

Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais

Environmental characterization of processing sludge of ornamental stones

Florindo dos Santos Braga

Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP). Professor Associado do Departamento de Engenharia Ambiental da UFES

Daniella Cardoso Buzzi

Química. Mestre em Engenharia Ambiental pela UFES. Doutoranda em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela USP

Maria Cláudia Lima Couto

Engenheira Civil. Mestre em Engenharia Ambiental pela UFES. Coordenadora da Comissão Interna de Resíduos do Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Espírito Santo (IEMA)

Liséte Celina Lange

Professora Associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Resumo

As lamas de beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO) são resíduos que apresentam composição química variada em função da composição das rochas, do processo de beneficiamento, dos processos de reaproveitamento de águas e lamas, das propriedades dos insumos, entre outros fatores. A caracterização e classificação das LBRO são de grande importância, principalmente para o Estado do Espírito Santo, por possuir um expressivo número de empresas do setor. Neste trabalho, são apresentados os resultados de caracterização e classificação de lamas de desdobramento e polimento de mármore e granitos, segundo a NBR 10004/2004. Todas as amostras de lamas de tear convencional e de politriz analisadas foram classificadas como Classe IIA. Percebeu-se que a identificação dos resíduos por fonte geradora permite a proposição de tecnologias limpas, como o uso de teares a fio diamantado que utilizam o mínimo de insumos e de pastilhas diamantadas metálicas isentas de elementos tóxicos, contribuindo para a melhoria das características químicas das LBRO.

Palavras-chave: caracterização; classificação; resíduos sólidos industriais; lama de beneficiamento de rochas ornamentais; NBR 10004/2004.

Abstract

The sludges produced in the cutting and polishing of ornamental stones are residues with diverse chemical composition that depend on the composition of the stones, the cutting and polishing process, the processes involved in the recycling of water and sludges, among others. The characterization and classification of these resulting sludges have great importance, especially for the State of Espírito Santo, Brazil, which is an important producer of ornamental stones. In this work, the results of characterization and classification of developmental and polishing sludges were presented, according to the Brazilian standard NBR 10004/2004. All the sludge samples from the cutting and polishing equipment were classified as Class IIA. We observed that the identification of the residues according to the generation source allows the proposition of clean technologies usage, such as cutting equipment with diamond coated wires, that use a minimum of raw materials, and metal diamond coated pads, free of toxic material, thus contributing to improve the chemical characteristics of these sludges.

Keywords: characterization; classification; industrial solid waste; ornamental stones processing sludge; NBR 10004/2004.

Introdução

As rochas ornamentais compreendem os granitos, os mármore e pedras como as ardósias, gnaisses e quartzitos, as quais podem ter funções estruturais (alvenaria, colunas e pilares de revestimento). O mármore e o granito são os mais conhecidos e difundidos pela utilização em revestimentos ou peças ornamentais. Seus principais campos

de aplicação incluem uso em bancadas de pia de banheiro e cozinha, revestimentos de pisos, paredes e soleiras, monumento funerário, entre outras (MELO, 2008).

A geração de resíduos é inerente a qualquer processo de transformação de materiais ou produção. O processo de beneficiamento de rocha ornamental não é diferente – seus resíduos geram impacto ambiental em várias etapas do processo produtivo, como as lamas

do processo de desdobramento e polimento, os casqueiros e cacos e outros resíduos como lâminas e granalhas desgastadas, sacos de cimento e de cal, restos de pastilhas abrasivas, entre outros.

Segundo Valle (1995), a caracterização dos resíduos gerados ou acumulados em um estabelecimento tem papel importante na escolha da melhor solução para tratamento ou disposição deles. Como exemplo, Lorenzoni (2005) cita os resíduos do processo de beneficiamento de rochas ornamentais (BRO) que, pela falta de dados de caracterização, vêm se deparando com problemas para uma destinação final ambientalmente correta.

Os resíduos do processo de BRO, principalmente as lammas de beneficiamento de rochas ornamentais (LBRO), apresentam composição química variada em função da composição das rochas, do processo de beneficiamento, das propriedades dos insumos, entre outros fatores. A caracterização e a classificação das LBRO são de grande importância, principalmente para o Estado do Espírito Santo, por possuir um expressivo número de empresas do setor (cerca de 1.300) e o grande potencial de exploração da matéria-prima e exportação de produtos acabados. Uma preocupação é a grande quantidade de resíduos gerados por bloco desdobrado; cerca de 1/3 em peso seco ou 2/3 em peso úmido são transformados em resíduo, o que requer um gerenciamento sustentável. Outra preocupação é a contaminação que esses resíduos podem causar ao meio ambiente pela falta de um acondicionamento e um tratamento adequado. O tratamento comumente aplicado a esses resíduos, sob forma de lama, consiste apenas no desaguamento em tanques de sedimentação, os quais apresentam baixa eficiência de remoção de sólidos. O acondicionamento final é feito em tanques escavados no solo, descobertos e sem nenhuma proteção quanto à migração de poluentes para o solo, para as águas subterrâneas e superficiais e que funcionam como tanques de armazenamento temporário.

Da análise dos resultados de classificação obtidos da literatura, conforme levantamento de Lorenzoni (2005), dados de Buzzi *et al.* (2006) e de Manhães e Holanda (2008), verifica-se que 6 de 12 ou 50% das amostras de LBRO foram classificadas como Classe IIB - inerte e 50%, como Classe IIA - não-inerte para os parâmetros Al, F, Pb, Hg, Cl⁻, Cr, Fe, Mn. Essa classificação permite que as LBRO sejam consideradas resíduos Classe IIB ou Classe IIA. É um resultado insuficiente para servir de referência para a elaboração de um plano de gerenciamento por parte das empresas e fiscalização por parte dos órgãos de controle ambiental, por ser obtido a partir de um pequeno número de amostras e de diversas fontes, sendo algumas delas de origem e metodologia de coleta desconhecida. Além disso, impossibilita a tomada de decisões, de forma técnica e racional, sobre a definição de qual a melhor forma de gerenciar esses resíduos. Como consequência, as decisões passam a ser tomadas pelos consultores, conforme Couto *et al.* (2007), que projetaram um aterro industrial Classe IIA para as LBRO com um mínimo de dados de classificação, ignorando os dados de literatura, mas sem desconsiderar uma

tendência preferencial da não-inerticidade de alguns parâmetros presentes nessas lammas.

Da literatura consultada, observa-se que são escassas as pesquisas de caracterização ambiental das LBRO e que os poucos resultados apresentados nos estudos existentes serviram apenas para mostrar o risco que essas lammas representam para o meio ambiente e complementar a determinação da composição química dos resíduos utilizados nos estudos de aproveitamento. Apenas nos estudos de Buzzi *et al.* (2006) e de Manhães e Holanda (2008), as caracterizações tiveram como foco o gerenciamento ambiental das LBRO.

A estruturação de um plano de gerenciamento que promova o manuseio, o armazenamento temporário, o transporte, a disposição final e/ou aproveitamento dos resíduos como uma nova matéria-prima para outros processos produtivos deve visar à proteção da saúde do homem e à conservação do meio ambiente. A caracterização permite o conhecimento de um maior número de propriedades do resíduo, elimina suspeita não-fundamentada sobre suas características e possibilita a avaliação de desempenho técnico e ambiental dos sistemas de tratamento e dos processos e produtos onde forem incorporados. Além disso, abre caminhos para a proposição de novas alternativas de utilização dos resíduos. Para tanto, deve ter como base um banco de dados de caracterização consistente e permanentemente atualizado. Contribuir para a existência desse banco de dados é a razão e a importância deste trabalho.

Metodologia

Plano de amostragem

O plano de amostragem das LBRO foi elaborado com base no perfil das 81 empresas associadas à Associação Ambiental Monte Líbano (AAMOL), localizadas no município de Cachoeiro de Itapemirim (ES), o mais importante polo industrial de beneficiamento de rochas ornamentais do Estado, considerando-se as diferentes fontes de geração de resíduos nas empresas, os diferentes tipos de rochas, águas, pastilhas e outros insumos utilizados. Os estudos de Buzzi *et al.* (2006) e de Calmon, Braga e Prezotti (2007) forneceram embasamento para a elaboração do plano.

Para o desenvolvimento deste estudo, o processo produtivo foi dividido em duas etapas: a) desdobramento dos blocos, produzindo as chapas brutas, gerando como LBRO finais as lammas de tear do poço de bombeamento (LTEAR-PB); b) polimento das chapas brutas, produzindo as chapas polidas, gerando como LBRO finais as lammas do tanque de sedimentação horizontal (LTSH).

Na Figura 1, apresenta-se um esquema representativo das plantas industriais típicas estudadas, associando o processo produtivo ao plano de amostragem aplicado.

O plano de amostragem foi dividido em três grupos, a saber: matérias-primas, insumos e produtos, como demonstrado na Figura 1.

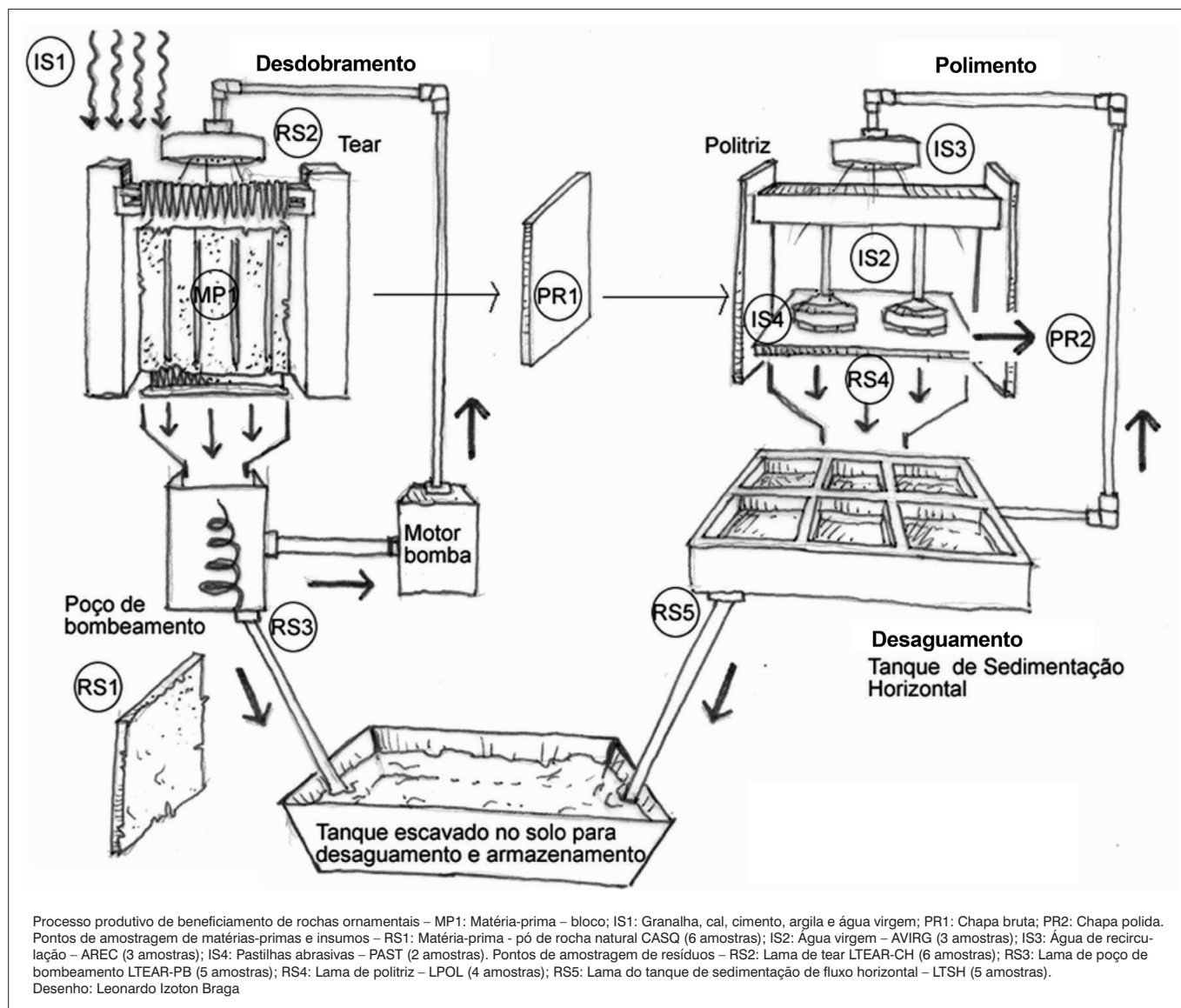


Figura 1 – Processo produtivo típico das plantas das indústrias de beneficiamento de rochas ornamentais associado ao plano de amostragem.

A análise de amostras segregadas de LBRO finais provenientes de três tipos de fontes de geração, com auxílio das análises de lamas intermediárias e dos principais insumos utilizados no processo produtivo possibilitou classificar e caracterizar as LBRO. As fontes foram: 1) casqueiros moídos ou CASQ; 2) lamas do desdobramento dos blocos em chapas brutas ou LTEAR-PB. Essa lama é o expurgo dos poços de bombeamento que ficam armazenadas temporariamente nos tanques escavados no solo; 3) lamas de polimento das chapas brutas acumuladas nos fundos dos tanques de sedimentação horizontal, LTSH, descartadas juntamente com LTEAR-PB.

Os resíduos intermediários foram as lamas de recirculação, distribuídas sobre os blocos através de chuveiros dos teares (LTEAR-CH) e as lamas líquidas geradas nas politrizes (LPOL). Os insumos foram: água virgem bruta (AVIRG), água de recirculação (AREC) e as pastilhas abrasivas de polimento (PAST). Observa-se que o pó de rocha

natural dos casqueiros moídos (RS1), apesar de serem placas laterais do bloco, ao serem descartados são um resíduo que neste estudo representam a rocha. Quando moída e umedecida, a lama do casqueiro representa também lama gerada em tear a fio diamantado, que no desdobramento do bloco utiliza como insumo apenas água.

Coleta de amostras

As coletas de amostras foram realizadas no período de 21 de agosto a 31 de outubro de 2007 em 6 empresas associadas à AAMOL. Foram coletadas, conforme a NBR 10007/2004 – Amostragem de resíduos sólidos (ABNT, 2004a), 21 amostras de LBRO (finais e intermediárias dos processos), 6 de casqueiros, 2 de pastilhas abrasivas, 3 de água bruta e 3 de água de recirculação, perfazendo um total de 35 amostras.

Análises físico-químicas

A caracterização das amostras consistiu na determinação do pH e na realização das análises químicas dos extratos lixiviados e solubilizados de amostras, realizadas no período de 21 de agosto de 2007 a 15 de janeiro de 2008. Todos os procedimentos de amostragem e metodologias utilizadas nas análises ambientais para caracterização e classificação das amostras seguiram as recomendações da norma (APHA, 2005) e a coletânea de normas da ABNT da série 10000/2004. No extrato lixiviado, foram determinados os parâmetros (As, Ba, Cd, Pb, Cr, F⁻, Hg, Ag e Se) e no extrato solubilizado, os parâmetros (Al, As, Ba, Cd, Pb, CN⁻, Cl⁻, Cu, Cr, fenóis, Fe, F⁻, Mn, Hg, NO₃⁻, Ag, Se, Na, SO₄²⁻, surfactantes e Zn).

Os testes de lixiviação e solubilização e as análises químicas foram realizados em laboratório especializado com emissão de laudo de caracterização para cada amostra, consubstanciados pelos limites máximos permitidos (LMP) da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d), intervalo de confiança do resultado, limite de detecção e de quantificação do método utilizado.

Classificação das amostras

A classificação das amostras foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d). Primeiramente, foi verificado se as LBRO constavam nas listagens dos Anexos A e B da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d). Em seguida, as LBRO foram consideradas isentas das características patogenicidade, inflamabilidade, reatividade, corrosividade e toxicidade, com base em justificativa fundamentada nos conhecimentos obtidos da literatura e das visitas técnicas às empresas para elaboração e realização do plano de amostragem, ensaios físicos e análises químicas: as LBROs são resíduos de origem, características físicas e de manuseio conhecidos. São misturas de materiais inorgânicos, rochas graníticas, mármore e materiais naturais como a argila, cal/borra de carbureto, cimento e gesso e materiais ferrosos oxidados originários dos desgastes das granalhas,

das laminas de corte e das pastilhas abrasivas. O processo produtivo é via úmida e realizado em condições isentas de contaminação patogênica. Durante o período de coletas de amostras nas empresas, não foram identificadas, no processo produtivo, evidências a ponto de se considerarem as LBROs suspeitas quanto às características de patogenicidade, inflamabilidade, reatividade. Resta, portanto, determinar as características de corrosividade e toxicidade, com a realização dos ensaios e análises físico-químicas de laboratório.

Na sequência, os resultados dos extratos lixiviados foram comparados com LMP, definidos na listagem do anexo F da norma NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d). No caso, se pelo menos um dos parâmetros analisados fosse superior ao LMP de norma correspondente, a amostra era classificada como resíduo Classe I - perigoso, encerrando o processo de classificação. No caso, se todos os parâmetros fossem inferiores aos LMP correspondentes, a amostra era classificada como resíduo Classe II - não-perigoso. Em seguida, os resultados dos extratos solubilizados foram comparados aos LMP da listagem do Anexo G da norma NBR - 10004/2004 (ABNT, 2004d). Caso todos os parâmetros quantificados fossem inferiores aos LMP, as amostras eram classificadas como resíduo Classe IIB - inerte e, no caso de pelo menos um parâmetro ser superior ao respectivo LMP, a amostra era classificada como Classe IIA - não-inerte.

Resultados

Os resultados obtidos foram analisados buscando-se classificar as LBRO, além de verificar a influência que os processos e os materiais constituintes exerceram na qualidade delas.

Matérias-primas e insumos

A classificação das amostras foi realizada de acordo com as recomendações da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d). Os resultados da Tabela 1 referem-se a seis amostras de CASQ, analisadas sob forma de mistura de rocha moída e água deionizada, ou seja, a forma mais pura

Tabela 1 – Caracterização e classificação dos casqueiros (CASQ) em função da cor da rocha

CASQ Parâmetro	NBR 10004 (mg.L ⁻¹)	E01 Mármore branco (mg.L ⁻¹)	E03 Granito branco (mg.L ⁻¹)	E04 Granito cinza (mg.L ⁻¹)	E02 Granito amarelo (mg.L ⁻¹)	E05 Granito preto (mg.L ⁻¹)	E06 Granito verde (mg.L ⁻¹)
pH	2<pH,12,5	8,6	8,3	8,2	8,2	8,1	8,3
Corrosividade	não-corrosivo						
Toxicidade	6/6-100% - Classe II - não-perigoso						
Parâmetros solubilizados superiores aos LMP	LMP Anexo G NBR 10004 (mg.L ⁻¹)	E01 Mármore branco (mg.L ⁻¹)	E03 Granito branco (mg.L ⁻¹)	E04 Granito cinza (mg.L ⁻¹)	E02 Granito amarelo (mg.L ⁻¹)	E05 Granito preto (mg.L ⁻¹)	E06 Granito verde (mg.L ⁻¹)
Al	0,20	<0,060	<0,060	0,14	0,27	0,12	0,18
Fe	0,30	<0,100	<0,100	<0,100	0,12	0,36	0,54
Inertidade	3/6%-Classe IIB			3/6-50%-Classe IIA			

LMP: limites máximos permitidos.

que uma LBRO pode apresentar. Todas as amostras analisadas foram caracterizadas como resíduo não-corrosivo (pH entre 8,1 e 8,6) e não-tóxico, por apresentarem concentrações de As, Cr, Pb, Hg Ag e Se abaixo do LMP, sendo quantificados no extrato lixiviado traços de Cd, Ba e F⁻ em concentrações inferiores aos LMP do Anexo F da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d).

Da análise do extrato solubilizado das amostras de CASQ, 3 das 6 ou 50% delas foram classificadas como resíduo Classe IIA - não-inerte para os parâmetros Al e Fe. Observa-se que as amostras de rochas de cor clara, mármore branco, granito branco e granito cinza, coletadas nas empresas E01, E03 e E04, respectivamente, foram classificadas como resíduo Classe IIB - inerte, enquanto as amostras das rochas amarela e de cor mais escura, preto e verde, coletadas nas empresas E02, E05 e E06 foram classificadas como resíduo Classe IIA - não-inertes. Esses resultados constata a influência dos elementos componentes da rocha na definição da classe das LBRO e também desmistificam a crença de que todas as LBRO são resíduos Classe - IIB - inerte.

Os resultados de caracterização das amostras dos insumos pastilhas abrasivas de polimento foram: 1 de 1 amostra de abrasivo resinóide, PAST ABRND, apresentou pH 9,0 e baixas concentrações de Ba e Cr no extrato lixiviado, sendo caracterizado e classificado como resíduo não-corrosivo e não-tóxico, Classe IIA - não-inerte para os parâmetros Cd, Pb, Cl⁻ e fenóis. E 1 de 1 amostra de abrasivo magnésiano, PAST ABRMAG, apresentou pH 9,8 e baixas concentrações de F⁻ no extrato lixiviado, sendo caracterizado e classificado como resíduo não-corrosivo e não-tóxico, Classe IIA - não-inerte para os parâmetros Cd, Pb, Cl⁻, fenóis, Hg e Na.

Observa-se que os parâmetros solubilizados das duas amostras PAST excederam os LMP dos extratos solubilizados, com altas concentrações para Cl⁻ (11.291 a 47.776 mg.L⁻¹); Na (303 mg.L⁻¹), Cd

(0,047 a 0,469 mg.L⁻¹) e mais baixas para fenóis (0,05 a 0,07 mg.L⁻¹) e Hg (0,001 mg.L⁻¹). Esses mesmos parâmetros foram também detectados em valores bem superiores em LPOL e LTSH, demonstrando a grande influência que os componentes das pastilhas abrasivas exercem na classificação das LBRO de polimento.

Os resultados da Tabela 2 referem-se às amostras segregadas, LTEAR-PB, coletadas nos poços de bombeamento antes de serem expurgadas para os tanques escavados no solo; 100% das amostras analisadas foram classificadas como resíduo não-corrosivo, pH entre 7,7 e 12,4, e não-tóxico, por apresentarem concentrações de As, Hg, Ag e Se abaixo do LMP do método de detecção, sendo quantificados no extrato lixiviado traços de Ba, Cd, Pb, Cr e F⁻ em concentrações inferiores aos LMP do Anexo F da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d).

A LTEAR-PB é um tipo de lama residual, na qual as granalhas e as lâminas já se encontram desgastadas e a viscosidade aumentada, devido à elevada quantidade de pó de rocha. Por serem amostras coletadas nos mesmos teares durante as mesmas serradas que originaram as LTEAR-CH, constata-se que as LTEAR-PB são mais representativas do histórico de serradas anteriores do que a serrada em andamento. Nessa lama, parte do Al presente em quatro de seis amostras tem como principal origem a rocha desdobrada. O F⁻, em duas de quatro amostras, e Pb, Cr, fenóis, F⁻ e SO₄²⁻, em uma de seis amostras, podem ser originários da rocha, da cal, das águas utilizadas e até mesmo das argilas e cimento utilizados em algumas empresas.

As lamas de polimento referem-se às quatro amostras de lamas líquidas coletadas nas canaletas de drenagem dos efluentes das politrizes. São amostras intermediárias do processo, das quais se tem geração das águas de recirculação após decantação. A amostra coletada na empresa E01, LPOL ABRND, refere-se ao efluente do polimento de chapas polidas com pastilhas com abrasivo resinóide e impermeabilizadas com resinas. A LPOL da empresa E01 apresentou

Tabela 2 – Caracterização e classificação das lamas de tear do poço de bombeamento (LTEAR-PB) de rochas de diferentes cores

LTEAR-PB Parâmetro	NBR 10004	E01 Mármore branco (mg.L ⁻¹)	E02 Granito amarelo (mg.L ⁻¹)	E03 Granito branco (mg.L ⁻¹)	E04 Granito cinza (mg.L ⁻¹)	E05 Granito preto (mg.L ⁻¹)	E06 Granito verde (mg.L ⁻¹)
pH	2<pH,12,5	9,4	12,3	7,7	10,3	8,4	11,0
Corrosividade	não-corrosivo						
Toxicidade	6/6-100% - Classe II - não-perigoso						
Parâmetros solubilizados superiores aos LMP	LMP NBR 10004	E01 Mármore branco (mg.L ⁻¹)	E02 Granito amarelo (mg.L ⁻¹)	E03 Granito branco (mg.L ⁻¹)	E04 Granito cinza (mg.L ⁻¹)	E05 Granito preto (mg.L ⁻¹)	E06 Granito verde (mg.L ⁻¹)
Al	0,20	<0,06	0,370	<0,06	4,41	0,31	10,49
Pb	0,01	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
Cr	0,05	0,02	0,01	0,01	0,05	<0,010	0,01
Fenóis	0,01	<0,010	<0,010	0,02	0,21	<0,010	<0,010
F	1,50	0,27	0,47	2,07	1,72	0,49	0,29
So ₄ ²⁻	250,00	6,13	<5,000	311,44	86,65	13,73	58,54
Inerticidade	6/6-100% - Classe IIA						

LMP: limites máximos permitidos.

pH = 9,4, altas concentrações de Cl⁻ (1851,8 mg.L⁻¹) e concentrações mais baixas para Cd (0,28 mg.L⁻¹), Pb (0,108 mg.L⁻¹), fenóis (0,030 mg.L⁻¹) e Hg (0,01 mg.L⁻¹), em concentrações iguais ou superiores aos LMP da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d). As amostras de LPOL ABRMAG das empresas E02 e E03 referem-se aos efluentes de chapas polidas com pastilhas abrasivas magnesianas sem uso de resinas, com pH = 9,2 e altas concentrações de Cl⁻ (3587,86 e 351,84 mg.L⁻¹) e Na (1873,4 mg.L⁻¹). A amostra E04, ABRDIAM, referente ao efluente do polimento de chapas polidas com pastilhas diamantadas metálicas apresentaram pH = 9,2 e concentrações de Cl⁻ (25,92 mg.L⁻¹).

Lamas de polimento

Todas as 4 amostras analisadas foram caracterizadas como resíduo não-corrosivo, com pH entre 8,3 e 9,3. Os parâmetros detectados em LPOL, em concentrações superiores aos LMP, podem ser explicados pelos resultados da caracterização e classificação de uma amostra de abrasivo resinóide, PAST ABRNRND, e de uma amostra do abrasivo magnesiano, PAST ABRMAG. A PAST ABRNRND apresentou pH = 9,0 e foi classificada como Classe IIA - não-inerte para os parâmetros Cd, Pb, Cl⁻ e fenóis. E a PAST ABRMAG apresentou pH de 9,8 e Classe IIA - não-inerte para os parâmetros Cd, Pb, Cl⁻, fenóis, Hg e Na. A partir desses resultados, tem-se a constatação de que as altas concentrações dos componentes das pastilhas abrasivas é que definem a classe das LPOL.

Na Tabela 3, são apresentados os resultados referentes às amostras de lamas, LTSH, coletadas no fundo do primeiro compartimento dos tanques de sedimentação e armazenamento das LPOL.

Todas as 5 amostras analisadas foram caracterizadas como resíduo não-corrosivo, com pH entre 8,1 e 11,6, e não-tóxico, por apresentarem concentrações de As, Ba, Cd, Pb, Hg, Ag e Se abaixo

do LMP de detecção, sendo quantificados no extrato lixiviado traços de Cr e F⁻ e concentrações inferiores aos LMP do Anexo F da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d); 100% das amostras de LTSH, coletadas nas empresas E04, E02, E05 e E06, foram classificadas como Classe IIA - não-inerte para os parâmetros Cd, Pb, Cl⁻, fenóis, e Fe, podendo este último ter como origem não somente as pastilhas abrasivas, mas também as AVIRG e as AREC. Estas, originárias do desaguamento das lamas nos tanques de sedimentação com pH entre 10,6 e 12,5 e com concentrações de Cr e Na superiores aos LMP da NBR 10004/2004, ao retornarem ao processo produtivo, contribuem para degradação da qualidade de LPOL e, consequentemente, da qualidade de LTSH.

Discussão

Quanto às lamas dos casqueiros, CASQ, preparadas em laboratório por diferentes tipos de rochas em função da cor, 3 de 6 ou 50% das amostras foram caracterizadas como não-corrosivas, não-tóxicas e não-inertes para os parâmetros Al e Fe. Os resultados de classificação dos CASQ são representativos das rochas, pois, segundo Calmon, Braga e Prezotti (2007), 93% dos tipos de rochas beneficiadas são: 19% de granito amarelo, 18% de granito verde, 15% de granito cinza, 14% de granito preto, 12% de granito branco e 10% mármore branco. Além disso, as amostras são representativas dos resíduos gerados nos teares a fio diamantado, equipamentos em fase de implantação nas empresas do Estado do Espírito Santo, considerada tecnologia limpa. O resultado demonstra que, mesmo nesses processos mais limpos, a possibilidade da não-inertividade das LBRO existe. Depende primeiramente do tipo de rocha; em segundo, do tipo de água e, em terceiro, do tipo de tear, o que se pode afirmar a partir deste estudo.

Tabela 3 - Caracterização e classificação das lamas dos tanques de sedimentação horizontal (LTSH)

LTSH Parâmetro	NBR 10004	E01 (mg.L ⁻¹)	E02 (mg.L ⁻¹)	E03 (mg.L ⁻¹)	E04 (mg.L ⁻¹)	E05 (mg.L ⁻¹)
pH	2 < pH, 12,5	9,5	8,1	11,6	8,9	8,4
Corrosividade	não-corrosivo					
Toxicidade	5/5-100% - Classell - não-perigoso					
Parâmetros solubilizados superiores aos LMP	LMP Anexo G NBR 10004	E01 (mg.L ⁻¹)	E02 (mg.L ⁻¹)	E03 (mg.L ⁻¹)	E04 (mg.L ⁻¹)	E05 (mg.L ⁻¹)
Cd	0,0085	0,020	0,020	0,016	0,024	0,016
Pb	0,01	0,07	0,09	0,08	0,10	0,08
Cl ⁻	250,00	1574,03	1527,74	41,67	1990,69	17,59
Fenóis	0,01	2,90	0,02	0,02	0,03	0,01
Fe	0,3	0,5	0,1	0,2	<0,100	<0,100
Ag	0,05	0,02	<0,010	0,01	<0,010	0,29
Na	200,00	327,00	308,40	308,40	6,70	8,75
Inertividade	5/5-100% - Classe IIA					

LMP: limites máximos permitidos.

Características das lamas do processo produtivo

Nos extratos lixiviados das lamas de desdobramento e polimento, foram quantificados os parâmetros (Ba, Cd, Pb, Cr, F⁻) abaixo dos LMP, e, em todas as amostras, os parâmetros (Hg, Ag e Se) apresentaram-se abaixo do limite de detecção.

Os resultados quantificados no extrato solubilizado de amostras semissólidas que se apresentaram em concentrações superiores aos LMP do Anexo G da NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d) foram: Al, Fe, Pb, Cr, fenóis, F⁻ e SO₄²⁻ para 6 de 6 ou 100% das amostras descartadas do processo de desdobramento, LTEAR-PB, classificadas como Classe IIA - não-inerte; Cd, Pb, Cl⁻, fenóis, Fe, Ag e Na para 5 de 5 ou 100% das amostras descartadas do processo de polimento, LTSH, classificadas como Classe IIA - não-inerte; e Al e Fe para 3 de 6 ou 50% das amostras originárias dos casqueiros moídos, tendo como insumos apenas CASQ e água deionizada, classificadas como Classe IIA - não-inerte. Em todas as amostras dos extratos solubilizados, os parâmetros CN⁻, Cu, Mn, surfactantes e Zn sempre se apresentaram abaixo dos limites de detecção.

Da literatura (BUZZI, 2006; LORENZONI, 2005), resultados e citações, (MANHÃES; HOLANDA, 2008) 6 de 12 ou 50% das amostras de resíduos de beneficiamento de rochas ornamentais foram classificadas como Classe IIA – não-inerte para os parâmetros Al, F⁻, Pb, Hg, Cl⁻ e Mn. Neste estudo, da análise de 14 de 17 ou 82% das amostras específicas de LBRO, CASQ, LTEAR-PB e LTSH foram classificadas como Classe IIA - não-inertes para os parâmetros Al, F⁻, Pb, Hg, e Cl⁻, Fe, Cr, fenóis, SO₄²⁻ e Na). Da junção dos resultados de literatura e os deste estudo, pode-se inferir que 20 de 24 ou 83% das amostras até então avaliadas são classificadas como Classe IIA - não-inertes para os parâmetros Al, F⁻, Pb, Hg, e Cl⁻, Fe, Cr, fenóis, SO₄²⁻, Na e Mn.

Os valores médios e máximos iniciais de pH das amostras de CASQ (8,3 e 8,6) e AVIRG (8,3 e 8,3) aumentaram significativamente nas AREC (11,8 e 12,5) e nas lamas de desdobramento LTEAR-CH (9,2 e 11,6) e LTEAR-PB (9,9 e 12,4), e de forma semelhante nas LPOL (9,0 e 9,3) e LTSH (9,3 e 11,6). Essas alterações podem ter sido causadas pelas rochas calcárias (mármore), a cal, as argilas, o cimento, o gesso e demais elementos presentes nos insumos utilizados no processo produtivo. Segundo Calmon, Braga e Prezotti (2007), o consumo médio de insumos por bloco desdobrado nas empresas investigadas é de 436 kg de granalha, 268 kg de cal, 33 kg de cimento e 17 kg de argila. O parâmetro Al ultrapassou os LMP nos extratos solubilizados das CASQ e das LTEAR-CH e LTEAR-PB, estando sua presença relacionada à composição das rochas, argilas e cimento utilizados no processo. O Fe, apesar de não-tóxico em elevadas concentrações, torna a cor das águas amareladas, causa manchas em vasos sanitários, propicia o desenvolvimento de ferro-bactéria, causando incrustações que obstruem canalizações dos sistemas públicos de distribuição de água. O parâmetro Fe ultrapassou os LMP nos extratos solubilizados dos casqueiros e das lamas dos tanques de

sedimentação LTEAR-PB e LTSH. A presença de Fe está relacionada aos desgastes das granalhas e lâminas de aço ou ferro. Esses são parâmetros que, apesar de não-tóxicos, devem ser monitorados nos resíduos para que sejam tomadas medidas que evitem a contaminação de recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Os parâmetros Al, Cd, Pb, Cl⁻, Cr, fenóis, Fe, F⁻, Ag, Hg, Na e SO₄²⁻, que se apresentaram em valores superiores aos LMP nas amostras analisadas, podem ser encontrados em maiores concentrações em lamas de composição mais complexa, aquelas depositadas nos tanques escavados no solo e que recebem a mistura LTEAR-PB e LTSH. A falta de cobertura, impermeabilização lateral e de fundo e de sistemas de drenagem torna os tanques verdadeiras fontes de migração dos elementos solubilizados das lamas para as águas subterrâneas e superficiais, seja por infiltração no solo ou por escoamento superficial em caso de transbordamento desses tanques. Esse problema pode ser solucionado pela disposição das lamas de desdobramento e de polimento em separado, em tanques construídos e cobertos. Ocorrendo segregação das lamas, haverá condições de controle ambiental de rotina dos resíduos das ações impactantes causadas pelas LBRO. Para tanto, recomenda-se que nos empreendimentos que geram e/ou recebem para disposição final e/ou tratamento de LBRO, sejam monitorados, com frequência, os parâmetros que ultrapassaram os LMP de norma observados neste estudo (Al, F⁻, Pb, Hg e Cl⁻, Fe, Cr, fenóis, SO₄²⁻, Na e Mn). Recomenda-se também que uma caracterização completa de todos os parâmetros de norma seja feita com menor frequência ou quando necessário. Essas recomendações podem auxiliar na eliminação de impactos ambientais e redução de custos relacionados ao gerenciamento das LBRO.

Conclusões

Todas as amostras de lamas analisadas, isto é, seis de CASQ, seis de LTEAR-CH, seis de LTEAR-PB e cinco de LTSH foram classificadas como resíduo não-perigoso Classe II, corroborando os resultados da literatura consultada; 100% das 6 amostras de lamas de desdobramento expurgadas dos poços de bombeamento foram caracterizadas como não-corrosivas, não-tóxicas e não-inertes para os parâmetros Al, Fe, Pb, Cr, fenóis, F⁻ e SO₄²⁻, e classificadas como Classe IIA; 100% das 6 amostras lamas de polimento acumuladas no fundo dos tanques de sedimentação foram caracterizadas como não-corrosivas, não-tóxicas e não-inertes para os parâmetros Cd, Pb, Cl⁻, fenóis, Fe, Ag e Na e classificadas como Classe IIA.

Os parâmetros que ultrapassaram os limites máximos permitidos na NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d) para extratos solubilizados observados neste estudo (Al, F⁻, Pb, Hg, Cl⁻, Fe, Cr, fenóis, SO₄²⁻, Na e Mn) devem ser priorizados em caso de análises de rotina para controle ambiental ou de impactos ambientais causados pelas LBRO. Uma caracterização completa de todos os parâmetros de norma deve ser feita com menor frequência ou quando necessário.

Os elevados valores de pH variando nas lammas de desdobramento, em valores médios entre 9,29 e 11,64, e nas lammas de polimento entre 11,6 e 12,4 em valores máximos, indicam a necessidade de cuidados na manipulação, acondicionamento e transporte das LBRO e águas utilizadas no processo produtivo, pois, apesar de não serem classificadas como corrosivas, são altamente agressivas, por apresentarem limites próximos aos limites superiores para corrosividade, segundo a NBR 10004/2004 (ABNT, 2004d), pH = 12,5.

Os parâmetros Cd, Pb, Cl⁻, fenóis, Hg e Na ultrapassaram os LMP nos extratos solubilizados nas lammas de polimento, LTSH, originárias dos tanques de sedimentação, tendo como principal fonte de origem as pastilhas abrasivas magnesianas e resinóides. Para a redução desses parâmetros, principalmente os altamente tóxicos como Cd, Pb, fenóis e Hg, deve-se substituir as pastilhas abrasivas resinóides e magnesianas por pastilhas diamantadas metálicas.

O conhecimento do processo como um todo – matérias-primas, insumos e resíduos por fonte de geração – permitiram

entender a formação e a composição das lammas de beneficiamento de rochas ornamentais, esclarecendo sobre sua não-periculosidade a partir do rastreamento dos parâmetros que as tornam resíduos não-inertes. Esse rastreamento seguido de parâmetros permitiu identificar as possíveis origens de contaminação das LBRO que se mostraram presentes na própria rocha, ou seja, na matéria-prima, mas principalmente nos insumos utilizados nos processos. Os resultados obtidos permitirão o estabelecimento de parâmetros de monitoramento de rotina mais representativa dos resíduos, dos impactos causados por eles e até mesmo de produtos com a incorporação das LBRO.

A identificação dos resíduos por fonte geradora permite a proposição de utilização de processos ou tecnologias mais limpas, como o uso de teares a fio diamantado e de pastilhas diamantadas metálicas, que utilizam o mínimo de insumos, contribuindo para a inerticidade das lammas de desdobramento e polimento de rochas ornamentais.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Amostragem de resíduos sólidos. *Norma técnica NBR 10007*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004a.

_____. Procedimento para obtenção de extrato de lixiviado de resíduos sólidos. *Norma técnica NBR 10005*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004b.

_____. Procedimento para obtenção de extrato de solubilizado de resíduos sólidos. *Norma técnica NBR 10006*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004c.

_____. Resíduos sólidos – classificação. *Norma técnica NBR 10004*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004d.

APHA, AWWA, WEF. *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. Washington, 2005.

BUZZI, D.C. et al. Caracterização segundo a NBR 10004/2004 de resíduos gerados no beneficiamento de granitos. In: *SIMPÓSIO ÍTALO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 8, Anais... Fortaleza, ABES, 2006. CD-ROM.

CALMON, J.L.; BRAGA, F.S.; PREZOTTI, J.C.S. *Projeto básico de central de tratamento de resíduos gerados no processo de beneficiamento de rochas ornamentais*. objeto: licenciamento ambiental junto ao IEMA,

e concessão de uso da área da Fazenda Monte Líbano por meio de comodato junto ao governo do Estado do Espírito Santo. Cariacica. 2007.

COUTO, M.C.L. et al. Proposta de implantação de uma central de tratamento de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais em Nova Venécia-ES. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 24, *Anais...*, Belo Horizonte, ABES, 2007. CD-ROM.

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

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

MELO, L.S.C. *Gestão ambiental de resíduos sólidos gerados em empresas de beneficiamento de rochas ornamentais em Belo Horizonte*. Monografia, Especialização em Meio Ambiente. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

VALLE, C.E. *Qualidade ambiental: o desafio de ser competitivo protegendo o meio ambiente*. São Paulo: Pioneira, 1995.