

LAMA DE BENEFICIAMENTO DE ROCHAS ORNAMENTAIS PROCESSADAS NO ESPÍRITO SANTO: COMPOSIÇÃO E APROVEITAMENTO

*DIMENSION STONE PROCESSING SLUDGE FROM THE STATE OF ESPÍRITO SANTO:
COMPOSITION AND UTILIZATION*

Mirna Aparecida NEVES¹, Ana Candida de Almeida PRADO², Rodson de Abreu
MARQUES¹, Arthur Bazoni da FONSECA¹, Mary Ester Santiago MACHADO¹

¹Universidade Federal do Espírito Santo. Campus de Alegre. Alto Universitário, S/N Guararema, Alegre. ES.
Email: mirnaan@gmail.com; arthurbazoni3@gmail.com; rodsonabreu@gmail.com; mary_geologia@hotmail.com

²Universidade Federal do Cariri. Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639. Bairro Cidade Universitária. Juazeiro do Norte – CE.
E-mail:acaprado@gmail.com

Introdução
Materiais e métodos
Resultados
 Composição e classificação das rochas processadas
 Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO)
 Processo produtivo e geração da LBRO
 Distribuição granulométrica da LBRO
 Composição química da LBRO
 Comparação entre rocha serrada e LBRO
Discussão
Conclusões
Agradecimentos
Referências

RESUMO - A produção de rochas ornamentais para revestimento gera um resíduo de granulação muito fina, a partir do descarte da Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), cuja composição indica potencial de utilização em diversos setores produtivos. Neste trabalho, apresenta-se um estudo da variabilidade composicional da LBRO de diferentes tipos de rocha, com o objetivo de identificar os fatores controladores da composição dos resíduos gerados pela serragem de blocos. Foram coletadas 35 amostras de rocha e da LBRO produzida durante a serragem dessas rochas. As amostras foram coletadas diretamente da descarga do tear em empresas de Cachoeiro de Itapemirim (ES), um dos principais polos produtores do Estado do Espírito Santo. O mapeamento do processo produtivo das empresas permitiu dimensionar a quantidade de resíduos que é gerada por bloco serrado e mostrou a importância do controle de perdas. A comparação entre rochas e LBRO evidenciou íntima semelhança entre a composição química dessas matrizes, com exceção de alguns elementos como ferro e cálcio, que são acrescentados a partir dos insumos de beneficiamento em teares convencionais. As amostras foram agrupadas em cinco conjuntos com potencial de uso em cosméticos, aplicação no solo, fabricação de cerâmica, uso na construção civil ou simplesmente como *filler*.

Palavras-chave: Resíduo. Reciclagem. Gestão ambiental.

ABSTRACT - The production of dimension stones for coating generates a thin-grained residue from the discarding of the Dimension Stone Processing Sludge (DSPS), whose composition indicates potential use in several productive sectors. Here, we describe the compositional variability of the DSPS different types of rocks, aiming to identify the factors that control the composition of the wastes generated by block sawing. Thirty-five samples of rocks were collected, together with the DSPS produced during the cutting of these rocks. The samples were collected directly at the loom discharge point in companies of Cachoeiro de Itapemirim County (ES), which is the main production pole in the State of Espírito Santo. The mapping of the companies' production process allowed to measure the amount of waste generated by each block sawed and showed the relevance of a stricter loss control. The comparison between rocks and DSPS revealed a strong similarity between these matrices, except for some elements such as iron and calcium, which are added as an input in the processing through conventional looms. The samples were grouped into five sets with potential uses in cosmetics, soil applications, ceramics manufacture, building or simply as a filler.

Keywords: Waste. Recycling. Environmental management.

INTRODUÇÃO

O Brasil insere-se mundialmente entre os principais países produtores de rochas ornamentais, sendo o estado do Espírito Santo responsável por mais de 80% da produção brasileira (Brasil, 2019). A grande quantidade de resíduos gerados por esta atividade econômica vem chamando a atenção das empresas, da

administração pública e de cientistas, pelo vislumbre de seu aproveitamento e pela necessidade de uma gestão eficiente.

O beneficiamento de rochas ornamentais envolve, entre outras etapas, a serragem de blocos em chapas (placas) semiacabadas utilizando-se de teares de lâminas de aço

(convencionais) ou de fios diamantados. Nos teares convencionais, utiliza-se uma polpa composta por granalha de aço, cal e água, também conhecida como “lama abrasiva” (Calmon & Silva, 2006) ou Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais - LBRO (Espírito Santo, 2016). Essa polpa é descartada após o desgaste, gerando um resíduo de granulação fina composto por pó de rocha e pelos insumos usados no beneficiamento.

A Instrução Normativa nº 11/2016 do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo – IEMA (Espírito Santo, 2016) determina a forma de armazenamento dos resíduos gerados pelo descarte da LBRO e, atualmente, a grande maioria das empresas vem seguindo suas premissas.

Os depósitos gerados são bastante expressivos e estocam materiais com potencial valor econô-

mico, visto que vários estudos voltados para o seu aproveitamento demonstram que é possível sua utilização como matéria-prima em diversos setores industriais.

Uma das dificuldades de aplicação deste resíduo como matéria-prima nobre se deve à sua heterogeneidade composicional, diretamente relacionada às características intrínsecas das rochas processadas e dos insumos utilizados em seu beneficiamento. Este trabalho tem como objetivo apresentar a caracterização de rochas ornamentais comumente beneficiadas no estado do Espírito Santo e sua relação com os resíduos gerados a partir do descarte da LBRO. As amostras foram coletadas separadamente, de acordo com o tipo de rocha processada, com o objetivo de propor aplicações em diferentes subprodutos de forma mais criteriosa e com maior valor agregado.

MATERIAIS E MÉTODOS

Antes da coleta de amostras, foi feito um acompanhamento do fluxo produtivo das várias empresas visitadas, descrevendo-se o processo de beneficiamento. Também foram anotadas as seguintes variáveis: volume de material processado, em m³ (volume bruto e líquido de blocos e de placas produzidas); porcentagem de perdas de material rochoso (em casqueiro, ou seja, aparas externas de blocos, e em pó) e quantidade, em kg, de insumos utilizados (cal, granalha e lâminas de aço).

Foram coletadas 35 amostras de diferentes tipos de rochas ornamentais (envolvendo granitos, granulitos, migmatitos, pegmatitos, gnaisses e mármore) e da LBRO que circulava no momento

da serrada do bloco amostrado (Tabela 1). Não foram coletadas amostras em teares que serravam dois blocos diferentes ao mesmo tempo, mas apenas de blocos serrados individualmente.

A amostra de mármore foi coletada em tear de fio diamantado e o restante são produtos de teares convencionais. O maior número de tipos de rochas silicáticas decorre da maior variedade deste grupo comparativamente às rochas carbonáticas (mármore). Os mármore, por outro lado, são mais homogêneos, possuem pouca variabilidade composicional e constituem parcela menor da produção capixaba, motivo pelo qual há, nesse estudo, apenas um representante deste grupo no conjunto amostral.

Tabela 1 - Nome comercial das rochas processadas e codificação utilizada nesse trabalho. As siglas são maiúsculas para identificar as rochas e minúsculas para a LBRO coletada no momento da serrada das dessas rochas (S: rochas silicáticas, C: rocha carbonática).

Nome comercial	COD.	Nome comercial	COD.	Nome comercial	COD.
Amarelo Icarai	S-01	Crema Marfim	S-14	Preto Aracruz	S-27
Amarelo Sta Cecilia	S-02	Delicatus	S-15	Preto Indiano	S-28
Amarelo Ornamental	S-03	Dourado Carioca	S-16	Preto São Gabriel	S-29
Amêndoa Jaciguá	S-04	Giallo Fiorito	S-17	Typhoom Bourdeaux	S-30
Branco Dallas	S-06	Giallo Antico	S-18	Verde Pavão	S-31
Blue Fire	S-07	Golden Flower	S-19	Verde Peacock	S-32
Branco Fortaleza	S-08	Golden Ray	S-20	Verde Pérola	S-33
Branco Itaúnas	S-09	Marrom Bahia	S-21	Verde Ubatuba	S-34
Branco Siena	S-10	Nero Marinace	S-23	Vermelho Brasília	S-35
Cinza Castelo	S-11	Ocre Itabira	S-24	Versace	S-36
Cinza Corumbá	S-12	Ouro Brasil	S-25	Mármore Aquarela	C-01
Crema Bordeaux	S-13	Preto Absoluto	S-26		

As amostras de rocha foram analisadas por meio de microscópio petrográfico de luz polarizada para descrição e classificação mineralógica e litológica. A classificação das rochas ígneas (que é o tipo predominantemente usado e referido generalizadamente como “granitos” pelo setor de rochas ornamentais) foi feita segundo a *International Union of Geological Sciences* (IUGS), por meio do diagrama “QAP” para rochas graníticas, que considera a quantidade relativa dos minerais essenciais: quartzo, feldspato potássico e plagioclásios (Streckeisen, 1974).

Também foi anotada a existência de minerais secundários, que ocorrem em pequena quantidade na rocha (como biotita, granada, piroxênio etc.). A classificação de rochas metamórficas, como mármore e gnaisses, seguiu a classificação de Fettes & Desmons (2007).

A LBRO foi coletada diretamente no tear, de forma que ficasse garantida a amostragem do material de serragem de um único bloco de rocha. A coleta foi feita na mangueira que leva a lama para

a caneleira de recirculação, após a recuperação parcial da granalha. Em algumas empresas que não realizam recuperação da granalha e no caso do mármore serrado em tear com lâminas diamantadas, a lama foi coletada logo após a saída da mangueira do tear, também garantindo a amostragem de um único tipo litológico.

A coleta foi feita do meio para o final da serrada de um bloco, para que não houvesse interferência de material rochoso da serrada anterior. As amostras foram secas ao ar e desaglomeradas em moinho tipo cruzeta. A distribuição granulométrica foi medida a úmido em peneiras com abertura de 45, 63, 125 e 250 micrômetros (ou 325, 230, 115 e 60 mesh, respectivamente).

Uma alíquota de cada amostra de rocha moída em moinho tipo panela, bem como amostras da LBRO foram preparadas e enviadas para análise da composição química por fluorescência de raios X (FRX), no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Petrologia e Metalogenia do IGCE / UNESP.

RESULTADOS

Composição e Classificação das Rochas Processadas

As rochas silicáticas são ricas em silício, que compõe em média, cerca de 69% do material rochoso (Tabela 2). O Si^{+4} juntamente com o O^{2-} , constituem o quartzo (dióxido de silício, SiO_2), além do Si^{+4} estar presente nos feldspatos [amplo grupo de aluminossilicatos de composição variável: $(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca})(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_8$] e em minerais acessórios, como as micas e outros.

O alumínio perfaz em média cerca de 15% das rochas e está presente principalmente nos feldspatos alumino-potássicos (KAlSi_3O_8), como a microclina e o ortoclásio. Em seguida, vêm o potássio, sódio e ferro, em teores que variam, em média, entre 3 e 5%. O cálcio e o magnésio ocorrem em menor quantidade, entre 1 e 2%. E, por último, vêm o titânio, fósforo e manganês, com médias menores que 1%.

Nas rochas silicáticas, o K e o Na, assim como o Ca e o Mg, constituem minerais do grupo dos feldspatos (como citado acima) e os plagioclásios $[(\text{Na}, \text{Ca})\text{Al}(\text{Si}, \text{Al})\text{Si}_2\text{O}_8]$. O Fe costuma estar presente em minerais como a biotita $[\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{F}, \text{OH})_2]$ e o piroxênio $[\text{XY}(\text{Si}, \text{Al})_2\text{O}_6]$ (onde X e Y representam associações entre Mg, Fe, Ca e Na), que ocorrem geralmente como acessórios comuns em rochas ricas em plagioclásio. A rocha carbonática estu-

dada é composta basicamente por cálcio e magnésio (Tabela 2), apresentando, ao contrário das silicáticas, alta perda ao fogo (ou *loss on ignition* - LOI).

A nomenclatura comercial das rochas ornamentais não corresponde ao sistema de classificação geológica das rochas. No setor de ornamentais, geralmente separa-se os materiais em dois grandes grupos principais os “granitos” e os “mármore”, além de outros que não são estudados aqui. As rochas referidas como “granitos” englobam uma ampla gama de litotipos de composição silicática. Dentre essas, existem rochas as rochas ígneas e as metamórficas. Assim, algumas rochas de composição silicática que são chamadas de “granitos” pelo setor de ornamentais, na verdade são gnaisses e migmatitos, ou seja, são rochas metamórficas cuja característica principal é a presença de uma foliação e bandamento (bandas ou camadas de composição – e cor – diferente).

A tabela 3 relaciona os nomes comerciais e científicos das rochas estudadas, junto com a descrição mineralógica, onde constam os minerais essenciais, acessórios e de alteração. A nomenclatura das rochas metamórficas, como os gnaisses e os mármore, leva em consideração a intensidade da foliação e/ou a presença de minerais metamórficos que ocorrem em baixa concentração. Tais características não interferem na composição prin-

principal dos materiais estudados, portanto, não será apresentada a classificação geológica dessas rochas, apenas sua tipologia e composição mineralógica essencial (Tabela 3). Já as rochas de origem ígnea foram plotadas no diagrama QAP (Streckeisen, 1974), que relaciona os teores de quartzo, feldspato alcalino e plagioclásio (Figura 1).

As rochas referidas comercialmente como

“granitos cinza” são monzogranitos, sienogranitos e álcali granitos, além de alguns quartzo-sienitos. As rochas com tendência de cor amarela ou vermelha são sienogranitos, monzogranitos e alguns são granodioritos, sendo que este último não é um granito *strictu sensu*. As rochas com tonalidades verdes são monzogranitos, quartzo-monzodioritos e quartzo-dioritos.

Tabela 2 - Composição química das rochas silicáticas (S) e de uma carbonática (C) estudadas nesse trabalho (valores em %).

COD.	MATRIZ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI*
S-01	rocha	74,30	14,30	5,83	3,22	1,78	0,70	0,13	0,13	0,17	0,03	0,25
S-02	rocha	75,00	13,00	4,42	2,83	2,47	0,98	0,33	0,28	0,19	0,02	0,29
S-03	rocha	74,70	13,60	5,20	2,75	2,53	0,97	0,30	0,25	0,14	0,05	0,32
S-04	rocha	70,80	14,70	6,79	2,91	2,49	1,40	0,49	0,47	0,17	0,02	0,40
S-06	rocha	72,70	15,00	6,97	3,20	1,41	0,67	0,12	0,12	0,17	0,01	0,21
S-07	rocha	66,40	16,00	2,50	2,31	6,95	1,33	2,78	1,08	0,13	0,10	0,90
S-09	rocha	75,30	13,60	3,93	3,51	0,86	1,84	0,00	0,03	0,06	0,00	0,40
S-10	rocha	74,10	14,20	4,38	3,56	1,60	1,57	0,19	0,09	0,04	0,03	0,15
S-11	rocha	66,90	15,60	5,62	3,86	3,83	2,01	0,83	0,82	0,22	0,02	0,57
S-12	rocha	67,40	14,50	5,56	3,28	4,40	2,26	0,80	0,79	0,28	0,05	0,32
S-13	rocha	76,40	11,80	7,31	2,24	0,86	0,26	0,00	0,04	0,02	0,00	0,29
S-14	rocha	72,90	14,00	6,07	2,93	2,19	0,88	0,25	0,18	0,13	0,05	0,33
S-15	rocha	72,00	14,70	5,43	4,15	1,54	0,64	0,22	0,13	0,12	0,12	0,52
S-16	rocha	71,60	14,10	5,39	3,63	2,69	1,07	0,37	0,39	0,16	0,02	0,30
S-17	rocha	75,10	12,80	5,66	2,86	2,33	0,97	0,16	0,21	0,10	0,02	0,29
S-18	rocha	72,70	13,90	5,58	3,54	2,14	1,04	0,23	0,24	0,09	0,02	0,71
S-20	rocha	76,20	13,50	3,51	5,25	0,49	0,93	0,00	0,03	0,03	0,01	0,54
S-21	rocha	56,90	17,60	4,37	6,45	7,29	3,63	1,53	1,43	0,77	0,20	0,26
S-23	rocha	78,30	8,42	1,90	2,23	2,94	2,11	1,01	0,42	0,12	0,07	2,10
S-24	rocha	60,20	18,60	6,11	4,94	4,53	3,17	1,06	0,98	0,32	0,09	0,29
S-25	rocha	76,40	13,00	5,64	2,76	1,61	0,79	0,17	0,15	0,13	0,02	0,26
S-26	rocha	63,80	15,90	3,66	3,00	5,20	2,12	2,61	0,66	0,18	0,06	1,54
S-27	rocha	52,50	16,80	2,04	3,59	9,59	7,28	3,71	2,15	1,17	0,13	0,67
S-28	rocha	60,70	17,70	3,85	3,11	7,46	1,85	3,65	1,03	0,12	0,09	1,28
S-29	rocha	51,30	15,80	1,70	3,10	10,90	7,04	5,53	2,97	1,35	0,13	0,24
S-30	rocha	74,60	14,80	3,54	6,02	0,62	0,41	0,00	0,02	0,19	0,01	0,22
S-31	rocha	63,90	16,20	5,97	3,48	6,13	2,47	0,51	0,66	0,32	0,07	0,12
S-32	rocha	64,80	15,40	4,84	3,62	6,04	3,04	0,32	0,64	0,28	0,08	0,27
S-33	rocha	62,50	15,50	4,72	3,86	7,41	3,04	1,12	1,12	0,51	0,10	0,00
S-34	rocha	62,70	16,50	5,93	3,66	6,81	2,74	0,52	0,71	0,28	0,11	0,02
S-35	rocha	76,50	12,00	4,73	3,81	1,85	0,65	0,00	0,16	0,04	0,02	0,33
S-36	rocha	72,50	15,40	5,75	4,35	0,69	0,82	0,00	0,06	0,05	0,00	0,48
	média	69,13	14,65	4,84	3,56	3,74	1,90	0,90	0,58	0,25	0,05	0,46
	desv. pad.	7,30	1,96	1,44	0,98	2,81	1,65	1,33	0,66	0,30	0,05	0,44
	mín.	51,30	8,42	1,70	2,23	0,49	0,26	0,00	0,02	0,02	0,00	0,00
	máx.	78,30	18,60	7,31	6,45	10,90	7,28	5,53	2,97	1,35	0,20	2,10
C-01	rocha	0,00	0,00	0,01	0,00	0,07	33,70	18,80	0,01	0,07	0,00	46,12

*LOI = *loss on ignition* ou perda ao fogo.

Embora haja uma tendência de rochas de coloração cinza-claro serem mais ricas em feldspatos alcalinos e as de coloração verde

escura serem mais ricas em plagioclásio, rochas de várias cores projetam-se no mesmo campo classificatório.

Existe, de fato, uma tendência de as rochas magmáticas escuras possuírem menor conteúdo de quartzo e feldspatos alcalinos do que as claras, mas a cor da rocha não reflete necessariamente esse conteúdo. Esses minerais estão presentes em

ampla gama de tipos litológicos e a ocorrência de certos componentes (como minerais acessórios, elementos-traço ou produtos de intemperismo) pode conferir coloração diferente aos materiais rochosos.

Tabela 3 – Tipologia, nomenclatura e mineralogia por análise microscópica das rochas ornamentais descritas nesse trabalho.

TIPO	COR	NUM.	NOME COMERCIAL	NOME CIENTÍFICO	MINERALOGIA (essenciais, acessórios e secundários)	
ÍGNEAS	Amarelos	S-01	Amarelo Icarai	Sienogranito (diatexito)	Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio, Granada, Minerais Opacos, Biotita, Sericita	
		S-04	Amendoa Jaciguá	Sienogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Muscovita, Minerais Opacos, Apatita, Sericita, Zircão	
		S-15	Delicatus	Sienogranito (diatexito)	Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio, Biotita, Anfibólio, Granada, Muscovita	
		S-16	Dourado Carioca	Monzogranito	Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio, Biotita, Muscovita, Sericita, Clorita, Zircão, Apatita, Minerais Opacos	
		S-17	Giallo Fiorito	Sienogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Minerais Opacos, Zircão, Sericita	
		S-20	Goden Ray	Monzogranito (diatexito)	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Sericita, Biotita, Muscovita, Carbonato	
	Branco e Cinzas	S-30	Typhoom Bourdeaux	Granodiorito (diatexito)	K-feldspato, Plagioclásio, Quartzo, Muscovita, Sericita, Biotita	
		S-06	Branco Dallas	Álcali Granito (diatexito)	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Granada, Minerais Opacos e Zircão	
		S-08	Branco Fortaleza	Sienogranito	Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio, Biotita, Zircão, Muscovita, Esfeno/Titanita, Apatita, Epidoto, Anfibólio, Clorita	
		S-09	Branco Itaúnas	Monzogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato Carbonato, Muscovita, Zircão, Granada	
		S-10	Branco Siena	Quartzo Sienito (diatexito)	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Granada, Minerais Opacos, Zircão, Biotita	
		S-11	Cinza Castelo	Álcali Granito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Muscovita, Minerais Opacos, Apatita, Titanita, Zircão, Clorita, Sericita	
		S-12	Cinza Corumbá	Monzogranito	Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio, Biotita, Carbonato, Muscovita, Titanita, Zircão, Minerais Opacos, Apatita, Epidoto	
		S-14	Crema Marfim	Sienogranito (diatexito)	Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio, Biotita, Granada, Apatita, Silimanita, Minerais opacos, Zircão	
		S-24	Ocre Itabira	Monzogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Homblenda, Titanita/esfeno, Apatita, Zircão, Opacos, Zoisita	
		Pretos e Verdes	S-27	Preto Aracruz	Quartzo Monzodiorito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Apatita, Minerais opacos, Ortopiroxênio, Clinopiroxênio
	S-28		Preto Indiano	Quartzo Sienito (migmatito)	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Sericita, Muscovita, Granada, Zircão, Minerais Opacos, Carbonato	
	S-29		Preto São Gabriel	Quartzo Diorito	Plagioclásio, Quartzo, Clinopiroxênio, Ortopiroxênio, Biotita, Zircão, Minerais Opacos, Apatita	
	S-32		Verde Peacock	Monzogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Apatita, Biotita, Clinopiroxênio, Opacos, Zircão, Clorita, Carbonato, Sericita, Anfibólio, Titanita, Espinélio	
	S-33		Verde Pérola	Monzogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Ortopiroxênio, Apatita, Anfibólio, Biotita, Minerais Opaco, Clinopiroxênio, Zircão	
	S-34		Verde Ubatuba	Quartzo Monzodiorito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Anfibólio, Biotita, Ortopiroxênio, Clinopiroxênio, Apatita, Zircão, Minerais Opacos	
	Outros	S-13	Crema Bourdeaux	Sienogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Minerais Opacos, Zircão, Muscovita	
		S-35	Vermelho Brasília	Granodiorito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Carbonato, Apatita, Zircão	
		S-36	Versace	Monzogranito	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Biotita, Sericita, Muscovita	
	METAMÓRFICAS	Amarelos	S-02	Amarelo Santa Cecília	sill-esp-bt-gt Gnaiss	Quartzo, K-feldspato, Plagioclásio, Granada, Biotita, Zircão, Apatita, Silimanita, Clinozoisita, Espinélio
			S-03	Amarelo Ornamental	sill-bt-gt Gnaiss	Quartzo, Plagioclásio, k-feldspato, Biotita, Silimanita, Granada, Zircão, Apatita, Epidoto, Minerais Opacos
			S-07	Blue Fire	sill-gt-bt Gnaiss	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Granada, Biotita, Minerais Opacos, Zircão, Silimanita
			S-25	Ouro Brasil	spn-sill-gt-bt Gnaiss	Quartzo, Plagioclásio, K-feldspato, Silimanita, Biotita, Zircão, Espinélio, Granada, Minerais Opacos
		C-01	Mármore Aquarela	Mármore	Calcita, dolomita, flogopita, quartzo, tremolita, anortita	

Lama do Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO)

Processo produtivo e geração da LBRO

As rochas ornamentais são extraídas das pedreiras sob a forma de blocos e transportadas para a indústria ou empresas de beneficiamento. Na indústria, os blocos são lavados e seguem para serragem nos teares (Figura 2a), processo também conhecido como desdobramento. Os teares são constituídos por quatro colunas que sustentam um quadro, onde são dispostas lâminas de aço carbono que se movimentam sobre o bloco de rocha, serrando-o em placas (Figura 2b). Embora os teares convencionais ainda sejam os mais comuns no Brasil, existem também os teares de fios diamantados ou teares multifios. Nesse trabalho, serão apresentados dados de rochas silicáticas processadas em teares com

lâminas de aço e de uma rocha carbonática serrada em tear multifios.

Nos teares convencionais, a Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), constituída por uma polpa formada por pó da rocha cortada, água, cal e granalha de aço é aspergida sobre o bloco continuamente. Conforme a rocha é serrada, parte dela é cominuída, transformando-se em pó, que fica agregado à LBRO. Essa polpa de serragem é recirculada no tear até que o desgaste da granalha diminua seu poder abrasivo. Parte da granalha é, às vezes, recuperada para reciclagem e, posteriormente, a lama é descartada, compondo o resíduo da LBRO. Nos teares multifios, não é necessário o uso da LBRO, então o resíduo de serragem é composto essencialmente por pó de rocha e água.

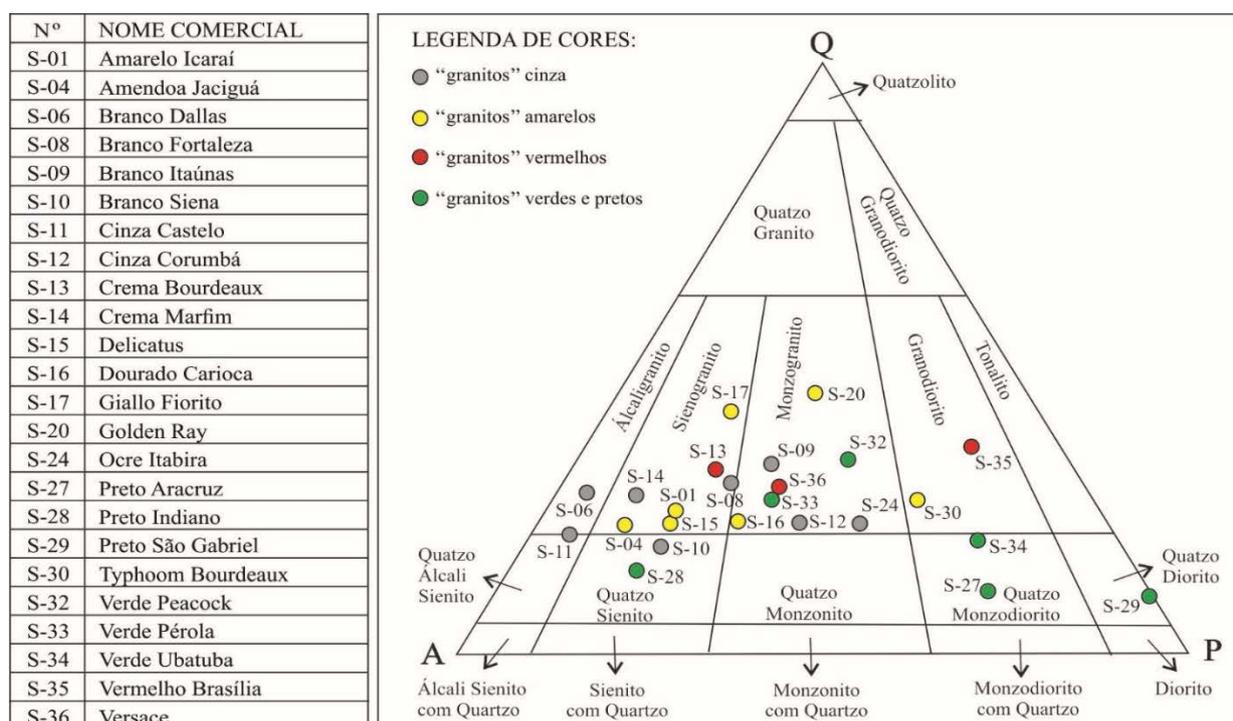


Figura 1 - Classificação geológica das rochas ornamentais de origem ígnea estudadas neste trabalho. O diagrama "QAP" indica percentagens relativas de Q: quartzo (SiO_2), A: feldspato potássico (KAlSi_3O_8) e P: plagioclásios ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$). Diagrama de Streckeisen (1974) para classificação de rochas graníticas.

Depois da serragem dos blocos, as placas brutas são levadas para as politrizes (Figura 2c). Materiais abrasivos e água são usados no polimento.

Além disso, resinas são aplicadas em rochas com microfissuras, ocasionalmente, soluções ácidas são usadas para limpeza e corantes são aplicados para realçar ou conferir uma cor específica à chapa. Após o polimento, as chapas são recortadas para obter a forma e as dimensões desejadas no emprego final. O resíduo dessas duas etapas formado por água, materiais

abrasivos, pó de rocha e, eventualmente, resina, corante e soluções ácidas é levado para tanque de decantação (Figura 2d), onde a água recuperada é reintroduzida no processo e a pasta semissólida é misturada aos resíduos da etapa de serragem.

Antes do transporte até os aterros, é utilizado o filtro-prensa (Figura 2e) ou o leito de secagem para redução da umidade (Figura 2f). A água recuperada no filtro-prensa e, por vezes, do leito de secagem, também é recirculada no sistema industrial. Nesta etapa do processo, os resíduos provenientes dos diferentes tipos de rochas

processadas já se encontram misturados entre si e com os diversos tipos de insumos utilizados.

A tabela 4 sintetiza dados sobre a produção de chapas, com as perdas sob a forma de casqueiro e pó, o tempo de serrada e os insumos utilizados por metro cúbico de rocha processada. O volume médio dos blocos brutos estudados neste trabalho é de 12,8 m³, com valores que variam de 8,5 a

24,8 m³. O volume líquido do bloco é igual ao seu volume bruto subtraído do volume do casqueiro. De cada bloco, 8,8 % são perdidos como casqueiro; a perda mínima observada foi de 6,0 % e maior perda foi de 17,1 %. O volume de pó de rocha gerado no corte dos blocos é igual ao volume líquido do bloco menos o volume total das placas produzidas.



Figura 2 - Nos teares convencionais. **a)** lâminas de aço são utilizadas para serrar o bloco em chapas, **b)** as chapas são polidas, **c)** e os efluentes são drenados para tanques de decantação, **d)** depois de misturados com a lama da serragem, os resíduos são conduzidos para o filtro-prensa, **e)** ou para leitos de secagem, **f)**, antes de serem direcionados aos aterros.

Observa-se uma perda média de 34,52%, com o mínimo de 18,95% e o máximo chegando a 51,58% do bloco. Considerando-se a densidade média de 2.600 kg/m³ para as rochas de composi-

ção silicática, são gerados cerca de 5.300 a 16.200 kg de pó de rocha a cada bloco serrado. Tal quantidade chama atenção para a importância do estudo dos fatores que podem influenciar nas perdas,

para que sejam minimizadas.

Distribuição Granulométrica da LBRO

A lama de beneficiamento de rochas ornamentais possui grãos de tamanho predominantemente fino, conforme figura 3, onde é apresen-

tado o percentual médio de cada classe granulométrica das amostras de LBRO coletadas. Aproximadamente 78% das partículas são menores do que 45 μm e apenas 0,8% maiores do que 250 μm .

Tabela 4 - Dados sobre a produção de rochas ornamentais em tear convencional (BB: volume bruto do bloco; BL: volume líquido do bloco; PP: volume de placas produzidas; CA: perda em casqueiro; PO: perda em pó; TT: perda total; GR: consumo de granalha; CL: consumo de cal; LA: consumo de lâmina).

	Volume (m^3)			Perda (%)			Tempo (dias) de serrada	Insumos (kg)		
	BB	BL	PP	CA	PO	TT		GR	CL	LA
Média	12,8	11,7	7,7	8,8	34,5	43,3	3,5	5,7	3,9	2,5
mediana	12,6	11,1	7,3	6,9	36,0	44,3	3,2	5,7	3,5	2,4
desvio padrão	2,7	2,6	2,2	3,2	6,8	8,0	1,1	2,1	1,6	1,0
valor mínimo	8,5	7,7	4,8	6,0	18,9	25,2	2,1	0,4	1,6	0,6
valor máximo	24,8	22,9	16,7	17,1	51,6	63,1	6,5	9,2	7,8	5,3

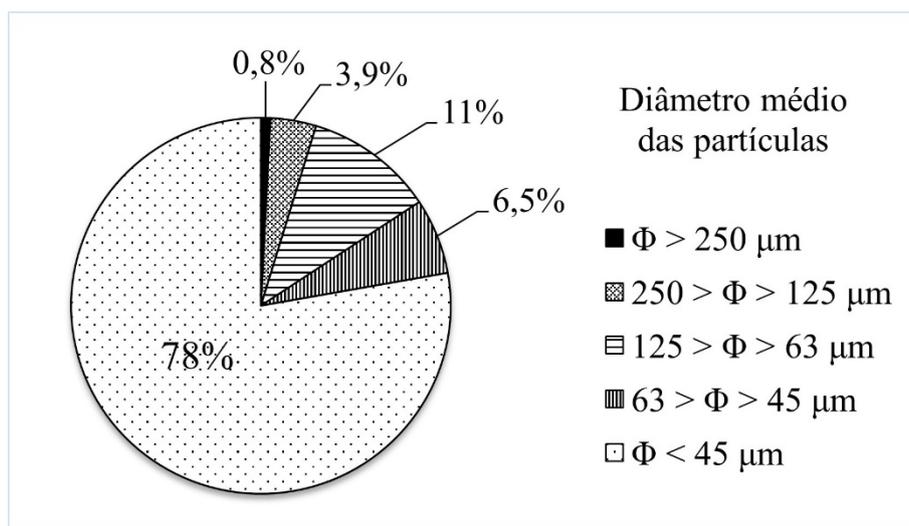


Figura 3 - Distribuição dos tamanhos das partículas que compõem a Lama de Beneficiamento de Rochas Ornamentais (LBRO), mostrando que 78% tem diâmetro menor do que 45 μm .

Composição química da LBRO

A LBRO recuperada a partir do processamento de rochas silicáticas possui teor médio de silício em torno dos 60%, enquanto o alumínio ocorre com média em torno dos 12% (Tabela 5). O potássio e o cálcio variam em torno dos 4%, embora com valores muito variáveis (podendo chegar a 5 e 10%, respectivamente). Diferente dos materiais carbonáticos, algumas amostras silicáticas apresentam alto cálcio com baixa perda ao fogo, indicando que a fonte de cálcio nessas rochas está na cal, usada como insumo de serragem e, também, no plagioclásio cálcico. O magnésio pode advir de alguns minerais da rocha (como biotita e piroxênio), mas o uso de pó de mármore em lugar da cal também pode causar enriquecimento desse elemento na lama.

Os percentuais de ferro, com média de quase 11%, são os que apresentam maior variabilidade (podendo chegar a cerca de 20%). A

quantidade de granalha inserida durante a serragem do bloco influencia diretamente neste valor, sendo que alguma parcela desse elemento possa ser fornecida também pela biotita e piroxênio presentes em alguns litotipos. A perda ao fogo ou *loss on ignition* (LOI) é baixa nas amostras de composição silicática, enquanto na amostra carbonática, proveniente da serragem de um mármore, há altos valores de LOI (cerca de 40%), assim como cálcio e magnésio.

Comparação entre Rocha Serrada e LBRO

A comparação entre a composição química das rochas e da LBRO circulada durante seu processamento (Figura 4) mostra que existe alta correlação entre essas matrizes. Na figura 4a, estão todos os elementos medidos na análise química (conforme Tabelas 2 e 5), onde o silício se destaca pela alta porcentagem e o ferro e cálcio não se encaixam tão bem à reta como os demais.

Tabela 5 – Composição química da LBRO coletada durante a serrada de rochas silicáticas (s) e de uma carbonática (c) (valores em %).

COD.	MATRIZ	SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	MnO	LOI*
s-01	LBRO	66,28	10,61	4,57	2,28	12,76	2,51	0,18	0,14	0,14	0,13	0,40
s-02	LBRO	68,54	12,25	4,95	2,22	6,76	3,71	0,50	0,34	0,21	0,07	0,48
s-03	LBRO	68,84	11,11	5,27	2,20	8,34	2,87	0,30	0,23	0,11	0,08	0,66
s-04	LBRO	66,71	12,67	5,90	2,41	6,74	3,22	0,47	0,43	0,15	0,07	1,21
s-06	LBRO	70,39	10,90	5,17	2,11	9,27	1,31	0,17	0,16	0,13	0,08	0,32
s-07	LBRO	65,66	13,10	3,30	1,92	10,15	2,13	2,32	0,88	0,17	0,15	0,23
s-09	LBRO	67,55	12,39	4,65	2,69	8,40	3,63	0,15	0,13	0,09	0,09	0,21
s-10	LBRO	70,61	12,62	4,41	2,89	6,13	2,57	0,23	0,10	0,05	0,08	0,33
s-11	LBRO	61,11	13,05	5,11	3,05	11,82	3,82	0,72	0,71	0,18	0,11	0,32
s-12	LBRO	61,65	12,53	5,21	2,56	12,44	3,67	0,71	0,68	0,25	0,13	0,16
s-13	LBRO	70,19	11,87	4,01	3,34	6,66	2,97	0,05	0,05	0,01	0,06	0,81
s-14	LBRO	70,07	11,61	5,43	2,16	7,51	2,40	0,28	0,21	0,11	0,10	0,11
s-15	LBRO	64,61	11,44	3,79	3,38	14,00	1,90	0,09	0,06	0,12	0,19	0,40
s-16	LBRO	64,17	12,42	4,91	2,71	10,84	2,94	0,77	0,74	0,29	0,12	0,10
s-17	LBRO	66,81	11,24	5,05	2,18	10,85	3,01	0,22	0,29	0,15	0,11	0,11
s-18	LBRO	62,04	11,12	4,86	2,61	14,05	4,07	0,51	0,22	0,08	0,14	0,29
s-20	LBRO	61,82	10,21	4,80	2,51	8,50	6,54	1,27	0,10	0,05	0,11	4,10
s-21	LBRO	51,16	14,77	3,91	4,95	15,59	5,95	1,19	1,21	0,70	0,25	0,32
s-23	LBRO	56,45	8,28	1,57	2,03	14,32	10,25	0,67	0,32	0,11	0,18	5,82
s-24	LBRO	53,07	15,42	5,26	3,47	10,85	7,93	2,62	0,82	0,34	0,14	0,09
s-25	LBRO	67,41	11,13	5,11	2,13	7,59	4,19	0,29	0,24	0,12	0,09	1,69
s-26	LBRO	60,21	11,70	2,78	2,52	8,31	6,95	1,89	0,59	0,17	0,10	4,80
s-27	LBRO	48,27	14,00	2,26	2,58	13,89	8,64	4,41	3,06	1,81	0,16	0,93
s-28	LBRO	61,86	14,09	3,40	2,01	10,56	3,06	2,39	0,85	0,10	0,15	1,52
s-29	LBRO	46,58	14,03	1,35	2,63	13,86	9,76	5,10	3,61	1,65	0,13	1,31
s-30	LBRO	66,42	11,12	3,48	4,00	11,30	3,24	0,06	0,04	0,19	0,07	0,10
s-31	LBRO	58,17	14,33	5,83	2,67	14,79	2,96	0,32	0,44	0,20	0,15	0,13
s-32	LBRO	57,86	15,02	5,43	2,93	12,29	4,83	0,36	0,60	0,24	0,11	0,33
s-33	LBRO	54,32	12,28	4,59	2,71	21,38	2,71	0,71	0,76	0,32	0,18	0,03
s-34	LBRO	59,12	15,23	5,70	2,99	11,38	3,56	0,48	0,64	0,25	0,14	0,49
s-35	LBRO	64,07	10,40	4,54	2,97	13,74	3,13	0,17	0,20	0,05	0,13	0,60
s-36	LBRO	68,10	12,86	4,19	3,58	7,76	2,48	0,11	0,08	0,08	0,07	0,69
	média	62,50	12,37	4,40	2,73	11,03	4,15	0,93	0,59	0,27	0,12	0,91
	desv. pad.	6,54	1,647	1,16	0,65	3,353	2,29	1,23	0,78	0,4	0,04	1,39
	mín.	46,58	8,28	1,35	1,92	6,13	1,31	0,05	0,04	0,01	0,06	0,03
	máx.	70,61	15,42	5,90	4,95	21,38	10,25	5,10	3,61	1,81	0,25	5,82
c-01	LBRO	1,67	0,65	0,03	0,01	0,51	38,78	15,83	0,02	0,04	0,01	42,46

*LOI = *loss on ignition* ou perda ao fogo.

Na figura 4b, esses elementos foram retirados da plotagem, o silício porque os teores elevados poderiam estar forçando a alta correlação e o ferro e cálcio porque sabidamente são inseridos como insumos (granalha e cal) no processo de serragem em tear convencional. Assim, a correlação se torna direta, ou seja, pode-se afirmar que a composição da LBRO reflete diretamente a composição dos litotipos serrados.

A figura 5 mostra a modificação, em termos

percentuais, da composição química da LBRO em relação à rocha. Comparando-se a LBRO com a rocha serrada, o teor de ferro aumentou em mais de 400%. Também se observa aumento de manganês, titânio e fósforo na LBRO provavelmente porque, junto ao ferro, esses elementos estão presentes no aço da granalha e lâminas de serragem. O cálcio também aumenta na LBRO devido ao uso da cal como insumo de serragem. Por outro lado, silício, alumínio, potássio e sódio

são fornecidos à LBRO pelas rochas processadas, cujos teores nesses elementos são relativamente maiores por não terem a influência dos insumos.

A informação acima mostra a importância da substituição dos teares convencionais pelos teares de fios diamantados (ou multifios), pois nesse

caso, o resíduo gerado será composto essencialmente por rocha moída, em granulação menor do que 0,25 mm (com quase 80% dos grãos menores do que 0,045 mm - ver Figura 3), que pode agregar valor a outros processos produtivos pela economia de matéria-prima e energia.

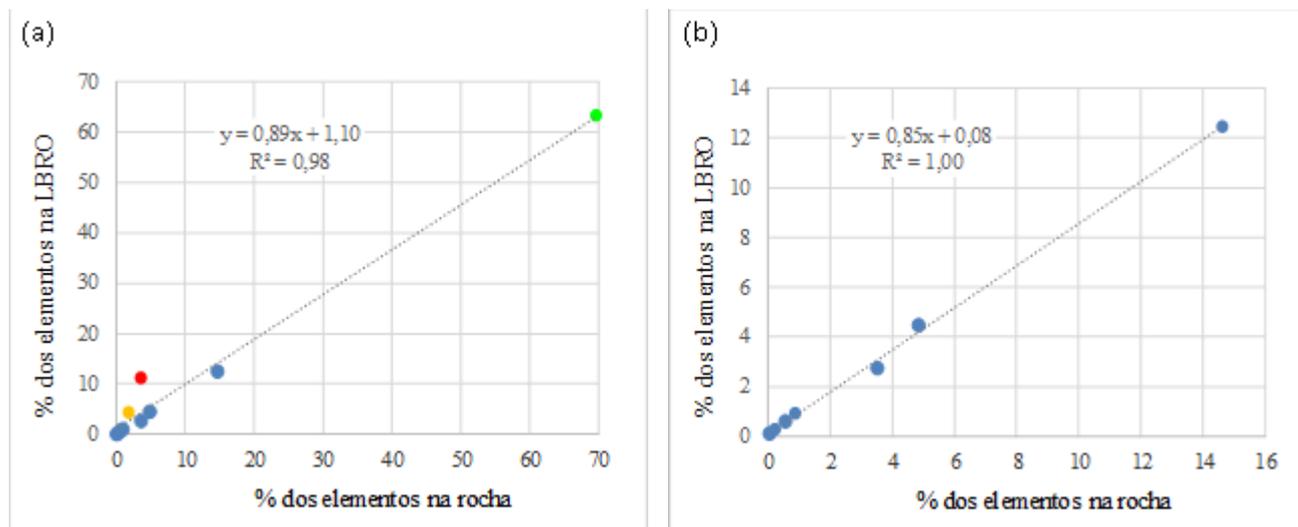


Figura 4 – Correlações entre a composição química das rochas processadas e da LBRO coletada durante a serrada de cada tipo litológico. Em **a)** estão destacados, em cores diferentes, o silício (ponto verde), o ferro (ponto vermelho) e o cálcio (ponto laranja); em **b)** esses elementos foram retirados da plotagem.

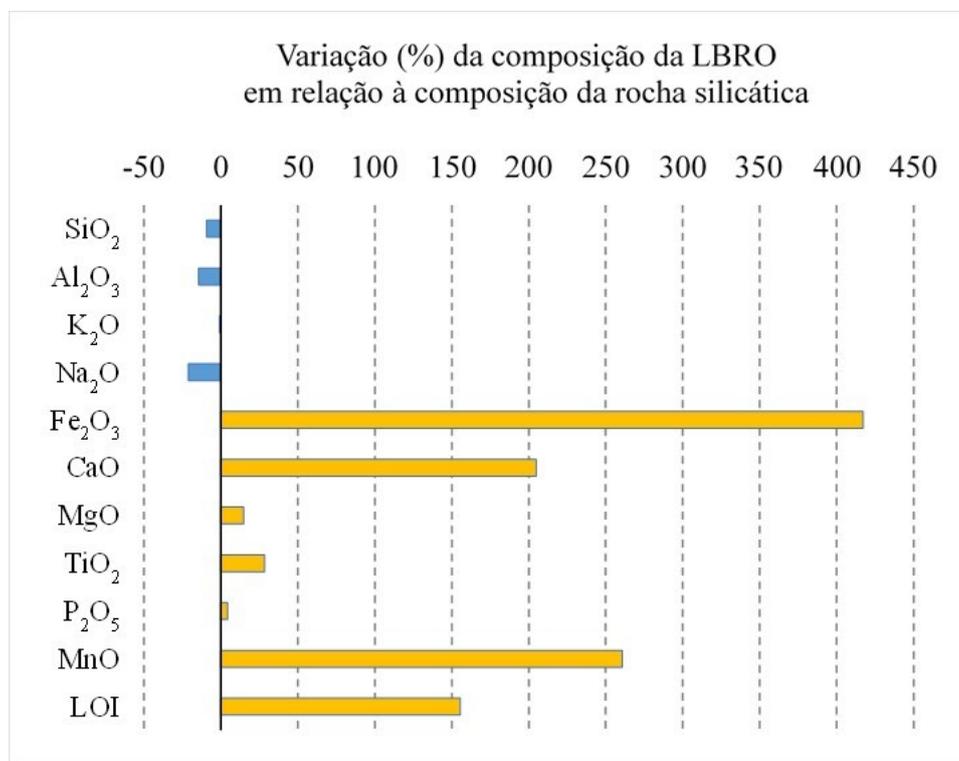


Figura 5 – Variação da composição da LBRO em relação à composição da rocha serrada (em azul, os teores dos elementos na LBRO são menores do que os medidos na rocha e, em laranja, os teores na LBRO são maiores) (valores médios dos elementos, em %, considerando todas as amostras de composição silicática).

DISCUSSÃO

A nomenclatura comercial das rochas ornamentais costuma ressaltar a cor predominante, o que não é adequado já que a cor nem sempre reflete a composição química e mine-

ralógica desses materiais naturais. Dentro de um grupo de mesma cor, há rochas com variados teores de minerais e, também há rochas com composições similares que são de colorações

diferentes. No mesmo sentido, além dos minerais essenciais (quartzo, feldspato e plagioclásio), as rochas são compostas por minerais secundários e acessórios, que podem influenciar em um possível uso dos resíduos gerados. Antes ainda da questão de uso de resíduos, o uso adequado da própria rocha ornamental pode ser otimizado a partir do conhecimento mais aprofundado de sua petrografia. Os fatos acima ressaltam a importância de uma descrição litológica adequada, feita por um profissional especializado, além da regulação da nomenclatura das rochas ornamentais de forma que a classificação geológica seja considerada.

Outro ponto relevante destacado nos dados desse trabalho é a necessidade de um controle de perdas no processo produtivo, visando à diminuição de custos e à minimização da geração de resíduos. Na serragem de blocos em chapas, há perdas consideráveis sob a forma de casqueiro e como pó de rocha que é agregado à LBRO. Nestas perdas, não apenas descarta-se material de valor econômico, mas também são gerados resíduos que envolverão custos de tratamento, transporte e armazenamento, e passarão a compor passivos ambientais do setor industrial.

Além de trabalhar adequadamente a diminuição das perdas, seria adequado acelerar e maximizar a troca dos teares convencionais pelos multifios diamantados, pois além de aumentar a velocidade da serrada, os resíduos gerados passarão a constituir essencialmente rocha moída com grande potencial de aproveitamento. Sabe-se que certos tipos litológicos são mais adequados para serragem em teares convencionais e que às vezes eles são necessários, mas esse processo deveria ser exceção e não regra.

Outro ponto importante a ser considerado para uma reformulação do processo industrial buscando uma produção mais limpa, é a separação dos fluidos que circulam na parte da serragem de blocos e no polimento das chapas. O processo de polimento é responsável pela introdução de diversos produtos potencialmente contaminantes, o que pode dificultar o futuro aproveitamento dos valiosos efluentes da serragem.

Com relação à composição química da LBRO, uma análise da literatura científica indica pontos relevantes que mostram a possibilidade de seu aproveitamento.

Nas rochas silicáticas, existe uma fonte de potássio no mineral microclínio (ou microclina),

que é um elemento com potencial de aplicação em alguns setores produtivos. Algumas rochas que são muito utilizadas como ornamentais (por exemplo, pegmatitos com megacristais de feldspato potássico e do plagioclásio albita), bem como outras rochas silicáticas e alcalinas ricas em feldspatos e feldspatoides, são consideradas matéria-prima da indústria cerâmica (Cabral Jr et al., 2019).

Diversos autores já comprovaram que é possível utilizar resíduos do beneficiamento desses tipos rochosos para fabricação de cerâmica vermelha (Moreira et al., 2008; Sultana et al., 2015; Eliche-Quesada et al., 2012) e alguns afirmam que os produtos são mecanicamente mais resistentes e menos porosos do que os tradicionais (Torres et al., 2009). El-Maghraby et al. (2011) testaram resíduos graníticos em produtos cujas propriedades foram similares à cerâmica de revestimento comercial classificada como BIIa e BIb. Porém, importante destacar que a obtenção de produtos de padrão de qualidade elevado exigiria o uso de resíduos provenientes de teares multifios, para evitar a entrada dos insumos que são utilizados no processo convencional. Dentre eles, está o ferro, que conferirá coloração avermelhada ou escura aos produtos, o que pode ser indesejado.

Outro importante potencial de uso destes resíduos é no setor agrícola, em um processo conhecido como “rochagem”, ou seja, agregação de pó de rocha ao solo para induzir enriquecimento mineral e corrigir acidez (Fyfe et al., 2006; Theodoro & Leonardos, 2006). Apesar de o potássio das rochas ornamentais estar retido na estrutura cristalina de minerais silicáticos, que são de baixa solubilidade, alguns estudos já foram conduzidos na busca de processos que favoreçam a disponibilização do potássio presente em rochas ígneas e metamórficas (Valarelli & Guardani, 1981; Valarelli et al., 1993; Varadachari, 1997). Bertossi et al. (2012) estudaram resíduos de rochas ornamentais ricos em potássio trocável, o que pode ter sido propiciado pela fina granulação, que aumenta a área superficial das partículas, e ataque aos minerais silicáticos pelo pH elevado, característico da polpa de serragem em tear convencional.

Porém, importante salientar que esses resíduos liberam, junto ao potássio, teores consideráveis de sódio e alumínio, que, ao contrário do primeiro, são elementos que podem

ser prejudiciais ao solo. Também com relação aos metais traços, é sempre exigível a dedicação de esforços para averiguar a possibilidade de

liberação destes elementos para o solo e para a planta, ao exemplo do trabalho de Souza et al. (2019).

Tabela 6 – Agrupamento das amostras estudadas em função dos possíveis usos dos resíduos gerados pela serragem de rochas ornamentais.

Grupo	Possível uso	Características	Nome comercial	COD.
I	Filler em diversos produtos, como os da construção civil	Granulação fina, composição similar à de materiais rochosos	Amarelo Icarai	S-01
			Blue Fire	S-07
			Branco Fortaleza	S-08
			Branco Itaúnas	S-09
			Delicatus	S-15
			Dourado Carioca	S-16
			Giallo Antico	S-18
			Golden Flower	S-19
			Preto Indiano	S-28
			Typhoom Bourdeaux	S-30
			Verde Pérola	S-33
			Vermelho Brasília	S-35
			Versace	S-36
II	Indústria cerâmica tradicional, de revestimento, sanitária	Teores mais elevados de potássio + sódio + cálcio (entre 12 e 17%)	Cinza Castelo	S-11
			Golden Ray	S-20
			Marrom Bahia	S-21
			Nero Marinace	S-23
			Ocre Itabira	S-24
			Preto Absoluto	S-26
			Preto Aracruz	S-27
			Preto São Gabriel	S-29
			Verde Peacock	S-32
			Verde Ubatuba	S-34
III	Vidrados	Teores mais elevados de silício (em torno de 70%)	Branco Dallas	S-06
			Branco Siena	S-10
			Crema Boudeaux	S-13
			Crema Marfim	S-14
IV	Agricultura	Teores mais elevados de potássio (entre 5 e 6%) - ver observação -	Amarelo Sta Cecília	S-02
			Amarelo Ornamental	S-03
			Amendoa Jaciguá	S-04
			Branco Dallas	S-06
			Cinza Castelo (*)	S-11
			Cinza Corumbá	S-12
			Crema Marfim	S-14
			Giallo Fiorito	S-17
			Ocre Itabira (*)	S-24
			Ouro Brasil	S-25
			Verde Pavão (*)	S-31
			Verde Peacock (*)	S-32
			Verde Ubatuba (*)	S-34
			V	Cosméticos
Alvura e granulação fina	Mármore Aquarela	C-01		

OBS: as amostras marcadas com (*), além de alto potássio, também possuem alto sódio e alumínio, o que pode inviabilizar o uso em rochagem.

Com relação ao resíduo mármore, o uso em calagem (correção de pH de solos ácidos) já foi amplamente comprovado por vários pesquisadores (Raymundo et al., 2013; Tozsin et al., 2015; Cazotti et al., 2019). Destaca-se ainda que, caso haja o mínimo de controle de qualidade, esses resíduos podem vir a ser utilizados em

produtos mais nobres, adquirindo consequentemente maior valor agregado. Careddu et al. (2014) comprovaram que resíduos do mármore Orosei, da Itália, atendem satisfatoriamente aos requisitos de CaCO₃ para produtos como papel, borracha e pneus. O uso em cosméticos também já foi aventado por Oliveira et al. (2010), que

testaram a adequabilidade dos resíduos de mármore como carga para fabricação de sabonete.

Assim, considerando-se os dados já publicados na literatura e com base nas características das amostras de LBRO estudadas nesse trabalho, foi montada a tabela 6, que apresenta um possível agrupamento de acordo com as possibilidades de uso dos resíduos. A numeração proposta para os grupos foi feita de acordo com o grau de restrição no controle de qualidade que seria exigido para o uso do material. O primeiro (I) é o menos restritivo e o último (V) exigiria maior controle de qualidade composicional. Embora as amostras sejam provenientes de tear convencional, os teores de ferro e cálcio não foram considerados em seu possível uso, pois esses elementos variam muito em função da inserção em maior ou menor

quantidade dos insumos granalha e cal, o que vai depender do controle na produção por parte das empresas.

Desta forma, a interpretação dos dados apresentados deve considerar preferencialmente o processo de serragem em tear multifios, onde a composição dos resíduos pode ser inferida diretamente a partir da composição da própria rocha que está sendo serrada, como foi demonstrado nesse trabalho.

Recomenda-se a realização de pesquisas direcionadas ao uso de resíduos de serragem dos tipos litológicos listados (ou outros semelhantes a esses), com testes específicos para comprovar o atendimento das normativas existentes para cada tipo de produto, observando-se sempre as condicionantes ambientais.

CONCLUSÕES

Este trabalho mostrou que a composição dos resíduos de serragem de rochas ornamentais reflete diretamente a composição das rochas processadas. No caso da serragem em tear convencional, essa relação nem sempre será direta com relação ao ferro, cálcio, magnésio, titânio, fósforo, manganês e LOI, pois esses parâmetros podem ser introduzidos no resíduo pelos insumos utilizados no beneficiamento.

Ainda que possa ser considerado um procedimento complexo, a segregação dos resíduos por tipo litológico poderia agregar valor ao material que atualmente é descartado. Nesse trabalho, propomos o agrupamento de materiais potencialmente adequados para uso na fabricação de cosméticos, uso em solos nos processos de calagem e rochagem, uso para fabricação de cerâmica tradicional, uso na construção civil ou como *filler* em outros produtos. Além da composição, a fina granulação do resíduo gerado

pelo descarte da LBRO é uma característica vantajosa para a utilização destes materiais como matéria-prima, devido à economia da energia que geralmente é necessária para moagem.

É importante utilizar um sistema de classificação geológica para descrição das rochas, pois a nomenclatura baseada na cor ou em aspectos estéticos não pode ser utilizada como critério de segregação de resíduos com vistas à sua utilização em outros processos produtivos nos quais seja requerido algum controle de qualidade.

A maior eficiência do sistema de gestão desses resíduos deverá passar pela separação entre os fluidos e particulados das etapas de serragem e polimento. Esse procedimento facilitará a aceitação dos possíveis subprodutos, bem como a gestão ambiental dos rejeitos, assim considerados os materiais que não poderão ser aproveitados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq (processo 563033/2010-0 e processo 481013/2008-3) e à FAPES (processo 42402794/08), pelo financiamento dos projetos e bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BERTOSSI, A.P.A.; NEVES, M.A.; CARDOSO, M.S.N.; PRADO, A.C.A.; RIBEIRO, C.A.D.; POLIDORO, J.C. Influência do resíduo fino de beneficiamento de rochas ornamentais silicáticas na qualidade do solo e da água. *Geociências*, v. 31, p. 185-195, 2012.
- BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL. *Anuário Estatístico do Setor de Transformação de Não-Metálicos*. MME, Brasília. 85 p. 2019. Disp. em <<http://www.mme.gov.br/web/guest/secretarias/geologia-mineracao-e-transformacao-mineral/publicacoes/>>. Acesso em: 20 abr. 2020.
- CABRAL JR, M.; AZEVEDO, P.B.M.; CUCHIERATOC, G.; MOTTA, J.F.M. Estudo estratégico da cadeia produtiva da indústria cerâmica no Estado de São Paulo: parte I – introdução e a indústria de cerâmica vermelha. *Cerâmica Industrial*, v. 24, n. 1, p. 20-34, 2019.
- CALMON, J.L. & SILVA, S.A.C. Mármore e Granito no Espírito Santo: problemas ambientais e soluções. In: DOMINGUES, A.F.; BOSON, P.H.G.; ALÍPAZ, S. *A Gestão de Recursos Hídricos e a Mineração*. Brasília: Agência Nacional de Águas – ANA, Instituto Brasileiro de Mineração - IBRAM, 2006. p.

- 199-231. Disp. em: <http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/CatalogoPublicacoes_2006.asp>. Acesso em: 12 abr. 2016.
- CAREDDU, N.; MARRAS, G.; SIOTTO, G. Recovery of sawdust resulting from marble processing plants for future uses in high value-added products. **Journal of Cleaner Production**, v. 84, p. 533 – 539, 2014.
- CAZOTTI, M.M.; COSTA, L.M.; CECON, P. R. Biogenic, sedimentary, and metamorphic limestone: a comparative characterization of soil amendments. **Revista Ceres, Viçosa**, v. 66, n.1, p. 63-71, 2019.
- ELICHE-QUESADA, D.; CORPAS-IGLESIAS, F.A.; PÉREZ-VILLAREJO, L.; IGLESIAS-GODINO, FJ. Recycling of sawdust, spent earth from oil filtration, compost and marble residues for brick manufacturing. **Construction and Building Materials**, n. 34, p. 275 – 284, 2012.
- EL-MAGHRABY, H.F.; EL-OMLA, M.M.; BONDIOLI, F.; NAGA, S.M. Granite as flux in stoneware tile manufacturing. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, p. 2057–2063, 2011.
- ESPÍRITO SANTO. SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **Instrução Normativa nº 11 de 11 de outubro de 2016**. Vitória (ES), Diário Oficial dos Poderes do Estado. Disp. em <https://iema.es.gov.br/legislacao>. Acesso em 20 mar 2020.
- FETTES, D. & DESMONS, J. **Metamorphic Rocks: a classification and glossary of terms**. Cambridge University Press, 256 p., 2007.
- FYFE, W.; LEONARDOS, O.H.; THEODORO, S.C.H. Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 4, p.715-720, 2006.
- MOREIRA, J.M.S.; MANHÃES, 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.
- OLIVEIRA, C.N.; RIBEIRO, R.C.C.; QUEIROZ, J.P.C. Aplicação de resíduos de mármore na produção de cosméticos. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. **Série Tecnologia Ambiental**, 2010.
- RAYMUNDO, V.; NEVES, M.A.; CARDOSO, M.S.N.; BREGONCI, I.S.; LIMA, J.S.S.; FONSECA, A.B. 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.
- SOUZA, M.E.P.; CARDOSO, I.M.; CARVALHO, A.M.X.; LOPES, A.P.; JUCKSCH. Gneiss and steatite vermin composted with organic residues: release of nutrients and heavy metals. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture**, v. 8, p. 233 -240, 2019.
- STRECKEISEN, A. Classification and nomenclature of plutonic rocks. **Geologische Rundschau**, v. 63, p.773–786, 1974.
- SULTANA, S.; AHMED, A.N.; ZAMAN, M.N.; RAHMAN, A.; BISWAS, P.K.; NANDY, P.K. Utilization of hard rock dust with red clay to produce roof tiles. **Journal of Asian Ceramic Societies**, v. 3, p. 22 – 26, 2015.
- THEODORO, S.H. & LEONARDOS, O.H. The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 78, p.721-730, 2006.
- TORRES, P.; FERNANDES, H.R.; OLHERO, S.; FERREIRA, J.M.F. Incorporation of wastes from granite rock cutting and polishing industries to produce roof tiles. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 29, p. 23 – 30, 2009.
- TOZSIN, G., OZTAS, T., AROL, A.I., KALKAN, E. Changes in the chemical composition of an acidic soil treated with marble quarry and marble cutting wastes. **Chemosphere**, v. 138, p. 664-667, 2015.
- VALARELLI, J.V. & GUARDANI, R. Estudos experimentais para utilização das rochas potássicas de Poços de Caldas como fertilizantes. **Fertilizantes**, v. 3, n. 3, p. 4-7, 1981.
- VALARELLI, J.V.; NOVAIS, R.F.; VAZ DE MELO, M.T.; LEAL, E.D. Ardósias verdetes de Cedro do Abaeté na produção de termofosfato potássico fundido e sua eficiência agrônômica. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 65, p. 343-375, 1993.
- VARADACHARI, C. Potash fertilizer from biotite. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 36, n. 11, p. 4768-4773, 1997.

Submetido em 25 de janeiro de 2020

Aceito para publicação em 5 de janeiro 2021