vitrocerâmica (TOYA *et al.*, 2007), tijolos estabilizados com cimento (PORRAS *et al.*, 2008; SILVA, 2011; RODRIGUES; HOLANDA, 2013), tijolo leve (CHIANG *et al.*, 2009), tijolos de concreto (HAMZA *et al.*, 2011; CUNHA, 2007), tijolos estabilizados com cal (PATRICIO *et al.*, 2013; FIGUEIREDO *et al.*, 2012; ALVES *et al.*, 2005), pavimentação (MANGWANDI *et al.*, 2014; GANCEL *et al.*, 2012; AKBULUT e GÜRER, 2007; LIN *et al.*, 2006; OKAGBUE e ONYEOBI, 1999), matriz de concreto (DUARTE *et al.*, 2012; FELEKOGLU, 2007; RODRÍGUEZ *et al.*, 2010; YEN *et al.*, 2011), melhorador em argila (ALIABDO *et al.*, 2014; ARUNTAS *et al.*, 2010; SARKAR *et al.*, 2006; SEGADÃES *et al.*, 2005) e, poliamida (FERREIRA; NUNES, 2007).

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Criar um compósito com base em lodo de estação de tratamento de água, resíduos de produção de cal e lodo de polimento de mármore, para aplicação na construção civil.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Criar composições de materiais com propriedades mecânicas que atendam as normas vigentes;
- Estudar os processos físico-químicos de interação durante a formação das estruturas dos componentes nas misturas.

## **1.2 Justificativa**

O lançamento de lodo de estação de tratamento de água em corpos hídricos é considerado crime ambiental (BRASIL, 1998) por causar efeitos diretos ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna e flora aquática e, conseqüentemente, à saúde humana.

A poeira gerada na extração do calcário pode atingir quilômetros de distância, afetando todo o ambiente ao seu redor. Ao se depositar no solo, esta poeira pode alterar seu pH natural devido à alcalinidade alta.

Na indústria de rochas ornamentais grandes quantidades de resíduo de rocha são dispostos no leito dos rios causando sérios problemas ambientais como, por exemplo, a redução da porosidade e permeabilidade do solo (ÇELIK; SABAH, 2008).

Uma das formas para minimizar todos esses impactos consiste na reciclagem ou na reutilização desses resíduos. Na busca por soluções que minimizem os impactos ambientais, tem-se o setor da construção civil que, pelo volume de recursos naturais consumidos, pode ser largamente indicado para receber resíduos sólidos como matéria-prima.

Dentro da construção civil o uso de resíduos pode ajudar na redução de custos e prejuízos ao meio ambiente, relativos ao tratamento e/ou disposição final dos mesmos, bem como na redução de impactos ambientais gerados pela extração de matéria-prima.

O preparo de um material utilizando resíduos industriais e municipais pode resultar em uma atividade ambiental e economicamente viável para reduzir e/ou minimizar os impactos causados por esses resíduos, possibilitando, também, maior conscientização entre seus geradores.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura que trata dos principais assuntos relacionados à incorporação de resíduos industriais e municipais em materiais para construção civil. A obtenção de dados e informações referentes ao assunto deste trabalho foi realizada em publicações científicas especializadas, dissertações, livros e teses, tendo como objetivo apresentar, identificar e justificar a necessidade de considerar a utilização de novos materiais na construção civil.

### 2.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA)

#### 2.1.1 Definição

Para alguns autores, ele é caracterizado como um fluido não newtoniano, volumoso e tixotrópico, apresentando-se como gel quando em repouso e relativamente líquido quando agitado.

De acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004), em seu item 3.1, resíduos sólidos são:

Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultem de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Os lodos provenientes de estações de tratamento de água, de acordo com esta norma, são considerados resíduos não perigosos e estão enquadrados como classe IIA (não inerte), tornando-se necessário a disposição final de forma adequada, não causando danos ao meio ambiente e aos seres humanos (SILVA *et al.*, 2012).

O lançamento de LETA em corpos d'água é considerado crime ambiental (BRASIL, 1998) por causar efeitos diretos ao ambiente aquático do corpo receptor, provocando danos à fauna aquática e, conseqüentemente, à saúde humana.

### 2.1.2 Caracterização

As características do lodo dependem da qualidade inicial da água bruta, do processo e do tipo de coagulante utilizado no tratamento e do período que este permanece dentro do sistema.

Geralmente são formados por silte, areia, argila, metais, matéria orgânica e microrganismos como bactérias, vírus, algas e etc. Segundo a American Water Works Association (AWWA, 2001), o lodo possui características mais similares aos solos do que se comparado com o lodo de esgoto. Em geral, o carbono orgânico e o nitrogênio encontrados no LETA são mais estáveis, menos reativos e estão em menores concentrações.

De acordo com *Unified Soil Classification System*, todos os lodos são classificados como argila inorgânica de baixa ou média plasticidade (HUANG; WANG, 2013).

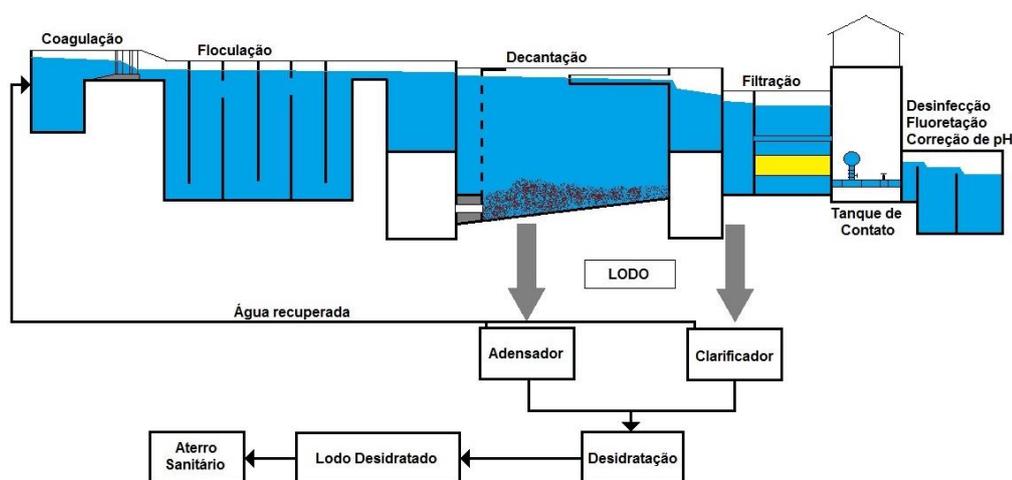
Com exceção dos gases dissolvidos, todas as impurezas encontradas na água bruta contribuem para a carga de sólidos. Essas impurezas podem ser classificadas por suas características físicas (tamanho e estado das partículas) e químicas (orgânico e inorgânico) (VON SPERLING, 2009).

Os coloides presentes na água constituem um sistema em que partículas de tamanho muito pequeno se encontram dispersas num meio homogêneo sem sofrer interferência das forças gravitacionais.

Os sólidos suspensos representam, aproximadamente, 75 a 90% dos sólidos totais presentes no lodo. A concentração de sólidos totais pode variar de 1.000 a 40.000 mg/L (RICHTER, 2001).

### 2.1.3 Produção

No Brasil, o tratamento convencional de água é o mais utilizado. Nesse tipo de tratamento a água bruta passa por vários processos até se tornar água potável (Figura 1). Para que o processo seja bem sucedido é necessário o uso de produtos químicos para desestabilizar as partículas indesejáveis presentes na água bruta.



**Figura 1 - Sistema de tratamento de água convencional.**

**Fonte: Adaptado de Coelho, 2008.**

Primeiramente, a água bruta passa pelo processo de coagulação, visando à remoção de cor e turbidez, onde são utilizados coagulantes para a formação de flocos com boas características de sedimentação (SILVA, 2011).

Para a remoção dos flocos formados na etapa de coagulação, a água passa pelos decantadores, onde o material sedimenta e fica retido por um período pré-determinado (RICHTER, 2001).

Mesmo após a decantação a água ainda apresenta flocos que não sedimentaram, então, é encaminhada para os filtros, onde ocorre a clarificação final. Resultando assim, em água própria para o consumo, água de lavagem dos filtros e lodo. Este último permanece acumulado no fundo dos decantadores (CORDEIRO, 1999).

O lodo gerado no tratamento de água deve passar por um sistema de tratamento para ser destinado ao aterro sanitário. Primeiramente o material passa por uma unidade de adensamento, com o objetivo de remover a umidade e reduzir o volume. Depois de adensado, o resíduo é preparado para desidratação onde ocorre

condicionamento químico e/ou térmico. Em seguida passa para a etapa de desidratação, que pode ser feita por lagoas de lodo, leitos de secagem, filtro prensa, centrífuga ou prensa desaguadora (VON SPERLING, 2009).

O volume de produção de lodo pode variar de 0,2 a 5% do volume total de água tratada pela ETA. A quantidade de lodo originário dos decantadores representa de 60 a 95% desse valor (RICHTER, 2001).

Segundo dados do relatório de administração e demonstrações contábeis, em 2012, a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) removeu um volume de 507.342 m<sup>3</sup> de lodo das ETAs do Paraná, 17,6% maior com relação a 2011 (SANEPAR, 2012).

Em Taiwan, em 2010, foram produzidas mais de 200 mil toneladas de lodo de ETA, e esse número vem crescendo cerca de 5% ao ano (CHIANG *et al.*, 2009).

Em geral, uma estação de tratamento com capacidade de tratar 1 m<sup>3</sup> de água por segundo pode produzir até 8.300 kg/dia de lodo. Considerado que, apenas nos Estados Unidos da América existem mais de 160 mil estações de tratamento de água, essa produção pode chegar a, aproximadamente, 485 milhões de toneladas de lodo ao ano (FRÍAS *et al.*, 2014).

#### **2.1.4 Composição Química**

Para Chao (2006), os LETAs são compostos por fósforo, alumínio cádmio, chumbo, cromo, mercúrio, zinco e sulfato, e possuem pH entre 5,8 a 7,6. Essas substâncias, na sua maior parte, são derivadas dos produtos químicos utilizados no tratamento da água.

Huang e Wang (2013) elaboraram um estudo onde utilizaram amostras de lodo de 10 estações de tratamento de água diferentes e, após análise de espectroscopia de fluorescência de raios-X, constataram que todas as amostras apresentavam composição química similar, sendo esta: SiO<sub>2</sub> (62-67%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (19-23%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4,9-11%) e outros produtos como Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, CaO, MgO e SiO<sub>3</sub>.

Já o lodo utilizado por Chiang *et al.* (2009) possuía a seguinte composição química: SiO<sub>2</sub> (53%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (21%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15%) e outros (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> e MnO).

Na pesquisa de Kizinievic *et al.* (2013) a composição química era muito semelhante à anterior, apresentando variação nas porcentagens e em alguns elementos existentes em pequenas quantidades: SiO<sub>2</sub> (68%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (17%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (7%) e outros (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, CaO, SO<sub>3</sub> e MgO).

### 2.1.5 Impactos Ambientais

Os resíduos gerados nos decantadores e filtros das ETAs são, frequentemente, dispostos nos corpos d'água mais próximos sem o mínimo de tratamento, causando assim, muitos problemas ambientais.

Este tipo de lodo possui concentrações elevadas de metais, principalmente alumínio e ferro, que ao serem lançados *in natura* nos corpos d'água podem induzir toxicidade aos organismos aquáticos (HUANG; WANG, 2013).

Além de conterem metais, apresentam altas concentrações de sólidos, alta turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), fatores que aumentam a criação de bancos de lodo, assoreamento dos recursos hídricos (Figura 2), aumento da concentração de metais e impurezas, podendo também, causar sérios problemas à saúde pública (FADANELLI; WIECHETECK, 2010; TEIXEIRA *et al.*, 2011).



(a)

(b)

**Figura 2 - Material fino em suspensão (a) e ilha de vegetação decorrente ao assoreamento (b).**

**Fonte: Lorenzo, 2011.**

### 2.1.6 Estado da Arte

Huang e Wang (2013) utilizaram lodo oriundo de dez diferentes estações de tratamento de água, localizadas em Taiwan, na produção de agregado leve e avaliaram as propriedades mecânicas do concreto produzido com este agregado. Dos dez lodos, cinco foram aproveitados para produzir agregado tanto para o concreto estrutural como o não estrutural, já os outros cinco produziram apenas agregado para concreto não estrutural. A partir desse resultado foram selecionados 6 agregados de lodo para produzir concreto estrutural. As propriedades deste, apresentadas na Tabela 1, atingiram os requisitos da norma internacional para concreto estrutural.

**Tabela 1 - Resistência à compressão e à tensão do cimento com agregado leve.**

Mistura	Água/Cimento	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à tensão (MPa)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )
L40	0,40	43,2	4,6	1789
L45	0,45	39,9	4,1	1755
L50	0,50	39,0	3,8	1730
L55	0,55	33,8	3,3	1714
L60	0,60	29,0	2,9	1709
L65	0,65	24,8	2,5	1694

Fonte: Adaptado de Hunag e Wang (2013).

Souza (2010) elaborou um compósito a partir de LETA e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto. Seus resultados confirmaram a possibilidade de utilização do material, porém, é necessário que se faça o controle da absorção de água dos grãos.

Em Taiwan, um estudo com LETA e casca de arroz para a produção de tijolos, foi elaborado. O novo material produzido atendeu aos requisitos das normas de Taiwan para tijolo leve. A quantidade de poros nos tijolos sinterizados produzidos com LETA e casca de arroz, comparado com tijolos produzidos somente com LETA, aumentou. Devido a esse grande número de poros, os produtos sinterizados apresentaram boas propriedades de isolamento térmico (CHIANG *et al.*, 2009).

Toya *et al.* (2007) produziram vitrocerâmica utilizando LETA. Para que a composição química do material chegasse mais próximo das características da

vitrocerâmica convencional, foram adicionados carbonato de cálcio e resíduo de vidro ao lodo. O produto final apresentou boa resistência, em torno de 100 MPa, e excelente durabilidade química.

Monteiro *et al.* (2008) incorporaram LETA na matriz de cerâmica vermelha para produção de tijolos e telhas. Misturas foram feitas incorporando 0, 3, 5 e 10% em massa de LETA. Foi comprovado que este tipo de resíduo pode ser utilizado em matriz de cerâmica vermelha estando dentro dos requisitos mínimos da NBR 15270-1 (ABNT, 2005).

Teixeira *et al.* (2011) avaliaram o efeito nas propriedades de materiais cerâmicos com a incorporação de LETA. Considerando os requisitos das normas para cerâmica, nos tijolos queimados até 1000°C, 10% de lodo pode ser incorporado. Para tijolos e telhas queimados acima dessa temperatura foi possível a incorporação de 20% de lodo no material.

Na Lituânia, de 5-40% de LETA foi incorporado na produção de materiais cerâmicos. Notou-se que o componente principal encontrado no lodo utilizado na pesquisa, óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), pode ser utilizado como pigmento natural, deixando a cerâmica com uma coloração vermelha mais intensa (KIZINIEVIC *et al.*, 2013).

Frías *et al.* (2014) estudaram as propriedades pozolânicas e termodinâmicas do lodo, ativado a 600°C por 2 horas, proveniente de uma ETA venezuelana, e o seu comportamento em matrizes cimento. Foram feitas misturas com diferentes teores de LETA ativado e cimento Portland onde a mistura com 15% de LETA ativado e 85% de cimento Portland atendeu as especificações físicas e mecânicas ( $\approx 60$  MPa) exigidas pelas normas europeias para cimento ( $\geq 52,5$  MPa).

## **2.2 Resíduos da produção de cal (RPC)**

### **2.2.1 Definição**

Resíduos da produção de cal são resultantes da indústria calcária de produção de cal para construção civil. Segundo a NBR 6453 (ABNT, 2003) o RPC é constituído essencialmente de cal e elementos não calcários ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , etc.) em quantidade total maior que 12%.

### 2.2.2 Caracterização

O principal produto proveniente da calcinação das rochas carbonatadas calcárias e cálcio-magnesianas é a cal virgem, composta predominantemente por óxido de cálcio e óxido de magnésio (PEREIRA, 2009).

A qualidade comercial de uma cal depende das propriedades químicas do calcário e da qualidade de queima. O resíduo de produção de cal é nada mais que a cal mal queimada. Isto ocorre quando o processo de combustão não ocorreu de forma completa (GARCIA, 2008).

Este resíduo pode ser utilizado como material de construção civil, porém há perda da reatividade com o passar do tempo, sendo assim, recomenda-se que seja utilizado logo após a produção, evitando-se o armazenamento prolongado. Seu aproveitamento como aglomerante dependerá das características químicas, tendo como referência os requisitos e critérios especificados para a cal industrial (CORRÊA, 2005).

### 2.2.3 Produção

O processo de produção da cal se inicia na jazida de calcário, onde a rocha é extraída. A rocha pode ser extraída da jazida de duas formas: se a superfície for horizontal, uma primeira cavidade é feita para que seja possível a inserção do serrote e, conseqüentemente, o corte da rocha na horizontal; quando a superfície é na vertical ou ligeiramente inclinada, é realizado um corte na vertical seguido de outro corte pela base, esse bloco de rocha, é então, tombado para posterior corte em blocos menores (SOLANCIS, 2014).

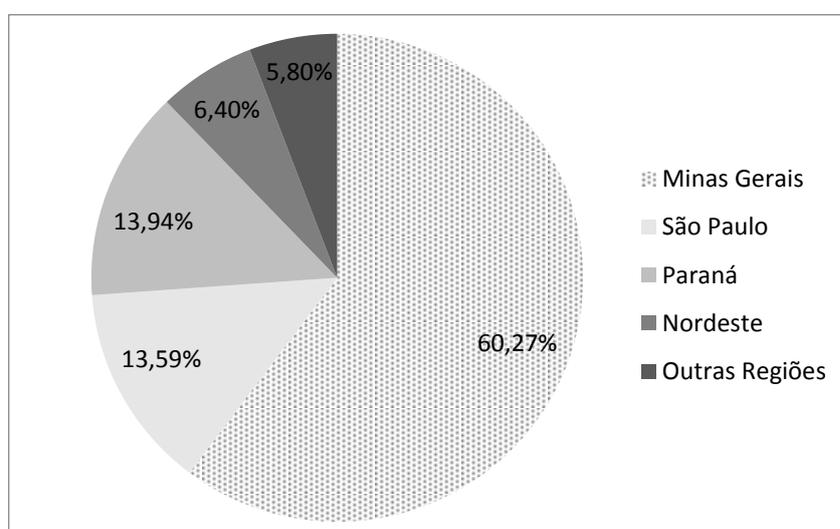
Após a extração, as rochas são transportadas ao forno, onde ocorre a calcinação, transformando-as em cal virgem. A proporção de produção é de 1,7 a 1,8 t de rocha calcária para 1 t de cal virgem (MME, 2009).

Para a produção de cal virgem ou cal viva, é necessário a conversão do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), comumente chamado de calcário, em óxido de cálcio

(CaO), ou seja, a descarbonatação do calcário. Essa reação ocorre no interior do forno durante o processo de calcinação. (GARAY, 2014).

O processo de descarbonatação do calcário é realizado em alto-forno, sendo, normalmente, do tipo vertical, devido sua alta eficiência comparada aos outros tipos de fornos. Para que seja possível a obtenção da cal virgem as rochas calcárias devem ser calcinadas à temperatura de 900 – 1.200°C (GARAY, 2014).

No Brasil, existem mais de 200 produtores de cal, onde a maior parte da capacidade produtiva localiza-se nos estados de São Paulo, Minas Gerais e na região da cidade de Colombo – PR (BAJAY; SANT'ANA, 2010).



**Figura 3 – Distribuição da produção de cal no Brasil.**

**Fonte: ABPC, 2006 *apud* Braga *et al*, 2010, adaptado pelo autor.**

A Associação Brasileira dos Produtores de Cal (ABPC), no ano de 2006, estimou a distribuição da produção de cal no Brasil, sendo: região Sudeste com 73,96%; região Sul com 13,95%; região Nordeste com 6,4% e outras regiões com 5,8% (Figura 3) (BAJAY; SANT'ANA, 2010).

Em 2011, a produção brasileira de cal foi mais de 8 milhões t, tendo um crescimento de 6,1% da produção interna quando comparada a 2010 (GALO, 2012).

Segundo o Mineral Industry Surveys (2014) a China está em primeiro lugar na lista de produtores de cal, tendo uma produção de 220.000.000 t no ano de 2012. Neste mesmo ano, a produção de cal nos Estados Unidos, Índia e Rússia foi de 18.800.000 t, 15.000.000 t e 10.500.000 t, respectivamente.

## 2.2.4 Composição Química

O RPC em geral é constituído por óxido de cálcio (CaO), óxido de magnésio (MgO), hidróxido de cálcio (Ca(OH)<sub>2</sub>), restos de carbonato de cálcio e magnésio não queimados (CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub>), e traços de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, entre outros (MME, 2009).

Segundo estudos realizados pelo Laboratório de Tecnologia Ambiental da Universidade Federal do Paraná (UFPR) o resíduo da produção de cal apresentou um teor de 23,55% de CO<sub>2</sub> caracterizando, assim, a cal como sendo de baixa reatividade (MME, 2009).

Tabela 2 - Composição de diferentes RPC e cal virgem.

Elemento	RPC (MYMRIN e CORREA) %	RPC (TURGUT) %	Cal Virgem (OTI <i>et al.</i> ) %
SiO <sub>2</sub>	2,82	0,26	0,9
CaO	47,69	56,19	95,9
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,25	0,25	0,15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,24	0,30	0,07
MgO	33,10	-	0,46
K <sub>2</sub> O	0,05	-	-
SO <sub>3</sub>	0,03	-	-
TiO <sub>2</sub>	0,04	-	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,02	-	-

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 2 é possível observar a composição química do RPC utilizado em duas pesquisas distintas e uma cal virgem. Pode-se destacar a diferença entre os teores de óxido de magnésio devido ao fato de, o RPC utilizado por Mymrin e Correa (2007) ser originado de calcário dolomítico, e o RPC utilizado por Turgut (2007) de calcário calcítico. O mesmo acontece na composição da cal virgem utilizada por Oti *et al.* (2008), porém, esta última além de ser um calcário de origem calcítica, o alto teor de óxido de cálcio se deve a queima eficiente da rocha calcária.

### 2.2.5 Impactos Ambientais

O impacto ambiental causado pela produção de cal pode ser de escala local, regional ou global. Dentre os impactos locais há a emissão de material particulado e as mudanças na paisagem (Figura 4) devido à mineração do calcário. Já, dentre os impactos regionais pode-se citar a emissão de dióxido de enxofre e óxido de nitrogênio, gases que contribuem para a formação das chuvas ácidas (GUTIÉRREZ *et al.*, 2012).



**Figura 4 – Extração de calcário, Ibirité – MG.**

**Fonte: Jalowitzki, 2012.**

Ainda entre os impactos regionais, se tem a poeira gerada na extração do calcário, que pode atingir quilômetros de distância, afetando todo o ambiente ao seu redor. Ao se depositar no solo, a poeira de cálcio pode alterar seu pH natural devido sua alta alcalinidade. Pode, também, afetar os corpos hídricos e águas subterrâneas prejudicando a fauna e flora aquática (GUTIÉRREZ *et al.*, 2012).

Na produção da cal, grandes quantidades de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) são emitidas na atmosfera, o qual é o principal “ator” nas mudanças climáticas, considerando que, para a produção de 1 tonelada de cal são emitidas 1,2 toneladas de  $\text{CO}_2$ , tendo, então, um impacto a nível global (OCHOA *et al.*, 2010).

### 2.2.6 Estado da Arte

Turgut (2007) estudou o uso de RPC e serragem na produção de um compósito leve como material de construção. Os valores de resistência à compressão, resistência à flexão e absorção de água, obtidos atenderam aos requisitos das normas internacionais. O compósito produzido pode ser potencialmente utilizado como substituto de painéis de madeira, alternativa econômica para blocos de concreto, barreira sonora, entre outros.

Em trabalho realizado por Turgut e Algin (2007), foi estudada a combinação de RPC e serragem, para a produção de tijolos. Os valores obtidos nos ensaios de resistência à compressão (7,2 a 16,6 Mpa), flexão (3,08 a 3,65 Mpa) e absorção de água (13,9 a 19,2%) atingiram os requisitos mínimos das normas internacionais. O mesmo estudo foi realizado por Algin e Turgut (2008), utilizando RPC e resíduo de algodão para produção de um compósito leve como material de construção civil, obtendo um produto leve e economicamente viável, podendo ser aplicado como tijolo.

Felekoglu (2007) estudou o potencial de utilização do RPC na indústria de concreto, especificamente, no concreto auto adensável. As propriedades físicas e mecânicas foram avaliadas e concluiu-se que, com a substituição de 10% do cimento por RPC houve um aumento na resistência à compressão, porém, foi necessária a adição de superplastificante. A substituição de mais de 10% do cimento por RPC já acarreta em perda de resistência.

Kitouni e Houari (2013) estudaram as propriedades físicas e mecânicas do concreto leve com substituição de 30% do agregado graúdo por RPC. O concreto produzido obteve bom desempenho mecânico, atingindo resistência à compressão de 34,99 Mpa e resistência à tração na flexão de 6,39 Mpa, o que satisfaz as normas internacionais para concreto estrutural.

## 2.3 Lama de Polimento de Mármore (LPM)

### 2.3.1 Definição

O termo mármore é, no setor de rochas ornamentais e de revestimento, utilizado para caracterizar as rochas carbonáticas capazes de receber polimento e lustro (CHIODI FILHO, 2009).

O mármore, nada mais é que, calcário submetido à alta pressão e temperatura. A lama de mármore é o resíduo obtido durante os processos de serragem e polimento das rochas (RODRIGUES, 2009).

### 2.3.2 Caracterização

Os mármore são rochas metamórficas constituídas principalmente por calcita e/ou dolomita (Tabela 3). Esses constituintes conferem a coloração branca à rocha, porém o padrão cromático é determinado pelos minerais acessórios e impurezas presentes em seus constituintes.

**Tabela 3 - Classificação do mármore em função dos teores de MgO e CaO.**

Mármore	Teor de MgO (%)	Razão MgO/CaO
Calcário calcítico	0,0 – 1,1	0,00 – 0,02
Calcário magnesiano	1,2 – 4,3	0,03 – 0,08
Calcário dolomítico	4,4 – 10,5	0,09 – 0,25
Dolomito calcítico	10,6 – 19,1	0,26 – 0,56
Dolomito	≥ 19,2	≥ 0,57

Fonte: Rêgo, 2005.

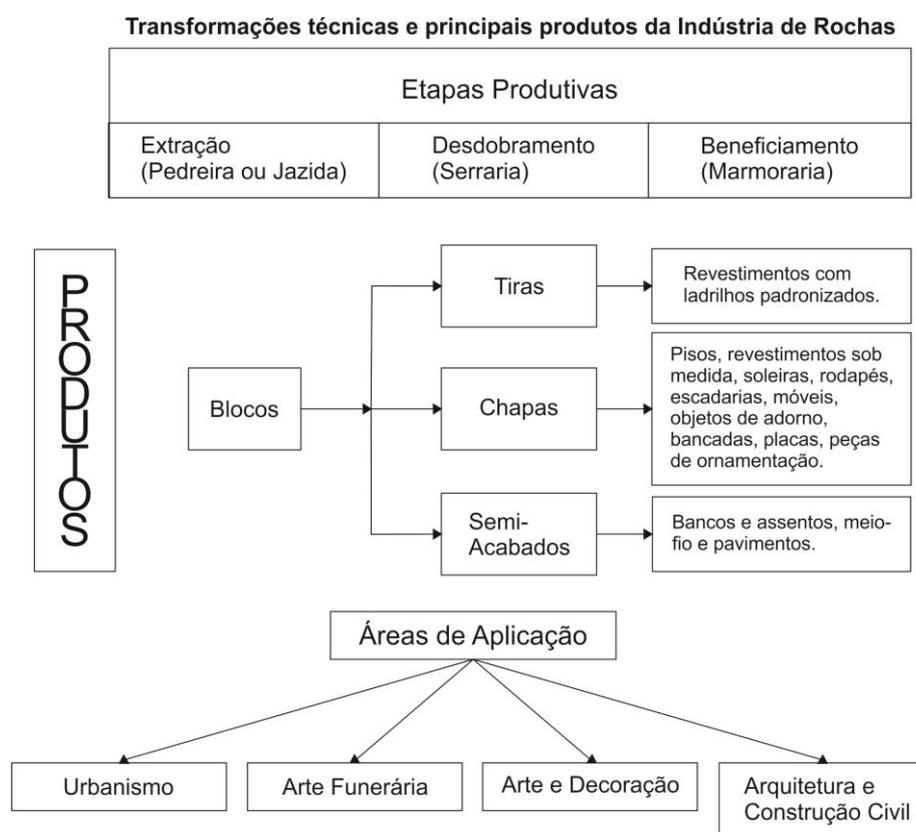
A lama de polimento de mármore (LPM) é caracterizada como material ultrafino tendo, em média, 67% de suas partículas com tamanho inferior a 0,037 mm, e possui coloração branca.

Segundo alguns autores (BRAGA *et al.*, 2010; LORENZONI, 2005; BUZZI *et al.*, 2006; MANHÃES; HOLANDA, 2008) as lamas do beneficiamento de rochas

ornamentais podem ser classificadas tanto como classe IIA quanto classe IIB, da NBR 10004 (ABNT, 2004).

### 2.3.3 Produção

A exploração de rochas ornamentais, em geral, é dividida em três etapas, conforme ilustrado na Figura 5.



**Figura 5 - Etapas e principais produtos na indústria de rochas ornamentais.**

**Fonte: Spínola, 2003, adaptado pelo autor.**

Primeiramente é feita a extração da pedra na jazida. Nesta etapa são utilizados fios diamantados, martelotes, explosivos e massas expansivas para retirada dos blocos (FRASCA, 2007).

Após a extração é realizado o desdobramento dos blocos de rocha, que são, normalmente, cortados em chapas com espessura variando de 1 a 3 cm. Para a realização do corte são utilizados teares com lâminas de aço, com fio diamantado,

talha-blocos ou ecotear. O primeiro utiliza uma mistura de água, cal e granalha para auxílio do corte, o segundo e terceiro necessitam apenas de água para arrefecimento do sistema, e o último é conhecido também como tear de corte a seco, pois utiliza apenas granalha para auxiliar no corte (AGUIAR *et al*, 2010; AIM, 2002). Dependendo da tecnologia empregada nesta etapa, a composição química do resíduo gerado pode variar.

A seguir é realizado o polimento das chapas por equipamentos denominados politrizes. Esta etapa tem como objetivo conferir brilho e lustro a superfície das peças, realçando as colorações dos diferentes minerais constituintes da rocha. Isto é obtido pela eliminação da rugosidade e fechamento dos poros da peça. A utilização de abrasivos com granulometria decrescente, através de movimentos de fricção, vão desbastando o material até alcançar o grau de polimento almejado (STELLIN JR; PONTES, 2001).

Segundo o Ministério de Minas e Energia - MME (2009), o Brasil é o quinto produtor mundial de rochas ornamentais, com uma produção anual de aproximadamente 8 milhões t/ano, depois de China, Índia, Turquia e Itália, sendo a China o maior produtor, com 26,5 milhões t/ano.

Grande quantidade de resíduo é gerada nas atividades de beneficiamento de rochas ornamentais, sendo em forma de lascas de rocha e lama. Esta última composta por água, pó de rocha e algum tipo de abrasivo (OLIVEIRA, 2005).

Durante o beneficiamento das rochas, no processo de serragem, cerca de 25 a 30% de um bloco é reduzido a pó (OLIVEIRA, 2010).

#### **2.3.4 Composição Química**

A composição química dos resíduos de mármore varia de acordo com a tecnologia utilizada no desdobramento e beneficiamento da rocha. Em serrarias onde é utilizado o tear convencional com lâminas de aço, geram-se resíduos contendo pó de rocha, água, cal e granalha, que auxiliam no corte da rocha e arrefecimento do sistema. Já as serrarias que utilizam tear com fio diamantado geram apenas pó de rocha e água. Na etapa do polimento, as placas de rochas que saem dos teares são polidas com auxílio de abrasivo com diferentes granulometrias,

gerando nessa etapa, pó de rocha, água e restos de abrasivos (STELLIN JR. e PONTES, 2001).

Aruntas *et al.* (2010) realizaram um trabalho utilizando lama de mármore e, segundo análises feitas por difração de raios-X chegou a seguinte composição química:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  e pequenos traços de  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Na}_2\text{O}$ .

Em pesquisa realizada por Aliabdo *et al.* (2014), utilizando lama de mármore na produção de cimento e concreto a seguinte composição química foi encontrada:  $\text{CaO}$  (83%),  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  e  $\text{Fe}_2\text{O}_3$

### 2.3.5 Impactos Ambientais

Na indústria de rochas ornamentais da Espanha, aproximadamente 70% dos resíduos produzidos na extração do mármore são dispostos no leito dos rios, causando sérios problemas ambientais. A lama de mármore disposta no meio ambiente causa redução da porosidade e permeabilidade do solo, aumentando o assoreamento dos rios. Essa disposição inadequada causa, também, a perda de fertilidade do solo local devido ao aumento de seu pH (ÇELIK; SABAH, 2008).

No Brasil não é diferente, esse resíduo, quando não disposto nos rios, é depositado em tanques de decantação na própria empresa. Porém, esses tanques são construídos de maneira inadequada, sem nenhum tipo de impermeabilização, fazendo com que o resíduo passe a contaminar as águas subterrâneas (FREIRE, 2009).

Nas regiões de mineração, além do ambiente original ser modificado com alteração da paisagem natural, do relevo e da degradação do solo, pode ser observado, também, a extinção da fauna e flora local (Figura 6) (ÇELIK; SABAH, 2008; SILVA, 2011).



**Figura 6 - Jazida de mármore branco.**

**Fonte: Marbrasa, 2014.**

A poeira do minério fino gerada na extração e a lama seca que fica exposta ao ambiente (Figura 7) podem causar sérios problemas de saúde, não só nos mineradores como também na população que vive nos arredores da mina (ÇELIK; SABAH, 2008; RODRIGUES, 2009).



**Figura 7 - Disposição inadequada de resíduos do beneficiamento de mármore.**

**Fonte: Braga et al., 2010.**

### 2.3.6 Estado da Arte

Anwar *et al.* (2011) utilizaram lama de mármore na composição de corpos cerâmicos para fins sanitários. Concluiu-se que a utilização do lama de mármore aumentou consideravelmente a resistência dos corpos cerâmicos, tendo 33 MPa sem a adição de lama de mármore e 48 MPa com a adição de 30% de lama de mármore à massa cerâmica.

Compostos cerâmicos foram produzidos com a adição de lama, rica em carbonato de cálcio, proveniente de indústrias de beneficiamento de rochas. Variou-se de 15 a 35% a lama adicionada à argila. Quanto maior a adição de lama obteve-se valores menores de resistência à flexão, mas foi possível a adição de até 25% de lama à massa cerâmica. Por outro lado, a adição de lama rica em carbonato de cálcio pode melhorar algumas propriedades tecnológicas como o controle de defeitos (MONTERO *et al.*, 2009).

Resíduos provenientes do beneficiamento de mármore e granitos foram utilizados por Mello (2006) como matéria-prima na produção de cerâmica vermelha. Concluiu-se que as lamas com maior concentração de granito podem ser incorporadas em até 40%, proporcionando melhores resultados que as lamas de mármore. Já esta última pode ser incorporada em até 16% em cerâmicas queimadas à temperaturas elevadas.

Aruntas *et al.* (2010) estudaram a viabilidade de se utilizar lama de mármore como aditivo na produção de cimento. Variou-se de 2,5-10% em massa a quantidade de lama de mármore onde foram elaboradas as composições segundo apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Proporção dos componentes das misturas para a produção do cimento.

Tipo de Cimento	Cimento Portland (%)	Lama de Mármore (%)	Gesso (%)
WMDC1	92,5	2,5	5,0
WMDC2	90,0	5,0	5,0
WMDC3	87,5	7,5	5,0
WMDC4	85,0	10,0	5,0
Cimento Portland (CP)		EM 197-1 CEM I	
CP Composto		EM 197-1 CEM II	

Fonte: Adaptado de Aruntas *et al.*, 2010.

O cimento produzido com adição de 5% do resíduo obteve resultados de resistência à compressão maior que a do cimento Portland aos 90 dias de cura como pode ser observado na Figura 8.

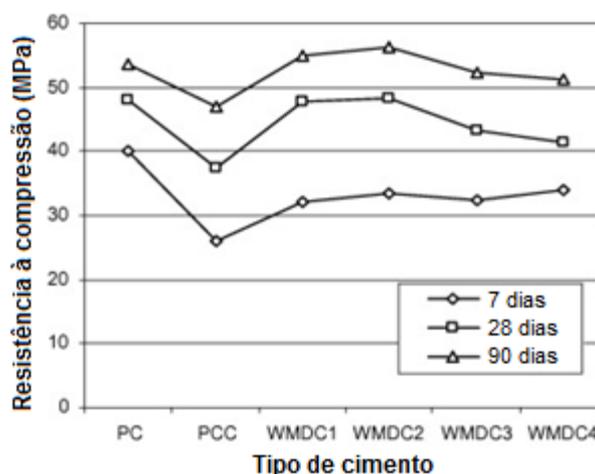


Figura 8 - Comparação de resistência à compressão do cimento de referência e das misturas.

Fonte: Adaptado de Aruntas *et al.*, 2010.

Okagbue e Onyeobi (1999) estudaram o potencial de utilização da lama de mármore como estabilizador de solos tropicais vermelhos para construção de estradas. No estudo foram utilizados três tipos de solo. Os parâmetros geotécnicos dos solos melhoraram com a adição do resíduo, a plasticidade reduziu e a resistência aumentou, podendo ser utilizado como base para estradas de tráfego leve e sub-base para estradas de tráfego intenso.

Bilgin *et al.* (2012) utilizaram lama de mármore na massa cerâmica para a produção de tijolos. A adição de até 10% em massa do resíduo teve efeito positivo sobre as características físicas, químicas e de resistência mecânica dos tijolos produzidos, porém, em quantidades maiores que 10% o teor de absorção de água aumenta trazendo prejuízos às propriedades mecânicas do tijolo.

Gancel *et al.* (2012) utilizaram lama de mármore como agregado na produção de *paver* (bloco intertravado de concreto). Houve redução da resistência à compressão pela adição do resíduo, porém, obteve-se melhor durabilidade ao frio e aumento na resistência ao desgaste abrasivo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

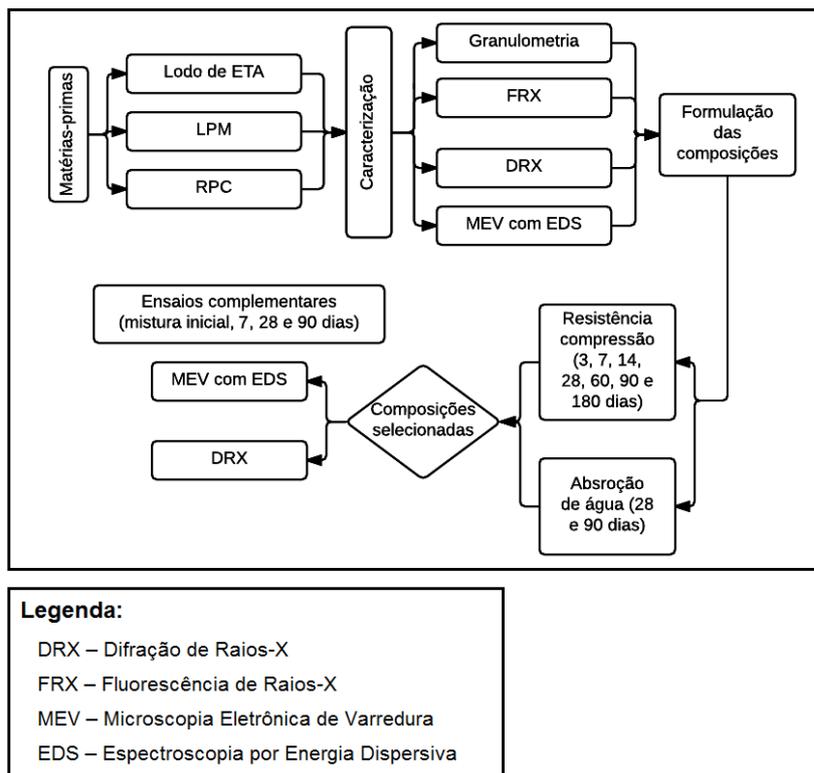
O objetivo deste estudo foi a confecção de um compósito contendo em sua composição 100% de resíduos, sendo estes: lodo de estação de tratamento de água, lama de polimento de mármore e resíduo de produção de cal.

Para alcançar o objetivo proposto foi desenvolvido um programa experimental que possibilite, inicialmente, a caracterização das matérias-primas por meio dos ensaios de difração de raios-X (DRX), espectroscopia de fluorescência de raios-X (FRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS) e, granulometria a laser.

Como não foi encontrada bibliografia referente ao tema utilizando os três materiais em questão, as composições dos compósitos foram definidas por variação de porcentagem, de modo que fosse utilizado o maior teor possível de LETA com, até, 30% de material ligante, no caso, o RPC.

Os compósitos foram avaliados inicialmente quanto à resistência à compressão uniaxial aos 3, 7 e 28 dias. Posteriormente foram selecionadas as composições que obtiveram os melhores desempenhos mecânicos e melhor aparência visual, e as quais foram ensaiadas aos 60, 90 e 180 dias.

De modo a tentar correlacionar o ganho de resistência à morfologia do material obtido foram realizados ensaios de difração de raios-X (DRX), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva (EDS) da pior e das melhores composições. Na Figura 9 tem-se o fluxograma do programa experimental desenvolvido para a realização dos ensaios e obtenção dos resultados.



**Figura 9 - Fluxograma do programa experimental.**

Fonte: Autoria própria.

### 3.1 Materiais

As matérias-primas utilizadas foram: o lodo de estação de tratamento de água (LETA); a lama de polimento de mármore (LPM) e o resíduo de produção de cal (RPC), apresentados na Figura 10.



**Figura 10 - Matérias-primas: LETA (a), LPM (b) e RPC (c).**

Fonte: Autoria própria.

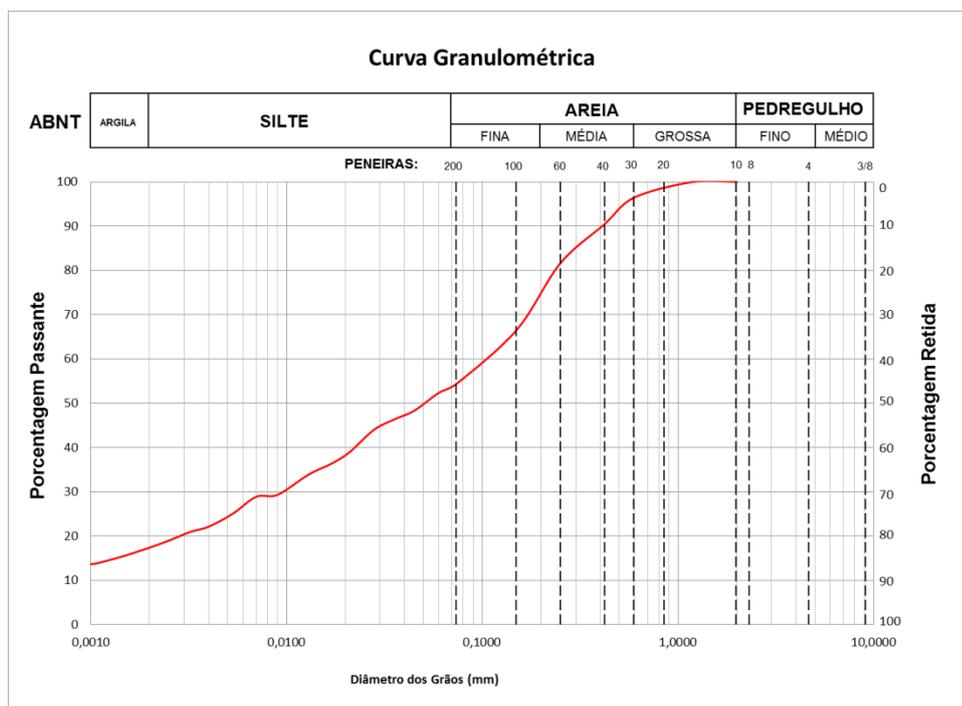
### 3.1.1 Lodo de Estação de Tratamento de Água

O lodo utilizado na pesquisa foi coletado na unidade de desaguamento de lodo (UDL) de uma ETA localizada ao sul da região metropolitana de Curitiba. A estação utiliza tecnologia convencional com Calha Parshall, floculador hidráulico, decantador de alta taxa, filtro rápido e tanque de contato para a desinfecção.

Já a UDL é constituída por um tanque para receber e recircular a água de lavagem do filtro e outro tanque para receber as descargas do decantador, além de um adensador por gravidade, dois decanters centrífugos e containers para depósito de torta de lodo.

O teor de umidade de 78,45% foi obtido conforme os procedimentos descritos na norma ME 213 (DNER, 1994).

A análise granulométrica foi realizada conforme os procedimentos da norma NBR 7181 (ABNT, 1984), porém, o peneiramento foi feito via úmido com o material *in natura*, pois, como se trata de um material muito fino a formação de torrões muito rígidos e de difícil desmanche iria alterar os resultados. A Figura 11 mostra a curva granulométrica do LETA.

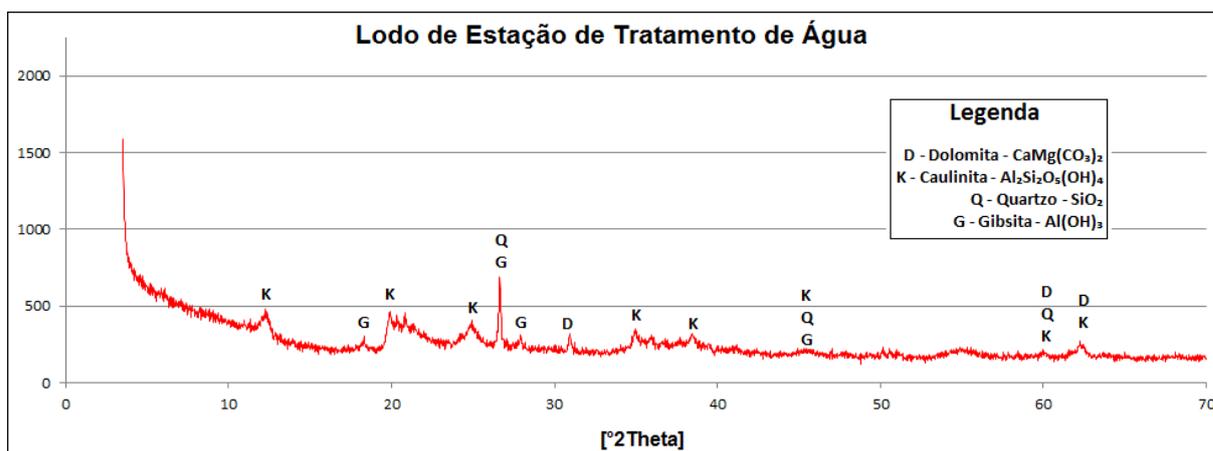


**Figura 11 - Curva Granulométrica do LETA utilizado na pesquisa.**

**Fonte: Autoria própria.**

A granulometria do LETA é composta por aproximadamente 46% de areia, 36% de silte e 18% de argila e, segundo a classificação textural do solo (LEMOS; SANTOS, 1996), pode ser comparado a um solo franco.

O difratograma de raios-X da amostra de LETA estudado é mostrado na Figura 12.



**Figura 12 - Composição mineralógica do LETA por DRX.**

Fonte: Autoria própria.

Verificam-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes à caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) e gibsite ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ). Ainda, há indícios da presença de dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) detectada por seus picos menos intensos.

A Tabela 5 mostra os resultados da composição química da amostra de LETA.

**Tabela 5 – Composição química do LETA por FRX (%).**

$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{TiO}_2$	$\text{MgO}$	$\text{SO}_3$	$\text{P}_2\text{O}_5$	$\text{CaO}$
28,5	28,4	11,5	1,0	0,7	0,5	0,4	0,4	0,3
$\text{Na}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{SrO}$	$\text{ZnO}$	$\text{Cl}$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{Rb}_2\text{O}$	$\text{PbO}$	P.F. <sup>1</sup>
0,3	0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	27,57

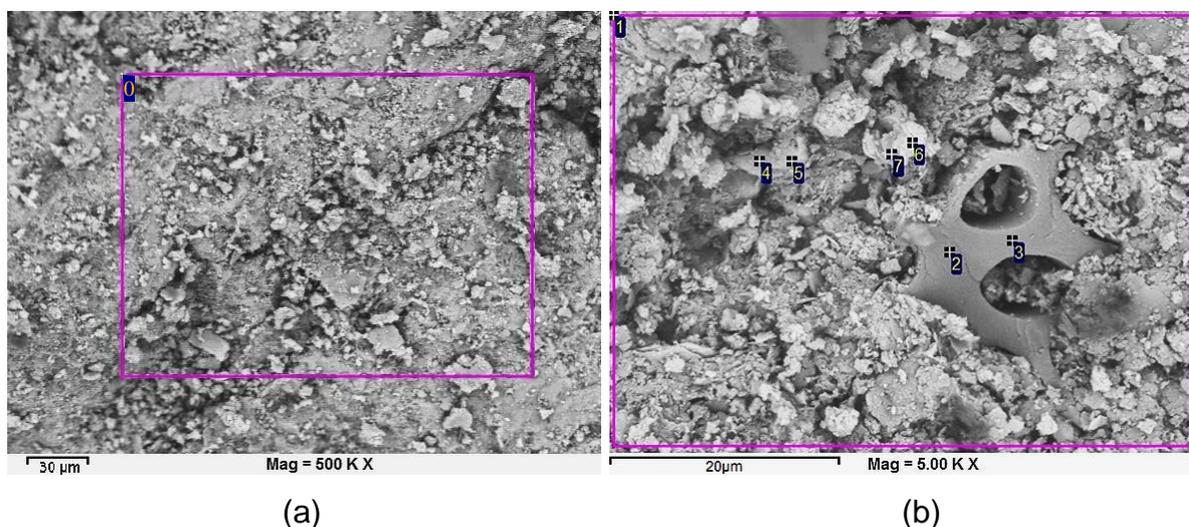
Fonte: Autoria própria.

Do ponto de vista químico, o resíduo é constituído basicamente por óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) e óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) que correspondem à

<sup>1</sup> Perda ao fogo.

cerca de 68,4%. O alto valor da perda de fogo pode ser justificado pela presença de argilominerais, hidróxidos e matéria orgânica.

A Figura 13 mostra os aspectos morfológicos da amostra de LETA.



**Figura 13 – Imagens resultantes da análise de microscopia eletrônica de varredura do LETA: 500x (a) e 5.000x (b).**

**Fonte: Autoria própria.**

O LETA é constituído de partículas com perfil irregular. Existe uma grande quantidade de partículas inferiores a  $2\mu\text{m}$ , provavelmente de caulinita. É observada também a grande variação na distribuição de tamanho das partículas, corroborando com os dados granulométricos mostrados na Figura 11.

A Tabela 6 mostra a microanálise química realizada por EDS.

**Tabela 6 – Resultados da microanálise química por EDS do LETA (%).**

	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Área 0	0,86	0,81	34,39	44,87	1,69	-	1,40	16,05
Área 1	-	0,78	32,66	43,91	1,97	0,79	1,11	18,78
Ponto 2	-	-	34,09	22,36	-	9,70	-	33,86
Ponto 3	-	-	32,50	22,58	-	6,12	-	38,80
Ponto 4	-	4,90	91,75	-	-	-	-	3,35
Ponto 5	-	-	8,07	87,38	-	-	-	4,55
Ponto 6	-	1,37	31,87	45,91	-	0,95	-	19,90
Ponto 7	-	2,33	33,96	46,11	2,09	1,84	-	13,67

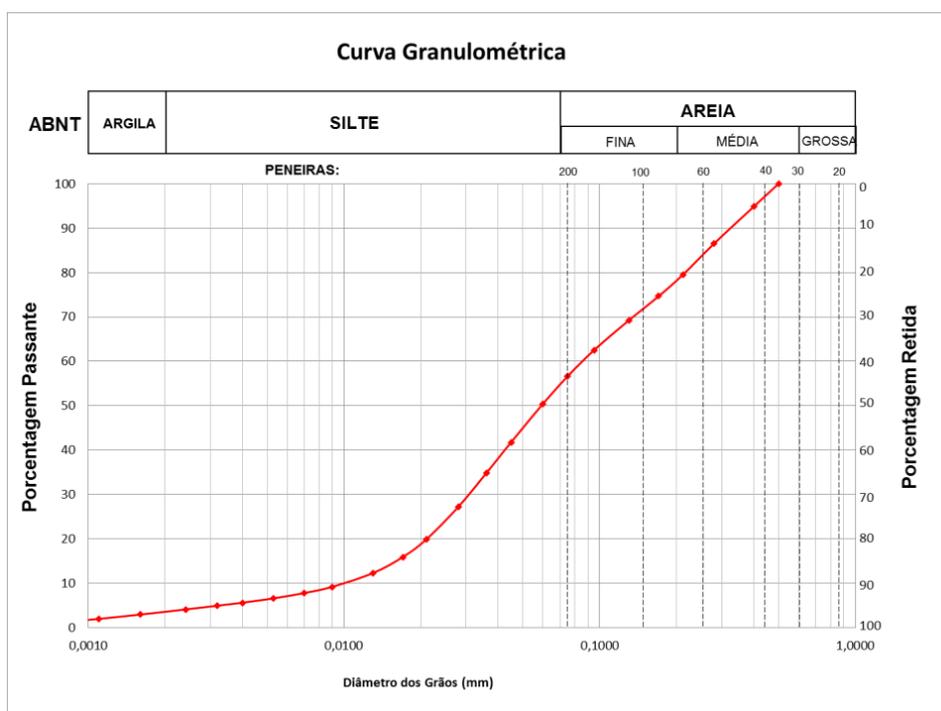
**Fonte: Autoria própria.**

O mapeamento dos elementos por EDS indicou a presença de silício (Si), alumínio (Al), ferro (Fe) e traços de magnésio (Mg), cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) e titânio (Ti), os quais ratificam os dados da composição química (Tabela 5).

### 3.1.2 Lama de Polimento de Mármore

A lama de polimento de mármore foi fornecida por uma empresa beneficiadora de rochas da região metropolitana de Curitiba.

A análise granulométrica da LPM foi realizada pelo Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), utilizando um granulômetro a laser via úmido, Cilas 1064. Figura 14 mostra a curva granulométrica do RPC.



**Figura 14 - Curva Granulométrica da LPM utilizada na pesquisa.**

**Fonte: Autoria própria.**

A granulometria da LPM é composta por aproximadamente 43% de areia, 53% de silte e 4% de argila e, segundo a classificação textural do solo (LEMOS; SANTOS, 1996), pode ser comparado a um solo franco-siltoso.

O difratograma de raios-X da amostra de LPM estudada é mostrado na Figura 15.

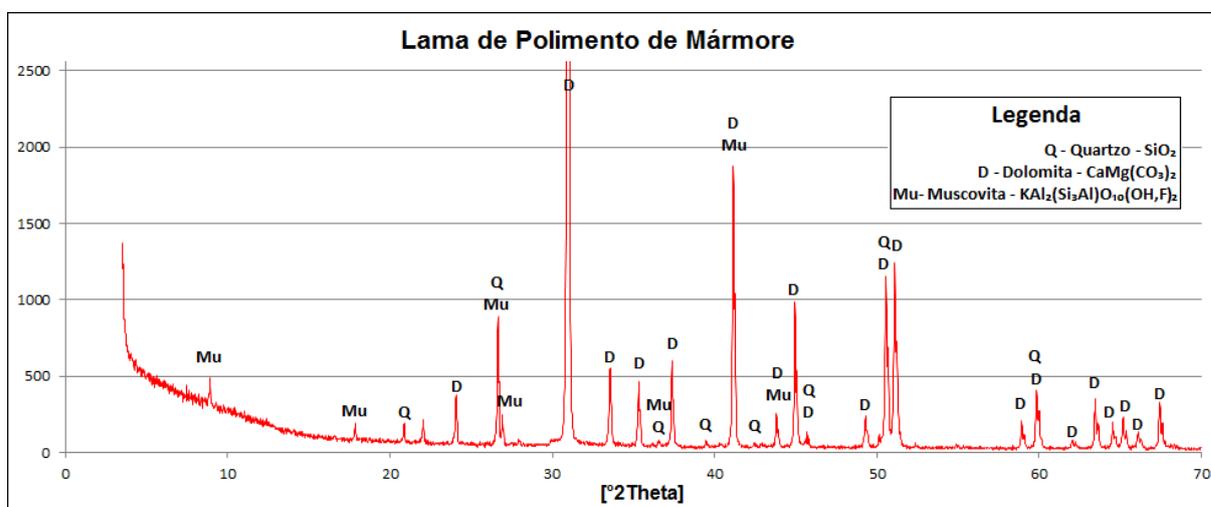


Figura 15 - Composição mineralógica da LPM por DRX.

Fonte: Autoria própria.

Verificam-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes à dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), muscovita ( $\text{KAl}_2(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$ ) e quartzo ( $\text{SiO}_2$ ). A ocorrência de picos intensos de quartzo é devido à presença de silício originário do abrasivo utilizado na etapa de polimento da rocha.

A Tabela 7 mostra os resultados da composição química da LPM.

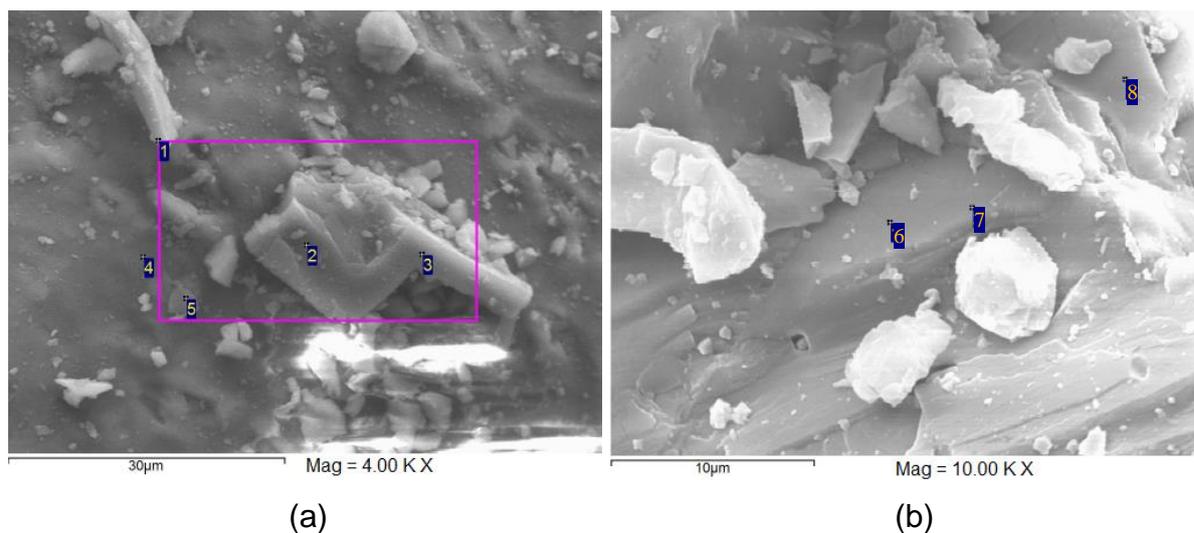
Tabela 7 - Composição química do LPM através de FRX (%).

CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SrO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.
33,3	17,7	8,8	0,8	0,3	0,2	<0,1	<0,1	38,97

Fonte: Autoria própria.

Do ponto de vista químico, a lama tem como constituintes principais os óxido de cálcio (CaO), magnésio (MgO) e silício (SiO<sub>2</sub>), sendo muito semelhante ao resultado obtido por Aruntas *et al.*(2010) e Aliabdo *et al.*(2014), porém, contendo traços de estrôncio e fósforo. Como o material é proveniente de uma jazida na região metropolitana de Curitiba, onde há grande ocorrência de dolomita, os teores elevados de óxidos de cálcio e magnésio são justificáveis.

A Figura 16 mostra os aspectos morfológicos da amostra de LPM.



**Figura 16 - Imagem resultante da análise de microscopia eletrônica de varredura da LPM: 5.000x (a) e 10.000x (b).**

**Fonte: Autoria própria.**

A LPM é constituída de partículas com perfil irregular com aspecto semelhante às formações cristalinas. Existe uma grande variação na distribuição de tamanho das partículas, corroborando com os dados granulométricos mostrados na Figura 14.

A Tabela 8 mostra a microanálise química realizada por EDS.

**Tabela 8 - Resultados da análise de EDS da LPM (%).**

	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Ca</b>
Área 1	11,92	58,05	1,07	-	27,52	1,44
Ponto 2	6,31	51,64	-	-	42,05	-
Ponto 3	6,65	60,03	-	-	33,03	0,28
Ponto 4	23,71	45,87	-	-	30,41	-
Ponto 5	18,94	55,23	2,24	-	21,20	2,39
Ponto 6	18,71	56,55	10,52	0,32	-	13,91
Ponto 7	19,99	56,61	10,53	0,23	-	12,65
Ponto 8	17,86	53,06	11,33	0,37	-	17,38

**Fonte: Autoria própria.**

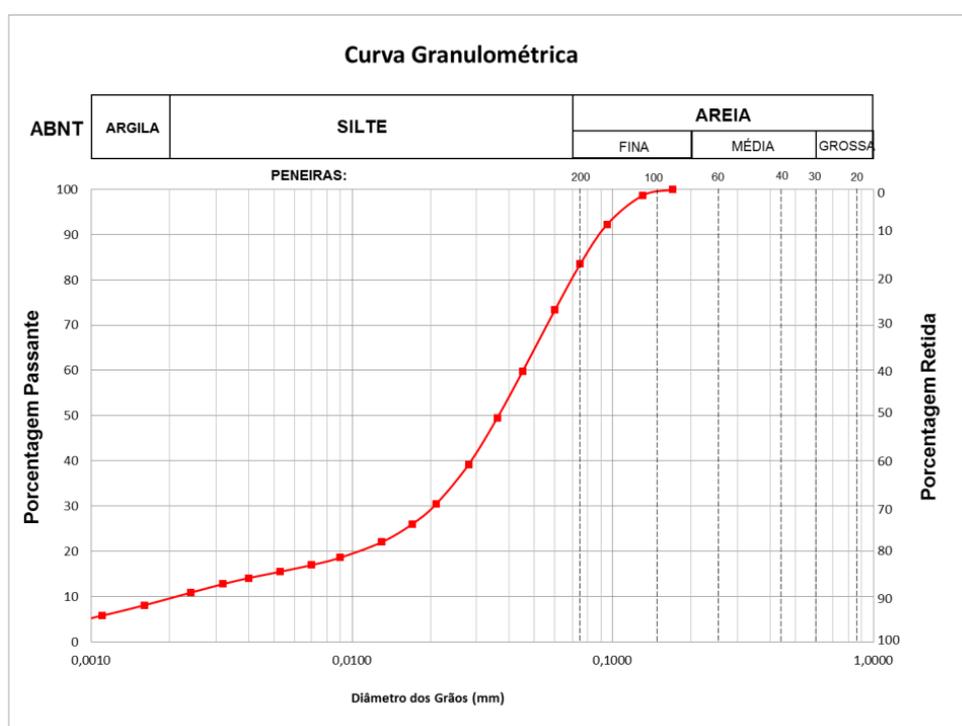
O mapeamento dos elementos químicos por EDS indicou a presença de silício (Si), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e traços de alumínio (Al), os quais ratificam os dados da composição química (Tabela 7). O alto teor de silício mostrado pela

microanálise química comprova a origem do resíduo, onde abrasivos contendo silício são utilizados no processo de polimento da rocha.

### 3.1.3 Resíduo de Produção de Cal

O resíduo de produção de cal foi fornecido por uma empresa produtora de cal virgem da região metropolitana de Curitiba.

A análise granulométrica do RPC foi realizada pelo Laboratório de Análises de Minerais e Rochas (LAMIR) do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), utilizando um granulômetro a laser via úmido, Cilas 1064. A Figura 17 mostra a curva granulométrica do RPC.

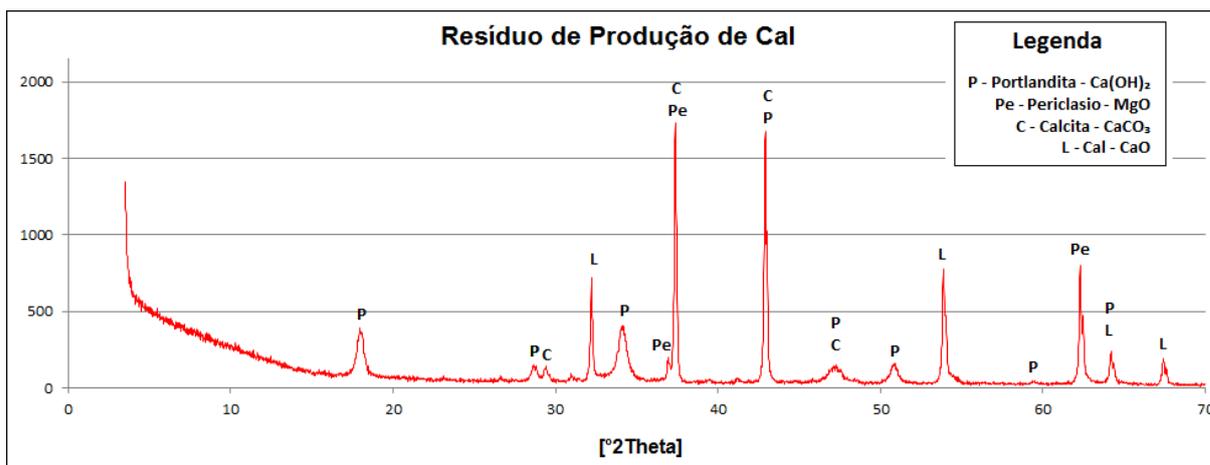


**Figura 17 - Curva Granulométrica do RPC utilizado na pesquisa.**

**Fonte: Autoria própria.**

A granulometria do RPC é composta por aproximadamente 18% de areia, 72% de silte e 10% de argila e, segundo a classificação textural do solo (LEMOS; SANTOS, 1996), pode ser comparado a um solo franco-siltoso

O difratograma de raios-X da amostra de RPC estudado é mostrado na.



**Figura 18 - Composição mineralógica do RPC por DRX.**

Fonte: Autoria própria.

Verificam-se picos de difração característicos das fases cristalinas referentes à portlandita ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), periclase ( $\text{MgO}$ ) e cal virgem ( $\text{CaO}$ ).

A Tabela 9 mostra os resultados da composição química da amostra de RPC.

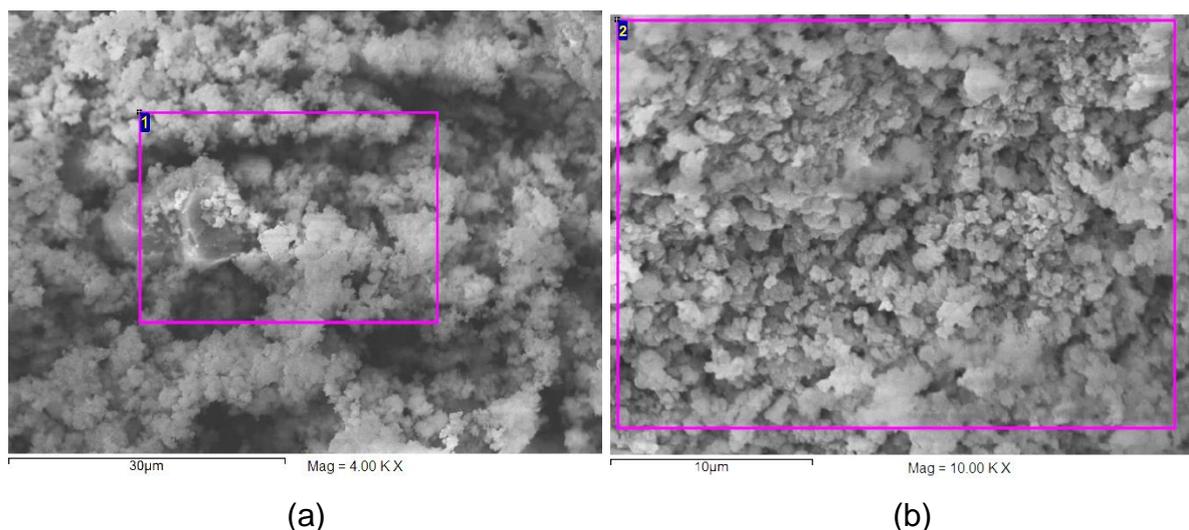
**Tabela 9 - Composição química do RPC por FRX (%).**

CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	P.F.
51,8	32,5	1,4	0,3	0,2	0,1	<0,1	<0,1	13,66

Fonte: Autoria própria.

Do ponto de vista químico, o RPC é constituído basicamente por óxidos de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e magnésio ( $\text{MgO}$ ) porém, a presença de impurezas somadas à perda ao fogo resultam em, aproximadamente, 15,5% o que caracteriza o material como sendo um resíduo conforme estabelecido pela NBR 6453 (ABNT, 2003).

A Figura 19 mostra os aspectos morfológicos da amostra de RPC.



**Figura 19 - Imagem resultante da análise de microscopia eletrônica de varredura da RPC: 4.000x (a) e 10.000x (b).**

**Fonte: Autoria própria.**

Pode-se dizer que o RPC possui estrutura amorfa e partículas com diferentes tamanhos e formas essencialmente arredondadas, o que é comum encontrar em substâncias amorfas.

A Tabela 10 mostra a microanálise química realizada por EDS.

**Tabela 10 - Resultados da microanálise química por EDS do RPC (%).**

	<b>C</b>	<b>O</b>	<b>Mg</b>	<b>Ca</b>
Área 1	7,08	51,93	16,32	24,67
Área 2	7,53	48,16	15,86	28,45

**Fonte: Autoria própria.**

O mapeamento dos elementos por EDS indicou a presença de magnésio e cálcio os quais ratificam os dados da composição química (Tabela 9).

## 3.2 Preparação e Produção dos Compósitos

### 3.2.1 Composições

A Tabela 11 mostra as composições desenvolvidas para realização dos testes.

Tabela 11 - Composições iniciais.

N	Composição (%)		
	LETA	LPM	RPC
1	25	45	30
2	30	40	30
3	35	35	30
4	25	50	25
5	30	45	25
6	35	40	25
7	50	40	10
8	45	40	15
9	40	40	20

Fonte: Autoria própria.

As composições foram formuladas de acordo com o objetivo principal do estudo, utilizar o maior teor possível de LETA e até 30% de material ligante, o RPC.

### 3.2.2 Confeção dos Corpos de Prova

Para cada uma das composições trabalhadas foram confeccionados 5 corpos de prova por idade (10 corpos de prova para 28 e 90 dias para realização do teste de absorção de água). As idades trabalhadas foram: 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias, totalizando 405 corpos de prova com dimensões aproximadas de 20 mm x 20 mm.

Inicialmente, o LETA foi seco em estufa à 30°C até atingir, aproximadamente, 50% de umidade com o objetivo de utilizar a própria umidade do material para a hidratação das misturas. Segundo Porras *et al.* (2008) a umidade do

lodo influenciou significativamente na qualidade dos tijolos produzidos em sua pesquisa, sendo possível a confecção dos mesmos somente com teor de umidade abaixo de 50%.

Os resíduos foram pesados (conforme composições apresentadas na Tabela 11) misturados, homogeneizados manualmente, utilizando-se de pistilo e almofariz, e hidratados (adicionando-se aos poucos a água ao sistema, manualmente, durante a mistura, quando necessário) de forma que cada composição atingisse uma consistência ideal. Esta consistência ideal foi estabelecida quando, ao apertar a massa na mão de forma enérgica, obteve-se um bolo com marca nítida dos dedos em relevo, para assim proporcionar a ligação entre os resíduos.

O molde utilizado na confecção dos corpos de prova foi fabricado em aço, material não absorvente e quimicamente inerte aos resíduos trabalhados. O método utilizado foi baseado no trabalho de Corrêa (2005), que utiliza moldes menores que os exigidos pela NBR 5738 (ABNT, 2015), tornando a produção e armazenamento dos corpos de prova mais econômica.

Para a compactação dos corpos de prova foi utilizada uma prensa hidráulica manual. A pressão empregada foi de 300 kg (10 MPa). Sendo que o tempo de permanência dos corpos de prova a esta pressão foi de 10 segundos.

Após a compactação, os corpos de prova foram acondicionados em gavetas plásticas e curados ao ar.

### **3.3 Caracterização dos Compósitos**

Após a caracterização dos materiais e determinação das composições, os corpos de provas confeccionados foram avaliados quanto ao desempenho mecânico e microestrutural, de acordo com as etapas determinadas no programa experimental, sendo que as amostras selecionadas para os ensaios complementares foram devido ao seu desempenho de resistência mecânica.

### **3.3.1 Resistência à Compressão Uniaxial**

A resistência à compressão traduz a qualidade do material produzido, estando diretamente relacionada à sua estrutura interna (LEVY, 2001). Os valores obtidos neste ensaio fornecem seu desempenho em termos mecânicos e, conseqüente, durabilidade.

Os ensaios foram realizados conforme descrito na NBR 5739 (ABNT, 2007), no laboratório de prensas da UTFPR utilizando o equipamento da marca EMIC, modelo DL60000. A velocidade definida para aplicação da força foi de 1 mm/min e carga de 500 N/s. As idades estudadas foram 3, 7, 14, 28, 60, 90 e 180 dias.

### **3.3.2 Absorção de Água**

O ensaio de absorção de água foi realizado conforme estabelecido na norma NBR 8492 (ABNT, 1984). Para este ensaio foram empregados 3 corpos de prova para cada uma das composições, nas idades de 28 e 90 dias.

### **3.3.3 Análise Morfológica**

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) fornece sobre a morfologia do material e, quando em conjunto com a utilização da espectroscopia por energia dispersiva (EDS), é possível identificar elementos químicos de amostras sólidas (KLEIN e DUTROW, 2012).

Com as amostras já fraturadas foram submetidas ao ensaio após a interrupção da hidratação das mesmas por meio do uso de acetona (imersão por 2 horas) e posterior bomba à vácuo para remoção da mesma e, para completar o processo de eliminação da acetona, as amostras foram deixadas em temperatura controlada (aproximadamente 30°C) por 24 horas. Posteriormente as amostras foram metalizadas com ouro utilizando o equipamento Quorun Q150R ES.

A análise foi realizada no Laboratório de MEV e DRX da UTFPR utilizando o equipamento EVO MA 15.

### **3.3.4 Difração de Raios-X**

A difração de raios-X consiste em uma análise qualitativa que tem como objetivo identificar as fases mineralógicas das matérias-primas utilizadas, e as novas estruturas formadas durante os períodos de cura.

Primeiramente foi interrompida a hidratação das amostras por meio do uso de acetona (imersão por 2 horas) e posterior bomba à vácuo para remoção da mesma e, para completar o processo de eliminação da acetona, as amostras foram deixadas em temperatura controlada (aproximadamente 30°C) por 24 horas. Após este processo, o material foi pulverizado até a obtenção da dimensão máxima de 0,075 mm (#200).

O ensaio foi realizado no laboratório de Minerais e Rochas (LAMIR), da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O equipamento utilizado é da marca Panalytical, modelo EMPYREAN, com tubo de radiação Cu - K $\alpha$ , (40 kV, 25 mA).

A interpretação dos gráficos foi realizada no LAMIR/UFPR utilizando o software de reconhecimento X.Pert e banco de dados JCPDS.

### **3.3.5 Fluorescência de Raios-X**

O método de fluorescência de raios-x (FRX) foi utilizado para determinar a composição química das matérias-primas antes da confecção dos corpos de prova, e das misturas iniciais das composições selecionadas.

Primeiramente o material foi pulverizado e colocado em estufa para secar. Após, foram separados 7 g de cada material, adicionados 1,4 g de aglomerante para posteriormente produzir as pastilhas que seguiram para a análise química.

Tanto a preparação das amostras quanto a análise foram realizadas no LAMIR/UFPR. Para a FRX foi utilizado o equipamento da marca Philips/Panalytical modelo PW 2400,41 com tubo de 3kW e alvo de ródio.

Este ensaio foi realizado apenas para análise da mistura inicial das composições selecionadas, pois, a composição química modifica com o passar do tempo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Caracterização das Composições Desenvolvidas

Neste item serão apresentados os resultados das investigações realizadas com os compósitos desenvolvidos. Serão apresentados, também, os resultados de DRX, FRX, MEV e EDS para as composições selecionadas.

#### 4.1.1 Resistência à Compressão Uniaxial

A Tabela 12 mostra a mudança da resistência uniaxial em até 180 dias de cura de todas as composições estudadas.

Tabela 12 - Resultados de resistência à compressão uniaxial.

N	Composição (%)			Resistência à compressão uniaxial (MPa) após dias de cura						
	LETA	LPM	RPC	3	7	14	28	60	90	180
1	25	45	30	4,02	6,36	<b>6,74</b>	<b>5,98</b>	<b>8,52</b>	11,75	12,06
2	30	40	30	3,67	<b>4,57</b>	<b>4,41</b>	<b>4,29</b>	<b>5,68</b>	6,61	6,94
3	35	35	30	4,04	4,44	4,62	5,33	5,33	5,53	6,22
4	25	50	25	3,89	<b>4,16</b>	<b>4,05</b>	<b>5,54</b>	5,95	7,13	7,57
5	30	45	25	<b>4,65</b>	<b>4,41</b>	<b>5,25</b>	6,17	6,27	7,52	8,13
6	35	40	25	3,51	<b>3,81</b>	<b>3,80</b>	<b>4,72</b>	5,13	5,82	6,05
7	50	40	10	2,61	<b>2,07</b>	<b>1,95</b>	<b>2,11</b>	<b>2,06</b>	<b>2,10</b>	3,03
8	45	40	15	1,64	<b>3,12</b>	<b>2,86</b>	<b>3,03</b>	<b>3,52</b>	<b>2,97</b>	<b>3,35</b>
9	40	40	20	1,60	3,45	3,59	3,92	4,57	4,45	4,33

Fonte: Autoria própria.

Devido à inexistência de norma para o tipo de material produzido foi utilizado como parâmetro de comparação as normas NBR 7170 (ABNT, 1983) e NBR 8491 (ABNT, 2012).

A norma NBR 7170 (ABNT, 1983) regulamenta os ensaios para tijolo maciço cerâmico para alvenaria, e serve como parâmetro para classificação de resistência à

compressão uniaxial deste material. Nesta norma, o parâmetro para resistência à compressão uniaxial é subdividido em três classes, apresentadas na Tabela 13.

**Tabela 13 - Resistência mínima à compressão em relação à categoria.**

<b>Categoria</b>	<b>Resistência à Compressão (MPa)</b>
A	1,5
B	2,5
C	4,0

**Fonte: Autoria própria.**

Já a norma NBR 8491 (ABNT, 2012) regulamenta os critérios mínimos de utilização para tijolos maciços tipo solo-cimento, onde “a amostra ensaiada não deve apresentar a média dos valores de resistência à compressão menor do que 2,0 MPa nem valor individual inferior a 1,7 MPa com idade mínima de 7 dias”.

Isso quer dizer que, comparando o material produzido com a NBR 7170 (ABNT, 1983), aos 28 dias de cura, mais de 50% das amostras ensaiadas atingiram a classe C de tijolos maciços para alvenaria (> 4,0 MPa).

Todavia, ao compararmos com a NBR 8491 (ABNT, 2012), aos 7 dias de cura, 100% das amostras ensaiadas atingiram a resistência mínima exigida pela norma.

Com base nessas informações é possível afirmar que os valores de resistência das amostras listados na Tabela 12, variam principalmente com o tempo de cura e a quantidade de LETA empregada.

Os valores destacados na Tabela 12 mostram queda seguida de aumento da resistência de algumas misturas, como pode ser facilmente observado na Figura 20.

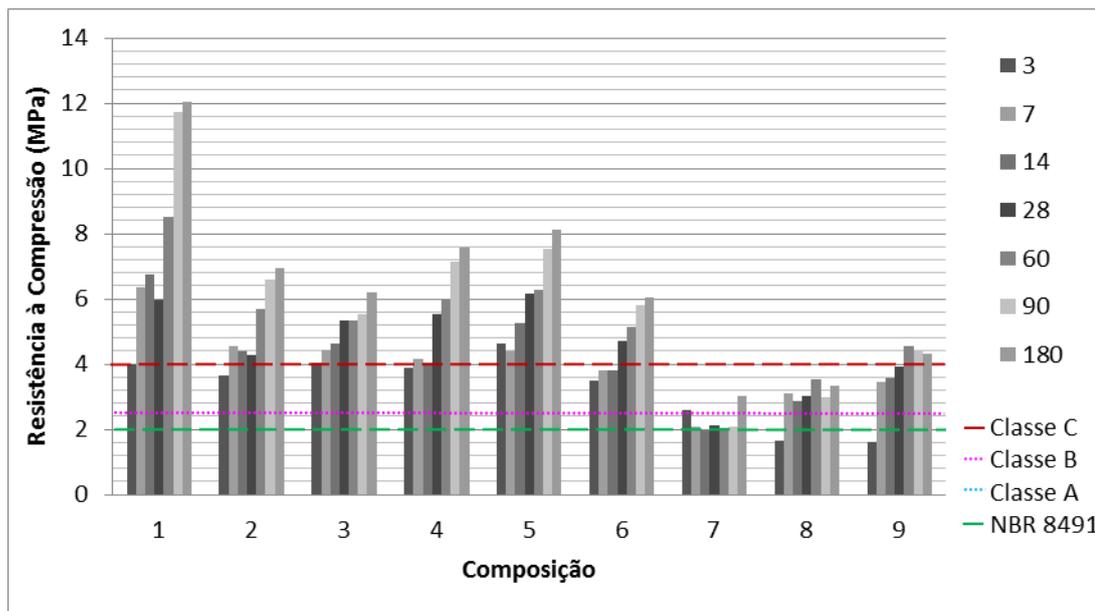


Figura 20 - Resultados dos ensaios de resistência à compressão até o 180º dia.

Fonte: Autoria própria.

Isso ocorre durante as etapas de modificação das estruturas dos materiais, através de processos de envelhecimento de gel (sinérese) de novas formações em poros, tendo um aumento na densidade das substâncias amorfas. Paralelamente, ocorre a transformação parcial de substâncias amorfas em formas cristalinas. A combinação desses fenômenos pode ocasionar a redução temporária das características mecânicas do material (CORRÊA, 2005).

#### 4.1.2 Absorção de Água

Os valores de absorção de água aos 28 e 90 dias de cura estão representados na Tabela 14.

Tabela 14 - Absorção de Água.

N	Composição (%)			Absorção de Água (%)	
	LETA	PM	RPC	28 dias	90 dias
1	25	45	30	16,27	13,57
2	30	40	30	19,70	15,96
3	35	35	30	21,78	16,99
4	25	50	25	21,95	13,81
5	30	45	25	22,12	16,04
6	35	40	25	22,00	17,56
7	50	40	10	26,32	23,56
8	45	40	15	22,75	20,73
9	40	40	20	17,92	17,45

Fonte: Autoria própria.

Segundo a NBR 8491 (ABNT, 2012), para tijolo maciço tipo solo-cimento, a média dos valores de absorção de água não deve ser maior que 20%, ou seja, somente as composições 1, 2 e 9 atenderam esse requisito.

Já a NBR 15270-1 (ABNT, 2005), define um intervalo de tolerância para o índice de absorção de água para blocos cerâmicos de vedação entre 8 a 22%, sendo assim, apenas as composições 5, 7 e 8 não atenderam à norma.

Isso quer dizer que não é recomendado o uso do material em locais úmidos sem aplicação de revestimento em argamassa, por apresentar maiores chances de desenvolver algum tipo de mofo e, também, pelo fato de que os acabamentos (pinturas, azulejos etc.) não resistem a tijolos muito úmidos.

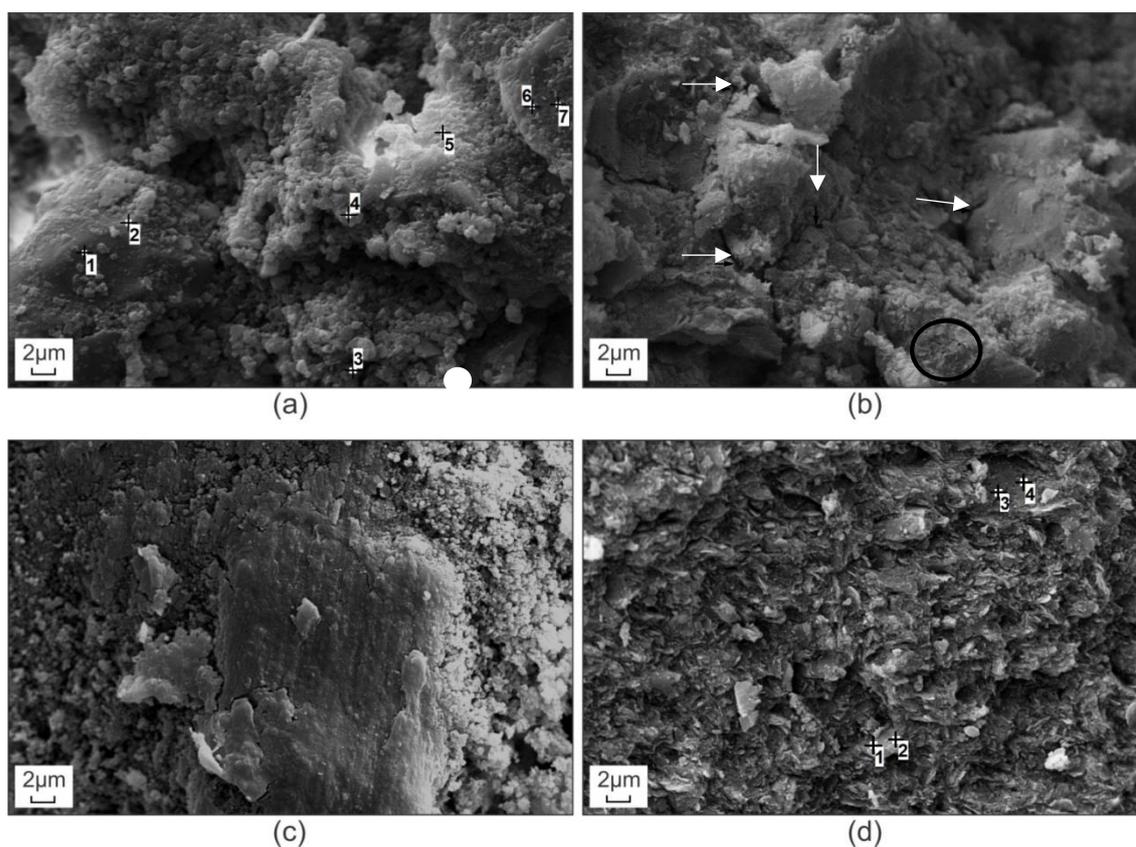
É possível afirmar que houve redução dos valores de absorção de água entre os períodos de 28 e 90 dias de cura, fato que pode ser possivelmente explicado devido ao crescimento da densidade aparente pelo surgimento de novas formações nos poros dos corpos de prova.

### 4.1.3 Análise das Composições Seleccionadas

As composições seleccionadas para análise das características morfológicas, composição química e mineralógica, foram as misturas 1 e 7. A primeira por obter o melhor desempenho mecânico e a segunda por conter o maior teor de LETA na composição.

#### 4.1.3.1 Estrutura Morfológica da Composição 1

A Figura 21 mostra a morfologia da composição 1 na mistura inicial, após 3, 28 e 90 dias de cura.



**Figura 21 - Morfologia na composição 1: mistura inicial (a), 3 dias (b), 28 dias (c), 90 dias (d) com aumento de 5.000x.**

**Fonte: Autoria própria.**

Ao analisar as micrografias da Figura 21 nas diferentes idades é possível observar a evolução na estrutura morfológica do material. Na micrografia da mistura inicial é possível ver os diferentes materiais componentes sem muitas alterações e as reações entre ele ainda são muito fracas, pois, o material ainda não foi compactado para produção do corpo de prova.

A Tabela 15 mostra a composição química pontual feita por EDS da mistura inicial.

**Tabela 15 - Microanálise química por EDS da mistura inicial da composição 1 (Figura 21 a).**

	<b>C</b>	<b>Mg</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>
Ponto 1	53,34	0,45	-	45,36	0,84	-
Ponto 2	52,88	0,48	-	45,70	0,94	-
Ponto 3	45,98	20,97	-	-	33,06	-
Ponto 4	48,25	20,15	0,68	-	30,92	-
Ponto 5	48,02	15,75	1,41	7,29	27,53	-
Ponto 6	55,26	15,45	5,60	12,56	9,92	1,21
Ponto 7	43,74	11,80	4,23	13,93	24,13	2,16

**Fonte: Autoria própria.**

A partir dos dados da Tabela 15 é possível comprovar que nenhuma reação química ocorreu entre os componentes da mistura, sendo possível identificar os diferentes materiais mostrados nas imagens de MEV (Figura 21) pela composição química realizada pontualmente.

Na micrografia do corpo de prova rompido após 3 dias de cura já é possível observar o início das reações de formação de um novo material onde pode-se observar ligações entre os materiais, porém, essas reações ainda são fracas, ocasionando fissuras no material.

Na micrografia do corpo de prova rompido após 28 dias de cura é nítida a formação de um monólito compacto onde a ocorrência de fissuras é menor devido ao ganho de resistência do material.

Na micrografia do corpo de prova rompido após 90 dias de cura várias formas semelhantes às formas cristalinas aparecem. No entanto, uma comparação entre os resultados da análise de EDS dessas formações, mostrada na Tabela 16,

conclui-se que se trata de uma nova formação amorfa devido a grande diferença das composições químicas entre os pontos 1 e 2, ou entre os pontos 3 e 4.

**Tabela 16 - Microanálise química por EDS da composição 1 após 90 dias (Figura 21 d).**

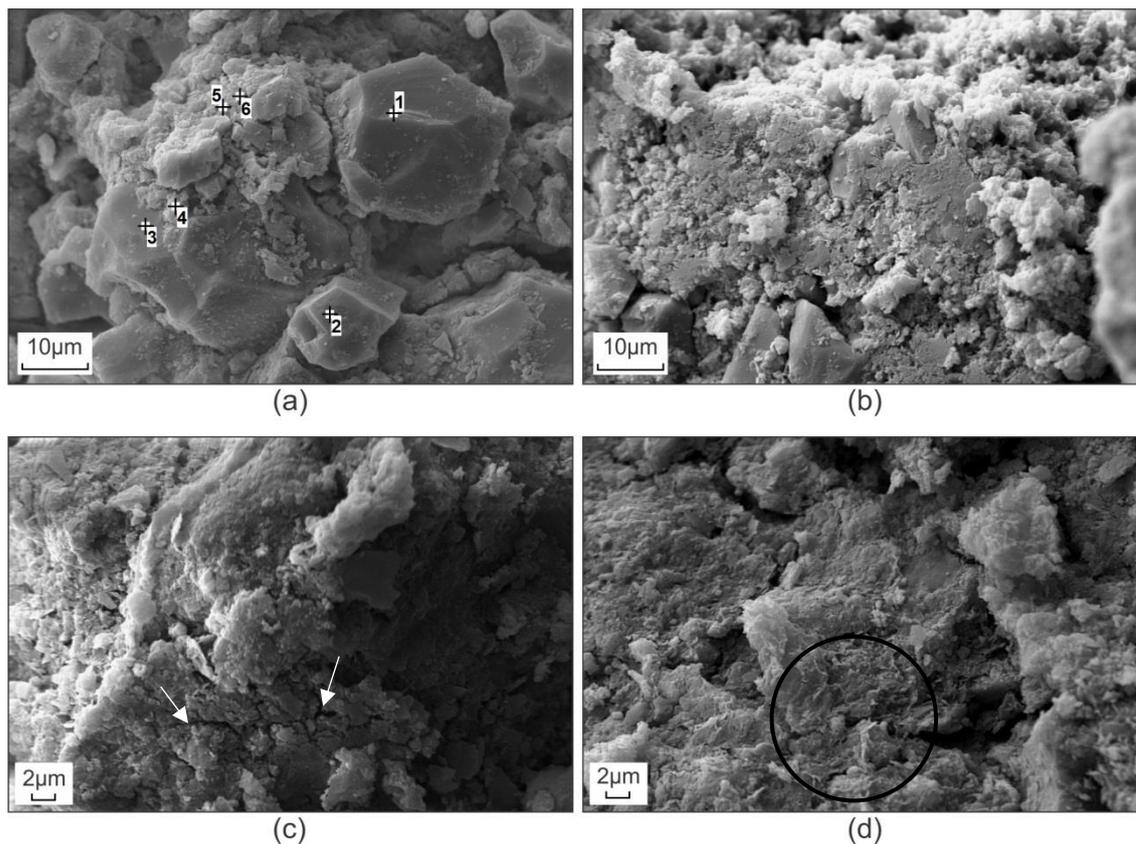
	<b>C</b>	<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Fe</b>
Ponto 1	-	32,68	46,98	3,36	9,09	7,89
Ponto 2	53,47	17,05	21,01	1,58	3,54	3,32
Ponto 3	-	17,68	18,68	-	24,42	39,19
Ponto 4	33,61	16,21	18,12	-	12,09	19,97

**Fonte: Autoria própria.**

Ainda sobre a composição 1 após 90 dias de cura, é possível dizer que poros e fissuras são praticamente inexistentes.

#### 4.1.3.2 Estrutura Morfológica da Composição 7

A Figura 22 mostra a morfologia da composição 7 na mistura inicial, após 3, 28 e 90 dias de cura.



**Figura 22 - Morfologia na composição 7: mistura inicial (a), 3 dias (b), 28 dias (c), 90 dias (d) com aumento de 3.000x e 5.000x.**

**Fonte: Autoria própria.**

Da mesma forma que a composição 1 mostrada na Figura 21, a composição 7, em sua mistura inicial, ainda não apresenta indícios de interação entre os materiais componentes, sendo possível identifica-los separadamente com o auxílio da microanálise química por EDS realizada em pontos específicos da imagem de MEV.

A Tabela 17 mostra a microanálise química por EDS da mistura inicial.

Tabela 17 - Microanálise química por EDS da mistura inicial da composição 7 (Figura 22 a).

	C	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe
Ponto 1	27,08	17,26	1,40	-	-	52,01	-	2,26
Ponto 2	37,64	19,88	-	-	-	42,17	-	-
Ponto 3	46,64	20,60	0,71	-	-	32,04	-	-
Ponto 4	45,98	20,97	-	-	-	33,06	-	-
Ponto 5	50,80	7,03	11,18	11,42	0,71	13,03	0,69	5,15
Ponto 6	50,46	9,89	9,90	9,43	0,51	16,66	-	3,14

Fonte: Autoria própria.

Como esta composição possui apenas 10% de material aglomerante em sua composição, as reações entre os materiais ocorre mais lentamente ao compararmos com a composição 1, que contém 30% de aglomerante. Após 3 dias de cura ainda é possível identificar os diferentes materiais.

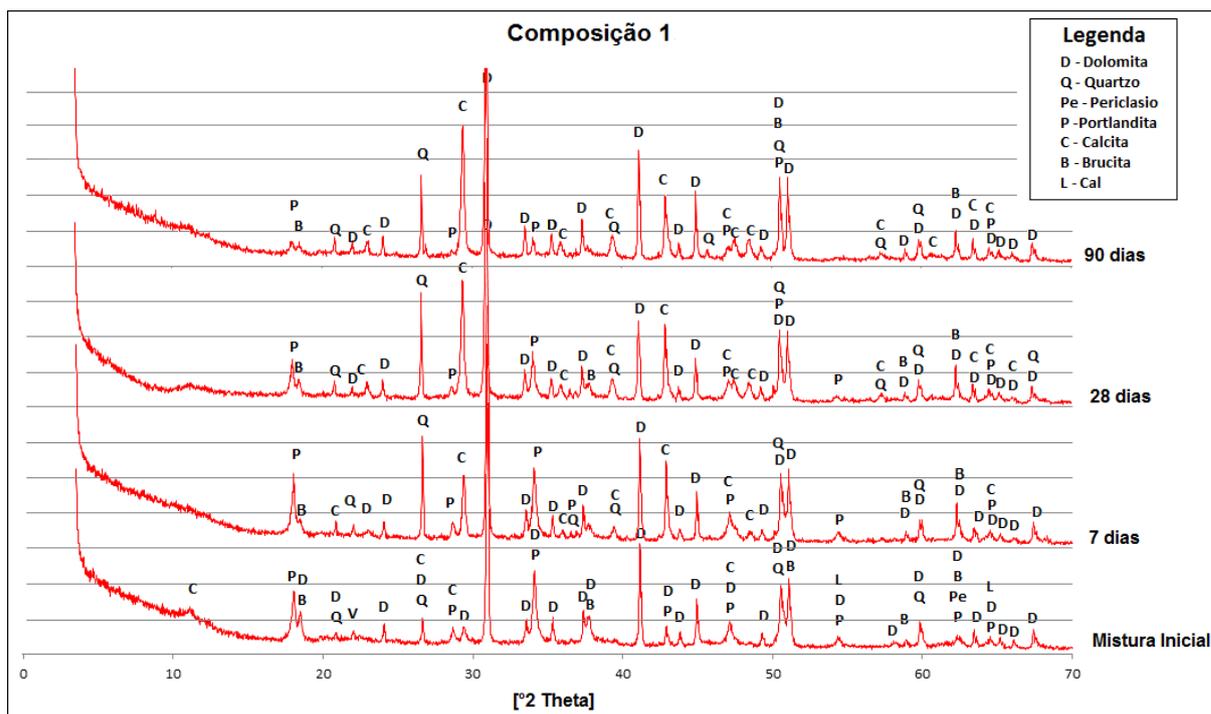
Na micrografia do corpo de prova rompido após 28 dias de cura ainda há muito material que não reagiu e há grande presença de poros vazios e fissuras na estrutura do material.

Após 90 dias de cura, a micrografia do corpo de prova rompido mostra a lenta formação de novas estruturas semelhantes às escamas de peixes, apresentando um material de pouca resistência, onde a presença de poros vazios e fissuras ainda são visíveis.

#### 4.1.3.3 Análise Mineralógica das Composições 1 e 7

A dificuldade na interpretação dos difratogramas de raios-X de um material em diferentes tempos de cura com inúmeros componentes minerais se deve à coincidência entre picos (MYMRIN *et al.*, 2015). Portanto, serão discutidos apenas alguns picos onde não existe tal coincidência entre picos de minerais, onde a intensidade altera durante a cura.

A Figura 23 mostra a análise mineralógica da composição 1 na mistura inicial e, após 7, 28 e 90 dias de cura.



**Figura 23 - Análise mineralógica da composição 1 nos diferentes tempos de cura.**

Fonte: Autoria própria.

Comparando os difratogramas da mistura inicial e após 90 dias de cura, da composição 1, é clara a ausência de novos picos. A interpretação dessas curvas permite que se saiba que após 7 dias de cura os picos de cal virgem, vermiculita e periclasio ficaram abaixo do limite de detecção do método DRX (aproximadamente 5%), fazendo com que os picos desaparecessem do difratograma. No entanto, a intensidade dos picos de minerais como dolomita e calcita aumentou significativamente. Isso pode ser facilmente observado na Tabela 18 e Tabela 19.

**Tabela 18 - Composição mineralógica da composição 1 (continua).**

Mist. In.		7 dias		28 dias		90 dias		
d[Å]	I [%]	Mineral						
7,94	3,41	C	-	-	-	-	-	-
4,92	16,10	Pt	17,39	Pt	8,80	Pt	3,26	Pt
4,78	9,35	B, V	-	-	3,45	B	2,44	B
4,27	2,24	Q, V	2,90	Q	3,00	Q	3,41	Q
4,04	3,01	V	2,44	D	1,78	D	2,73	D
3,86	-	-	1,89	C	3,43	C	3,64	C
3,69	4,66	V	4,34	D	3,71	D	4,27	D
3,35	5,92	Q, V, C	21,90	Q	17,09	Q	13,14	Q
3,11	4,59	Pt, C	5,22	Pt	3,22	Pt	-	-

Tabela 19 - Composição mineralógica da composição 1 (conclusão).

3,04	5,34	V	20,26	C	31,84	C	34,78	C
2,88	100,00	V	100,00	D	100,00	D	100,00	D
2,67	6,21	V	8,41	D	6,70	D	6,97	D
2,63	23,02	Pt, V	23,61	Pt	11,68	Pt	4,64	Pt
2,54	6,66	V	6,06	D	5,13	D	5,34	D
2,50	-	-	2,76	C	3,43	C	4,16	C
2,46	-	-	2,10	Q, Pt	-	-	-	-
2,40	9,02	V, L	9,46	D	7,33	D	8,94	D
2,38	9,38	B, V, L	-	-	4,46	B	-	-
2,28	-	-	4,03	Q, C	5,77	Q, C	6,26	Q, C
2,19	26,89	V, C	25,75	D	17,97	D	23,70	D
2,11	5,45	Pe, V	21,59	C	17,24	C	15,49	C
2,07	3,50	V	3,39	D	2,86	D	3,73	D
2,01	12,02	V	12,64	D	9,78	D	13,10	D
1,98	-	-	-	-	-	-	2,07	Q
1,93	7,91	Pt, V, C	9,00	Pt, C	5,71	Pt, C	3,39	Pt, C
1,91	-	-	-	-	5,80	C	5,83	C
1,88	-	-	3,11	C	5,09	C	5,69	C
1,85	3,86	V	3,26	D	3,08	D	3,15	D
1,81	15,07	Q, V	14,38	D, Q	17,59	D, Pt, Q	17,99	D, Pt, Q, B
1,77	19,53	B, V	19,48	D	16,03	D	17,71	D
1,69	3,18	Pt, V, L	3,26	Pt	1,44	Pt	-	-
1,61	-	-	-	-	2,05	Q, C	2,00	Q, C
1,59	1,64	V	-	-	-	-	-	-
1,57	2,16	B	2,31	D	2,01	D, B	2,37	D
1,54	7,66	Q, V	6,46	D, Q	5,34	D, Q	5,41	D, Q
1,53	-	-	-	-	-	-	1,54	C
1,49	3,51	Pt, Pe, B, V	9,17	D, B	5,91	D, B	5,66	D, B
1,47	3,67	V	3,86	D	3,55	D, C	4,13	D
1,44	2,96	Pt, V, L	3,39	D, Pt, C	2,87	D, Pt, C	2,55	D, Pt, C
1,43	2,74	V	2,47	D	2,42	D	2,49	D
1,41	1,99	V	1,40	D	1,25	D, C	1,83	D
1,39	4,03	V	4,56	D	3,23	D, Q	3,53	D

Fonte: Autoria própria.

A Figura 24 mostra a análise mineralógica da composição 7 na mistura inicial e, após 7, 28 e 90 dias de cura.

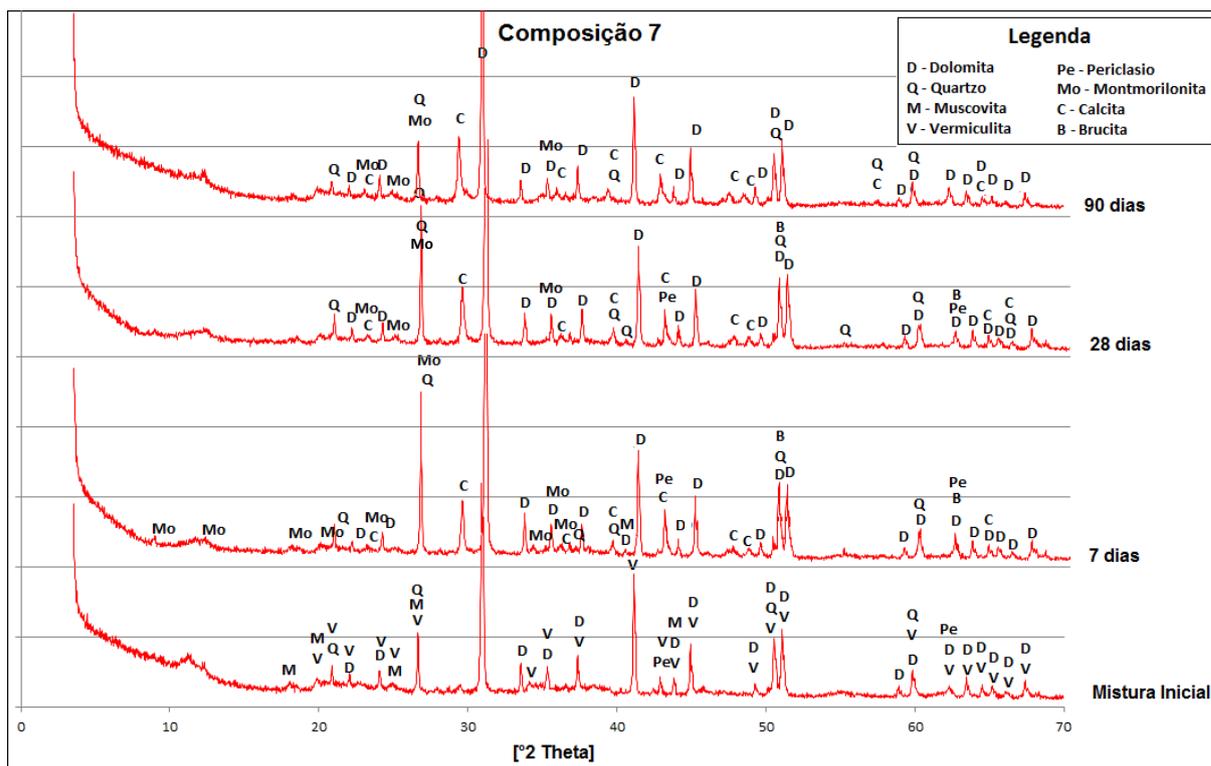


Figura 24 - Análise mineralógica da composição 7 nos diferentes tempos de cura.

Fonte: Autoria própria.

Comparando os difratogramas da mistura inicial e após 90 dias de cura, da composição 7, é clara a ausência de novos picos. Da mesma forma que ocorreu com a composição 1, ao interpretar as curvas de DRX da composição 7, foi possível verificar o desaparecimento dos picos de muscovita e vermiculita. Como essa composição continha apenas 10% de RPC, os picos de cal virgem eram tão pequenos que não possível detectar por DRX. No entanto, a intensidade dos picos de minerais como dolomita e calcita aumentou significativamente. Isso pode ser observado mais facilmente na Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 20 - Composição mineralógica da composição 7 (continua).

Mist. In.			7 dias		28 dias		90 dias	
d[Å]	I [%]	Mineral	I [%]	Mineral	I [%]	Mineral	I [%]	Mineral
9,97	-	-	1,07	Mo	-	-	-	-
7,24	3,98	-	1,44	Mo	1,60	-	3,00	-
4,93	1,56	M	1,14	Mo	-	-	-	-
4,47	3,18	V, M	-	-	1,70	V	-	-
4,45	-	-	1,47	V	-	-	3,47	-
4,26	-	-	4,19	Q	-	-	4,69	Q

Tabela 21 - Composição mineralógica da composição 7 (conclusão).

4,25	4,69	V, Q	-	-	4,28	Q	-	-
4,04	3,59	D, V	1,93	D	2,21	D	3,49	D
3,84	-	-	1,33	Mo, C	1,78	C, Mo	2,54	C, Mo
3,70	4,84	D, V	3,23	D	3,67	D	5,76	D
3,57	2,00	V, M			1,57	Mo	2,68	Mo
3,35	10,90	V, M, Q	19,85	Mo, Q	20,60	Q, Mo	13,93	Q, Mo
3,03	1,64	-	10,27	C	12,33	C	20,29	C
2,89	100,00	D, V	100,00	D, V	100,00	D, V	100,00	D, V
2,67	6,46	D	5,93	D	5,55	D	5,53	D
2,63	2,39	V	1,58	Mo	-	-	-	-
2,54	5,88	D, V	4,96	D, Mo	5,69	D, Mo	6,57	D, Mo
2,49	-	-	1,97	V, C	2,35	V, C	3,52	V, C
2,46	-	-	2,06	Q	-	-	-	-
2,40	7,15	D, V	5,47	D	6,86	D	9,33	D
2,28	-	-	2,68	Q, C	3,38	Q, C	4,28	Q, C
2,23	-	-	-	-	1,15	Q	-	-
2,19	26,21	D, V, M	17,03	D	18,24	D	27,58	D
2,10	3,06	V, Pe	7,40	C, Pe	6,42	C, Pe	8,17	C
2,06	3,70	D, V, M	2,22	D	3,27	D	3,49	D
2,01	10,60	D, V	9,09	D	10,21	D	13,29	D
1,91	-	-	1,75	C	2,32	C	3,83	C
1,87	-	-	1,55	C	2,21	C	3,42	C
1,85	2,55	D, V	2,25	D	2,66	D	4,67	D
1,82	-	-	2,69	Q, V	-	-	-	-
1,80	13,93	D, V, Q	13,05	D, Q, B	13,42	D, Q, B	13,70	D, Q
1,79	15,83	D, V	11,88	D	13,94	D	17,24	D
1,66	-	-	-	-	0,41	V, Q	1,01	Q, C
1,57	2,18	D	1,59	D	1,77	D	1,95	D
1,54	6,08	D, V, Q	5,04	D, Q	5,32	D, Q	6,18	D, Q
1,49	2,82	D, V, Pe	3,08	D, Pe, B	2,91	D, Pe, B	4,94	D
1,47	4,15	D, V	2,61	D	2,73	D	4,00	D
1,44	2,84	D, V	1,97	D, C	2,15	D, C	2,27	D, C
1,43	2,82	D, V	1,89	D	2,04	D	2,42	D
1,41	1,55	D, V	1,18	D	1,25	D, Q, C	1,37	D
1,39	3,28	D, V	2,21	D	3,36	D	3,29	D

Fonte: Autoria própria.

O aumento na intensidade dos picos nos difratogramas indica o aumento na quantidade desses minerais e na melhoria das estruturas cristalinas. Tais mudanças podem explicar o aumento da resistência do material durante o processo de cura.

## 5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho confirma experimentalmente a possibilidade de obtenção de um novo material para a construção civil utilizando lodo de estação de tratamento de água, lama de polimento de mármore e resíduo de produção de cal como matérias-primas.

Os compósitos que alcançaram os valores mais elevados de resistência à compressão continham os menores teores de LETA. No entanto, foi possível incorporar até 50%, em massa, desse resíduo à mistura.

Ao 7º dia de cura todas as composições atingiram os requisitos mínimos da norma para tijolo tipo solo-cimento no que diz respeito à resistência à compressão uniaxial. Referente à norma para tijolo maciço queimado, as composições 1 a 5 atenderam os requisitos da classe C (> 4 MPa) aos 7 dias de cura.

A absorção de água é um parâmetro que pode avaliar a aplicabilidade do compósito em diferentes componentes da construção civil (PAIVA, 2007). Os valores de absorção de água aos 28 dias de cura variaram entre 16,27% a 26,32% e aos 90 dias de cura variaram entre 13,57% a 23,56%, concluindo-se que não é recomendado o uso do material para produção de tijolos.

Por meio dos estudos realizados por DRX, MEV e EDS, foram determinadas as interações físico-químicas dos componentes das misturas iniciais, bem como os processos de formação de novas estruturas. Devido à dissolução da superfície das partículas sólidas dos materiais em meio alcalino, com a síntese das novas formações amorfas, houve o aumento dos valores de resistência.

A análise dos resultados de investigação experimental possibilitou afirmar que, dentro das limitações da pesquisa e, em ambiente laboratorial, os compósitos desenvolvidos apresentaram características técnicas que viabilizam sua aplicação prática na construção civil.

É recomendado, que um estudo mais aprofundado das características do material, seja feito para avaliar a real aplicabilidade do material na construção civil.

## REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. C.; BORLINI, M. C.; SANDRINI, I.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Utilização de resíduo do beneficiamento de granite pela tecnologia de tear a seco para obtenção de cerâmica vermelha. In: 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, Campos do Jordão. **Anais...**, p 252-259, 2010.
- AKBULUT, Hüseyin, GÜNER, Cahit. Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements. **Building and Environment**, v. 42, p. 1921-1930, 2007.
- ALGIN, Halil M.; TURGUT, Paki. Cotton and limestone powder wastes as brick material. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1074-1080, 2008.
- ALIABDO, Ali A.; ELMOATY, Abd A. E. M.; AUDA, Esraa M. Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. **Construction and Building Materials**, v. 50, p. 28-41, 2014.
- ALVES, Eliete B.; RIBEIRO JUNIOR, Ilçó; CONCIANI, Wilson. Estudo preliminar para dosagem de solo-cal para emprego em tijolos para alvenaria de vedação. In: I SEMINÁRIO MATO-GROSSENSE DE HABITAÇÃO DE INTERESSE SOCIAL, 2005, Cuiabá. **Anais...** Cuiabá: CEFETMT, 2005.
- AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). **Commercial application and marketing of water plant residuals – subject area: water treatment**. New York, 2001.
- ÂNGULO, S. C., JOHN, V. M., ULSEN, C., KAHN, H. Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados separados por líquidos densos. In: I CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEL, 2004, São Paulo, 2004. **Anais Eletrônicos...** São Paulo, 2004. Disponível em: <[http://www.globalconstroi.com/images/stories/Manuais\\_tecnicos/2010/construcao\\_de\\_molicao/1.pdf](http://www.globalconstroi.com/images/stories/Manuais_tecnicos/2010/construcao_de_molicao/1.pdf)>. Acesso em: 24 de outubro de 2015.
- ANWAR, Rusmadiyah; KAMARUN, H. R.; VERMOL, V. V.; HASSAN, O. H. Marble dust incorporate in standar local ceramic body as enhancement in sanitary ware products. IEEE CHUSER 2011, dezembro 2011, Penang, Malaysia, p. 355-357.
- ARUNTAS, Hüseyin Y.; GÜRÜ, Metin; DAYI, Mustafa; TEKIN, Inker. Utilization of waste marble dust as an additive in cement production. **Materials and Design**, v. 31, p. 4039-4042, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Tijolo Maciço Cerâmico para Alvenaria – NBR 7170**. Rio de Janeiro, 1983.

\_\_\_\_\_. **Solo: Análise Granulométrica – NBR 7181**. Rio de Janeiro, 1984.

\_\_\_\_\_. **Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova – NBR 5738**. Rio de Janeiro, 2015.

\_\_\_\_\_. **Cal Virgem para Construção Civil – NBR 6453**. Rio de Janeiro, 2003.

\_\_\_\_\_. **Resíduos Sólidos – Classificação – NBR 10004**. Rio de Janeiro, 2004.

\_\_\_\_\_. **Componentes Cerâmicos Parte 1: blocos cerâmicos para alvenaria de vedação - Terminologia e requisitos – NBR 15270-1**. Rio de Janeiro, 2005.

\_\_\_\_\_. **Concreto: ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos – NBR 5739**. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **Tijolo Maciço de Solo-cimento – NBR 8491**. Rio de Janeiro, 2012.

\_\_\_\_\_. **Tijolo Maciço de Solo-cimento: determinação da resistência à compressão e da absorção à água – NBR 8492**. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAZIONE ITALIANA MARMOMACCHINE (AIM). **Tecnologias Italianas para Extração e Beneficiamento de Pedras Ornamentais**. Apostila, 103p. Cachoeiro de Itapemirim, 2002.

BAJAY, Sérgio V; SANT'ANA, Paulo H. M. **Oportunidades de eficiência energética para a indústria: cal e gesso**. Relatório setorial. 42p. Brasília: CNI, 2010.

BILGIN, N.; YEPREM, H. A.; ARSLAN, S.; BILGIN, A.; GÜNAY, E.; MARSOGLU, M. Use of waste marble powder in brick industry. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 449,457, 2012.

BRAGA, Florindo S.; BUZZI, Daniella C.; COUTO, Maria C. L.; LANGE, Liséte C. Caracterização de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 237-244. Nota Técnica. 2010

BRASIL. **Lei n. 9.605**, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19605.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19605.htm)>. Acesso em: 12 de agosto de 2014.

BUZZI, Daniella Cardoso ; BRAGA, F. S. ; LORENZONI, D. I. . Caracterização segundo a NBR 10004/2004 de resíduos gerados no Beneficiamento de Granitos. In: VIII SIBESA - Mudanças Globais: Desafios para o saneamento Ambiental, 2006, Fortaleza - CE. **Anais VIII SIBESA**, 2006, Fortaleza. Mudanças Globais : desafios para o Saneamento Ambiental. Rio de Janeiro: ABES, 2006. v. 1. p. 95-95.

ÇELIK, Mustafa Y.; SABAH, Eyüp. Geological and technical characterization of Iscehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. **Journal of Environmental Management**, v. 87, p.106-116, 2008.

CHAO, Iara R. S. **Remoção de fósforo de efluentes de estações de tratamento biológico de esgotos utilizando lodo de estação de tratamento de água**. 2006. 160p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2006.

CHIANG, Kung-Yuh; CHOU, P. H.; HUA, C. R.; CHIEN, K. L.; CHEESEMAN, C. Lightweight bricks manufactured from water treatment sludge and rice husks. **Journal of Hazardous Materials**, v. 171, p. 76-82, 2009.

CHIODI FILHO, Cid. Informações mercadológicas de interesse para o projeto especificadores. I SEMINÁRIO DE ESPECIFICAÇÃO E APLICAÇÃO DE ROCHAS ORNAMENTAIS, ABIROCHAS, 2009, Vitória. Disponível em: <[http://www.sindi-rochas.com.br/arquivos/I\\_Seminario\\_Especificacao\\_Cid\\_Chiodi.pdf](http://www.sindi-rochas.com.br/arquivos/I_Seminario_Especificacao_Cid_Chiodi.pdf)>. Acesso em: 03 de setembro de 2014.

COELHO, Edumar R. C. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2008. Disponível em: <[www.ct.ufes.br/ppgea/files/Arquivos28/5.1\\_Abastecimento\\_de\\_água-2008-1-a\\_\(dado\\_em\\_4\\_horas\).ppt](http://www.ct.ufes.br/ppgea/files/Arquivos28/5.1_Abastecimento_de_água-2008-1-a_(dado_em_4_horas).ppt)>. Acesso em: 25 de novembro de 2014.

CORDEIRO, João S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: REALI, Marco. A. P. (Coord.). **Noções Gerais de Tratamento e Disposição Final de Lodos de Estações de Tratamento de Água**. Rio de Janeiro: ABES, 1999.

CORRÊA, Sandra M. **Compósitos à base de resíduos de concreto e resíduos de produção de cal.** 2005. 105p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

CUNHA, Jefferson P. **Desenvolvimento de um novo material a partir da composição dos resíduos da mineração de varvito e da produção de cal.** 2007. 94 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). **Solos: determinação do teor de umidade – ME 213.** Rio de Janeiro, 1994.

DHANAPANDIAN, Swaminathan; GNANAVEL, Balasubramani; RAMKUMAR, Thirunavukkarasu. Utilization of granite and marble sawing powder wastes as brick materials. **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences**, v. 4, n. 2, p. 147-160, 2009.

DUARTE, Júlia K. V.; SILVA, Lucas R.; SILVA, Edja L. da. Utilização dos resíduos de empresas de beneficiamento de granito e mármore como adição na produção de concreto de alto desempenho na região do agreste alagoano. In: VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, 2012. **Anais eletrônicos...** Palmas, Tocantins: IFTO, 2012. Disponível em: <<http://propi.ifto.edu.br/ocs/index.php/connepi/vii/paper/view/4943>>. Acesso em: 30 de julho de 2014.

FADANELLI, Lis E.A.; WIECHETECK, Giovana K. Estudo da utilização de lodo de estação de tratamento de água em solo cimento para pavimentação rodoviária. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 2, n. 2, p. 31-37, 2010.

FELEKOGLU, Burak. Utilisation of high volumes of limestone quarry wastes in concrete industry (self-compacting concrete case). **Resources, Conservation and Recycling**, v.51, p. 770-791, 2007.

FERREIRA, Ana C. B.; NUNES, Edilene, C. D. Reaproveitamento e incorporação de resíduos de mármore em poliamida 66. **Revista Eletrônica de Educação e Tecnologia do SENAI-SP**, v. 3, n.5, 2009.

FIGUEIREDO, Suélen S.; SILVA, Cibelle G.; BEZERRA, Izabelle M. T.; DIAS, Suellen L.; NEVES, Gelmires A.; MENEZES, Romualdo R.; SANTANA, Lisiane N. L. Soil-lime blocks using construction residues – durability study. **Materials Science Forum**, v. 727-728, p. 1422-1427, 2012.

FRASCA, M. H. B. O. Rocha como material de construção. In: ISAIA, Geraldo C. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais. **IBRACON**, v. 1, p. 437-480, 2007.

FREIRE, Leonardo C.; QUEIROZ, Joedy P.C.; CARANASSIOS, Adriano. Utilização de resíduos oriundos do desdobramento de rochas ornamentais para confecção de blocos paisagísticos. XVIII Jornada de Iniciação Científica, 2009. **Anais eletrônicos...** CETEM, 2009. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie\\_anais\\_XVII\\_jic\\_2009/Leonardo\\_Cattabriga\\_Freire.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XVII_jic_2009/Leonardo_Cattabriga_Freire.pdf)>. Acesso em 28 de julho de 2014.

FRÍAS, Moisés; DE LA VILLA, R. V.; SOTO, I. de; GARCÍA, R.; BALOA, T. A. Influence of activated drinking-water treatment waste on binary cement-based composite behavior: characterization and properties. **Composites: Part B**, v. 60, p. 14-20, 2014.

GALETAKIS, Mihalis; RAKA Sid Ahmed. Utilization of limestone dust for artificial stone production: an experimental approach. **Minerals Engineering**, v. 17, p. 355-357, 2004.

GALO, David de B. **Cal**. Sumário Mineral 2012. DNPM, Bahia, 2012. Disponível em: <[https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra\\_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7375](https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7375)>. Acesso em 25 de julho de 2014.

GANCEL, Osman; OZEL, Cengiz; KOKSAL, Fuat; ERDOGMUS, Ertugrul; MARTÍNEZ-BARRERA, Gonzalo; BROSTOW, Witold. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**, v. 21 p. 62-70, 2012.

GARAY, Alexandre. **SINDICAL PR – Sindicato das indústrias de cal no estado do Paraná: Histórico da produção de cal**. Disponível em: <<http://www.fiepr.org.br/sindicatos/sindicalpr/FreeComponent3302content19867.shtml>>. Acesso em: 10 de julho de 2014.

GARCIA, Ana. Setor de fabricação de cimento e cal. Inspeção geral do ambiente e do ordenamento do território (2008). In: FERRARI, Fernanda de O. S. **Utilização de fosfógeno, resíduos da produção de cal e areia da extração de ouro para produção de materiais da construção civil**. 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

GUTIÉRREZ, Alexis S.; CANEGHEM, Jo V.; MARTÍNEZ, Juan. B. C.; VANDECASTEELE, Carlo. Evaluation of the environmental performance of lime production in Cuba. **Journal of Cleaner Production**, v. 31, p. 126-136, 2012.

HAMZA, Rania; EL-HAGGAR, Salah; KHEDR, Safwan. Utilization of marble and granite waste in concrete bricks. **IPCBEE**, v. 21, p. 115-119, 2011.

HEBHOUB, H. AOUN, H.; BELACHIA, M.; HOUARI, H.; GHORBEL, E. Use of waste marble aggregates in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 25, p. 1167-1171, 2011.

HEGAZY, Badr E. E.; FOUAD, Hanan A.; HASSANAIN, Ahmed M. Incorporation of waste sludge, silica fume, and rice husk ash in brick making. **Advances in Environmental Research**, v. 1, n. 1, p. 83-96, 2012.

HUANG, Chihping; PAN, Jull R.; LIU, Yaorey. Mixing water treatment residual with excavation waste soil in brick and artificial aggregate making. **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, n.2 p. 272-277, 2005.

HUANG, Chung-Ho; WANG, Shun-Yuan. Application of water treatment sludge in the manufacturing of lightweight aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 174-183, 2013.

JALOWITZKI, Marise. **Indústria do Cimento – Tijolos Ecológicos – Várias Opções**. 2012. Disponível em: <<http://compromissoconsciente.blogspot.com.br/2012/07/industria-do-cimento-tijolos-ecologicos.html>>. Acesso em: 16 de agosto de 2014.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, USP, São Paulo, 2000.

KITOUNI, Souad; HOUARI, H. Lightweight concrete with Algerian limestone dust. Part I: study on 30% replacement to normal aggregate at early age. **Cerâmica**, v. 59, p. 600-608, 2013.

KIZINIEVIC, Olga; ZURAUSKIENE, Ramune; KIZINIEVIC, Viktor; ZURAUSKAS, Rimvydas. Utilisation of sludge waste from water treatment for ceramic products. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 464-473, 2013.

LEMONS, Raimundo C.; SANTOS, Raphael D. **Manual de descrição e coleta no campo**. 3 ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996.

LEVY, Salomon M. **Contribuição ao estudo de durabilidade de concreto produzidos com resíduo de concreto e alvenaria**. 2001. 194p. Tese (Doutorado) em Engenharia Civil – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

LIN, Cheng-Fang; WU, Chung-Hsin; HO, Hsiu-Mai. Recovery of municipal waste incineration bottom ash and water treatment sludge to water permeable pavement materials. **Waste Management**, v. 26, p. 970-978, 2006.

LORENZO, Mariana P. **Caracterização dos impactos ambientais negativos e medidas mitigatórias do processo de assoreamento do lago Igapó, Londrina – PR**. 2011. 68 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Centro Universitário Filadélfia, Londrina, 2011.

LORENZONI, Denise I. **Tijolos prensados produzidos com resíduos sólidos industriais: uma caracterização segundo a NBR 10004/2004**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, 2005.

MANGWANDI, Chirangano; ALBADARIN, Ahmad B.; TAO, Liu J.; ALLEN, Stephen; WALKER, Gavin M. Development of a value-added soil conditioner from high shear co-granulation of organic waste and limestone powder. **Powder Technology**, v. 252, p. 33-41, 2014.

MANHÃES, J.P.V.T.; HOLANDA, J.N.F. (2008) Caracterização e classificação de resíduo sólido “pó de rocha granítica” gerado na indústria de rochas ornamentais. **Química Nova**, v. 31, n. 6, p. 1301-1304.

MARBRASA. **Jazidas**. Disponível em: <<http://www.marbrasa.com.br/jazidas.html>>. Acesso em: 13 de outubro de 2014.

MELLO, Roberta M. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha**. 2006. 69 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2006.

MINERAL INDUSTRY SURVEYS. **Lime**. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 2014. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/lime/mcs-2014-lime.pdf>>. Acesso em: 28 de julho de 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). **Relatório Técnico 33 – Perfil de Rochas Ornamentais e de Revestimento**. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia, Brasília, 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_mineracao\\_brasileira/P23\\_RT33\\_Perfil\\_de\\_Rochas\\_Ornamentais\\_e\\_de\\_Revestimento.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_mineracao_brasileira/P23_RT33_Perfil_de_Rochas_Ornamentais_e_de_Revestimento.pdf)>. Acesso em 23 de julho de 2014.

\_\_\_\_\_. **Perfil da Cal**. Projeto de Assistência Técnica ao Setor de Energia, Brasília, 2009. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano\\_duo\\_decenal/a\\_transformacao\\_mineral\\_no\\_brasil/P46\\_RT72\\_Perfil\\_do\\_Cal.pdf](http://www.mme.gov.br/sgm/galerias/arquivos/plano_duo_decenal/a_transformacao_mineral_no_brasil/P46_RT72_Perfil_do_Cal.pdf)>. Acesso em: 28 de julho de 2014.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA. **Resolução CONAMA n° 307**, de 17 de julho de 2002. – In: Resoluções, 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 12 de agosto de 2014.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA n° 357**, de 18 de março de 2005. – In: Resoluções, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 12 de agosto de 2014.

\_\_\_\_\_. **Resolução CONAMA n° 430**, de 13 de maio de 2011. – In: Resoluções, 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em: 12 de agosto de 2014.

MONTEIRO, Sergio N. *et al.* Incorporation of sludges waste from water treatment plant into red ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 22, p. 1281-1287, 2008.

MONTERO, M. A. JORDÁN, M. M.; HERNÁNDEZ-CRESPO, M. S.; SANFELIU, T. The use of sewage and marble residues in the manufacture of ceramic tile bodies. **Applied Clay Science**, v. 46, p. 404-408, 2009.

\_\_\_\_\_. The use of a calcium carbonate residue from the stone industry in manufacturing of ceramic tile bodies. **Applied Clay Science**, v. 43, p. 186-189, 2009.

MYMRIN, Vsévolod; CORREA, Sandra M. New construction material from concrete production and demolition wastes and lime production waste. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 578-582, 2007.

MYMRIN, Vsévolod; ALEKSEEV, Kirill P.; CATAI, Rodrigo E.; IZZO, Ronaldo L. S.; ROSE, Juliana L.; NAGALLI, André; ROMANO, Cezar A. Construction material from construction and demolition debris and lime production wastes. **Construction and Building Materials**, v. 79, p. 207-213, 2015.

OCHOA, Pedro A G.; GUTIÉRREZ, Alexi S.; MARTÍNEZ, Juan B. C.; VANDECASTEELE, Carlo. Cleaner production in a small lime factory by means of process control. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 12, p. 1171-1176, 2010.

OKAGBUE, Celestine O.; ONYEGBI T. U.S. Potential of marble dust to stabilise red tropical soils for road construction. **Engineering Geology**, v. 53, p.371-380, 1999.

OLIVEIRA, Carolina N. RIBEIRO, Roberto C. C.; QUEIROZ, Joedy P. C. Aplicação de resíduos de mármore na produção de cosméticos. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 40 p. **Série Tecnologia Ambiental**, n. 54.

OLIVEIRA, Elza M.S. **Estudo da valorização e reciclagem de resíduo proveniente de estação de tratamento de águas em cerâmica vermelha**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2004.

OLIVEIRA, Elza M.S.; HOLANDA, José N.F. Influência da adição de resíduo (lodo) de estação de tratamento de águas nas propriedades e microestrutura da cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 54, p. 167-173, 2008.

OLIVEIRA, E.M.S., MACHADO, S.Q., HOLANDA J.N.F. Caracterização de resíduo (lodo) proveniente de estação de tratamento de águas visando sua utilização em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 50, p. 324-330, 2004.

OLIVEIRA, Inês C. A. As lamas resultantes da indústria transformadora das rochas ornamentais: Recuperação paisagística de um aterro superficial de lamas em Pêro Pinheiro (Sintra). 2005. 70p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2005.

OTI, Jonathon E.; KINUTHIA, J. M.; BAI, J. Developing unfired stabilized building material in the UK. **Engineering Sustainability**, v. 161, p. 211-218, 2008.

PAIVA, S. N. **Compósito cimento-lodo de ETE de indústria de papel para aplicação na construção civil**. 2007. 110p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

PATRICIO, S. M. R.; FIGUEIREDO, S. S.; BEZERRA, I. M. T.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C. Blocos solo-cal utilizando resíduo da construção civil. **Cerâmica**, v. 59, n. 349, 2013. Disponível em:  
<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0366-69132013000100003&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132013000100003&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em 01 de agosto de 2014.

PEREIRA, Luana dos S. A indústria da cal no Brasil. In: XVII JORNADA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 2009, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: CETEM, 2013. Disponível em: <[http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie\\_anais\\_XVII\\_jic\\_2009/Luana\\_dos\\_Santos\\_Pereira.pdf](http://www.cetem.gov.br/publicacao/serie_anais_XVII_jic_2009/Luana_dos_Santos_Pereira.pdf)>

PORRAS, Álvaro C.; ISAAC, Ricardo, de L.; MORITA, Dione. Incorporação de lodo das estações de tratamento de água e agregado reciclado de resíduos da construção civil em elementos de alvenaria – Tijolos estabilizados com cimento. **Ciencia e Ingeniería Neogranadina**, v. 18, n. 2, 2008.

RÊGO, José M. **O potencial das rochas carbonáticas do Rio Grande do Norte**. Natal, 2005. Disponível em: <<http://www.abceram.org.br/asp/13emc/pdf/sedec-m.pdf>>. Acesso em: 13 de outubro de 2014.

RICHTER, Carlos A. **Tratamento de lodos de estações de tratamento de água**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 2001.

RODRIGUES, Girley F. **Reciclagem de resíduos visando à produção de lâ mineral**. 2009. 84 f. Dissertação (Mestrado) – Rede Temática em Engenharia de Materiais (REDEMAT), Ouro Preto - MG, 2009.

RODRIGUES, Lara P.; HOLANDA, João N.F. Influência da incorporação de lodo de estação de tratamento de água (ETA) nas propriedades tecnológicas de tijolos solo-cimento. **Cerâmica**, v. 59, p. 551-556, 2013.

RODRÍGUEZ, Nuriah H.; RAMÍREZ, S. M.; VARELA, M. T. B.; GUILLEM, M.; PUIG, J.; LARROTCHA, E.; FLORES, J. Re-use of drinking water treatment plant (DWTP) sludges: Characterization and technological behavior of cement mortars with atomized sludge additions. **Cement and Concrete Research**, v. 40, p. 778-786, 2010.

SABOYA, Fernando Jr.; XAVIER, G. C.; ALEXANDRE, J. The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1950-1960, 2007.

SALES, Almir; SOUZA, Francis R. de. Concretes and mortars recycled with water treatment sludges and construction and demolition rubble. **Construction and Building Materials**, v. 23, p. 2362-2370, 2009.

SALES, Almir; SOUZA, Francis R. de.; SANTOS, Wilson N. dos.; ZIMER, Alexsandro M.; ALMEIDA, Fernando do C. R. Lightweight composite concrete produced with water treatment sludge and sawdust: Thermal properties and potential application. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2446-2453, 2010.

SANEPAR. **Relatório de administração e demonstrações contábeis**. Sanepar, Curitiba, 2012. Disponível em: <[http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/relatorio\\_demonstracoes\\_contabeis\\_2012\\_b.pdf](http://site.sanepar.com.br/sites/site.sanepar.com.br/files/relatorio_demonstracoes_contabeis_2012_b.pdf)>. Acesso em: 11 de novembro de 2014.

SARKAR, Ritwik; DAS, Swapan K.; MANDAL, Pradip K.; MAITI, Himadri S. Phase and microstructure evolution during hydrothermal solidification of clay-quartz mixture with marble dust source of reactive lime. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 26, p. 297-304, 2006.

SEGADÃES, Ana M.; CARVALHO, M. A.; ACCHAR, W. Using marble and granite rejects to enhance the processing of clay products. **Applied Clay Science**, v. 30, p. 42-52, 2005.

SILVA, André A. A. Gestão de resíduos na indústria de rochas ornamentais, com enfoque para a lama abrasiva. In: VII CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO, 2011, Rio de Janeiro. **Anais Eletrônicos...** Rio de Janeiro, CNEG, 2011. Disponível em: <<http://www.excelenciaemgestao.org/pt/edicoes-anteriores/vii-cneg/anais.aspx>>. Acesso em: 27 de novembro de 2014.

SILVA, Cynthia A. da; SILVEIRA, Carole; SILVA, Fernando A. da; KLEN, Marcia R. F.; BERGAMASCO, Rosângela. Classificação dos lodos formados durante o processo de coagulação/floculação da água com os coagulantes PAC e *Moringa oleifera*. **ENGEVISTA**, v. 14, n. 3, p. 302-309, 2012.

SILVA, Jaqueline B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, v. 51, p. 325-330, 2005.

SILVA, Mauro V. **Desenvolvimento de tijolos com incorporação de cinzas de carvão e lodo provenientes de estação de tratamento de água**. 2011. 132 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, USP, São Paulo, 2011.

SOLANCIS. **Extração**. 2014. Disponível em: <<http://www.solancis.com/pt/pedreiras/extracao>>. Acesso em: 26 de novembro de 2014.

SOUZA, Francis R. de. **Compósito de lodo de estação de tratamento de água e serragem de madeira para uso como agregado graúdo em concreto**. 2010. 209 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, USP, São Carlos, 2010.

SPÍNOLA, Vera. **Rochas ornamentais em arranjo produtivo**. Série de estudos e pesquisas – Superintendência de Estudos Econômicos e Sociais da Bahia, Salvador, 2003.

STELLIN JUNIOR, A.; PONTES, I. F. **Aproveitamento de finos gerados nas serragens de mármore e granitos**. Boletim Técnico - Escola Politécnica, USP. BT/PMI, São Paulo, v. BT/PMI, n. 134, p. 1-39, 2001.

TEIXEIRA, Silvio R. SANTOS, G. T. A.; SOUZA, A. E.; ALESSIO, P.; SOUZA, S. A.; SOUZA, N. R. The effect of incorporation of a Brazilian water treatment plant sludges on the properties of ceramic materials. **Applied Clay Science**, v. 53, p. 561-565, 2011.

TOYA, Tomohiro; NAKAMURA, Aiko; KAMESHIMA, Yoshikazu; NAKAJIMA, Akira; OKADA, Kiyoshi. Glass-ceramics prepared from sludge generated by a water purification plant. **Ceramics International**, v. 33, p. 573-577, 2007.

TURGUT, Paki; ALGIN, Halil M. Limestone dust and wood sawdust as brick material. **Building and Environment**, v. 42, p. 3399-3403, 2007.

TURGUT, Paki. Cement composites with limestone dust and different grades of wood sawdust. **Building and Environment**, v. 42, p. 3801-3807, 2007

UTLU, Zafer; SOGUT, Ziya; HEPBASLI, Arif; OKTAY, Zuhul. Energy and energy analyses of a raw mill in a cement production. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, p. 2479-2489, 2006.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e o tratamento de esgotos**. Universidade Federal de Minas Gerais, 3<sup>a</sup> ed., 4<sup>a</sup> reimpressão, Belo Horizonte, 2009.

WOLFF, Eliane; SCHWABE, Wilfrid K.; CONCEIÇÃO, Samuel V. Utilization of water treatment plant sludge in structural ceramics. **Journal of Cleaner Production**, v. 96, p. 282-289, 2015.

YEN, Chi-Liang; TSENG, Dyi-Hwa; LIN, Tung-Tsan. Characterization of eco-cement paste produced from waste sludges. **Chemosphere**, v. 84, p. 220-226, 2011.