



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E**  
**DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL**

**ISADORA ANDRADE BASTOS**

**UTILIZAÇÃO EXCLUSIVA DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA**  
**FABRICAÇÃO DE VIDROS COMUNS**

**VITÓRIA - ES**  
**2018**

**ISADORA ANDRADE BASTOS**

**UTILIZAÇÃO EXCLUSIVA DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA  
FABRICAÇÃO DE VIDROS COMUNS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial à obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Silva Filho.

Co-orientador: Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman.

Co-orientador: Prof. Dr. Francisco Wilson Hollanda Vidal.

**VITÓRIA - ES  
2018**

## ISADORA ANDRADE BASTOS

### UTILIZAÇÃO EXCLUSIVA DE RESÍDUOS DE ROCHAS ORNAMENTAIS PARA FABRICAÇÃO DE VIDROS COMUNS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável (Modalidade Profissional) da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Desenvolvimento Sustentável na área de concentração Gestão Sustentável e Energia.

Aprovada em \_\_\_\_\_.

#### COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Gilson Silva Filho  
(PPGES/CT/UFES)  
Orientador

---

Prof. Dr. Francisco Wilson Hollanda Vidal  
(CETEM)  
Co-orientador

---

Prof. Dr. Renato Ribeiro Siman  
(PPGES/CT/UFES)  
Co-orientador

---

Profa. Dra. Rosane Hein de Campos  
(PPGES/CT/UFES)  
Membro interno

---

Profa. Dra. Michelle Pereira Babisk  
(UENF/CETEM)  
Membro externo

## AGRADECIMENTOS

A Deus, meu sustentador, refúgio e fortaleza, pelo cuidado a todo instante, principalmente nos momentos de desânimo e desesperança.

À minha família – pai, mãe e irmã –, pelo apoio constante, a disponibilidade, por não ter poupado recursos quando precisei; porque se esforçou junto comigo. Especificamente a meu pai, pelas várias idas e vindas para me levar, com tanta prontidão, a Cachoeiro de Itapemirim.

Ao meu namorado, Alexandre, pelo incentivo e assistência desde o início, ainda no processo seletivo para ingresso no Mestrado, que perdurou em todas as etapas deste processo.

Ao meu orientador, Gilson, por ter me apresentado uma oportunidade de pesquisa tão fantástica e por ter me acompanhado e contribuído durante toda esta caminhada.

Ao professor Otoniel, do Centro Universitário São Camilo, que colaborou com tanto conhecimento e entusiasmo com esta pesquisa.

Ao Centro Universitário São Camilo, que disponibilizou de toda sua estrutura de laboratórios para que eu pudesse desenvolver este trabalho.

Ao Francisco Hollanda, por ter aberto as portas do CETEM para mim tão gentilmente.

Ao CETEM e seus colaboradores, pelos ensaios realizados, pela preparação e envio das amostras ao Rio de Janeiro.

À AAMOL, por ter permitido nossa entrada na associação para coleta dos resíduos de lama abrasiva. Especialmente ao diretor Fabrício, e à Eunice, do CETEM, pelo fornecimento de dados dos resíduos disponibilizados na AAMOL.

Ao grupo que se prontificou e passou sufoco junto comigo na perfuração para coleta da lama abrasiva: professor Gilson, alunas da iniciação científica Lara e Monique, meu namorado Alexandre e o amigo Arthur.

À equipe de técnicos e estagiários dos laboratórios do Centro Universitário São Camilo, em especial o Eduardo, por ter me auxiliado e contribuído com tanta seriedade com o sucesso desta pesquisa.

Às alunas da iniciação científica, Lara e Monique, pelo auxílio e por darem continuidade aos processos de produção dos vidros.

Ao Helimar, professor da São Camilo e colega de mestrado, pela coleta do resíduo de quartzito.

Aos membros da banca, Rosane Hein e Michelle Babisk, por terem aceitado o convite e, certamente, pelas futuras contribuições a esta pesquisa, e aos coorientadores Francisco Hollanda e Renato Siman.

Aos colegas e amigos do mestrado, que fizeram das aulas momentos tão ricos de discussão e aprendizado, e que me proporcionaram dias tão alegres, divertidos e agradáveis.

À FAPES, pelo financiamento do projeto.

## RESUMO

O beneficiamento de rochas ornamentais gera em torno de 1.610.000 toneladas de resíduos por ano no mundo. Os resíduos sólidos gerados no beneficiamento destas rochas apresentam elevado potencial de reciclagem como matéria prima para fabricação de vidros, devido à presença de alguns óxidos em sua composição como  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  e o  $\text{SiO}_2$ , principal óxido formador de rede vítrea. Assim, este trabalho teve como objetivo primário avaliar a viabilidade técnica de produção de vidros com a utilização exclusiva de resíduos de rochas ornamentais: lama abrasiva (LBRO) e resíduo de quartzito, proveniente da atividade de lavra, bem como de rochas calcílicas e dolomíticas. E como objetivos secundários, realizar a caracterização físico-química das matérias primas utilizadas; realizar a caracterização físico-química dos vidros obtidos; comparar os resultados dos vidros produzidos. Foram produzidos dois tipos de vidro, um com lama abrasiva disposta de forma heterogênea em um talhão de resíduos de rochas ornamentais e enriquecida com resíduo de quartzito, e outro com apenas resíduo de quartzito, ambos a uma temperatura máxima de  $1200^\circ\text{C}$ . Os resultados da difração por raio x (DRX) mostraram a vitrificação completa dos vidros produzidos; o FRX evidenciou características similares ao padrão do vidro comum; a densidade do vidro com lama e quartzito foi de  $2,71 \text{ g/cm}^3$  e a do vidro com quartzito foi de  $1,77 \text{ g/cm}^3$ ; a resistência hidrolítica foi classificada como muito baixa nos dois casos, segundo a norma ISO 719. O teor de ferro presente na primeira mistura resultou em um vidro de coloração verde, enquanto o de quartzito ficou incolor. Concluiu-se que existe viabilidade técnica na produção de vidros utilizando-se apenas resíduos de rochas ornamentais.

**Palavras-Chave:** Vidros; Rochas Ornamentais; Quartzito; Resíduos.

## ABSTRACT

The processing of dimensional stones generates around 1,610,000 tons of waste per year in the world. The solid waste generated in the processing of these rocks presents a high recyclability potential as a raw material for glassmaking, due to the presence of some oxides in its composition as  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  and  $\text{SiO}_2$ , the main glass forming oxide. The goal of this work was to evaluate the technical feasibility of glass production with the exclusive use of residues of ornamental stones: abrasive sludge (LBRO) and quartzite residue from the quarry activity as well as of calcitic and dolomitic rocks. As secondary objectives to carry out the physical-chemical characterization of the raw materials used; to perform the physico-chemical characterization of the glasses obtained; compare the results of the produced glasses. Two types of glass were produced, one with abrasive sludge disposed in a heterogeneous form in a piece of ornamental rock residues and enriched with quartzite residue, and the other with only quartzite residue, both at a maximum temperature of  $1200^\circ\text{C}$ . The results of the x-ray diffraction (DRX) showed the complete vitrification of the glasses produced; the FRX showed characteristics similar to the common glass pattern; the density of the glass with mud and quartzite was  $2.71\text{ g/cm}^3$  and that of the glass with quartzite was  $1.77\text{ g/cm}^3$ ; the hydrolytic resistance was classified as very low in both cases, according to ISO 719. The iron content present in the first mixture resulted in a green colored glass, while the quartzite glass was colorless. It was concluded that there is technical feasibility in the production of glasses using only dimension stone wastes.

**Keywords:** Glasses; Dimension stones; Quartzite; Waste.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama demonstrando a relação entre os estados vítreo, líquido e sólido cristalino.....	35
Figura 2 - Representação dos pontos demarcados por GPS no talhão de lama abrasiva na central de tratamento AAMOL .....	38
Figura 3 - Representação do local de coleta do resíduo de quartzito .....	39
Figura 4 - Homogeneização da lama abrasiva no moinho de bolas de porcelana. ....	40
Figura 5 - Resíduo de quartzito antes do processo de moagem.....	40
Figura 6 - Homogeneização da mistura com grau e pistilo. ....	42
Figura 7 - Homogeneização da mistura com mixer. ....	42
Figura 8 - Homogeneização da mistura no moinho de bolas. ....	43
Figura 9 - Mistura aquecida em mufla, em processo de vitrificação.....	43
Figura 10 - Cadinho de porcelana.....	44
Figura 11 - Mistura de vidro na cápsula de porcelana.....	44
Figura 12 - Mistura em fôrma de fibrocerâmica antes do aquecimento; vidro formado após a vitrificação; vidro após o desmolde.....	44
Figura 13 - Ensaio de resistência hidrolítica dos vidros. ....	46
Figura 14 - Difratoograma da lama abrasiva. ....	49
Figura 15 – Vidro produzido no cadinho de porcelana.....	50
Figura 16 – Vidro produzido na cápsula de porcelana. ....	50
Figura 17 – Vidro produzido na fôrma de fibrocerâmica, após desmolde. ....	50
Figura 18 - Vidro posterior ao desmolde e após o processo de lixamento para remoção do caulim. ....	51
Figura 19 – Vidro produzido com quartzito.....	52
Figura 20 – Fragmentos do vidro de quartzito.....	52
Figura 21 - Vidro produzido com quartzito: A- em fôrma de fibrocerâmica; B- em cadinho de platina. ....	53
Figura 22 - Difratoograma do vidro de lama abrasiva. ....	54
Figura 23 - Difratoograma do vidro de resíduo de quartzito. ....	55

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Composição química dos resíduos de rochas ornamentais (% em peso) com diferentes beneficiamentos.....	22
Quadro 2 - Comparação das composições químicas de resíduos de granito evidenciadas por diferentes pesquisadores (% em massa) .....	23
Quadro 3 - Comparação das análises químicas de resíduos de mármore evidenciados por diferentes pesquisadores (% em massa). .....	23
Quadro 4 - Análises químicas para as variedades de quartzitos do Centro Produtor de São Thomé das Letras-MG. ....	24
Quadro 5 - Composição química dos quartzitos branco, dourado, preto, rosa e verde. ....	25
Quadro 6 - Composição de vidros comuns utilizados nos copos, janelas e garrafas, em relação às proporções de SiO <sub>2</sub> , CaCO <sub>3</sub> (carbonato de sódio) e Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (carbonato de cálcio). ....	31
Quadro 7 - Compostos utilizados na coloração de vidros e as representações das variações das cores obtidas. ....	34
Quadro 8 - Valores limites e interpretação dos resultados no teste de resistência hidrolítica segundo a norma ISO 719. ....	46
Quadro 9 - Resultados FRX da lama abrasiva coletada. ....	47
Quadro 10 - Composição química das matérias-primas (%). ....	48
Quadro 11 – Composição química do vidro feito com LBRO e do vidro com apenas quartzito (%). ....	54
Quadro 12 - Comparações entre as densidades dos vidros obtidos de LBRO, do Quartzito e de um Vidro de Garrafa industrializado como recipiente de vinho branco. ....	56
Quadro 13 - Comparações entre as resistências hidrolíticas dos vidros obtidos de LBRO, do Quartzito e de um Vidro de Garrafa industrializado como recipiente de vinho branco. ....	57
Quadro 14 - Resultados do teste “t” sob 5% de significância para as comparações entre as resistências hidrolíticas dos vidros obtidos de LBRO, do Quartzito e de um Vidro de Garrafa industrializado como recipiente de vinho branco. ....	57

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AAMOL	Associação Ambiental Monte Líbano
CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
DFE	Hidrofluorcarbono Difluoretano
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
LBRO	Lama do beneficiamento de rochas ornamentais
PIB	Produto Interno Bruto

# SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>6</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>8</b>
<b>LISTA DE QUADROS.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>10</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>16</b>
3.1 ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO .....	16
3.1.1 Caracterização geológica .....	17
3.1.2 Caracterização comercial .....	18
3.1.3 Importância socioeconômica da indústria.....	18
3.1.4 Processo produtivo .....	20
3.1.5 Geração de resíduos .....	21
3.1.6 Composição química dos resíduos.....	21
3.1.7 Estudos sobre a aplicação de resíduos de rochas ornamentais.....	25
3.2 VIDROS .....	29
3.2.1 Definição e características.....	30
3.2.2 Estrutura .....	31
3.2.3 Propriedades .....	32
3.2.4 Transição vítrea.....	35
3.2.5 Temperatura de transição vítrea.....	36

3.2.6	Mercado de aplicação do vidro .....	36
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>38</b>
4.1	MATÉRIAS-PRIMAS .....	38
4.1.1	Coleta da lama abrasiva do beneficiamento de rochas ornamentais.	38
4.1.2	Coleta do resíduo de quartzito.....	39
4.1.3	Preparação das matérias-primas.....	39
4.1.4	Caraterização físico-química .....	41
4.1.5	Preparação das misturas.....	41
4.2	PRODUÇÃO DOS VIDROS .....	43
4.2.1	Fusão das misturas .....	43
4.2.2	Polimento dos vidros .....	45
4.3	CARACTERIZAÇÃO DOS VIDROS OBTIDOS.....	45
4.3.1	Difração de raios X .....	45
4.3.2	Fluorescência de raios X .....	45
4.3.3	Caracterização da densidade dos vidros.....	45
4.3.4	Resistência hidrolítica do vidro .....	46
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>47</b>
5.1	MATÉRIAS PRIMAS .....	47
5.1.1	Resultados FRX.....	47
5.1.2	Resultados DRX .....	49
5.2	PRODUÇÃO DOS VIDROS .....	49
5.3	CARACTERIZAÇÃO DOS VIDROS.....	53
5.3.1	Fluorescência de raios X .....	53
5.3.2	Difração de raios X .....	54
5.3.3	Densidade .....	55
5.3.4	Resistência hidrolítica.....	56
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>61</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de rochas ornamentais e de revestimento possui grande potencial no mercado mundial, sendo um importante setor para a economia de diversos países, inclusive do Brasil. No ano de 2016, o país apareceu no mercado internacional como o quarto maior produtor, atrás de China, Índia e Turquia, respectivamente, com 8,5 milhões de toneladas produzidas, e exportou 2,46 milhões de toneladas para 120 países. No âmbito nacional, o Espírito Santo foi o estado com maior destaque, respondendo por 75% do volume físico e 81% do total do faturamento das exportações brasileiras neste mesmo ano (ABIROCHAS, 2017; MONTANI, 2017).

Milhões de toneladas de resíduos de rochas ornamentais são produzidas anualmente no mundo. As diversas etapas de produção na indústria de rochas ornamentais geram grandes perdas, onde cerca de 30% das rochas são transformadas em resíduos de serragem durante as atividades de beneficiamento das mesmas, sem levar em conta o volume de resíduo gerado nas jazidas durante a extração dos blocos (SILVA, 1998; GALETAKIS, 2016; SOUZA et al., 2017).

O elevado índice de resíduos gerado, que se apresenta em forma de lama abrasiva do processo de beneficiamento (LBRO) ou resíduos sólidos, como casqueiros, cacos e lâminas e granalhas desgastadas (BRAGA et al., 2010), pode estar associado à carência de investimento em tecnologia pelas empresas de pequeno e médio portes, cujas operações são caracterizadas por baixa produtividade, combinada ao baixo uso de novas tecnologias, e uma completa falta de gestão ambiental (BAI; ZHANG; WHANG, 2015a). No Brasil, esta estimativa chega a 240.000 toneladas (MOURA; GONÇALVES; LEITE, 2002), o que equivale a aproximadamente um décimo do volume exportado em 2016 (ABIROCHAS, 2007).

A Política Nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei 12.305/2010 Art. 9º, estabelece que no gerenciamento dos resíduos sólidos a prioridade é a não geração dos resíduos, seguida da redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e, por último, disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. A Política ainda afirma que a gestão dos mesmos é de responsabilidade dos geradores e do poder público, e dos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010).

Porém, o que se observa é um gerenciamento inadequado dos resíduos que, por muitas vezes, são estocados em locais a céu aberto, aterros, lançados em rios ou lagoas de decantação, sem receber nenhum tipo de tratamento prévio (ALVES et al., 2015; REIS; DELLA-SAGRILLO; VALENZUELA-DIAZ, 2015; SOUZA et al., 2017; FRANÇA et al., 2018; SILVA; CAMPOS; SANTANA, 2019). O acúmulo dos resíduos sólidos de rochas ornamentais resulta em diversos problemas ambientais – visto que o material é muito fino e pode penetrar no solo, contaminando lençóis freáticos – e problemas sociais, ocasionando doenças respiratórias devido ao material particulado lançado em forma de pó na atmosfera (AL-AKHRAS et al., 2010; REIS; DELLA-SAGRILLO; VALENZUELA-DIAZ, 2015; BARROS et al., 2016; CARVALHO et al., 2018).

Embora a atividade de exploração e beneficiamento de rochas ornamentais cause considerável impacto ambiental, ela não pode ser interrompida, devido à sua relevante participação no mercado econômico (RAYMUNDO et al., 2013). Bai, Zhang e Wang (2015, 2016) e Singh et al. (2016) afirmam que as rochas são um dos mais importantes materiais e matérias primas utilizados na construção civil.

Como atualmente a redução na geração de resíduos de rochas ornamentais não tem sido controlada, a reutilização e a reciclagem se mostram como soluções mais atraentes para os problemas de tratamento e destinação final, além de agregar valor ao resíduo gerado (ALEIXO, 2016). A reciclagem da LBRO para a obtenção de um novo produto apresenta diversas vantagens que contribuem para a sustentabilidade, como a diminuição da quantidade de rejeitos descartada no meio ambiente, redução do consumo de recursos naturais e geração de novos empregos (MOTHÉ FILHO; POLIVANOV; MOTHÉ, 2005).

Muito se tem estudado sobre as possíveis aplicações do resíduo oriundo do beneficiamento de rochas ornamentais como subproduto em outros segmentos industriais, como na fabricação de concretos, argamassas, materiais cerâmicos, correção da acidez do solo, agregados, blocos para pavimentação (AL-AKHRAS; ABABNEH; ALARAJI, 2010; GENCEL et al., 2012; AL-ZBOON; AL-ZOU'BY 2015; SINGH et al., 2016a; SOUZA et al., 2017). Porém, estas alternativas não são suficientes para dar fim ao grande volume de resíduos depositados em aterros, até porque apresentam restrições quanto ao uso do resíduo, devido à presença de

fragmentos metálicos provenientes do desgaste das lâminas e granalha, além de cal ou substitutos (CALMON, 2007).

Diante do exposto, uma forma mais sustentável de continuar desenvolvendo o setor e atender às normas e legislações vigentes é a utilização dos resíduos de rochas ornamentais no processo de fabricação de vidros. Além de serem materiais altamente densos, com um alto consumo de matéria prima, os vidros têm como principal componente a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), que é encontrada de maneira abundante nos resíduos de rochas ornamentais, sobretudo em granitos e, principalmente, em quartzitos.

A utilização de resíduos de rochas ornamentais como matéria-prima para a fabricação de vidros comuns pode dar fim ao uso da areia neste processo, um recurso natural e finito, que diversas vezes é extraída de locais impróprios como várzeas e leitos de rios. Além disso, promove uma destinação adequada ao resíduo, minimizando o impacto ambiental e promovendo ganho econômico tanto para as empresas de rochas, que possuem gastos com o descarte do resíduo, quanto para as indústrias vidreiras, que lançam mão de recursos naturais em seus processos produtivos (ALEIXO, 2016; SHELBY, 2005).

A utilização de resíduos de rochas ornamentais para a produção de vidros limita-se a resíduos puros de um único bloco, obtidos de filtro prensa, e não de misturas de blocos em aterros, produzidos em elevada temperatura ( $1500^\circ\text{C}$ ), e que utilizam uma porcentagem de areia para o ajuste de  $\text{SiO}_2$  na composição (BABISK, 2009; MARÇAL, 2011). Assim, a proposta deste trabalho foi verificar a viabilidade técnica de produção de vidros com a utilização exclusiva de resíduos de rochas ornamentais, disponibilizados de maneira heterogênea e mista em um talhão de resíduos de uma central de tratamento de LBRO, com o ajuste de sílica por meio do uso de resíduo de quartzito, e utilização de fundentes por resíduos de rochas calcílicas e dolomíticas, produzidos em baixa temperatura.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar a viabilidade técnica de produção de vidros exclusivamente de resíduos de rochas ornamentais: lama abrasiva (LBRO) disposta heterogeneamente em um talhão de resíduos de rochas ornamentais; resíduo de quartzito, proveniente da atividade de lavra; e fundentes obtidos de resíduos de rochas calcíticas e dolomíticas.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para tal, foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a caracterização físico-química das matérias primas utilizadas – LBRO e resíduo de quartzito;
- Produzir dois tipos de vidro: um com a LBRO, o quartzito e os fundentes; e o outro apenas com o quartzito e os fundentes;
- Realizar a caracterização físico-química dos vidros obtidos;
- Comparar os resultados dos vidros produzidos.

## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **3.1 ROCHAS ORNAMENTAIS E DE REVESTIMENTO**

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) define rocha ornamental como material pétreo natural utilizado em revestimentos internos e externos, estruturas, elementos de composição arquitetônica, decoração, mobiliário e arte funerária. Já o termo rocha para revestimento é definido como rocha ornamental submetida a diferentes graus ou tipos de beneficiamento, utilizada no revestimento de superfícies, especialmente pisos, paredes e fachadas (NBR 15012, 2013).

A adequação de uma rocha natural como uma rocha ornamental depende da sua aparência e capacidade para produzir blocos retangulares de dimensões adequadas, de modo que o produto final seja obtido com esforço mínimo. Assim, dimensões e aparência são os dois critérios que regem a classificação de uma rocha como rocha ornamental. Além disso, uma rocha ornamental deve ser forte, trabalhável, passível de receber polimento e resistente a desgastes físico e químico (RANA et al., 2016). Segundo a Abirochas (2017), as atividades de lavra em uma

jazida não são interrompidas pela ausência de material, mas pela possibilidade de não se obter blocos com aparência e dimensões que permitam a serragem de peças aceitáveis no mercado.

### **3.1.1 Caracterização geológica**

Do ponto de vista geológico as rochas são classificadas de acordo com sua origem, enquadrando-se em três categorias básicas: ígneas, sedimentares ou metamórficas.

#### **3.1.1.1 Rochas ígneas**

As rochas ígneas ou magmáticas resultam da mudança de material fundido (magma) do estado líquido para o sólido, ou seja, da cristalização de líquidos magmáticos, geralmente a grandes profundidades no interior da crosta terrestre. As formas mais usuais deste grupo são o granito, o serpentinito e o basalto (SPENCE; KULTERMANN, 2011; ABNT, 2013). O granito é constituído por quartzo, feldspatos e micas, e seus constituintes químicos majoritários, expressos na forma de óxidos, são a sílica ( $\text{SiO}_2$ , óxido presente em maior quantidade), a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), a cal ( $\text{CaO}$ ) e os óxidos alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ) (SILVA et al. 2005).

#### **3.1.1.2 Rochas sedimentares**

As rochas sedimentares são formadas por processos de consolidação dos produtos resultantes da desagregação ou decomposição de rochas preexistentes, ou ainda, da acumulação de restos orgânicos na superfície terrestre ou em bacias deposicionais de ambientes subaquáticos. Fazem parte deste conjunto os arenitos e calcários (ABIROCHAS, 2009; SPENCE; KULTERMANN, 2011; NBR 15012, 2013).

#### **3.1.1.3 Rochas metamórficas**

As metamórficas são fruto da transformação mineralógica e textural (metamorfismo) de rochas preexistentes no interior da Terra, em função das variações nas condições de pressão e temperatura no ambiente geológico. É o exemplo dos mármore, quartzitos e ardósias (ABIROCHAS, 2009; SPENCE; KULTERMANN, 2011; NBR 15012, 2013; CHINELATO et al., 2015). Mármore são compostos majoritariamente por óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) e óxido de magnésio ( $\text{MgO}$ )

(MARÇAL, 2011), enquanto os quartzitos são ricos em sílica (IAMAGUTI, 2001; GODOY; FERNANDES, 2004; GUERRA, 2013; SILVA et al. 2016).

### **3.1.2 Caracterização comercial**

Do ponto de vista comercial, as rochas ornamentais são classificadas basicamente em granitos e mármore. Os produtos que sofrem não apenas a extração e a serragem, mas também algum tipo de tratamento de superfície (polimento e lustro) são classificados como rochas processadas especiais, que incluem também os quartzitos maciços e os serpentinitos (ABIROCHAS, 2017).

Granitos correspondem a um amplo conjunto de rochas silicáticas, cuja associação mineralógica mais comum apresenta uma composição de quartzo, feldspatos e micas. É possível observar ainda a presença de diversos outros minerais, porém em proporções bem mais reduzidas. Já o termo mármore é empregado comercialmente para designar todas as rochas carbonáticas, metamórficas ou não, capazes de receber polimento e lustro (SINDIROCHAS, 2013; CHINELATO et al., 2015).

Quanto aos quartzitos, são rochas silicosas e derivam-se de sedimentos arenosos, formados por mais de 80% de grãos de quartzo recristalizados (IAMAGUTI, 2001). Apesar de apresentarem, normalmente, bastantes fraturas em suas feições maciças, estão sendo muito utilizados na indústria devido a seu aspecto cromático e pela existência diversificada de técnicas que possibilitam a estruturação do bloco para serrada e a utilização das resinas no beneficiamento secundário (SINDIROCHAS, 2013).

### **3.1.3 Importância socioeconômica da indústria**

O segmento de rochas ornamentais revela-se demasiadamente relevante na economia brasileira e engloba todas as atividades da cadeia produtiva principal: jazidas e pedreiras com grande diversidade de mármore e granitos, empresas para beneficiamento primário e acabamento, e as atividades da cadeia de apoio, que inclui fabricantes de máquinas e equipamentos, fornecedores de outros insumos industriais, prestadores de serviços técnicos e administrativos, centro de tecnologia, sindicatos e associações (BRASIL, 2007; MOURA; LEITE, 2011). A cadeia produtiva movimenta, direta ou indiretamente, o desenvolvimento

econômico e social do país, sendo responsável pela geração de mais de 100 mil empregos diretos (BRASIL, 2007; BACARJI et al., 2013).

Como materiais dimensionais, portanto aproveitados em volume, as rochas ornamentais e de revestimento têm valor comercial bastante significativo frente a outras matérias-primas minerais (PEITER; CHIODI FILHO, 2001). Em 2016 as exportações brasileiras, que contemplaram 120 países, fecharam o ano com US\$ 1.138,3 milhões, equivalentes a 2,46 milhões de toneladas de produtos de rocha. Os principais importadores das rochas brasileiras foram EUA, China e Itália, respectivamente. Somadas, as vendas para estes três países compuseram 80,6% do total de exportações (ABIROCHAS, 2017). Neste mesmo ano, a produção mundial de rochas ornamentais atingiu o valor de 145 milhões de toneladas (MONTANI, 2017), e a estimativa é que se chegue aos 170 milhões de toneladas em 2020 (ABIROCHAS, 2017).

#### 3.1.3.1 A participação do Espírito Santo no segmento das rochas ornamentais

O Espírito Santo destaca-se no cenário nacional e mundial de rochas com a maior reserva de mármore do país e uma grande reserva de granito, apresentando uma variedade de cerca de 200 tipos de rochas ornamentais (SINDIROCHAS, 2013). Além disso, possui o maior parque de beneficiamento da América Latina, onde são realizados investimentos superiores a 90% de todo parque industrial brasileiro, chegando na casa de R\$1 bilhão. São cerca de 900 teares, a maioria instalados em Cachoeiro de Itapemirim, totalizando a terceira maior concentração mundial de teares (CASTRO et al., 2011).

Apesar de tradicionalmente concentrada na região de Cachoeiro de Itapemirim, a produção de rochas encontra-se disseminada por todo o estado, sobretudo nas regiões sul – com grande concentração de empresas de beneficiamento –, e norte – com forte concentração da atividade extrativa (BRASIL, 2007).

A produção do setor de rochas ornamentais no Espírito Santo responde por 10% do Produto Interno Bruto (PIB) capixaba e gera cerca de 22 mil empregos diretos. Possui cerca de 1.700 empresas ativas desenvolvendo atividades que englobam toda a cadeia produtiva, desde a mineração, indústria de transformação e beneficiamento, até as marmorarias e comércio (LYRA, 2016).

No ano de 2016 as exportações de rochas ornamentais foram efetuadas por 18 estados brasileiros, e o destaque maior foi do Espírito Santo, com 1,8 milhões de toneladas e US\$ 921,4 milhões, correspondentes a 75% do volume físico e 81% do total de faturamento das exportações de rochas do país (ABIROCHAS, 2017).

#### **3.1.4 Processo produtivo**

O ciclo produtivo das rochas ornamentais pode ser dividido em três etapas bem definidas: extração, beneficiamento primário e beneficiamento final (CALMON, 2007; SINDIROCHAS, 2013).

Após a extração, que consiste na remoção de material útil ou economicamente aproveitável dos maciços rochosos ou dos matacões, o produto é submetido aos processos de beneficiamento.

O beneficiamento primário, chamado de serragem ou desdobramento, refere-se ao corte dos blocos para a obtenção de chapas, tiras ou espessores, realizado em máquinas e equipamentos como os teares convencionais, multifios diamantados para granitos, teares com lâminas diamantadas para mármore, talha-blocos, monofios diamantados, e outros. É nesta etapa do processo produtivo que é gerada a lama abrasiva, uma mistura composta de água, granalha metálica de ferro ou aço, cal e rocha moída (BARBOSA; COSTA; LIMA, 2013). A aplicação do tipo de equipamento ou tecnologia no beneficiamento primário varia em função do tipo de produto intermediário que se deseja obter (BRASIL, 2007; CALMON, 2007; SINDIROCHAS, 2013).

O beneficiamento final (ou acabamento) é a etapa em que as peças tomam forma, dimensões e aparência definitivas. Pode ser subdividida em três processos: polimento ou outro tipo de acabamento, corte e acabamento final. Os principais produtos gerados neste último elo da cadeia de produção, que exige maior variedade de máquinas, equipamentos, ferramentas e insumos para a execução das atividades, são: ladrilhos e painéis para revestimento de pisos e paredes, soleiras, rodapés, bancadas de pias e móveis, objetos de adorno e decoração, peças para túmulos e mausoléus, e etc. (BRASIL, 2007; SINDIROCHAS, 2013).

### **3.1.5 Geração de resíduos**

Na indústria de beneficiamento de rochas ornamentais, as diversas etapas de produção geram grandes perdas, com um volume de resíduo bastante significativo, que pode chegar a 1.610.000 toneladas/ano no mundo (CHINELATO et al., 2015; SOUZA, 2017). No Brasil, a geração do resíduo de corte de mármore e granito juntos é estimada em 240.000 toneladas/ano, distribuídas na maior parte entre os estados do Espírito Santo, Bahia, Ceará e Paraíba (MOURA; GONÇALVES; LEITE, 2002). Na serragem, cerca de 30% do volume total dos blocos são transformados em resíduo (SILVA, 1998).

Os resíduos produzidos pela indústria de rochas ornamentais podem ser classificados em dois tipos: resíduos sólidos e lama abrasiva. A maioria desses rejeitos é descartada em aterros, independentemente do uso potencial que possam apresentar em outros segmentos industriais. Quando isso ocorre, a lama tem seu teor de água drasticamente reduzido, e o pó de pedra resultante representa diversos impactos ambientais (GALETAKIS, 2016).

As características dessa lama gerada durante as operações de serragem e acabamento, como a porcentagem de material proveniente do desgaste das granalhas e lâminas de aço, dependem das características da rocha, dos equipamentos utilizados no processo de beneficiamento e das propriedades dos insumos (BRAGA, 2010; CAREDDU; MARRAS, 2015). Blocos que contêm minerais mais duros ou aspectos texturais distintos geralmente desgastam mais as lâminas e gastam uma maior quantidade de granalha de aço para serem desdobradas, gerando-se um resíduo com maior percentual de aço (OLIVEIRA, 2015).

### **3.1.6 Composição química dos resíduos**

A composição química dos resíduos de rochas ornamentais é apresentada no Quadro 1 segundo Santos, Destefani e Holanda (2013), de acordo com o tipo de equipamento utilizado na etapa de beneficiamento, e não leva em conta o tipo de rocha ornamental que foi processada em cada equipamento. Os resíduos analisados foram: I) proveniente da etapa de levigação (desengrossamento das chapas), denominado de Resíduo Levigação; II) proveniente do corte com fio diamantado, denominado de Resíduo Diamantado; III) proveniente da etapa de polimento desbaste fino da chapa), denominado Resíduo Polimento; e IV)

proveniente do corte com lâmina metálica, utilizando granalha de aço, denominado Resíduo Granalha.

Quadro 1 - Composição química dos resíduos de rochas ornamentais (% em peso) com diferentes processos de beneficiamento.

Óxidos	Resíduo Levigação	Resíduo Diamantado	Resíduo Polimento	Resíduo Granalha
SiO <sub>2</sub>	67,058	92,058	67,720	53,516
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,072	3,258	16,207	19,405
K <sub>3</sub> O	6,615	0,933	6,733	8,612
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,087	-	3,447	8,059
CaO	2,0275	1,071	3,446	6,890
SO <sub>3</sub>	2,021	1,725	1,620	1,574
TiO <sub>2</sub>	0,594	-	0,477	0,882
MnO	0,139	-	0,085	-
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,067	-	-	-
ZrO <sub>2</sub>	0,056	-	0,038	0,067
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,015	-	0,006	-

Fonte: adaptado de Santos, Destefani e Holanda (2013).

No Quadro 2 está evidenciado o resultado da análise química de resíduos de granito estudados por diferentes pesquisadores, enquanto o Quadro 3 as análises de diferentes resíduos de mármore investigados.

Quadro 2 - Comparação das composições químicas de resíduos de granito evidenciadas por diferentes pesquisadores (% em massa)

Componentes	Moreira et al. (2003)	Gonçalves (2000)	Mello (2006)		Menezes et al. (2007)	Babisk (2009)	Marçal (2011)
SiO <sub>2</sub>	65,95	59,62	68,01	63,89	62,77	71,13	64,41
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,84	12,77	14,99	11,69	14,38	13,56	18,07
Na <sub>2</sub> O	2,39	2,72	1,65	2,13	3,52	3,05	3,87
CaO	1,47	4,83	2,28	6,52	6,28	2,96	4,75
MgO	0,73	1,96	0,73	1,44	-	-	0,06
K <sub>2</sub> O	4,19	5,30	4,82	5,53	3,78	4,34	5,40
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,89	9,49	3,67	3,13	6,58	4,21	3,44
TiO <sub>2</sub>	0,93	-	0,54	0,51	-	-	-

Fonte: Elaboração própria.

Quadro 3 - Comparação das análises químicas de resíduos de mármore evidenciados por diferentes pesquisadores (% em massa).

Componentes	Matos et al. (2006)	Babisk (2009)	Marçal (2011)	Hackbart (2015)	Farias et al. (2016)
CaO	47,89	37,09	63,44	33,3	95,85
MgO	12,49	16,56	27,08	17,7	-
SiO <sub>2</sub>	8,32	1,97	7,66	8,8	2,26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,5	0,09	0,66	0,3	0,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,24	-	0,67	0,8	0,46
K <sub>2</sub> O	0,95	-	0,05	0,2	0,18
Na <sub>2</sub> O	-	-	0,44	-	-

Fonte: Elaboração própria.

A composição química dos quartzitos, além de se apresentar distinta, de acordo com a análise de diferentes autores, também varia em função do tipo do mineral estudado, que pode ser classificado em Branco, Amarelo ou Dourado, Preto, Rosa ou Róseo, Verde, e quartzitos específicos da região de São Thomé das Letras-MG, como o Carrancas, o Luminária e o Carranquinha (Quadro 4). Fernandes, Godoy e Fernandes (2004) além de avaliar o quartzito por coloração evidenciou ainda uma variação entre os três materiais avaliados em cada tipo do quartzito.

Quadro 4 - Análises químicas para as variedades de quartzitos do Centro Produtor de São Thomé das Letras-MG.

Óxidos	Branco			Amarelo			Róseo			Carrancas			Luminárias			Carranquinha		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
<b>SiO<sub>2</sub></b>	98,40	97,50	98,30	98,00	97,00	98,60	97,50	97,70	98,60	89,90	89,60	89,10	90,50	89,90	90,20	90,60	89,90	90,10
<b>Al<sub>2</sub>O</b>	0,83	0,82	0,86	0,89	0,80	85,00	0,72	0,68	0,77	5,40	5,50	5,70	5,20	500,00	5,30	5,10	5,10	5,30
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,06	0,04	0,04	0,06	0,04	0,04	4,00	0,03	0,04	18,00	0,18	0,17	21,00	0,20	0,21	0,25	0,27	0,24
<b>F<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,11	0,12	0,15	0,18	0,18	0,19	0,06	0,06	0,08	1,70	1,70	1,70	1,10	120,00	1,20	1,20	120,00	1,20
<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>MnO</b>	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01
<b>MgO</b>	0,10	0,10	0,10	0,14	0,11	0,10	0,10	0,01	0,10	0,13	0,16	0,13	0,15	0,13	0,10	17,00	0,13	0,13
<b>CaO</b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	0,10	0,10	0,10	0,10	10,00	0,10	0,10	0,10	10,00	10,00	0,10	0,10	10,00	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
<b>K<sub>2</sub>O</b>	0,24	0,22	0,22	0,22	0,21	0,22	0,19	0,19	0,18	1,90	2,00	1,90	2,10	2,10	2,10	2,00	1,90	2,00
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,03	0,01
<b>LOI</b>	0,22	22,00	0,23	0,27	0,25	0,25	0,19	0,18	0,15	0,92	0,94	0,86	0,77	0,77	0,78	0,83	0,86	0,85
<b>Total</b>	100,10	99,17	100,04	99,90	98,73	100,39	98,96	98,99	100,07	100,30	100,24	99,74	100,21	99,44	100,08	100,30	99,53	99,96

Fonte: adaptado de Fernandes, Godoy e Fernandes (2004).

O Quadro 5 evidencia a grande variação da proporção de sílica nos distintos tipos de quartzito. Contudo, a proporção de SiO<sub>2</sub> superior a 70% permite a obtenção vidros sem a necessidade de complementação do óxido. Sendo assim, dos tipos que se encontram nos quadros, apenas o preto não vitrificaria sem o enriquecimento de sílica.

Quadro 5 - Composição química dos quartzitos branco, dourado, preto, rosa e verde.

Óxido (%)	Quartzito Branco	Quartzito dourado	Quartzito preto	Quartzito rosa	Quartzito verde
SiO <sub>2</sub>	70,73	91,21	44,32	91,35	81,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,19	5,03	13,70	4,32	9,83
K <sub>2</sub> O	9,79	2,04	5,02	1,91	5,53
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,39	0,93	25,33	0,99	2,87
BaO	0,99	--	0,79	--	--
MgO	0,92	--	3,88	--	--
CaO	0,45	--	3,96	--	--
TiO <sub>2</sub>	0,40	0,22	1,88	0,26	0,44
Rb <sub>2</sub> O	0,09	--	0,06	--	0,04
SrO	0,03	--	0,24	--	--
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,02	--	0,03	--	--
WO <sub>3</sub>	--	0,17	--	--	--
ZrO <sub>2</sub>	--	0,05	0,21	--	--
MoO <sub>2</sub>	--	0,03	--	--	--
CuO	--	0,03	--	--	--
MnO	--	--	--	--	--
Cl	--	0,30	--	0,40	--
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	--	--	0,14	--	--
SO <sub>3</sub>	--	--	--	0,77	--
ZnO	--	--	0,07	--	0,03
Cs <sub>2</sub> O	--	--	--	--	0,06
Au <sub>2</sub> O	--	0,02	--	--	--

Fonte: Vidal, Campos e Correia (2015), adaptado de Souza et al. (2013).

### 3.1.7 Estudos sobre a aplicação de resíduos de rochas ornamentais

Inúmeras pesquisas têm estudado soluções técnicas para o aproveitamento do resíduo oriundo do beneficiamento de rochas ornamentais como matéria-prima para a produção dos mais variados produtos.

### 3.1.7.1 Concretos

Almeida, Branco e Santos (2005) e Almeida et al. (2007) avaliaram o uso de lama de rocha em substituição aos agregados miúdos em misturas de concreto. Concluíram que a substituição de 5% de areia pelo resíduo resultou em aumento da resistência a compressão, tensão de ruptura e módulo de elasticidade do concreto. Al-Zboon e Al-Zou'by (2015) analisaram teores de incorporação de 0%, 25%, 50%, 75%, 100%, e concluíram que a resistência à compressão do concreto teve melhor desempenho com o teor de 50%. Singh et al. (2016a) incorporaram resíduo do corte de granito em concretos e constataram aumento de performance significativa no concreto com a substituição de 30% do resíduo como agregado miúdo. Singh et al. (2016b) chegaram à conclusão de que os teores ótimos de substituição variam entre 25% e 40%, dependendo do fator água/cimento empregado no concreto. Porém, altos teores de substituição resultam em perda de trabalhabilidade.

### 3.1.7.2 Argamassas

Al-Zboon e Al-Zou'by (2015) avaliaram o emprego do resíduo de lama de rochas em argamassas, e perceberam melhora na resistência a compressão e resistência à flexão com a proporção de 50% de lama/água. Al-Akhras, Ababneh e Alaraji (2010) utilizaram lama queimada de rocha em substituição parcial à areia com 5%, 10% e 15%, e obtiveram melhores resultados em relação à amostra de referência na resistência a compressão e à flexão, porém inferiram que o tempo de pega e a trabalhabilidade das argamassas diminuiu. AAMOL (2014<sup>1</sup>) produziu uma argamassa com 50% de incorporação da massa de lama, contudo teve problema para definir uma composição em que se pudesse utilizar a LBRO coletada em qualquer porção e profundidade do talhão de deposição de LBRO da própria AAMOL.

### 3.1.7.3 Blocos para pavimentação

Gencil et al. (2012) e AAMOL (2014<sup>1</sup>) produziram blocos de concreto para pavimentação com resíduos de mármore. Os primeiros citados substituíram os

---

<sup>1</sup> Apresentação em Seminário pelo diretor executivo da Associação Ambiental Monte Líbano – AAMOL, realizada em 2014.

agregados por resíduos de mármore em proporções de 10%, 20%, 30% e 40%. Com o acréscimo de resíduo incorporado, a resistência mecânica do bloco apresentou queda, enquanto a resistência a abrasão e durabilidade ao congelamento/descongelamento aumentaram.

#### 3.1.7.4 Materiais cerâmicos

Moreira, Manhães e Holanda (2008) produziram cerâmica vermelha a partir da incorporação de 5%, 10%, 15% e 20% de resíduos de rochas ornamentais, enquanto Dantas (2008) produziu cerâmica branca incorporando 10%, 20%, 30% e 40% de resíduo de granito. Os resultados obtidos em ambos os casos atestam uma solução viável para este tipo de aproveitamento dos resíduos. Reis, Della-Sagrillo e Valenzuela-Diaz (2015) analisaram a adição de resíduo de rocha na produção de telhas e obtiveram resultados satisfatórios com incorporações de até 60% de resíduo. Entretanto, Alzaboon et al. (2010), com a utilização de LBRO nas taxas de 100%, 75%, 50%, 25% na fabricação de azulejos, concluíram que a resistência transversal diminui e a absorção de água aumenta quando o emprego do resíduo é maior.

Babisk et al. (2012) evidenciaram que a adição de 10% de resíduo de quartzito na massa cerâmica vermelha não altera a compactação e as propriedades tecnológicas estudadas. Enquanto as incorporações de 20% e 30% de resíduo não alteram ou melhoram a compactação, mantêm a mesma absorção de água da massa cerâmica pura e diminuem a resistência mecânica. Contudo a incorporação de 40% de resíduo piorou a compactação, causou expansão nos corpos de prova, aumentou a absorção de água e diminuiu a resistência mecânica. Mesmo assim a incorporação desse resíduo na fabricação de cerâmica vermelha se mostrou promissora, pois reduziu os impactos ambientais causados pelo resíduo do beneficiamento de quartzito, proporcionando a estes uma destinação ambientalmente correta.

Carreiro et al. (2016) também utilizaram resíduo de quartzito, porém com a aplicação em massa de cerâmica estrutural, nas proporções de 5%, 10% e 15%. Concluiu-se que para adições de até 15% houve melhoria nas propriedades físicas e mecânicas.

Souza, Pinheiro e Holanda (2013) desenvolveram pisos cerâmicos vitrificados com 20%, 30%, 40% e 47,5% de resíduos de rochas ornamentais. Percebeu-se que o efeito da adição do resíduo de rocha ornamental promoveu melhoras significativas nas propriedades de retração linear, absorção de água, massa específica aparente, porosidade aparente e tensão de ruptura à flexão das peças sinterizadas.

#### 3.1.7.5 Outros produtos

Diversos produtos foram desenvolvidos utilizando-se resíduos de rochas ornamentais como subproduto em sua composição, como blocos de concreto (MOURA; LEITE, 2011; SOUZA et al., 2017), agregados (CHANG et al., 2010), cimento (ERCIKDI; KÜLEKCI; YILMAZ, 2015) e correção da acidez do solo (RAYMUNDO et al., 2013).

Moura e Leite (2011) produziram blocos de concreto para vedação com LBRO em substituição parcial ao cimento nos teores de 5%, 10% e 15% em massa, e concluíram que a substituição de até 10% é viável. Souza et al. (2017) produziram blocos para casas populares, e avaliaram a resistência térmica e acústica destes, que foram inferiores aos blocos de referência.

Chang et al. (2010) utilizaram os resíduos como agregados, e os resultados mostraram que, combinando 35% de LBRO com 50% de lodo residual e 15% de agentes solidificadores secos, a reciclagem da lama e do lodo em materiais de construção podem criar novos produtos e oferecer uma alternativa ao tratamento destes resíduos.

Ercikdi, Külekci e Yilmaz (2015) utilizaram de 10% a 30% de resíduos de mármore (% em peso) na produção de pastas de cimento, o que foi equivalente a substituições de 10% a 45% da massa de cimento. Porém, certificou-se que este resíduo não é adequado para substituir o cimento, pois não apresenta atividade pozolânica.

Raymundo et al. (2013) avaliaram a utilização de resíduo de mármore na correção de acidez do solo e obtiveram resultados satisfatórios, pois o uso do resíduo elevou as concentrações de Ca e Mg e o pH do solo, eliminando a toxicidade de Al.

### 3.1.7.6 Vidros

Babisk (2009) produziu vidros sodo-cálcicos a 1500°C com resíduos de rochas ornamentais coletados do filtro prensa, e Marçal (2011) produziu vidros especiais, ambos com adição de areia para ajuste no teor de sílica. Devido ao elevado teor de sílica que estes subprodutos apresentam, se torna viável sua empregabilidade na fabricação destes produtos, desde que se faça um ajuste na composição do resíduo. Guerra (2013) evidenciou excelente viabilidade da utilização de quartzo ou quartzito brasileiro para a fabricação de sílica vítrea de elevado valor agregado. Contudo, verificou uma gama de impurezas na amostra, o que não prejudicou o resultado final das análises, considerando a qualidade do produto obtido a partir das lascas de quartzo ou quartzito (resíduo) com o produto da matéria prima comercializada.

O uso de rochas ornamentais como matéria prima para a produção de materiais de vitrocerâmicos é de grande importância econômica, tecnológica e científica. Diferentes tipos de rochas podem ser bem-sucedidos no uso para a produção de materiais vitro-cristalinos, com diferentes microestruturas e composições mineralógicas, com uma ampla gama de propriedades (KHATER et al., 2014). Rodrigues (2009) incorporou 11,6% e 78,3% de resíduos de corte de mármore e de granito, respectivamente, como matéria-prima na fabricação de lâ de rochas, e alcançou resultados semelhantes aos da lâ de vidro convencional.

## 3.2 VIDROS

Quando se fala de produção de vidro ou de pesquisas relacionadas ao vidro, Mauro e Zanotto (2014) evidenciaram um total de 112.627 publicações no período de 1850 a 2013, dentre as quais o Brasil estava na 14ª posição dos países que mais publicaram (n=1751 publicações). Esse ranque era liderado pelos Estados Unidos (n=21.524) seguidos do Japão (14.113) e China com 13.675 trabalhos publicados. Contudo, Mauro e Zanotto (2014) ainda relataram cerca de 370.000 relacionadas com o vidro foram emitidos em todo o mundo no período de 1963 a 2013, um total de cerca de 370.000 patentes.

### 3.2.1 Definição e características

Os vidros tem sido e serão essenciais ao processo de modernização da sociedade (ZANOTTO; MAURO, 2017). Segundo Morse e Evenson (2016), a sociedade estaria passando por uma era do vidro ou idade do vidro.

O vidro pode ser visto como um estado especial da matéria que mostra as propriedades dos sólidos em escalas de tempo humano, mas a sua estrutura não-cristalina, os tornam mais parecidos com líquidos congelados (CHIHULY; BREMSER; COURTYARDS apud ZANOTTO; MAURO, 2017).

Vidros são sólidos não-cristalinos, portanto com ausência de simetria e periodicidade translacional, que exibe o fenômeno de transição vítrea, amorfos, podendo ser obtido a partir de qualquer material inorgânico, orgânico ou metálico, e formado através de qualquer técnica de preparação (GUPTA, 1996; ZANOTTO; MAURO, 2017). Genericamente, são substâncias de alta viscosidade que, durante a solidificação, não apresentam mobilidade suficiente e então não têm tempo suficiente para formar uma rede cristalina regular, resultando em um sólido amorfo (VELLINI; SAVIOLI, 2009). São sólidos com uma estrutura não-cristalina, que continuamente se converte em um líquido sobre aquecimento (VARSHNEYA; MAURO, 2010). Os vidros possuem forma definida e propriedades mecânicas compatíveis com a de sólidos considerados frágeis. Estes apresentam propriedades comuns a materiais vítreos e de uma maneira geral são diferentes dos sólidos cristalinos, pois não apresentam ordenamento cristalino de longo alcance. Em geral são isotrópicos, não possuem temperatura de fusão definida e não apresentam planos de clivagem definidos, além de apresentarem rigidez mecânica à temperatura ambiente. Na produção de vidros podem ser utilizadas matérias-primas naturais, produtos químicos e resíduos sólidos de rochas ígneas e metamórficas. A seleção dos materiais de partida deve levar em conta a aplicação a que se destina o vidro. (ALEIXO, 2016).

As características dos vidros mudam conforme sua matéria prima ou aos óxidos adicionados durante a sua fabricação. Fernandes (1999) apresenta algumas composições de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  utilizados na fabricação de vidros específicos para algumas aplicações (Quadro 6). Contudo as proporções dos

óxidos depositados nas formas de carbonato serão reduzidas após o aquecimento da matéria prima.

Quadro 6 - Composição de vidros comuns utilizados nos copos, janelas e garrafas, em relação às proporções de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaCO}_3$  (carbonato de sódio) e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (carbonato de cálcio).

Aplicações	$\text{SiO}_2$	$\text{CaCO}_3$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$
Vidro usado em copos	72%	12,5%	11,5%
Vidro de janela	72%	14%	9%
Vidro de garrafa	70%	14,5%	9%

Fonte: Fernandes (1999).

### 3.2.2 Estrutura

As matérias-primas utilizadas para a produção de vidros são agrupadas conforme as funções que desempenham e podem ser classificadas como: vitrificantes, fundentes, estabilizantes e afinantes (ALEIXO, 2016; SANTOS et al., 2016).

Os componentes vitrificantes são os óxidos passíveis de se transformar em vidros, e os principais são o  $\text{SiO}_2$  (sílica), o  $\text{B}_2\text{O}_3$  e o  $\text{P}_2\text{O}_5$ . A maioria dos vidros comerciais é baseada em sílica e, sozinha, ela produz um vidro de ótima qualidade, porém necessita de temperaturas extremamente elevadas de fusão podendo superar  $2000^\circ\text{C}$  (RIELLA et al., 2002; FELISBERTO, 2006; BABISK, 2009; MÉDICI et al., 2014; SOUZA, 2015).

Os fundentes, o tipo mais comum de óxidos modificadores de rede vítrea, tem a função de reduzir a temperatura de fusão, resultando em viscosidade e temperatura de transição vítrea menores, e, assim, baixando o consumo de energia e o custo do processo. Além disso, aumentam o coeficiente de expansão térmica. Os fundentes mais usuais são os óxidos alcalinos, como o  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$  (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001; RIELLA et al., 2002; FELISBERTO, 2006; MÉDICI et al., 2014; ASKELAND, 2008; TOFFOLI; 2014).

Os estabilizantes, outro tipo de modificadores de rede, são acrescentados para impedir que o vidro seja solúvel. Como exemplo de estabilizantes tem-se o  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{PbO}$  e o  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , sendo esse último denominado de alumina. O óxido de

cálcio melhora a durabilidade química do material mantendo a facilidade de fusão, e a alumina é responsável por agregar propriedades térmicas aos vidros (FELISBERTO, 2006; MÉDICI et al., 2014; SOUZA, 2015).

Os afinantes são matérias primas que favorecem o desprendimento de gases dissolvidos no vidro, portanto servem para retirar as bolhas produzidas pela decomposição dos carbonatos que se formam na massa vítrea devido à alta viscosidade. Utilizados em quantidades mínimas, sendo os principais o  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (sulfato de sódio), o  $\text{KNO}_3$  (nitrato de potássio),  $\text{NaNO}_3$  (Nitrato de sódio), óxidos de antimônio e arsênio, e outros (FELISBERTO, 2006; SOUZA, 2015; SANTOS et al., 2016).

### 3.2.3 Propriedades

As propriedades dos vidros dependem de sua composição química, inclusive as quantidades de cada composto presente, e da sequência de processos térmicos aos quais são submetidos nos processos de produção (AKERMAN, 2000).

As matérias primas vitrificáveis são em quase sua totalidade sólidos granulados, com tamanhos entre 0,1 e 2 mm. A granulometria é um fator muito importante sob os aspectos da fusão, pois quanto mais fina for, mais fácil será de se fundir devido à maior superfície específica. Porém, granulometrias muito finas não são convenientes pela alta formação de pó, que acaba sendo lançado indesejavelmente na atmosfera, gerando a perda de matéria-prima. Na elaboração das misturas é necessário que as diversas matérias-primas possuam tamanhos semelhantes, para não dificultar a homogeneidade do vidro (SANTOS et al., 2016).

Em relação à proporção dos componentes, aumentando-se o  $\text{Na}_2\text{O}$  (um tipo de fundente), aumenta-se a fluidez do vidro, expansão e solubilidade, por outro lado diminui a durabilidade; o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (um estabilizante), inversamente ao  $\text{Na}_2\text{O}$ , aumenta a durabilidade e faz aumentar a viscosidade, além de promover resistência a água; o  $\text{BaO}$  e o  $\text{PbO}$  (também estabilizantes) aumentam a densidade e reduzem a viscosidade, além de aumentarem a expansão térmica; e o  $\text{CaO}$  (estabilizante) favorece a devitrificação (AKERMAN, 2000; SANTOS et al., 2016).

Inicialmente a viscosidade não pode ser muito baixa, pois não seria possível dar forma ao vidro. Entretanto, ele não pode se apresentar demasiadamente viscoso,

pois dificultaria a conformação. Durante a conformação, o vidro segue resfriando-se e ficando mais viscoso, até alcançar viscosidade o bastante para não continuar a fluir (SHELBY, 2005).

Tratando-se dos processos térmicos, o tempo de resfriamento do vidro tem grande influência nas suas características finais. A velocidade de resfriamento deve ser suficientemente elevada para que não se forme uma quantidade significativa de cristais, uma vez que um vidro completamente não-cristalino é a situação ideal (AKERMAN, 2000; ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001).

#### 3.2.3.1 Cor

A adição de óxidos ou elementos metálicos na composição também interferem na propriedade das cores dos vidros. Os colorantes alteram a forma com que a luz atravessa o vidro. Vidros marrons, por exemplo, impedem a penetração de radiação ultravioleta, e vidros cinza, bronze e verdes impedem a passagem de radiação infravermelha sem obstruir a passagem de luz. Os corantes mais comumente utilizados são o cobalto, o selênio, o manganês, o ferro e o cromo. Alguns destes compostos aparecem elencados no Quadro 7. A incorporação de pigmentação ao vidro é feita antes da etapa de fusão, na massa do vidro. A coloração torna-se perceptível somente após a fusão e resfriamento do mesmo (MÉDICI et al., 2014; SANTOS et al., 2016; HELMENSTINE, 2017).

Quadro 7 - Compostos utilizados na coloração de vidros e as representações das variações das cores obtidas.

<b>COMPOSTOS</b>	<b>CORES</b>
Óxidos de ferro	Verde, marrom
Óxidos de manganês	Âmbar escuro, ametista, descolorante
Óxidos de cobalto	Azul escuro
Cloreto de ouro	Vermelho rubi
Compostos de selênio	Tons avermelhados
Óxidos de carbono	Âmbar, marrom
Mistura de manganês, cobalto e ferro	Preto
Óxidos de antimônio	Branco
Óxidos de urânio	Amarelo esverdeado
Compostos de enxofre	Âmbar, marrom
Compostos de cobre	Azul claro, vermelho
Compostos de estanho	Branco
Chumbo com antimônio	Amarelo

Fonte: adaptado de Helmenstine (2017).

### 3.2.3.2 Resistência hidrolítica

Como material para embalagem, o vidro é considerado um dos poucos materiais com elevada durabilidade química e inerte à maioria das substâncias aquosas e químicas. Entretanto, sob determinadas condições, mesmo a água pura pode atacar o vidro, mesmo que em proporções muito pequenas. Esse ataque é denominado como ataque hidrolítico (JAIME; DANTAS, 2009; JANETTI; JAIME, 2010).

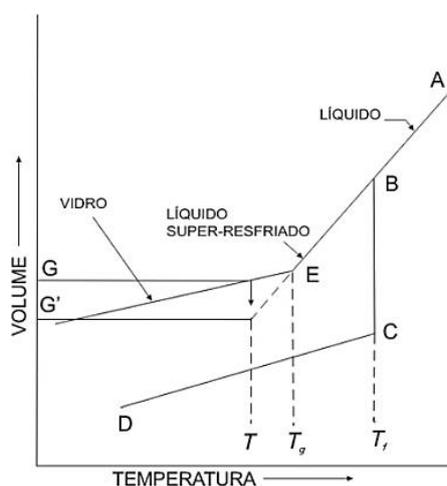
A resistência hidrolítica do vidro é uma propriedade muito importante e também varia de acordo com sua composição, pois quanto mais óxidos alcalinos ele possuir, mais solúvel será. Os vidros são altamente resistentes a soluções ácidas e levemente básicas, porém são mais atacáveis por soluções básicas. Portanto, para obtenção de vidros com alta resistência química, deve-se projetar uma composição com poucos óxidos alcalinos, porém, para compensar a ausência dos fundentes,

se adiciona o boro, que é um elemento formador de rede que reduz a viscosidade da sílica (AKERMAN, 2000).

### 3.2.4 Transição vítrea

A relação entre cristal, líquido e vidro pode ser explicada através de um diagrama Volume X Temperatura. Um líquido estável partindo do ponto inicial A é resfriado e se contrai constantemente, até chegar em sua temperatura de fusão  $T_f$  (Figura 1). Neste momento ocorre uma enorme redução de volume, pois as moléculas que antes estavam soltas – característica do estado líquido – passam a se ordenar na forma de cristais (PAUL, 1990; AKERMAN, 2000, ZANOTTO; MAURO, 2017).

Figura 1 - Diagrama demonstrando a relação entre os estados vítreo, líquido e sólido cristalino



Fonte: Paul (1990).

Se a taxa de resfriamento for suficientemente alta, a cristalização não acontecerá em  $T_f$ . O volume do líquido super-resfriado que se forma decresce ao longo da linha BE. Em uma temperatura  $T_g$ , no ponto E, chamada de temperatura de transição vítrea, o volume continua a reduzir devido à diminuição do agitação térmica, mas sem possibilidade de cristalização (AKERMAN, 2000; PAUL, 1990; ZANOTTO; MAURO, 2017).

A medida que a temperatura decresce, há um aumento muito elevado da viscosidade, que impossibilita qualquer movimentação de moléculas e, portanto, a cristalização. Abaixo de  $T_g$ , embora o material continue com a característica de um líquido (moléculas sem arranjo definido), ele passa a se comportar

semelhantemente a um sólido, o que caracteriza a formação do vidro. (AKERMAN, 2000; PAUL, 1990; ZANOTTO; MAURO, 2017).

### **3.2.5 Temperatura de transição vítrea**

A temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) é a temperatura característica dos vidros que define a passagem do estado vítreo para o estado viscoelástico, através da relaxação estrutural. O termo viscoelástico descreve o comportamento de um corpo que responde elasticamente a uma força aplicada, ou seja, sem apresentar deformação permanente. Tal resposta não ocorre instantaneamente, devido a um componente significativo de viscosidade. Em contrapartida, o comportamento vítreo está associado a um corpo que não pode ser deformado nem permanentemente nem elasticamente, sendo mais propenso a absorver a energia e dissipá-la, quebrando-se (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001).

Quando se aquece um vidro acima de  $T_g$ , o comportamento viscoelástico tem início, devido à possibilidade de escoamento das cadeias umas em relação às outras, dentro do vidro. Desta forma, quando uma força é aplicada, as cadeias se movimentam, mas a atração que existe entre as mesmas as faz retornar elasticamente à situação inicial, com uma velocidade relativamente baixa, devido à elevada viscosidade. Diz-se, neste caso, que ocorre um aumento na chamada entropia configuracional do sistema, o que significa que, à medida que as unidades formadoras do vidro adquirem a capacidade de escoamento, estas podem ser encontradas em um número cada vez maior de diferentes arranjos relativos (ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001; AXINTE, 2011).

### **3.2.6 Mercado de aplicação do vidro**

Vidros apresentam diversas aplicações no setor da construção, engenharia e decoração, podendo resolver muitos problemas em situações nas quais plásticos e metais falhariam como nos casos em que a função estética é um requisito (AXINTE, 2011). A opção pelo vidro tem se tornado cada vez maior devido às características como translucidez, integração com o meio externo e eficiência energética (SPENCE; KULTERMANN, 2011; SANTOS et al., 2016).

Segundo Alves, Gimenez e Mazali (2001), nos últimos 20 anos os vidros têm sido utilizados especialmente nos diferentes campos da atividade humana. O vidro

continua como material que evolui com as necessidades tecnológicas e se torna uma alternativa importante no desenvolvimento tecnológico da sociedade. De forma geral tem contribuído para decorações, utilizações laboratoriais, conforto térmico e acústico em ambientes, ou por questões de segurança (SHELBY, 2005). Nesse sentido o vidro tem sido utilizado para fábrica de lentes fotocromáticas. Vidros ópticos especiais destinados à proteção nuclear atuam em tecnologia nuclear, como câmaras de manipulação de material radioativo denominadas de *hot cells*; fibras de vidro, utilizadas como isolantes térmicos e acústicos em construção e como fibras de vidros têxteis; fibras ópticas; vitrocerâmicas; vidros contendo poros abertos, como as esponjas vítreas; vidros calcogenetos, que apresentam faixa de transmissão de comprimentos de onda além das dos vidros de sílica; janelas inteligentes ou eletrocromáticas constituídas de uma placa de vidro com filme fino de óxido de tungstênio ( $WO_3$ ) que atua como uma bateria para mudança de cor promovida pela eletricidade; *microarrays* de DNA; utilizações como fabricação de vidros de automóveis, pisos de residências, películas de celular, dentre outros (DOREMUS 1994; SCHEMA et al. 1995; ALVES; GIMENEZ; MAZALI, 2001; VERISSIMO; ALVES, 2006).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 MATÉRIAS-PRIMAS

#### 4.1.1 Coleta da lama abrasiva do beneficiamento de rochas ornamentais

A lama abrasiva foi coletada na central de tratamento de subprodutos do beneficiamento de rochas ornamentais AAMOL. A Associação está situada na rodovia do contorno, Km 03, s/n – Fazenda Monte Líbano, no município de Cachoeiro de Itapemirim-ES. A lama depositada na AAMOL é oriunda do beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) gerada a partir de processos de serragem dos blocos e polimento das chapas. A AAMOL recebe estes resíduos de 72 empresas da região sul do estado do Espírito Santo.

A coleta do material foi realizada com perfurador de solo à gasolina perpendicularmente à superfície do solo em 57 pontos a 1m de profundidade e em 8 pontos a 2m de profundidade, distanciados entre si a cada 10m, selecionados aleatoriamente no talhão de resíduos (Figura 2). Este procedimento possibilitou coletar amostras mais heterogêneas da lama depositada no talhão, o que permite uma melhor representatividade do material a ser utilizado na produção do vidro, uma vez que a lama que entra no aterro não é avaliada antes de ser depositada (AAMOL, 2017<sup>2</sup>).

Figura 2 - Representação dos pontos demarcados por GPS no talhão de lama abrasiva na central de tratamento AAMOL



Fonte: Elaboração própria.

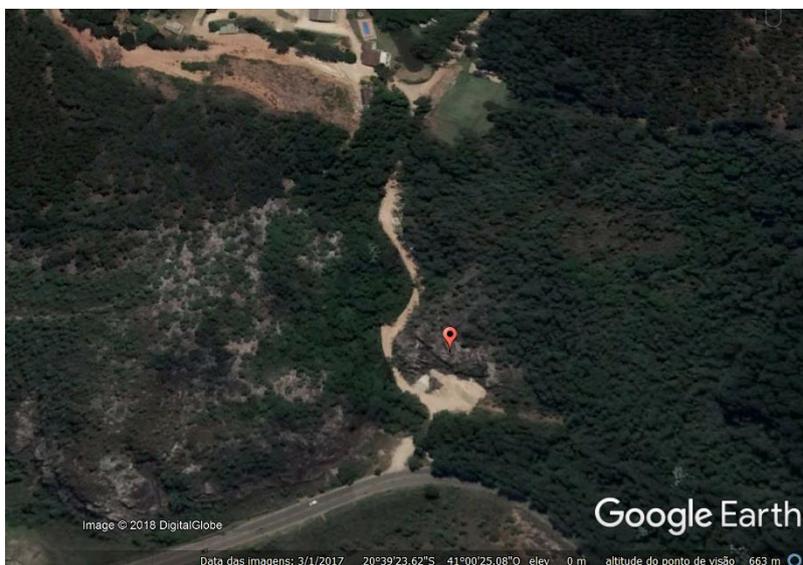
<sup>2</sup> Comunicação pessoal do diretor executivo da Associação Ambiental Monte Líbano – AAMOL, em visita realizada no mês de maio de 2017.

Em cada furo realizado recolheu-se aproximadamente 200g de amostra (material contido nas duas primeiras voltas da broca de 10cm de diâmetro do perfurador) por profundidade (57 amostras simples de 1m e 8 amostras simples de 2m). A mistura de amostras de mais de um ponto de mesma profundidade foi chamada amostra composta. Nos procedimentos metodológicos utilizou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, realizados em triplicata.

#### 4.1.2 Coleta do resíduo de quartzito

Foi coletada uma quantidade aproximada de 20 kg de resíduo de quartzito branco, proveniente da atividade de lavra, em uma jazida localizada em Morro Branco, no município de Vargem Alta-ES (Figura 3).

Figura 3 - Representação do local de coleta do resíduo de quartzito



Fonte: Google Earth.

#### 4.1.3 Preparação das matérias-primas

A preparação dos resíduos foi realizada nos Laboratórios de Química e de Materiais do Centro Universitário São Camilo, em Cachoeiro de Itapemirim-ES.

##### 4.1.3.1 Lama abrasiva

Após a obtenção das amostras compostas das profundidades de 1 e 2 metros dos resíduos da AAMOL, a lama abrasiva foi homogeneizada por 2 horas em um moinho de bolas de porcelana de marca DeLeo (Figura 4). Em seguida foi levada

à estufa marca DeLeo à temperatura de 100°C durante 2 horas para retirada de água livre e, depois de seca, aguardou-se o resfriamento e foi tamisada a 425 µm.

Figura 4 - Homogeneização da lama abrasiva no moinho de bolas de porcelana.



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.1.3.2 Resíduo de quartzito

O resíduo de quartzito (Figura 5) foi submetido à moagem em um moinho de bolas de porcelana marca DeLeo por 4 horas, para fragmentação das partículas, e em seguida destorroado novamente com grau e pistilo, e tamisado a 425 µm.

Figura 5 - Resíduo de quartzito antes do processo de moagem.



Fonte: Elaboração própria.

#### **4.1.4 Caracterização físico-química**

##### **4.1.4.1 Caracterização por difração de raios X**

As amostras compostas de lama abrasiva e uma amostra do resíduo de quartzito foram submetidas à análise de fases cristalinas por difração de raios X (DRX) em um difratômetro de marca Bruker, modelo D4 Endeavor, com fonte de radiação  $\text{CuK}\alpha$ , voltagem de 40 kV e corrente de 40 mA, no laboratório do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), núcleo regional do Rio de Janeiro.

##### **4.1.4.2 Fluorescência de raios X**

A fluorescência de raios X (FRX) foi realizada na lama abrasiva e no quartzito, com o intuito de identificar os elementos presentes nas amostras (análise qualitativa), bem como evidenciar a concentração de cada elemento identificado (análise quantitativa), utilizando-se um espectrômetro de fluorescência de raios X marca Philips, modelo PW 2400, no CETEM do Rio de Janeiro.

Primeiramente, foram realizadas três análises FRX da lama abrasiva coletada. A primeira análise foi da amostra composta de todos os 57 pontos de 1m de profundidade misturados e homogeneizados; a segunda análise também foi de amostra composta dos pontos de 1m de profundidade, porém não contemplou todos os pontos: coletou-se material de alguns pontos aleatoriamente, a fim de se obter uma comparação com a primeira amostra e analisar sua representatividade; a terceira análise foi uma amostra composta de todos os 8 pontos de 2 m de profundidade.

##### **4.1.5 Preparação das misturas**

De posse dos resultados da análise físico-química das matérias primas iniciou-se a fase de elaboração das composições para a preparação das misturas, utilizando-se de estequiometria para a adequação das proporções dos componentes necessários à fabricação do vidro.

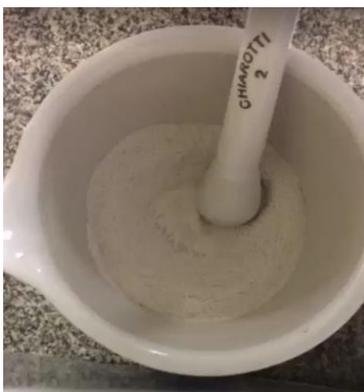
Para adição dos carbonatos e óxidos na elaboração das misturas dos vidros, comparou-se as composições químicas de cada amostra que passou pelo FRX e considerou-se, entre as três, a menor porcentagem de cada óxido nos cálculos estequiométricos, para se garantir a quantidade mínima desejada de cada componente ao fim do ajuste de composição.

A lama sofreu um ajuste de composição viabilizado pela prévia caracterização físico-química das matérias-primas, com adição do resíduo de quartzito (para enriquecimento de  $\text{SiO}_2$ ), carbonatos ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{K}_2\text{CO}_3$  e  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) e do óxido  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , de modo a se obter composições que se aproximem às da matéria-prima do vidro comum.

Além desta, elaborou-se uma mistura tendo como principal matéria prima e fonte de sílica o resíduo de quartzito, onde não se utilizou a lama abrasiva. Esta mistura teve as mesmas adições de carbonatos e óxido da mistura anterior, porém em proporções diferentes. O material foi pesado em uma balança analítica marca Bel, modelo M214AI, com capacidade de 210g e precisão de 0,0001g.

Antes da fusão, cada mistura passou por um processo de homogeneização que ocorreu por três diferentes modos: por 20 minutos com grau e pistilo, durante 5 minutos com uso de um *mixer*, ou por 2 horas no moinho de bolas (Figuras 6,7 e 8).

Figura 6 - Homogeneização da mistura com grau e pistilo.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 7 - Homogeneização da mistura com *mixer*.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 8 - Homogeneização da mistura no moinho de bolas.



Fonte: Elaboração própria.

## 4.2 PRODUÇÃO DOS VIDROS

### 4.2.1 Fusão das misturas

As misturas, após homogeneização, foram aquecidas ao ar em forno mufla marca Quimis, com temperatura inicial de 900°C e elevada à temperatura máxima de 1200°C por um período de 4 horas (Figura 9). Este procedimento foi realizado em quatro diferentes tipos de molde: em cadinhos de porcelana, em cápsulas de porcelana, em fôrmas de fibrocerâmica seladas com uma mistura de caulim em pó e água (Figuras 10, 11, 12), e uma mistura de quartzito em cadinho de platina. Em seguida, desligou-se a mufla, e as amostras permaneceram resfriando por aproximadamente 10 horas.

Figura 9 - Mistura aquecida em mufla, em processo de vitrificação.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 10 - Cadinho de porcelana.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 11 - Mistura de vidro na cápsula de porcelana.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 12 - Mistura em fôrma de fibrocêramica antes do aquecimento; vidro formado após a vitrificação; vidro após o desmolde



Fonte: Elaboração própria.

#### 4.2.2 Polimento dos vidros

Os vidros confeccionados nas fôrmas de fibroceâmica foram desmoldados e, em seguida, passaram por um processo de polimento para retirada do caulim na parte de trás do vidro, que estava em contato com a fôrma. Este procedimento foi feito com o uso de lixas de 180mm, 320mm, 600mm, 1200mm e 1500mm, acopladas a uma lixadeira.

### 4.3 CARACTERIZAÇÃO DOS VIDROS OBTIDOS

#### 4.3.1 Difração de raios X

As análises de fases cristalinas foram obtidas por difração de raios X, a fim de se detectar um diagrama de fases nos vidros, e para atestar que todos os vidros produzidos eram amorfos. A difração foi realizada pelo Método do Pó, com fonte de radiação monocromática  $\text{CuK}\alpha$  em um difratômetro da marca Bruker, modelo D4 Endeavor, com passos de  $0,02^\circ$  para o ângulo de detecção e tempo de 0,5s por passo, em uma varredura de  $4^\circ$  a  $80^\circ$ .

#### 4.3.2 Fluorescência de raios X

As análises de composição química foram realizadas no Laboratório de Espectrometria por Fluorescência de Raios X do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) do Rio de Janeiro.

#### 4.3.3 Caracterização da densidade dos vidros

As medidas de densidade foram realizadas utilizando-se o método do princípio de Arquimedes, com auxílio de uma balança analítica analógica marca Bel, modelo M214Al, com capacidade de 210g e precisão de 0,0001g, e água destilada como líquido de imersão. Os valores de densidade foram calculados mediante a utilização da Equação 1 (BABISK, 2009).

$$\rho_s = \left( \frac{M_s}{M_u - M_i} \right) \times \rho_l \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

$\rho_s$  = densidade do sólido;  $\rho_l$  = densidade do líquido (água);  $M_s$  = massa seca;  $M_u$  = massa úmida;  $M_i$  = massa imersa.

#### 4.3.4 Resistência hidrolítica do vidro

Os ensaios de resistência hidrolítica dos vidros foram realizados segundo a norma ISO 719 (1985) *Glass - Hydrolytic resistance of glass grains at 98 degrees C - Method of test and classification* (Vidro - Resistência hidrolítica de grãos de vidro a 98°C - Método de teste e classificação) e encontra-se representado na Figura 13.

Figura 13 - Ensaio de resistência hidrolítica dos vidros.



Fonte: Elaboração própria.

Os valores de resistência foram calculados em mililitro de solução de ácido clorídrico por grama de vidro (ml/g), e interpretados conforme o Quadro 8. O indicador utilizado foi a solução vermelha de metila (ISO 719, 1985).

Quadro 8 - Valores limites e interpretação dos resultados no teste de resistência hidrolítica segundo a norma ISO 719.

Classe	ml/g	Interpretação
HGB 1	$\geq 0,10$	Resistência muita alta
HGB 2	$0,10 \geq 0,20$	Resistência alta
HGB 3	$0,20 \geq 0,85$	Resistência média
HGB 4	$0,85 \geq 2,0$	Resistência baixa
HGB 5	$2,0 \geq 3,5$	Resistência muito baixa

Fonte: ISO 719 (1985).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 MATÉRIAS PRIMAS

#### 5.1.1 Resultados FRX

O resultado do FRX permitiu identificar que a composição química da lama abrasiva coletada no talhão da AAMOL foi semelhante em todas as amostras (Quadro 9). Desta forma, utilizou-se apenas uma amostra para produção dos vidros, já que a diferença entre elas era pouco significativa, de forma que não influenciaria na produção de vidros distintos.

Quadro 9 - Resultados FRX da lama abrasiva coletada.

	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Amostra 1	3,4	2,5	15,0	58,5	0,47	0,13	3,4	6,3	0,75	5,7
Amostra 2	3,2	2,6	14,2	57,1	0,45	0,11	3,3	7,0	0,76	6,7
Amostra 3	3,2	2,7	14,4	57,6	0,48	0,15	3,4	6,9	0,73	6,1

Fonte: Laboratório CETEM (2108).

O resultado da análise de FRX do resíduo de quartzito apontou a presença de 93,64% de SiO<sub>2</sub> na amostra, o que justifica o uso deste material como fonte de sílica para a produção de vidros. O teor de alumina foi de 3%, sendo a impureza encontrada em maior fração. O teor de hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), que promove a coloração verde nos vidros, foi de apenas 0,3%. Contudo, as impurezas distintas presentes na amostra na forma de óxido pode promover a formação de bolhas e a não obtenção de um vidro especial, geralmente fabricado utilizando-se materiais com elevado teor de sílica (GUERRA, 2013).

As composições químicas das matérias primas utilizadas foram elencadas no Quadro 10, onde ainda se analisou o resultado do FRX de uma amostra de resíduo de granito coletada no filtro-prensa da AAMOL, apenas a título de comparação.

Quadro 10 - Composição química das matérias-primas (%).

Componentes	Amostra Lama Granito	Amostra Composta LBRO (1m)	Amostra Composta LBRO (2m)	Resíduo Quartzito
SiO <sub>2</sub>	58,89	58,5	57,6	93,64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15,57	15	14,4	3,19
Na <sub>2</sub> O	2,69	3,4	3,2	-
CaO	4,66	6,3	6,9	0,56
MgO	0,7	2,5	2,7	-
K <sub>2</sub> O	8,64	3,4	3,4	1,2
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	7,23	6,5	6,1	0,33
TiO <sub>2</sub>	0,79	0,75	0,73	0,59

Fonte: Elaboração própria.

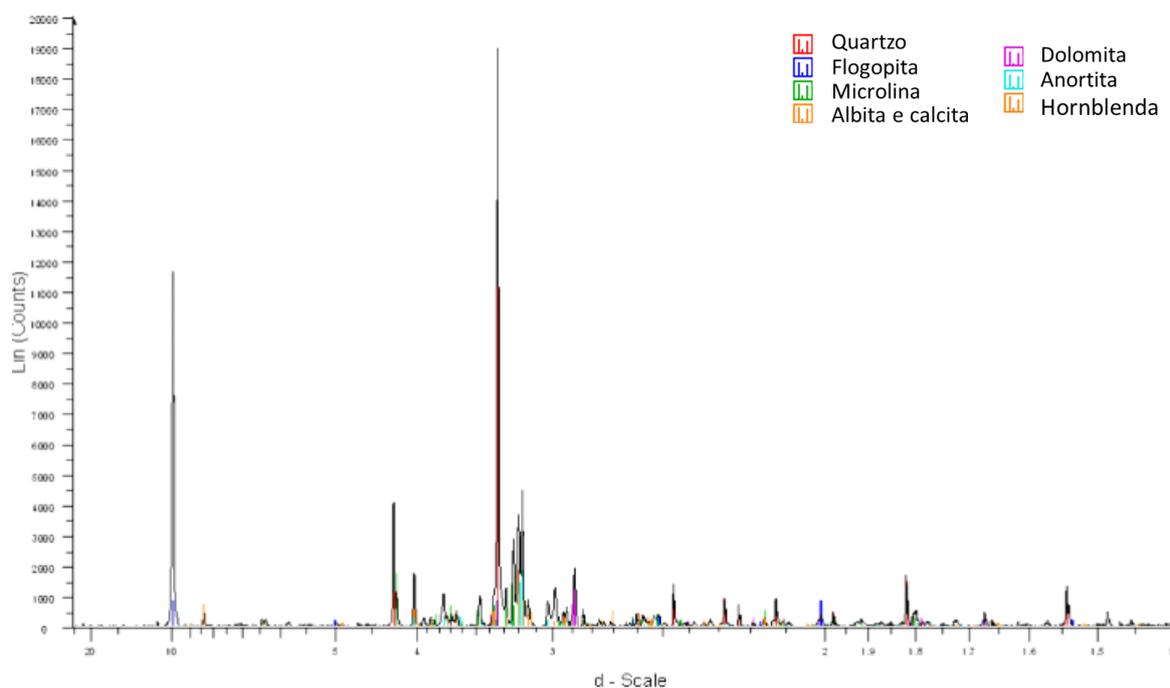
Analisando-se a composição química do material coletado no talhão da AAMOL, disponibilizado de maneira heterogênea com resíduos misturados de diferentes rochas ornamentais (granito, mármore, quartzito e outras), percebeu-se que a composição química dos resíduos não teve variação significativa nas diferentes profundidades da lâmina do aterro (1 e 2 metros). Além disso, estes resíduos tiveram uma composição mais favorável à fabricação do vidro do que o resíduo de granito isolado, pois, apesar da quantidade de sílica ser similar nestas três, em torno de 58%, o resíduo heterogêneo apresentou teores maiores de CaO e MgO devido à presença de mármore na amostra, óxidos que favorecem o processo de vitrificação em temperaturas inferiores às normalmente utilizadas no processo de fundição da matéria prima para fabricação de vidro.

Em relação ao quartzito, os resíduos do talhão apresentam valores maiores de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, K<sub>2</sub>O e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, além da presença do Na<sub>2</sub>O. A quantidade significativa de hematita está associada ao método de beneficiamento do bloco, onde é comum o uso de teares tradicionais no desdobramento da peça, com o emprego de granalhas de ferro (BABISK, 2009). Devido à menor resistência mecânica dos blocos de quartzito, o corte deste tipo de material é realizado com fio diamantado, que não utiliza granalha, para se manter a integridade da peça. Do contrário, o bloco de rocha se fragmentaria.

### 5.1.2 Resultados DRX

O resultado da análise DRX da lama abrasiva foi apresentado na Figura 14. O difratograma evidencia os picos de quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) presentes na amostra, fase cristalina da sílica estável à pressão e temperatura ambientes (MARÇAL, 2011). Também foi possível identificar picos característicos de outras fases cristalinas características do resíduo de granito, referentes a silicatos de cálcio, potássio, alumínio, sódio, na forma mineralógica de microlina ( $\text{KAISi}_3\text{O}_8$ ) e albita ( $(\text{NaCa})\text{Al}(\text{SiAl})_3\text{O}_8$ ), bem como de fases mineralógicas características do resíduo de mármore, como a calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e a dolomita ( $\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2$ ). Além disso, observou-se picos de flogopita ( $\text{KMg}_3\text{Al}(\text{OH})\text{Si}_4\text{O}_{10}$ ), e traços de anortita ( $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) e hornblenda ( $(\text{Ca},\text{Na})_2(\text{Mg},\text{Fe},\text{Al})_5(\text{Al},\text{Si})_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ ).

Figura 14 - Difratograma da lama abrasiva.



Fonte: Laboratório CETEM (2108).

### 5.2 PRODUÇÃO DOS VIDROS

As Figuras 15, 16, 17 e 18 evidenciam os resultados dos vidros produzidos nos diferentes moldes: cadinho (Figura 15), cápsula (Figura 16) e fôrma de fibrocerâmica (Figuras 17 e 18). Os vidros mais escuros apresentam uma maior concentração de ferro, presente na lama abrasiva. Entretanto, quando a

concentração de ferro foi reduzida, o vidro ficou mais claro, tendendo ao verde e ao âmbar (Figuras 17 e 18). Isso foi possível elevando-se a concentração de quartzito na mistura. Neste último, observa-se resquícios de caulim na parte posterior do vidro - que não foi totalmente removido com a lixadeira -, além de melhor transmissibilidade de luz e sem distorções nas imagens, o que poderia tornar o produto útil para aplicação em vidros de mesas coloridos.

Figura 15 – Vidro produzido no cadinho de porcelana.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 16 – Vidro produzido na cápsula de porcelana.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 17 – Vidro produzido na fôrma de fibrocêrâmica, após desmolde.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 18 - Vidro posterior ao desmolde e após o processo de lixamento para remoção do caulim.



Fonte: Elaboração própria.

Comparando-se os três procedimentos, nota-se que o vidro fundido na fôrma de fibrocerâmica obteve o melhor resultado: a distribuição de calor por toda a massa aconteceu melhor e de forma mais homogênea; e ao término do processo de aquecimento, quando a mufla foi desligada, a fôrma de fibrocerâmica reteve melhor o calor que as outras, fazendo com que a taxa de resfriamento fosse menor nesse caso – o que contribui para a formação de um vidro não cristalizado. Outra vantagem é que o vidro pode ser desmoldado totalmente, e a fôrma ainda é reutilizável.

No cadinho de porcelana, a distribuição de calor não ocorreu de forma homogênea em virtude do material do molde e de sua altura, que impediu que o calor chegasse da mesma forma em todos os pontos da mistura. A cápsula de porcelana teve o mesmo problema em relação ao material, mas ainda funcionou melhor que o cadinho por ser mais baixa e com uma abertura superior maior, contribuindo para uma melhor distribuição da mesma massa de amostra, e assim uma melhor dissipação do calor em toda a amostra.

O vidro de quartzito, fundido na cápsula de porcelana, teve o resultado que se encontra na Figura 19. Nota-se a presença de muitas trincas e bolhas, salientando sua fragilidade mecânica causada pelo emprego de grande quantidade de fundentes. A Figura 20 evidencia a transparência do vidro de quartzito quando apresentado em menor espessura.

Figura 19 – Vidro produzido com quartzito



Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 – Fragmentos do vidro de quartzito.

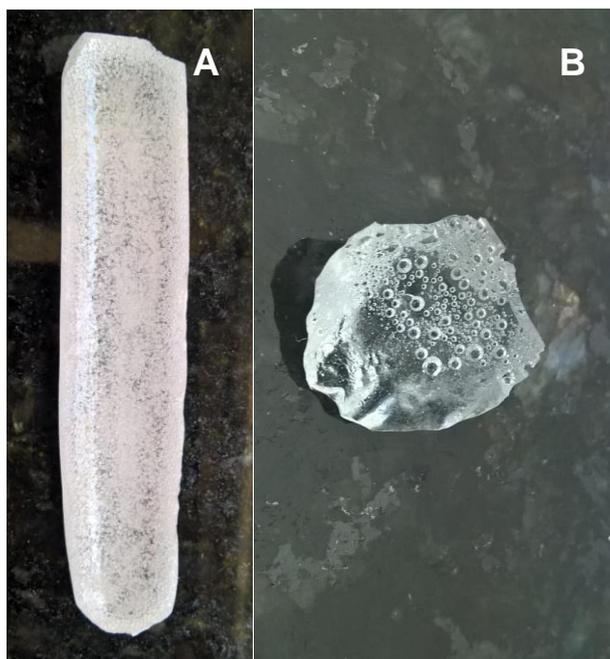


Fonte: Elaboração própria.

O vidro com alto teor de sílica é mais viscoso e, portanto, necessita de temperaturas mais altas de fusão para a vitrificação. Segundo Guerra (2013), mesmo em altas temperaturas de fusão, mas com amostras ricas em impurezas na forma de óxido, com tempos e temperaturas distintas de fusão aos da sílica, é possível a formação de bolhas. Uma forma de eliminar as impurezas se dá pela aplicação da lixiviação ácida, que permite obter sílica vítrea e, com isso, a melhor qualidade do material pela redução de bolhas (GUERRA, 2013). Isso tornaria possível a aplicação do vidro em lentes e óculos.

Neste trabalho, em que a temperatura máxima da mufla era de 1200°C, a alternativa viável foi o uso de mais fundentes, o que acabou diminuindo a resistência mecânica deste vidro. O produto obtido mediante os ajustes dos fundentes e com a utilização da placa de fibrocerâmica permitiu obter um vidro com bolhas, mas não quebradiço (Figura 21a). Novos ajustes de fundentes foram realizados e a amostra depositada em cadinho de platina. O produto final do vidro de quartzito pôde ser melhor obtido em cadinhos de platina de 10 ml (Figura 21b). A platina permite a distribuição de calor de forma homogênea na amostra, o que permitiu melhor transição das fases de sinterização à fase de vitrificação. As bolhas evidenciadas na Figura 21b foram formadas na área de contato da amostra com o fundo do cadinho, mas não estão inseridas no interior da massa vítrea.

Figura 21 - Vidro produzido com quartzito: A- em fôrma de fibrocerâmica; B- em cadinho de platina.



Fonte: Elaboração própria.

### 5.3 CARACTERIZAÇÃO DOS VIDROS

#### 5.3.1 Fluorescência de raios X

O resultado do FRX (Quadro 11) confirma que a cor verde do vidro produzido com a LBRO se deve à maior proporção de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  na amostra. O vidro de quartzito ficou incolor devido à baixíssima quantidade desse óxido (<0,1%).

Quadro 11 – Composição química do vidro feito com LBRO e do vidro com apenas quartzito (%).

Vidro	Na <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>
LBRO + Quartzito	8,4	9,6	58,1	5,6	10,3	4,7	2,3	0,22	0,55
Quartzito	13,6	15,4	55,3	5,7	8,6	<0,1	1,1	<0,1	0,12

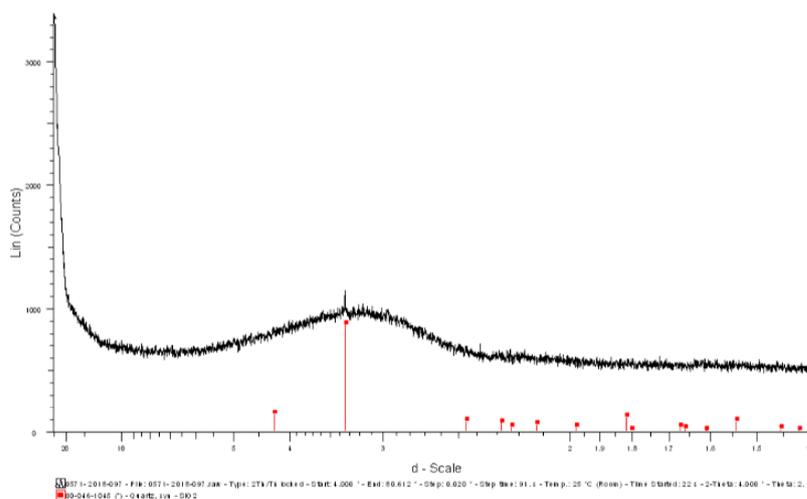
Fonte: Laboratório CETEM (2108).

O vidro de quartzito, em virtude do alto teor de SiO<sub>2</sub> da matéria prima, necessitou de mais fundentes para a vitrificação numa temperatura mais baixa que o requerido para formação da sílica vítrea, quando comparado a outros tipos de vidro.

### 5.3.2 Difração de raios X

Os resultados das análises de fases cristalinas realizadas por meio da difração de raios x no vidro de lama abrasiva e no vidro de quartzito encontram-se ilustrados nas Figuras 22 e 23.

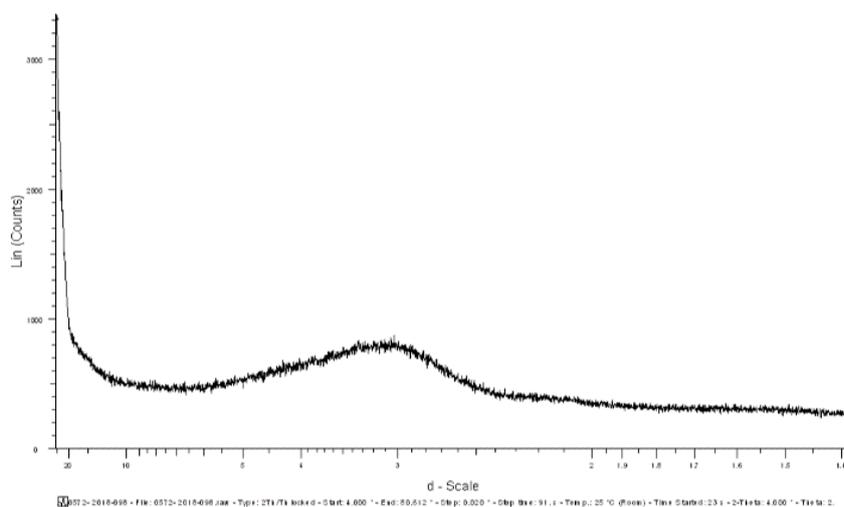
Figura 22 - Difratograma do vidro de lama abrasiva.



Fonte: Laboratório CETEM.

O difratograma do vidro com lama abrasiva (Figura 22) mostra a ocorrência de um pico de quartzo pouco intenso em um dos pontos, o que pode ser explicado pela velocidade da taxa de resfriamento, que não foi suficientemente alta. Porém, o vidro é amorfo em quase sua totalidade. A ausência de picos no difratograma do vidro de quartzito (Figura 23) evidencia que o vidro produzido foi completamente amorfo.

Figura 23 - Difratoograma do vidro de resíduo de quartzito.



Fonte: Laboratório CETEM.

Além disso, pode-se inferir que o tempo de homogeneização das misturas não foi suficiente, e que os materiais com granulometrias diferentes dificultaram a correta homogeneização do vidro. Com exceção do vidro ilustrado na Figura 18, nitidamente mais homogêneo, que teve as matérias primas com granulometrias igualadas em 75  $\mu\text{m}$ , e passou pelo processo de homogeneização em moinho de bolas por tempo superior a 1 hora.

### 5.3.3 Densidade

Devido à presença dos óxidos modificadores de rede, os vidros sodo-cálcicos têm densidade nominal de 2,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  (BABISK, 2009). Neste trabalho, os vidros produzidos com lama abrasiva e quartzito apresentaram valor médio de densidade de 2,71  $\text{g}/\text{cm}^3$ , enquanto o vidro produzido só com quartzito teve densidade média de 1,77  $\text{g}/\text{cm}^3$ , o que se justifica pela elevada presença de bolhas que ficaram retidas na massa vítrea do material utilizado para o teste. Além disso, a densidade do vidro de quartzito tende a ser menor que o produzido com a LBRO devido à maior concentração de óxidos presentes na própria lama quando comparado ao de quartzito (GUERRA, 2013; ZANOTTO; MAURO, 2017). A comparação dos valores de densidade entre os vidros produzidos a partir dos resíduos de LBRO e quartzito apresentaram diferenças significativas estatisticamente pelo teste “t” ( $t=46,05$ ;  $df=6$ ;  $p=0,00001$ ) (Quadro 12).

Quadro 12 - Comparações entre as densidades dos vidros obtidos de LBRO, do Quartzito e de um Vidro de Garrafa industrializado como recipiente de vinho branco.

<b>Vidro obtido pelos materiais</b>	<b>*Médias (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
LBRO	2,71 <sup>a</sup>	0,029
Quartzito	1,77 <sup>b</sup>	0,028
Vidro de garrafa	1,92 <sup>c</sup>	0,026

Fonte: Elaboração própria.

\*Valores na coluna seguidos de mesma letra não apresentam diferenças entre as médias, calculadas para a par pelo teste t, já que o poder do teste é maior.

Quando a comparação foi realizada entre o vidro de LBRO e o de garrafa transparente (recipiente de vinho branco), as médias se mostraram diferentes pelo teste “t” ( $t=40,15$ ;  $df=6$ ;  $p=0,00001$ ). Enquanto as médias de densidade para o vidro obtido a partir dos resíduos apenas do quartzito em comparação com a densidade da garrafa industrializada foram distintas estatisticamente pelo teste “t” ( $t=-7,638$ ;  $df=6$ ;  $p=0,00026$ ) (Quadro 12).

#### 5.3.4 Resistência hidrolítica

O grau de resistência de um vidro à água é determinado por seu comportamento em termos de capacidade de resistência na água. O ensaio de resistência hidrolítica foi realizado para o vidro obtido de LBRO com quartzito, que teve como resultado um valor médio de 3,26 ml/g (mililitro de solução de ácido clorídrico por grama de vidro). Enquanto o resultado para o vidro produzido apenas com o quartzito possuiu menor resistência hidrolítica, sendo que valor do teste teve como média 4,3 ml/g. Ambos os valores, quando comparados a um vidro de garrafa destinada ao armazenamento de vinho, foram inferiores ao valor de HGB para o vidro de garrafa com média igual a 5,7 ml/g. De acordo com a norma ISO 719, estes vidros enquadram-se na classificação HGB 5 e apresentam resistência hidrolítica muito baixa, em função da quantidade alta de óxidos alcalinos adicionados à mistura ou presentes na matéria prima amostrada.

Os dois vidros produzidos com resíduos de rochas ornamentais, de LBRO e quartzito, embora estivessem dentro da mesma faixa de resistência hidrolítica, possuem HGB significativamente inferior pelo teste “t” ao vidro de garrafa de acondicionamento de vinho branco (Quadro 13). Os valores de significância e as

comparações são observadas no Quadro 14. A baixa resistência hidrolítica apresentada no vidro de garrafa sugere que esse material tenha sido produzido com a adição de fundentes em proporções elevadas, diferentemente dos vidros borossilicatos, que não permitem reações químicas com solventes ácidos e, conseqüentemente, apresentam maior resistência hidrolítica, pelo fato de o boro ser anfótero.

Quadro 13 - Comparações entre as resistências hidrolíticas dos vidros obtidos de LBRO, do Quartzito e de um Vidro de Garrafa industrializado como recipiente de vinho branco.

<b>Vidro obtido pelos materiais</b>	<b>*Médias (ml/g)</b>	<b>Desvio Padrão</b>
HGB LBRO	3,26 <sup>a</sup>	0,026
HGB Quartzito	4,30 <sup>b</sup>	0,028
HGB Vidro de garrafa	5,70 <sup>c</sup>	0,28

Fonte: Elaboração própria.

\*Valores na coluna seguidos de mesma letra não apresentam diferenças entre as médias, calculadas para a par pelo teste t, já que o poder do teste é maior.

Quadro 14 - Resultados do teste "t" sob 5% de significância para as comparações entre as resistências hidrolíticas dos vidros obtidos de LBRO, do Quartzito e de um Vidro de Garrafa industrializado como recipiente de vinho branco.

<b>Vidro obtido pelos materiais</b>	<b>Valor de t</b>	<b>df</b>	<b>Valor de p</b>
HGB LBRO x HGB Quartzito	-24.2892	6	0.000000
HGB LBRO x HGB Vidro de garrafa	-17.1820	6	0.000002
HGB Quartzito x HGB Vidro de garrafa	-9.51113	6	0.000077

Fonte: Elaboração própria.

Para utilização dos vidros obtidos nesse trabalho com o fim de vidraria, poderia ser realizado o ataque com solução de sulfato ( $SO_4$ ) ou hidrofluorcarbono difluoretano (DFE) (JANETTI; JAIME, 2010), onde o resultado da reação do sal com a superfície do vidro produziria um precipitado que poderia ser retirado em solução aquosa, sendo assim, eficaz para aumentar a resistência hidrolítica do material. Segundo Janetti e Jaime (2010), o DFE é mais eficaz para promoção de maior resistência hidrolítica do vidro e tem sido utilizado em substituição ao sulfato de sódio.

Os resultados obtidos neste trabalho, devido à presença dos fundentes, inviabilizaram a utilização dos vidros produzidos sem o tratamento de alcalinidade

para utilização em recipientes que estarão em contato direto com soluções aquosas, como por exemplo copos, garrafas, dentre outros, pois reduziria a resistência do material e mudaria sua característica ao ataque químico pela água (JANETTI; JAIME, 2010). Embora os vidros sodo-cálcicos sejam um dos mais utilizados atualmente para produção de vidrarias destinadas ao acondicionamento de material alimentar e de medicamentos farmacêuticos e veterinários, o tratamento para aumentar a resistência hidrolítica deve ser realizado, principalmente no caso em que uma alteração de pH mudaria a característica e eficácia do produto, como exemplo o acondicionamento de medicamentos (DANTAS, 1997; JAIME; DANTAS, 2009, JANETTI; JAIME, 2010).

Os vidros produzidos dos resíduos de rochas ornamentais poderiam ser recomendados para a utilização na construção civil com ou sem tratamento de resistência hidrolítica. Contudo, devem ser criadas normas de produção e utilização do vidro a partir desse resíduo.

## 6 CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho foi possível concluir que existe viabilidade técnica na produção de vidros utilizando-se apenas resíduos de rochas ornamentais, sendo que os vidros produzidos apresentam possibilidade de serem utilizados no ramo da construção civil.

Os resultados obtidos nas análises de caracterização realizadas nos resíduos utilizados e sua comparação com os resultados encontrados por outros autores é um indicativo de que as propriedades químicas e físicas destes resíduos são similares, contribuindo potencialmente para o efetivo emprego industrial da tecnologia desenvolvida.

As misturas aquecidas na fôrma de fibrocerâmica, devido à retenção e distribuição mais homogênea de calor, além do possível desmolde do vidro sem quebra-lo, obtiveram o melhor resultado final. Assim quanto melhor a distribuição de calor na amostra melhor será a formação da rede vítrea e o resultado do produto final, conforme ocorre na produção industrial.

Os vidros confeccionados com LBRO tiveram valores próximos de densidade aos de vidros convencionais, enquanto o vidro com quartzito apresentou densidade inferior. Tratando-se da resistência hidrolítica, esta se mostrou muito baixa de acordo com a ISO 719 (1985), principalmente devido à adição de fundentes para redução da temperatura de fusão das misturas e obtenção do vidro, já que os fundentes utilizados eram alcalinos. Contudo, os resultados da comparação da resistência hidrolítica a um vidro incolor de garrafa de vinho branco mostram que os valores da resistência dos vidros produzidos foram maiores.

Os vidros com lama abrasiva apresentam um espectro ideal para vidros que atuem como redutores de calor, pois sua coloração verde tende a transmitir pouca radiação infravermelha.

As composições preparadas com quartzito resultaram em vidros completamente amorfos, e as com lama abrasiva em vidros quase totalmente amorfos.

Recomenda-se que sejam efetivados testes de resistência hidrolítica após o tratamento com DFE para melhor verificação das funcionalidades do produto, bem como a realização de lixiviação ácida para retirada de impurezas que influenciam

na formação da rede vítrea, a fim de se obter um vidro melhor e com maior resistência.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKERMAN, Mauro. **Natureza, estrutura e propriedades do vidro**. Publicação técnica. Centro técnico de elaboração do vidro. Saint-Gobain, Vidros-Brasil, 2000.
2. AL-AKHRAS, N. M.; ABABNEH, A.; ALARAJI, W. A. Using burnt stone slurry in mortar mixes. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 2658-2663, 2010.
3. AL-ZBOON, K.; AL-ZOU'BY, J. Recycling of stone cutting slurry in concrete mixes. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v. 17, p. 324-335, 2015.
4. AL-ZBOON, K.; TAHAT, M.; ABU-HAMATTEH, Z. S. H.; AL-HARAHSEH, M. S. Recycling of stone cutting sludge in formulations of bricks and terrazzo tiles. **Waste Management & Research**, v. 28, n. 6, p. 568-574, 2010.
5. ALEIXO, F. C.; BALLMANN, T. J. S.; FOLGUERAS, M. V.; JUNKES, J. A.; DELLA, V. P. Preparação de vidros sodo-cálcicos utilizando resíduo de lã de rocha. **Cerâmica**, v. 62, p. 358-364, 2016.
6. ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J.R. Recycling of stone slurry in industrial activities: Application to concrete mixtures. **Building and Environment**, v. 42, p. 810-819, 2005.
7. ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; BRITO, J.; SANTOS, J.R. High-performance concrete recycled stone slurry. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p. 210-220, 2007.
8. ALVES, J. O.; JUNCA, E.; ESPINOSA, D., C., R.; TENÓRIO, J. A. S. Resíduo do corte de granito: Inovação tecnológica para a destinação final. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 12, n. 2, p.123-128, 2015.
9. ALVES, O. L.; GIMENEZ, I. F.; MAZALI, I. O. **Vidros**. Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola, Divisão de Ensino da Sociedade Brasileira de Química, 2001.
10. ASKELAND, D. R., PHULÉ, P. P. **Ciência e Engenharia dos Materiais**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.
11. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2004). NBR ISO 14000, Sistemas Da Gestão Ambiental. Rio de Janeiro, 1996.

12. AXINTE, E. Glasses as engineering materials: A review. **Materials and Design**, v. 32, p. 1717–1732, 2011.
13. \_\_\_\_\_. NBR 15012 – Rochas para revestimento de edificações – Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.
14. BABISK, M. P. **Desenvolvimento de Vidros Sodo-cálcicos a partir de Resíduos de Rochas Ornamentais**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2009.
15. BABISK, M. P.; VIDAL, F. W. H.; RIBEIRO, W. S.; AGUIAR, M. C.; GADIOLI, M. C. B.; VIEIRA, C. M. F. Incorporação de resíduo de quartzitos em cerâmica vermelha. **HOLOS**, ano 28, v. 6, p. 169-177, 2012.
16. BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; FIGUEIREDO, E. P.; LOPES, J. L. M. P. Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers. **Construction and Building Materials**, v. 45, p. 1-10, 2013.
17. BAI, Shuo-Wei; ZHANG, Jin-Sheng; WANG, Zhi. A methodology for evaluating cleaner production in the stone processing industry: case study of a Shandong stone processing firm. **Journal of Cleaner Production**, v. 102, p. 461-476, 2015.
18. BAI, Shuo-wei; ZHANG, Jin-sheng; WANG, Zhi. Selection of a sustainable technology for cutting granite block into slabs. **Journal of Cleaner Production**, v. 112, p. 2278-2291, 2016.
19. BARBOSA, J. F.; COSTA, V. S. da; LIMA, M. R. P. Avaliação da utilização de lama abrasiva gerada no beneficiamento de mármore e granito para a confecção de telhas de concreto. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, v. 8, n. 1, p. 30-35, 2013.
20. BARRETO NETO, A. A.; MELO, A. M. V. Desenvolvimento de projetos de produtos utilizando resíduos pétreos de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, n. 4, p. 393-398, 2013.
21. BARROS, S. V. A.; MARCIANO, J. E. A.; FERREIRA, H. C.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A. Addition of quartzite residues on mortars: Analysis of the alkali aggregate reaction and the mechanical behavior. **Construction and Building Materials**, v. 118, p. 344-351, 2016.

22. BRAGA, Florindo dos Santos et al. Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 15, n. 3, p. 237-244, 2010.
23. BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago., 2010.
24. \_\_\_\_\_. Ministério da Educação. Secretaria de Educação Profissional e Tecnologia – SETEC. **Rochas Ornamentais**. Brasília, DF, 2007.
25. CALMON, J. L. **Resíduos industriais e agrícolas**. In: Isaia, Geraldo Cechella. (Org.). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto - IBRACON, 2007, v. 2, p. 1590-1627.
26. CAREDDU, N; MARRAS, G. Marble processing for future uses of CaCO<sub>3</sub>-microfine dust: A study on wearing out of tools and consumable materials in stoneworking factories. **Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review**, v. 36, n. 3, p. 183-191, 2015.
27. CARREIRO, M. E. A. et al. Resíduo de quartzito - matéria-prima alternativa para uso em massas de cerâmica estrutural. **Cerâmica**, São Paulo, v. 62, n. 362, p. 170-178, jun. 2016.
28. CARVALHO, E. A. S. et al. Novel Artificial Ornamental Stone Developed with Quarry Waste in Epoxy Composite. **Materials Research**, São Carlos, v. 21, n. 1, p.1-6, 2018.
29. CASTRO, N. F. et al. Impacto do APL de rochas ornamentais do Espírito Santo nas comunidades. Núcleo Regional do Espírito Santo do Centro de Tecnologia Mineral – CETEM-ES, 2011.
30. CHANG, F. C. et al. Artificial aggregate made from waste stone sludge and waste silt. **Journal of Environmental Management**, v. 91, p. 2289-2294, 2010.
31. CHINELATTO, A. S. A.; CHINELATTO, A. L.; FERREIRA, D. E. M.; GRALIK, G. Estudo da viabilidade do uso de resíduo de polimento de rochas ornamentais em porcelanas. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 1075-1086, 2015.

32. CHIODI FILHO, C. **Aspectos de interesse sobre rochas ornamentais e de revestimento: Identificação, especificação e utilização.** Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS. 2002.
33. CHIODI FILHO, C. **Panorama Mundial do Setor de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013.** Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS. São Paulo, 2014.
34. CHIODI FILHO, C. **Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais em 2016.** Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS. Brasília, 2017.
35. CHIODI FILHO, C.; RODRIGUES, E. P. **Guia de aplicação de rochas em revestimentos.** Projeto Bula, Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais – ABIROCHAS. São Paulo, 2009.
36. DANTAS, A. P. A. **Utilização de resíduos de rochas ornamentais na produção de cerâmica branca.** 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.
37. DANTAS, F.B.H. Aspectos relacionados à resistência química de embalagens de vidro. Centro de Pesquisa e Desenvolvimento de Embalagens (CETEA), São Paulo, v.19, n.2, p.1-6, 1997.
38. DU PONT Brasil. **Tratamento de superfícies de embalagens de vidro por DFE (HFC-152a) possibilitando a transformação de vidros TIPO III para TIPO II.** Barueri: Du Pont Brasil, fev.2003.
39. ERCIKDI, B.; KÜLEKCI, G.; YILMAZ, T. Utilization of granulated marble wastes and waste bricks as mineral admixture in cemented paste backfill of sulphide-rich tailings. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 573-583, 2015.
40. FARIAS, D. S. U. et al. Análise da incorporação de mármore da Mina Brejuí – Currais Novos/RN na massa cerâmica. *In*: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos, Natal, RN, 2016.
41. FELISBERTO, Camila Benini. **Rendimento e cor de selênio e seus compostos na coloração de vidros sodo-cálcicos.** 2006. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
42. FERNANDES, M. H. V. **Introdução à Ciência e Tecnologia do Vidro,** Universidade Aberta, 1ª Edição, Lisboa, 1999.

43. FERNANDES, T. M. G.; GODOY, A. M.; FERNANDES, N. H. Estudos petrográfico, estrutural e químico dos quartzitos do Centro Produtor de São Thomé das Letras (MG). **Revista Geociências**, v. 9, n. 6, p. 5-18, 2014.
44. FRANÇA, B. R. et al. Durability of Soil-Cement Blocks with the Incorporation of Limestone Residues from the Processing of Marble. **Materials Research**, São Carlos, v. 21, n. 1, p.1-6, 2018.
45. GALETAKIS, M. SOULTANA, A. A review on the utilization of quarry and ornamental stone industry fine by-products in the construction sector. **Construction and Building Materials**, v. 119, p. 45–52, 2016
46. GENCEL, O.; OZEL, C.; KOSKAL, F.; ERDOGMUS, E.; MARTÍNEZ-BARREA, G.; BROSTOW, W. Properties of concrete paving blocks made with waste marble. **Journal of Cleaner Production**, v. 21, p. 62-70, 2012.
47. GUERRA, C. P. **Desenvolvimento de sílica vítrea por fusão em chama a partir de lascas de quartzo brasileiro visando aplicações de alta transmitância no médio UV**. 2013. 104f. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
48. GUPTA, P.K. Non-crystalline solids: glasses and amorphous solids. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 195, p. 158-164, 1996.
49. 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.
50. IAMAGUTI, A. P. S. **Manual de rochas ornamentais para arquitetos**. **Universidade estadual paulista**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Campus de Rio Claro. Rio Claro, 2001.
51. ISO – International Organization for Standardization. ISO 719. **Glass – hydrolytic resistance of glass grains at 98°C**. 1985.
52. JAIME, S.B.M., DANTAS, F.B.H. Embalagens de vidro para alimentos e bebidas: propriedades e requisitos de qualidade. Campinas: CETEA/ITAL, 2009. 223p.

53. JANETTI, P. F.; JAIME, S. B. M. Resistência hidrolítica: ataque químico do vidro pela água e suas implicações no segmento farmacêutico. **Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens**, v. 22, p. 1-5, 2010.
54. KHATER, G. A. et al. Glass-ceramics materials from basaltic rocks and some industrial waste. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v. 358, p. 1128 –1134, 2012.
55. LYRA, B. **Rochas ornamentais geram 10% do PIB do Espírito Santo**. Tempo Novo. 2016. Disponível em: <<https://www.portaltemonovo.com.br/rochas-ornamentais-geram-10-do-pib-do-espírito-santo/>> Acesso em: 24 de julho de 2017.
56. MARÇAL, R. L. S. B. **Fabricação de vidros especiais a partir de resíduos de corte e polimento da indústria de rochas ornamentais**. 2011. 79f. Dissertação (mestrado) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2011.
57. MATOS, L. F. S.; ROCHA, J. C. Metodologia experimental para previsão da durabilidade de pedras de revestimento. *In*: XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Florianópolis, SC, 2006.
58. MAURO, J. C.; ZANOTTO, E. D. Two Centuries of Glass Research: Historical Trends, Current Status, and Grand Challenges for the Future. **International Journal of Applied Glass Science**, v. 5, n. 3, p. 313–327, 2014.
59. MEDICI, T.; LIMA, A.; MATOS, A. P.; VILARIGUES, M. **O papel dos materiais geológicos no estudo de proveniência de vidros**. *In*: DINIS, P.A.; GOMES, A.; MONTEIRO RODRIGUES, S. (Eds). Proveniência de materiais geológicos: abordagens sobre o Quaternário de Portugal. Coimbra: Associação Portuguesa para o Estudo do Quaternário, 2014. P. 243-267.
60. MELLO, Roberta Monteiro. **Utilização do resíduo proveniente do acabamento e manufatura de mármore e granitos como matéria-prima em cerâmica vermelha**. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear - Aplicações Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2006.
61. MENEZES, R. R. et al. Análise da co-utilização do resíduo do beneficiamento do caulim e serragem de granito para produção de blocos e telhas cerâmicos. **Cerâmica**, v. 53, n. 326, p. 192-199, 2007.

62. MONTANI, C. **XXVIII Rapporto Marmo e Pietre nel Mondo**. 2017.
63. MOREIRA, J. M. S.; FREIRE, M. N.; HOLANDA, J. N. F. Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. **Cerâmica**, v. 49, p. 262-267, 2003.
64. MOREIRA, J. M. S.; MANHAES, J. P. V. T.; HOLANDA, J. N. F. Processing of red ceramic using ornamental rock powder waste. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 196, p. 88-93, 2008.
65. Morse, D.L. Evenson, J.W. Welcome to the Glass Age. **International Journal of Applied Glass Science**, v. 7, n.4, p. 409–412, 2016.
66. MOTHÉ FILHO, H. F.; POLIVANOV, H.; MOTHÉ, C. G. Reciclagem dos Resíduos Sólidos de Rochas Ornamentais. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 28, n. 2, p.139-151, 2005.
67. MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. *Sitientibus - Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana*, n.26, p.49-61, 2002.
68. MOURA, W. A.; LEITE, M. B. Estudo da viabilidade da produção de blocos com utilização de resíduo de serragem de rochas ornamentais para alvenaria de vedação. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 64, n. 2, p. 147-154, 2011.
69. OLIVEIRA, T. **Caracterização do resíduo de serragem de rochas ornamentais para aplicações geotécnicas**. 2015. 146f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
70. PAUL, A. **Chemistry of Glasses**. 2. ed. New York: Chapman and Hall, 1990.
71. PEITER, C.C.; CHIODI FILHO, C. Rochas ornamentais no século XXI: bases para uma política de desenvolvimento sustentado das exportações brasileiras. Rio de Janeiro: CETEM/ABIROCHAS, 2001, 160p.
72. RANA, A., KALLA, P., VERMA, H. K., MOHNOT, J. K. Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review. **Journal Of Cleaner Production**, v.135, p.312-331, 2016.
73. RAYMUNDO, V. et al. Resíduos de serragem de mármore como corretivo da acidez de solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.47–53, 2013.

74. REIS, A. S.; DELLA-SAGRILLO, V. P.; VALENZUELA-DIAZ, F. R. Analysis of Dimension Stone Waste Addition to the Clayey Mass Used in Roof Tile Production. **Materials Research**, v. 18, p. 63-69, 2015.
75. RIELLA, H. G., FRANJNDLICH, E. U. C., DURAZZO, M. Caracterização e utilização de fundentes em massas cerâmicas. **Cerâmica Industrial**, v. 7, n. 3, p. 33-36, 2002
76. RODRIGUES, G. F. **Reciclagem de resíduos visando à produção de lâ mineral**. 2009. 98f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.
77. SAMPAIO, J. A. **Preparação e caracterização de vidros aluminato de cálcio com baixa concentração de sílica dopados com Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Er<sub>2</sub>O<sub>3</sub>**. 2001. Tese (Doutorado em Física Aplicada) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.
78. SANTOS, B. et al. **Vidro sodo-cálcico: uma proposta de disponibilização sustentável de resíduos de perfuração de poços de petróleo**. *In: IX Simpósio de rochas ornamentais do Nordeste*, João Pessoa, PB, 2016.
79. SANTOS, M. M. A.; DESTEFANI, A. Z.; HOLANDA, J.N.F. Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. **Matéria (Rio J.)**, v. 18, n. 4, p. 1442-1450, 2013.
80. SCHEMA, M. et al. Quantitative Monitoring of Gene Expression Patterns with a Complementary DNA Microarray. **Science**, v. 270, p. 467, 1995.
81. SHELBY, J. E. **Introduction to Glass Science and Technology**, 2nd Edition - Paperback, Royal Society of Chemistry, 2005.
82. SILVA, F. L; FREITAS, A. E. R; MADEIRA, V. S.; RODRIGUES, G. Purificação do pó de quartzo através da técnica de lixiviação ácida. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. 2016
83. SILVA, J. B.; HOTZA, D.; SEGADÃES, A. M.; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 320, p. 325-330, 2005.
84. SILVA, K. R.; CAMPOS, L. F. A.; SANTANA, L. N. L. Use of Experimental Design to Evaluate the Effect of the Incorporation of Quartzite Residues in Ceramic Mass for Porcelain Tile Production. **Materials Research**, São Carlos, v.22, n.1, p.1-11, 2019.

85. SILVA, S. C. **Caracterização do resíduo de serragem de blocos de granito. Estudo do potencial de aplicação na fabricação de argamassas de assentamento e de tijolos de solo-cimento.** 1998. 170 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1998.
86. SINDIROCHAS. Sindicato da Indústria de Rochas Ornamentais, Cal e Calcários do Espírito Santo. **Vitória Stone Fair marca retomada do crescimento do setor de rochas.** 2013. On-line. Disponível em: <[http://www.sindirochas.com.br/noticia\\_det.php?noticia=698](http://www.sindirochas.com.br/noticia_det.php?noticia=698)>. Acesso em: 17 mai. 2017.
87. SINGH, S.; NAGAR, R.; AGRAWAL, V.; RANA, A.; TIWARI, A. Sustainable utilization of granite cutting waste in high strength concrete. **Journal of Cleaner Production**, v. 116, p. 223-235, 2016a.
88. SINGH, S.; KHAN, S.; KHANDELWAL, R.; CHUGH, A.; NAGAR, R. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 119, p. 86-98, 2016b.
89. SOUZA, A. J., PINHEIRO, B. C. A.; HOLANDA, J. N. F. Influência da incorporação de resíduo de rocha ornamental sobre as propriedades e microestrutura sinterizada de piso cerâmico. **Revista Matéria**, v. 18, n. 1, p. 19-28, 2013.
90. SOUZA, L. G. M. et al. Composite utilizing residues of marble and granite for building popular homes. **Journal of Building Engineering**, v. 9, p. 192-197, 2017.
91. SOUZA, M. M. et al. Caracterização química e mineralógica de resíduos de quartzitos para utilização em revestimento cerâmico. *In: Fórum Internacional de Resíduos Sólidos-Anais.* 2013.
92. SPENCE, W. P.; KULTERMANN, E. **Construction materials, methods, and techniques.** Building for a sustainable future. 3rd Ed. New York, 2011.
93. TOFFOLI, S. **Estrutura e formação dos vidros.** Fundamentos de Ciência e Engenharia de Materiais, Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2014.
94. VARSHNEYA, Arun K.; MAURO, John C. Comment on misconceived ASTM definition of glass by AC Wright. **European Journal of Glass Science and Technology. Part A, Glass technology**, v. 51, n. 1, p. 28-30, 2010.

95. VELLINI, M.; SAVIOLI, M. Energy and environmental analysis of glass container production and recycling. **Energy**, v. 34, p. 2137-2143, 2009.
96. VERÍSSIMO, C.; ALVES, O. L. Microstructural modifications in macroporous oxides prepared via latex templating: synthesis and thermal stability of porous microstructure. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 89, n. 7, p. 2226-2231, 2006.
97. ZANOTTO, E. D.; MAURO, J. C. The glassy state of matter: Its definition and ultimate fate. **Journal of Non-Crystalline Solids**, v.471, p. 490–495, 2017.