

# Interações ambientais e resistência física de um depósito de resíduos finos da indústria de rochas ornamentais

*Environmental interactions and physical resistance of a fine waste deposit from dimension stone industry*

Mirna Aparecida Neves<sup>1\*</sup> , Marcus Araujo Alves Santos<sup>2</sup>, Simone Pereira Taguchi<sup>3</sup> , Caio Vinícius Gabrig Turbay Rangel<sup>4</sup> , Valerio Raymundo<sup>5</sup>

## RESUMO

Embora vários trabalhos proponham aplicações para os resíduos finos gerados no beneficiamento de rochas ornamentais, ainda não há evidências das vantagens financeiras para tal aproveitamento. Assim, a descrição dos depósitos existentes, muitos deles construídos sem triagem ou qualquer medida de proteção ambiental, torna-se imprescindível para seu melhor gerenciamento. Este trabalho estudou a caracterização física, química e mineralógica, além da resistência mecânica de um depósito de resíduos tradicionais e de seu substrato geológico. Cerca de 75% das partículas que compõem os resíduos são menores do que 0,0625 mm e o teor de umidade varia entre 26 e 60%. Os valores de pH variam entre 8,2 e 10,5. Os elementos químicos predominantes são Si, Al, Fe e, em menor proporção, Ca, Na e K. Esses elementos compõem quartzo, plagioclásio, microclina, calcita, muscovita, biotita e zircão. Ao comparar as características dos resíduos com as do substrato geológico, não foram encontrados indícios de migração das substâncias químicas analisadas. Os *Standard Penetration Tests* mostram que as camadas não apresentam resistência suficiente para receber fundações rasas. É provável que as concentrações de Fe em alguns níveis contribuam com o aumento da resistência mecânica em áreas localizadas do depósito.

**Palavras-chave:** lama abrasiva; uso de resíduos; sondagem SPT; passivo ambiental.

## ABSTRACT

Although several works propose applications for the fine wastes generated by the dimension stones processing, the financial advantages of recovering these materials are not yet evident. Then, the description of the deposits, much of them constructed without screening or any environmental protection measure, becomes indispensable for their best management. This work studies the physical, chemical and mineralogical characterization, as well as the mechanical resistance of a traditional waste deposit and its geological substrate. Around 76% of the particles that compound the wastes are smaller than 0,0625 mm and their humidity vary between 26 and 60%. The pH-values are between 8.2 and 10.5. The major chemical elements are Si, Al, Fe, and, at less proportions, Ca, Na, and K. These elements compound quartz, plagioclase, microcline, calcite, muscovite, biotite, and zircon. When comparing the characteristics of the wastes with the geological substrate, indicatives of the analyzed substances' migration was not found. The Standard Penetration Tests (SPT) show that the layer's strength is not good enough to receive shallow foundations. It is probable that Fe concentrations at some levels contribute for incrementing the deposit's mechanical resistance.

**Keywords:** abrasive slurry; use of wastes; SPT survey; environmental liability.

## INTRODUÇÃO

Na indústria de rochas ornamentais, o principal resíduo produzido durante a serragem de blocos para fabricação de chapas de revestimento é uma polpa viscosa denominada lama de beneficiamento de rochas ornamentais (CHIODI, 2004) ou, mais comumente, lama abrasiva.

O resíduo produzido em teares convencionais possui granalha de aço em sua composição, além de cal, água e o pó da rocha serrada (BRAGA *et al.*, 2010). Atualmente, os teares convencionais têm sido lentamente substituídos por teares de fios diamantados ou multifios, cujos resíduos são compostos basicamente por pó de rocha e água, já que não utilizam

<sup>1</sup>Universidade Federal do Espírito Santo - Vitória (ES), Brasil.

<sup>2</sup>Valor Investimentos - Vitória (ES), Brasil.

<sup>3</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>4</sup>Universidade Federal do Sul da Bahia - Porto Seguro (BA), Brasil.

<sup>5</sup>Associação de Desenvolvimento Ambiental do Mármore e Granito - Cachoeiro de Itapemirim (ES), Brasil.

\*Autor correspondente: mirnaan@gmail.com

Recebido: 05/06/2017 - Aceito: 04/06/2018 - Reg. ABES: 181046

insumos de serragem como os primeiros. Embora a tendência tecnológica seja a substituição dos teares convencionais pelos de fios diamantados, os primeiros ainda são maioria no Brasil, utilizados há muitas décadas.

O potencial de contaminação ambiental desses resíduos é tema controverso, encontrando-se dados e opiniões divergentes na literatura consultada. Com base no sistema da Norma Brasileira (NBR) 10004 (ABNT, 2004), alguns autores os classificam como não perigosos e não inertes (Classe II-A) (BRAGA *et al.*, 2010). Porém, Aguiar *et al.* (2016) identificam, nos resíduos de polimento, o potencial de causar mutagênese em organismos vivos por causa dos insumos utilizados e alertam para a necessidade de cuidados especiais na gestão desses materiais. Freitas, Raymundo e Jesus (2012) consideram tais resíduos como perigosos, em razão do pH elevado da polpa de serragem, enquanto Neves *et al.* (2013) identificam considerável atenuação dos valores de pH após a deposição dos resíduos.

O Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA), por meio da Instrução Normativa nº 11, de 11 de outubro de 2016 (ESPÍRITO SANTO, 2016), regula os procedimentos técnicos para licenciamento da disposição de lama do beneficiamento de rochas ornamentais em aterros controlados. Porém, grande parte das disposições de resíduos existentes, principalmente as mais antigas, não segue tal normativa. Assim, em lugar da denominação “aterro”, utiliza-se aqui o termo “depósito” para o sítio de disposição de resíduos. É importante citar que a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010), considera que os resíduos sólidos só poderão ser considerados rejeitos (material a ser descartado) se não forem passíveis de tratamento ou utilização e, só depois de esgotadas todas as possibilidades, deve-se proceder à disposição final ambientalmente adequada.

Portanto, os resíduos aqui estudados não constituem rejeitos, pois várias possibilidades de uso já foram apontadas. Alguns estudos demonstram que é possível seu uso como matéria-prima para construção civil (MENEZES *et al.*, 2002; ALMEIDA; BRANCO; SANTOS, 2007) e na indústria cerâmica (MOREIRA; FREIRE; HOLANDA, 2003; ACCHAR; VIEIRA; HOTZA, 2006; TAGUCHI *et al.*, 2014, PRADO *et al.*, 2012). No setor da agricultura, o pó de serragem de mármore já foi testado como corretivo de acidez de solos (RAYMUNDO *et al.*, 2013); e o de rochas silicáticas no processo de “rochagem”, ou seja, agregação de pó de rocha ao solo para enriquecimento mineral e correção de acidez (THEODORO; LEONARDOS, 2006; FYFE; LEONARDOS; THEODORO, 2006; TOZSIN *et al.*, 2015). Outra aplicação que tem sido estudada é o uso desses resíduos na remediação de áreas contaminadas (KABAS *et al.*, 2012; PÉREZ-SIRVENT *et al.*, 2007), pois o material pode causar a imobilização das fases livres de metais tóxicos por meio da neutralização do pH. Oliveira *et al.* (2010) afirmam que os resíduos de rochas ornamentais podem ser utilizados como carga na produção de cosméticos.

Vários trabalhos descrevem a composição desses resíduos (*e.g.*, SANTOS; DESTEFANI; HOLANDA, 2013), colocando a sílica (SiO<sub>2</sub>) como

um componente importante por causa do amplo uso de rochas silicáticas, além do alto teor de óxido de ferro relacionado ao uso da granalha e óxido de cálcio resultante da adição da cal na lama abrasiva. Porém, os estudos têm focado a lama recém-gerada, enquanto os depósitos armazenados em consórcios empresariais ou, muitas vezes, em sítios clandestinos, têm sido ignorados. Esses depósitos, acumulados há anos e sem medidas de segurança, constituem passivos ambientais da indústria de rochas ornamentais e estão sujeitos à exigência, por parte do órgão ambiental, de serem retirados e transportados para um aterro controlado. A remoção desses materiais deve ser feita de forma criteriosa e estudada caso a caso. Em determinadas situações, a retirada dos resíduos para fabricação de outros produtos ou mesmo o uso da área de disposição para construção podem ser procedimentos mais inteligentes, econômica e ambientalmente viáveis, podendo representar, em muitos casos, a sobrevivência da empresa.

Este trabalho teve, como foco principal, a caracterização física, química e mineralógica de um depósito de resíduos tradicional e de seu substrato geológico, ou seja, dos materiais naturais sobre os quais os resíduos foram depositados sem proteção ou isolamento. Adicionalmente, avaliou-se a resistência do depósito via *Standard Penetration Test* (SPT). Ainda que a liberação de substâncias nocivas seja tema controverso e merecedor de mais estudos, a avaliação da resistência e da possibilidade de uso do depósito como substrato pode indicar uma alternativa interessante do ponto de vista econômico, desde que tomadas as devidas medidas de proteção ambiental.

## MÉTODOS

As amostras foram coletadas por sondagem a trado em um depósito de resíduos finos da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais localizado no município de Cachoeiro de Itapemirim, sul do estado do Espírito Santo. A coleta foi realizada no mês de junho, em período de baixa precipitação pluviométrica na região sul capixaba.

Concomitantemente à amostragem, foram realizados ensaios conhecidos como SPT, visando à determinação dos tipos de solo, os índices de resistência à penetração a cada metro de profundidade, além da posição do nível da água, conforme NBR 6484 (ABNT, 2001). Os materiais amostrados e ensaiados envolveram tanto os resíduos acumulados no depósito quanto o solo, aqui denominado substrato, localizado sob o depósito. Tal substrato é composto por um elúvio correspondente à rocha alterada (gnaisse intemperizado, comumente encontrado no arcabouço geológico da área) e por um colúvio, que se refere a sedimentos depositados naturalmente nas encostas por processos gravitacionais.

Em seis furos de sondagem a trado, foram coletados cerca de 100 gramas de amostra a cada metro de profundidade (Figura 1), correspondendo a 27 amostras de resíduo e 17 de substrato. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas para análises físico-químicas e mineralógicas.

A análise granulométrica dos resíduos e do substrato foi realizada após destorroamento das amostras com auxílio de um pistilo de borracha, conforme NBR 7181 (ABNT, 1984). O peneiramento foi realizado a seco, utilizando agitador e jogo de peneiras com aberturas de 20, 60, 115 e 250 mesh.

Para determinação do teor de umidade conforme NBR 6502 (ABNT, 1995), as amostras, em triplicata, foram secas em estufa de exaustão com circulação forçada de ar sob temperatura de 42°C por 24 horas e, posteriormente, foram transferidas para um dessecador até atingir temperatura ambiente. Foram então recolocadas na estufa por mais oito horas antes de serem pesadas novamente. O processo foi repetido até que a massa se estabilizasse ou que a variação entre pesos fosse menor do que 7%.

A taxa de umidade ( $U\%$ ) das amostras foi calculada a partir da Equação 1:

$$U\% = \frac{M_u - M_s}{M_u} \times 100 \quad (1)$$

Em que:

$M_u$  = massa do corpo de prova antes da secagem (em gramas);

$M_s$  = massa do corpo de prova após secagem (em gramas).

A medição do pH foi feita conforme indicações da NBR 10004 (ABNT, 2004), preparando uma mistura com 50% em peso do material a ser analisado e 50% de água destilada. A mistura foi agitada por 30 minutos e, após esse tempo, o pH foi medido por meio de um pHmetro de bancada. Como houve rápida decantação das partículas, o pH foi medido em dois momentos: logo em seguida à agitação da mistura e após percorridos 30 minutos, com a mistura em repouso.

As amostras foram moídas e peneiradas para compor pastilhas prensadas para análise química por fluorescência de raios X (FRX).

As análises foram realizadas em espectrômetro S8 Tiger-Bruker, com cristal analisador padrão LIF 200 de lítio.

Os dados químicos incluem elementos principais, ou seja, aqueles volumetricamente significantes, com valores superiores a 1%, expressos em porcentagem em peso de óxidos ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ); elementos secundários e traços, com valores inferiores a 1 e 0,1% em peso, respectivamente, aqui expressos nas suas formas elementais e representados principalmente pelo Rb, Sr, Ba, Cl e Zn. O ferro foi analisado como ferro total, expresso sob a forma de óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

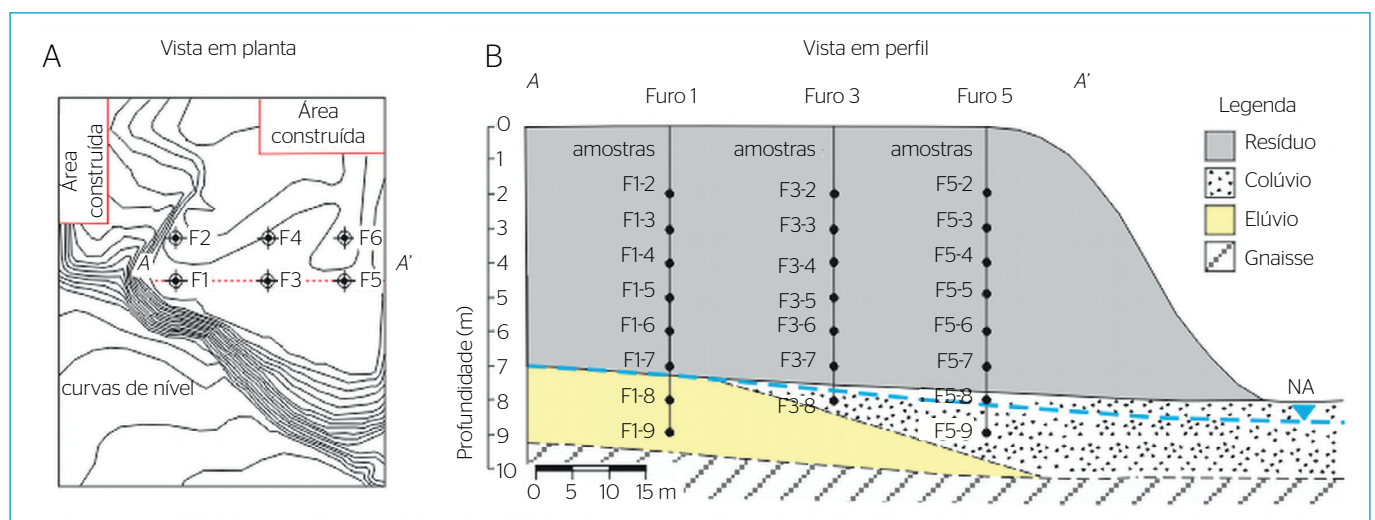
Uma alíquota de cada amostra foi reservada para análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX), utilizando radiação  $\text{CuK}\alpha$  ( $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) no intervalo angular  $2\theta = 4$  a  $90^\circ$ , passo angular  $0,02^\circ$  e contagem de 2 segundos. A identificação das fases cristalinas foi feita por meio de fichas Joint Committee on Power Diffraction Standards (JCPDS) da International Center for Diffraction Data.

O ensaio de resistência física foi realizado *in situ* nos seis furos de sondagem, que atravessaram todo o depósito de resíduos e adentraram alguns metros no substrato geológico. A determinação da resistência à penetração foi feita a cada metro de profundidade, por meio do SPT, que envolve a contagem do número de golpes necessários para cravação de 30 cm de um amostrador-padrão, conforme os procedimentos da NBR 6484 (ABNT, 2001).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Granulometria

Os resíduos de rochas ornamentais armazenados no depósito estudado possuem partículas de tamanho predominantemente menor ou igual



**Figura 1** - Esquema de coleta de amostras no depósito de resíduos mostrando (A) a localização dos furos de sondagem em planta e (B) vista em perfil, onde estão identificadas as profundidades de coleta no depósito e no substrato geológico.

a 0,0625 mm, os quais perfazem 76% da amostra; 19% das partículas possuem cerca de 0,125 mm; 4% possuem 0,25 mm e apenas 1% têm 0,841 mm (Tabela 1). O substrato abaixo do depósito, composto por um elúvio (gnaisse intemperizado) e colúvio (sedimentos de encosta, depositados naturalmente), são de granulação mais grossa. As partículas menores do que 0,0625 mm perfazem 30 e 15% do material; 19 e 18% possuem 0,125 mm; 39 e 50% possuem 0,25 mm, enquanto 11 e 18% estão na faixa dos 0,841 mm (valores do elúvio e colúvio, respectivamente).

A granulação predominantemente fina dos resíduos é um fator positivo para o seu uso em vários processos produtivos, visto que muita energia comumente é gasta na moagem de matéria-prima. Do ponto de vista ambiental, os materiais finos (silte fino e argila, isto é, partículas menores do que 0,0625 mm), tendem a não transmitir água, mas a retê-la entre as partículas (SPARKS, 2003). Em outras palavras, são materiais de alta porosidade e baixa permeabilidade (FETTER, 2001).

Çelik e Sabah (2008), em pesquisa realizada na Turquia, país com destaque na produção de rochas ornamentais, descrevem os resíduos de beneficiamento como partículas de tamanho menor do que 80 µm que se compactam e solidificam naturalmente ao serem acumulados e em contato com a água.

## Umidade

A Instrução Normativa nº 11/2016 do IEMA (ESPÍRITO SANTO, 2016) exige que a umidade dos resíduos seja menor ou igual a 30% para seu transporte e disposição em aterros. O controle do teor de umidade é considerado importante por minimizar a possível liberação de substâncias ou elementos químicos que possam causar danos ambientais. Assim, as empresas passaram a utilizar o filtro-prensa para processar os resíduos antes de seu armazenamento e/ou transporte para os aterros.

Porém, a maior parte dos resíduos antigos foram acumulados *in natura*, sem processamento preliminar ou simplesmente secos ao ar. Esse é o caso do depósito estudado, onde os resíduos não passaram por controle de umidade antes da disposição, como vem sendo feito nos aterros licenciados. O teor de umidade dos resíduos no depósito varia de 11 a 60% e a umidade natural do substrato fica na faixa de 12 a 26% (Figura 2).

Outra exigência do órgão ambiental é que a base do depósito esteja a pelo menos três metros de distância, em profundidade, relativamente ao nível da água subterrânea (ou nível freático). Esse controle também não

é procedimento comumente adotado em depósitos antigos ou nos clandestinos. No sítio estudado, o nível da água subterrânea foi encontrado, em período de estiagem, em profundidades menores do que três metros em relação à base do depósito, ou mesmo em contato com os resíduos (Figura 3). É possível que em período de chuvas os resíduos fiquem em contato com o nível do freático. Importante observar que, mesmo quando situadas abaixo do nível da água, as amostras do substrato apresentam teor de umidade menor do que as amostras de resíduo, demonstrando que a água armazenada no resíduo está presa entre as partículas, como é típico de materiais de granulação muito fina (ROWELL, 2014). Considera-se tal fato como positivo do ponto de vista ambiental, visto que as trocas de fluidos entre o material depositado e o meio tendem a ser limitadas, nesse caso.

## Potencial hidrogeniônico

Os valores de pH obtidos na primeira medida da mistura de resíduos com água deionizada ficaram na faixa de 8,4 e 10,8 (média de  $10,1 \pm 0,7$ ), enquanto as medidas após 30 minutos da mistura em repouso indicaram queda nos valores de pH, que ficou entre o valor mínimo de 6,2 e o máximo de 10,4. No substrato geológico, situado abaixo do depósito, o pH variou de 6,2 a 9,8 (média de  $7,5 \pm 0,9$ ) (Figura 4). A variação de pH com a profundidade (Figura 5) mostra a tendência geral de neutralização do pH junto ao substrato.

De acordo com a NBR 10004 (ABNT, 2004), resíduos com pH menor ou igual a 2,0 ou maior ou igual a 12,5 são classificados como perigosos.

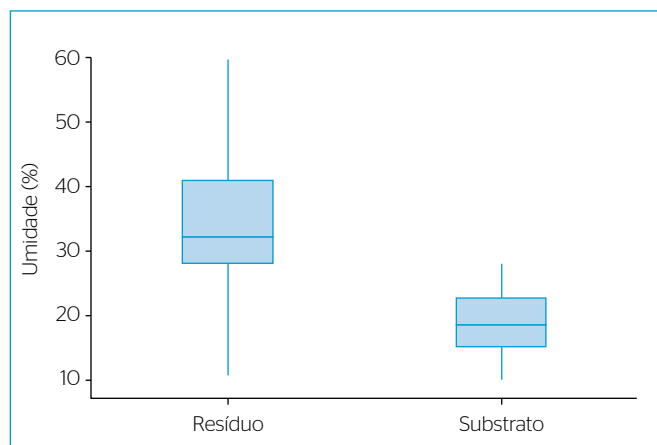


Figura 2 – Teor de umidade das amostras de resíduo e do substrato geológico.

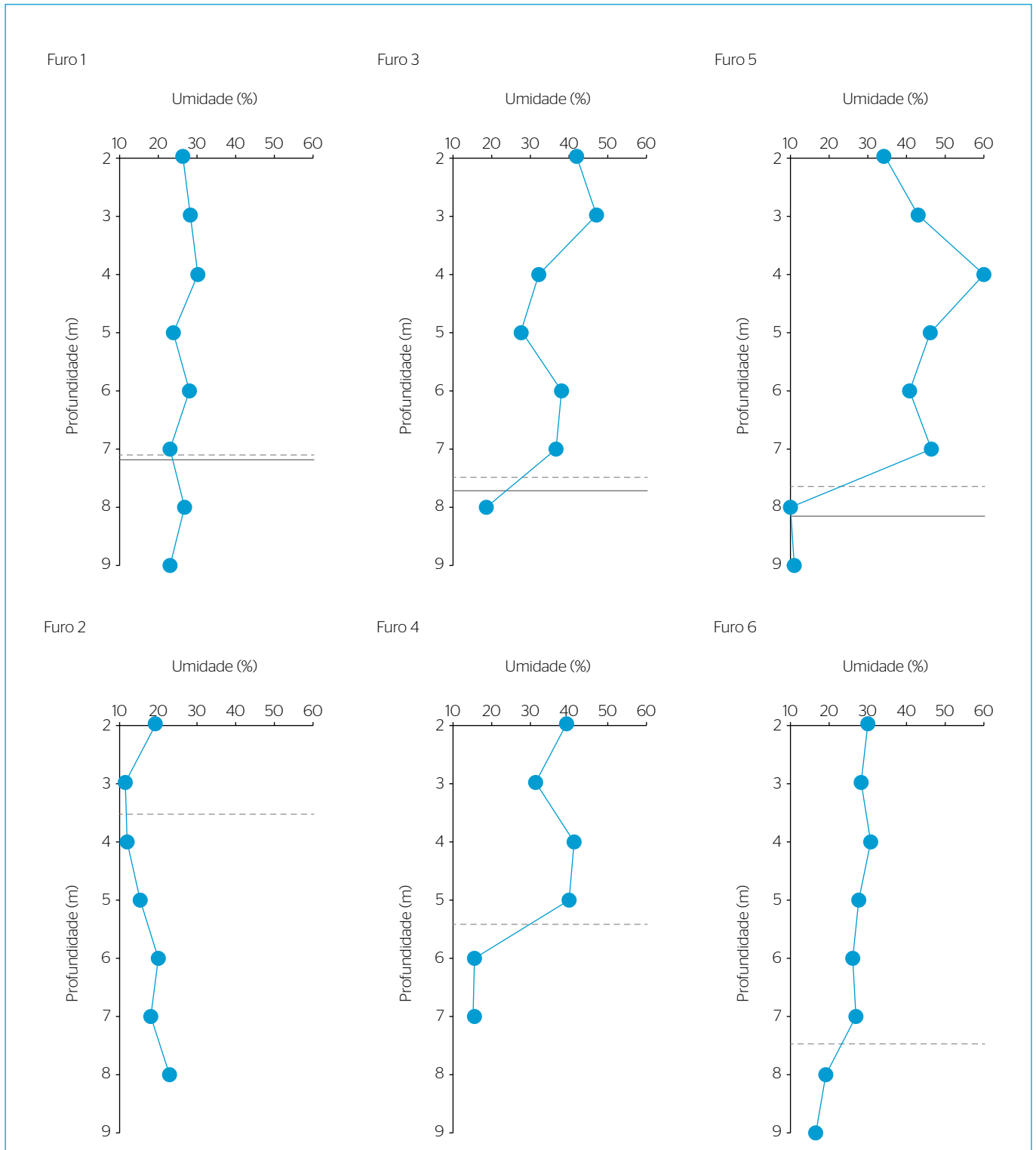
Tabela 1 - Granulometria do resíduo e do substrato abaixo do depósito\*.

| Peneira (mesh)            | #20   | #60   | #115  | #250   | Caixilho |
|---------------------------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Tamanho da partícula (mm) | 0,841 | 0,250 | 0,125 | 0,0625 | <0,0625  |
| Resíduo                   | 1     | 4     | 19    | 38     | 38       |
| Elúvio**                  | 11    | 39    | 19    | 24     | 6        |
| Colúvio***                | 18    | 50    | 18    | 10     | 5        |

\*Valores em % de partículas que passam na abertura de peneira indicada; \*\*elúvio: rocha intemperizada (gnaisse); \*\*\*colúvio: sedimentos de encosta.

Os valores de pH dos resíduos analisados estão fora das faixas de periculosidade e tendem a decair com o tempo, da mesma forma como observado por Neves *et al.* (2013). O pH do substrato também não apresenta valores anômalos. Esse depósito existe há mais de dez anos no local,

sendo assim, pode-se considerar que houve tempo suficiente para ocorrerem trocas iônicas entre o resíduo e o substrato. Assim como observado por Tozsin *et al.* (2015), o resíduo contribuiu com a elevação do pH do substrato, mas mantendo-o dentro de valores aceitáveis para solos.



**Figura 3** - Variação da umidade com a profundidade no depósito de resíduos e no substrato geológico (a linha horizontal pontilhada indica a interface entre depósito e substrato; e a linha horizontal contínua indica a posição do nível da água; os furos 2, 4 e 6 não atingiram o nível da água).

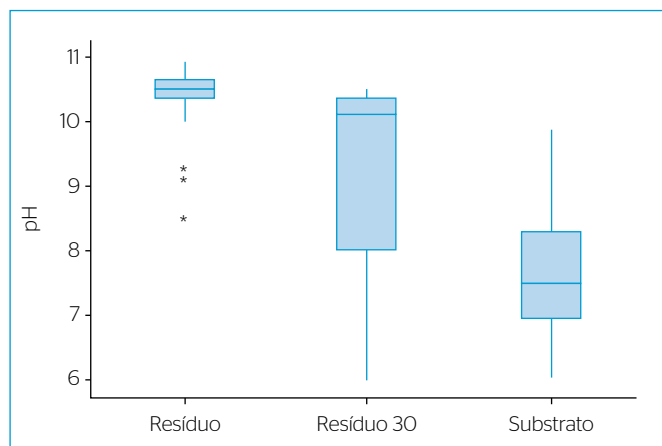
A manutenção do pH em solos é importante, pois esse parâmetro influencia na solubilização de elementos químicos. Em outras palavras, variações de pH podem causar liberação ou imobilização de metais tóxicos no ambiente. Em pH igual a 7,0, por exemplo, todos os macronutrientes estão disponíveis para as plantas, enquanto em pH elevado, elementos como Fe, Al, Zn, Mn e Cu tendem a ficar imobilizados sob a forma de hidróxidos (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1989). Alguns trabalhos já foram conduzidos buscando a correção de pH de solos acidificados em áreas mineradas, onde a utilização de pó de mármore foi eficiente na redução de metais tóxicos, não apenas do Al, mas também As, Cu, Pb, Zn e Cd (FERNÁNDEZ-CALIANI; BARBA-BRIOSO, 2010). Em associação com compostos orgânicos, esses materiais podem também contribuir para a formação de solo em áreas completamente degradadas (ZANUZZI *et al.*, 2009).

### Composição química e mineralógica

A constituição química principal das amostras, analisadas pela técnica de FRX, é apresentada na Tabela 2. A Figura 6 mostra, em termos percentuais, a distribuição dos constituintes principais nos materiais estudados. O  $\text{SiO}_2$  compõe mais da metade do material, tanto no caso do resíduo quanto no substrato, sendo que no primeiro ele é mais abundante. O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e o  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  ocorrem em maior porcentagem no substrato do que no resíduo, enquanto o  $\text{CaO}$  e o  $\text{K}_2\text{O}$  são mais abundantes no resíduo do que no substrato.

O fato de se observar maior concentração de Fe e Al no substrato do que no resíduo é esperado, visto que o intemperismo das rochas costuma causar enriquecimento relativo desses elementos durante a pedogênese (formação de solos). Um fato relevante é que, dentro do intervalo de valores de pH medidos no substrato, os metais como Fe e Al tendem a precipitar e formar óxidos e hidróxidos (HEM, 1985).

Por outro lado, o resíduo é mais rico em Ca do que o substrato devido à presença da cal utilizada como insumo durante a serragem de blocos e também pela presença de resíduo de mármore, que é uma rocha composta basicamente de carbonato de Ca (e Mg, no caso dos mármore dolomíticos).



**Figura 4** - Valores de pH medidos no resíduo logo após a mistura com água destilada, após decorridos 30 minutos (Resíduo 30) e no substrato situado abaixo do depósito.

É importante notar o teor de K, maior no resíduo do que no substrato, pois esse elemento é de extrema relevância para o enriquecimento de solos. Embora o K do resíduo provavelmente faça parte da estrutura cristalina dos minerais, alguns trabalhos indicam a possibilidade de liberação desse elemento utilizando processos de extração (*e.g.*, VALARELLI *et al.*, 1993; VARADACHARI, 1997). O  $\text{Na}_2\text{O}$  aparece apenas no percentual do resíduo, sendo que no substrato o sódio ficou incluso no grupo “outros” por ocorrer em pequenas proporções.

Das 44 análises realizadas por DRX, foram selecionados três difratogramas considerados representativos dos materiais estudados (Figura 7). No resíduo de rocha, foram detectados picos característicos do quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), plagioclásio ((Ca,Na)Al(Al,Si) $\text{Si}_2\text{O}_8$ ), microclina ( $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$ ), calcita ((Ca,Mg) $\text{CO}_3$ ), muscovita ( $\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ), biotita ( $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$ ) e zircão ( $\text{ZrSiO}_4$ ). No elúvio ocorrem minerais típicos das rochas comumente encontradas no substrato geológico da região, como o quartzo e a microclina, mas também produtos secundários característicos do intemperismo das rochas, como a caulinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), a goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) e a hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) (KLEIN; DUTROW, 2008). É interessante notar que não se identifica, no elúvio, a presença de biotita e muscovita, duas micas bastante comuns nessas rochas, o que é explicado pelo processo de intemperismo ou alteração natural ao qual as rochas foram submetidas ao longo do tempo. Com a reação natural de hidratação das micas, o K é facilmente lixiviado, deixando como resíduo a caulinita (NESBITT; YOUNG, 1984). A desestabilização da biotita libera também o ferro, formando a goethita e a hematita. Para o colúvio, observa-se a presença de caulinita, goethita e quartzo, com espectro difratométrico muito semelhante ao do elúvio. Porém, no colúvio, os picos da caulinita e goethita são atenuados devido possivelmente à fragmentação e redução na quantidade de cristais, pelo processo de transporte e deposição sedimentar.

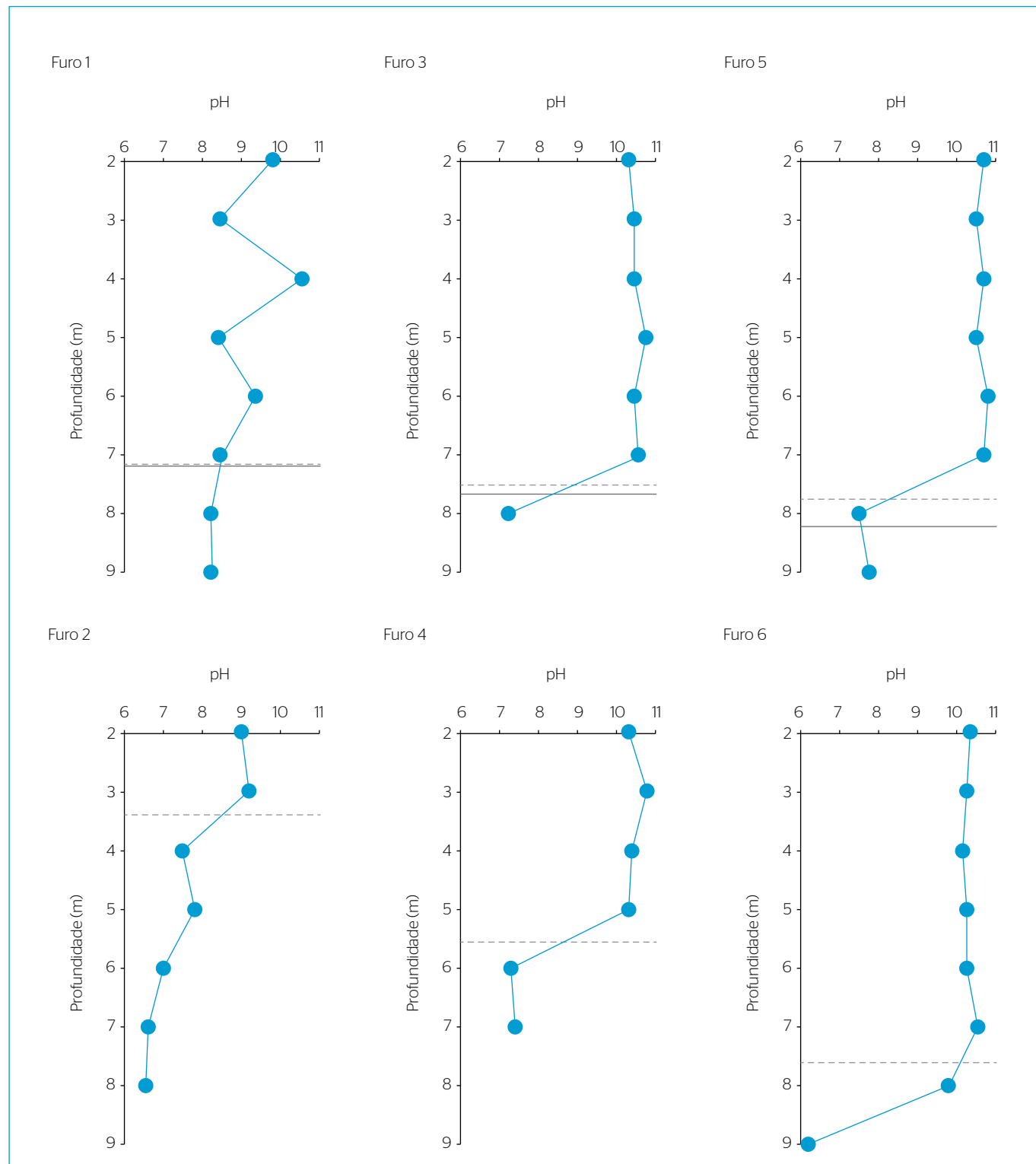
Os teores de elementos químicos (Tabela 2) e a composição mineralógica das amostras de resíduo (Figura 7) refletem a composição dos principais tipos litológicos processados pela indústria de rochas ornamentais no estado do Espírito Santo. São constituintes típicos de rochas ígneas intrusivas e de rochas metamórficas (granitoides e gnaisses), enquanto a calcita é o principal constituinte dos mármore. Os minerais identificados correspondem, portanto, ao pó da rocha que foi incorporado à lama abrasiva. Enquanto o elúvio e o colúvio refletem os materiais intemperizados que são esperados como pertencentes ao substrato geológico de toda a região, o resíduo reflete a composição de rochas não intemperizadas (ou rocha sã).

A comparação entre a composição mineral do resíduo e a do substrato (elúvio e colúvio) pode indicar que os componentes mineralógicos principais do resíduo não penetraram de forma significativa no substrato, caso contrário, seriam identificados no substrato outros minerais como calcita, biotita, muscovita, zircão e plagioclásio. Caso alguma migração tenha ocorrido, a quantidade foi menor do que 3%, que corresponde ao limite de detecção da análise por DRX.

A quantidade e o tipo de substâncias ou elementos liberados são informações fundamentais para o entendimento do real poder de impactos ambientais dos resíduos (DERMONT *et al.*, 2008). Apesar de ter sido identificada a retenção de líquidos pelo resíduo de granulação

muito fina, essa possibilidade deve ser analisada, tendo em vista a segurança na qualidade da água e do solo nos locais de aterro.

Se, por um lado, o resíduo de serragem reflete a composição da rocha processada junto ao Fe e ao Ca provenientes dos insumos utilizados em



**Figura 5** - Variação do pH com a profundidade no depósito de resíduos e no substrato geológico (a linha horizontal pontilhada indica a interface entre depósito e substrato; e a linha horizontal contínua a posição do nível da água; os furos 2, 4 e 6 não atingiram o nível da água).



teares convencionais (e.g., SANTOS; DESTEFANI; HOLANDA, 2013), a etapa de polimento possui grande potencial de fornecer substâncias mais agressivas devido aos insumos utilizados durante o processo (BRAGA

et al., 2010; KARACA; PEKIN; DELIORMANLI, 2012). Assim, consideramos que a separação dos resíduos de serragem dos de polimento seria uma maneira de assegurar o seu uso com minimização dos riscos

**Tabela 2 - Composição química dos resíduos e do substrato medida por fluorescência de raios X**

|        | Amostra | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | CaO   | MgO  | K <sub>2</sub> O | Na <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | TiO <sub>2</sub> |
|--------|---------|------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|-------------------|--------------------------------|------------------|
| Furo 1 | F1-2    | 60,57            | 12,33                          | 4,84  | 0,42 | 5,53             | 1,93              | 13,07                          | 0,51             |
|        | F1-3    | 59,02            | 13,67                          | 4,66  | 0,44 | 5,54             | 1,75              | 13,45                          | 0,63             |
|        | F1-4    | 64,07            | 12,47                          | 4,81  | 0,38 | 5,84             | 2,06              | 9,21                           | 0,45             |
|        | F1-5    | 57,41            | 11,26                          | 4,80  | 0,33 | 5,49             | 1,59              | 18,04                          | 0,46             |
|        | F1-6    | 60,13            | 11,07                          | 4,72  | 0,34 | 5,32             | 1,83              | 15,30                          | 0,40             |
|        | F1-7    | 58,85            | 13,31                          | 4,70  | 0,45 | 5,55             | 2,04              | 13,67                          | 0,55             |
|        | F1-8    | 51,50            | 27,10                          | 0,83  | 0,95 | 1,11             | 0,22              | 16,00                          | 2,01             |
|        | F1-9    | 57,10            | 24,27                          | 0,64  | 0,76 | 0,81             | 0,15              | 13,12                          | 1,95             |
| Furo 2 | F2-2    | 59,68            | 12,65                          | 4,36  | 0,36 | 5,56             | 1,77              | 14,14                          | 0,54             |
|        | F2-3    | 52,48            | 14,30                          | 5,39  | 0,83 | 3,90             | 1,12              | 20,51                          | 0,69             |
|        | F2-4    | 57,20            | 24,72                          | 0,74  | 0,31 | 2,65             | 0,15              | 10,57                          | 2,04             |
|        | F2-5    | 58,50            | 24,24                          | 0,69  | 0,28 | 2,57             | 0,13              | 10,19                          | 1,95             |
|        | F2-6    | 55,44            | 26,86                          | 0,24  | 0,80 | 2,25             | 0,00              | 11,93                          | 1,73             |
|        | F2-7    | 47,39            | 29,48                          | 0,19  | 0,92 | 2,24             | 0,00              | 17,11                          | 2,10             |
|        | F2-8    | 53,07            | 27,49                          | 0,24  | 0,91 | 2,18             | 0,00              | 13,86                          | 1,74             |
| Furo 3 | F3-2    | 50,24            | 15,17                          | 10,05 | 2,44 | 4,03             | 2,36              | 11,11                          | 2,23             |
|        | F3-3    | 58,78            | 13,31                          | 7,78  | 1,03 | 5,67             | 2,30              | 8,37                           | 1,09             |
|        | F3-4    | 62,84            | 12,94                          | 6,72  | 0,67 | 5,34             | 2,36              | 7,54                           | 0,72             |
|        | F3-5    | 67,14            | 12,45                          | 4,20  | 0,34 | 6,53             | 2,23              | 6,32                           | 0,32             |
|        | F3-7    | 61,22            | 12,98                          | 7,19  | 0,65 | 5,98             | 2,01              | 8,16                           | 0,81             |
| Furo 4 | F4-2    | 60,15            | 14,44                          | 6,87  | 0,38 | 6,21             | 2,52              | 7,79                           | 0,58             |
|        | F4-3    | 64,15            | 13,46                          | 6,44  | 0,34 | 5,87             | 2,30              | 6,35                           | 0,41             |
|        | F4-4    | 61,02            | 13,32                          | 7,20  | 0,35 | 6,38             | 2,33              | 7,89                           | 0,57             |
|        | F4-5    | 60,69            | 14,01                          | 6,80  | 0,39 | 6,30             | 2,47              | 7,73                           | 0,57             |
|        | F4-6    | 48,26            | 32,42                          | 0,16  | 0,59 | 2,04             | 0,00              | 13,99                          | 2,01             |
|        | F4-7    | 47,01            | 31,92                          | 0,15  | 0,68 | 2,08             | 0,00              | 15,67                          | 2,04             |
| Furo 5 | F5-2    | 67,28            | 12,22                          | 5,78  | 0,34 | 5,78             | 1,89              | 5,84                           | 0,42             |
|        | F5-3    | 64,72            | 13,10                          | 6,20  | 0,42 | 5,43             | 2,17              | 6,51                           | 0,52             |
|        | F5-4    | 60,74            | 12,20                          | 10,78 | 0,22 | 6,05             | 2,08              | 6,88                           | 0,38             |
|        | F5-5    | 58,43            | 13,54                          | 9,02  | 0,37 | 6,06             | 2,57              | 8,42                           | 0,52             |
|        | F5-6    | 59,93            | 12,85                          | 9,89  | 0,42 | 5,97             | 1,90              | 7,42                           | 0,54             |
|        | F5-7    | 59,31            | 12,63                          | 9,04  | 0,31 | 6,32             | 2,24              | 8,33                           | 0,52             |
|        | F5-8    | 60,15            | 12,22                          | 5,78  | 0,34 | 5,78             | 1,89              | 5,84                           | 0,42             |
| Furo 6 | F6-2    | 66,94            | 12,94                          | 3,54  | 0,72 | 5,71             | 2,34              | 6,39                           | 0,68             |
|        | F6-3    | 62,38            | 14,40                          | 4,51  | 0,86 | 5,88             | 2,67              | 7,39                           | 0,78             |
|        | F6-4    | 64,75            | 14,23                          | 3,57  | 0,56 | 5,71             | 2,62              | 7,19                           | 0,53             |
|        | F6-5    | 64,58            | 13,17                          | 3,23  | 0,51 | 5,61             | 2,55              | 9,28                           | 0,41             |
|        | F6-6    | 60,36            | 14,01                          | 4,23  | 0,88 | 6,10             | 2,55              | 9,78                           | 0,84             |
|        | F6-7    | 67,72            | 13,04                          | 3,30  | 0,62 | 5,76             | 2,39              | 5,98                           | 0,56             |
|        | F6-8    | 62,14            | 17,57                          | 4,63  | 0,49 | 4,87             | 1,75              | 7,15                           | 0,82             |

resíduos substrato



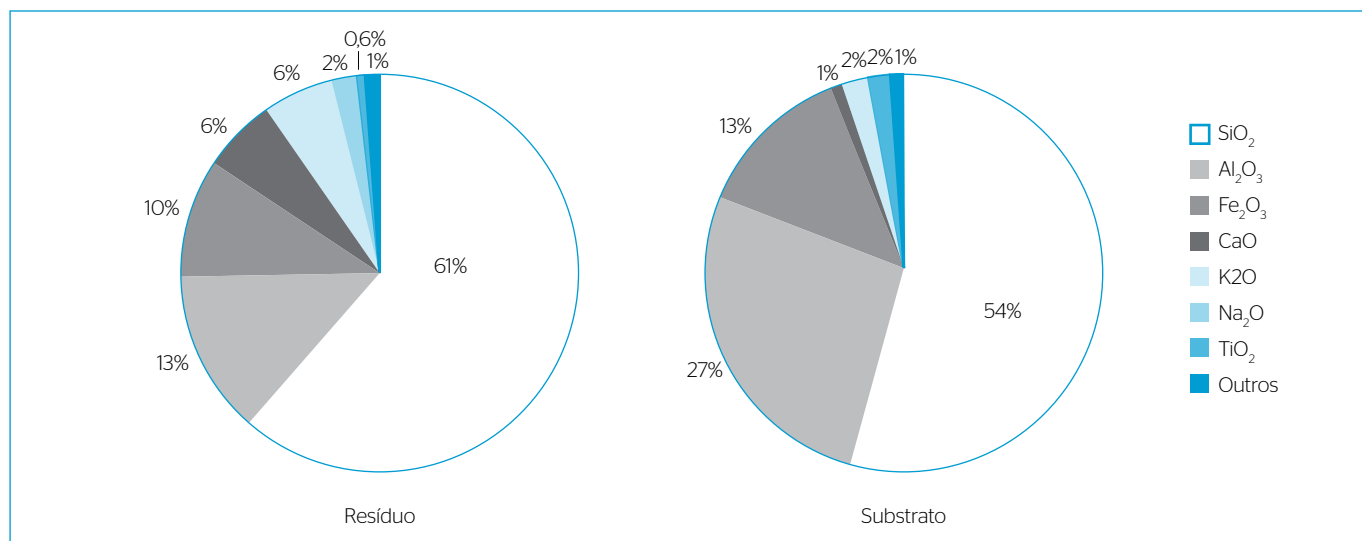


Figura 6 - Constituintes principais dos resíduos e do substrato (porcentagem média aproximada, considerando todas as amostras coletadas).

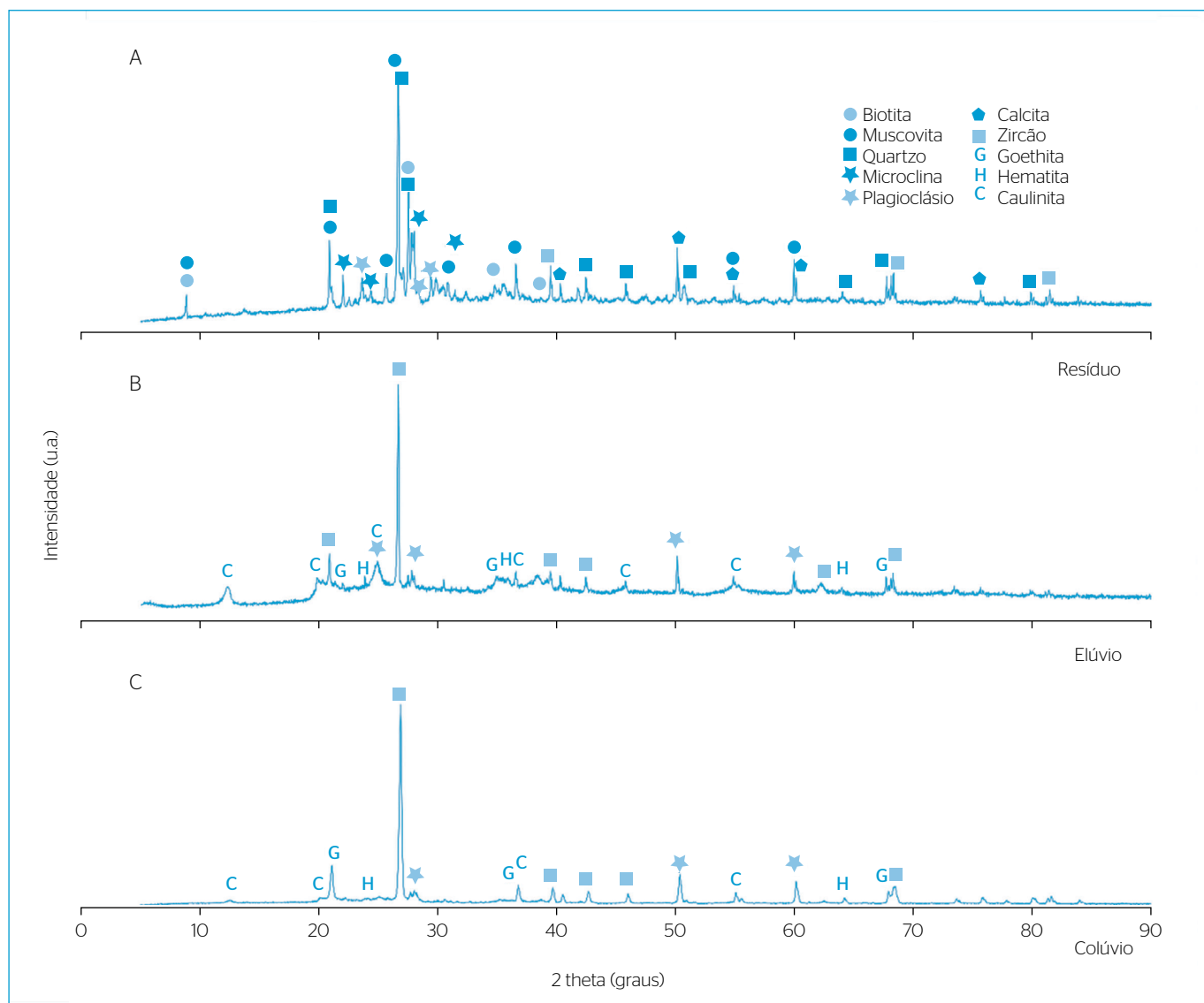
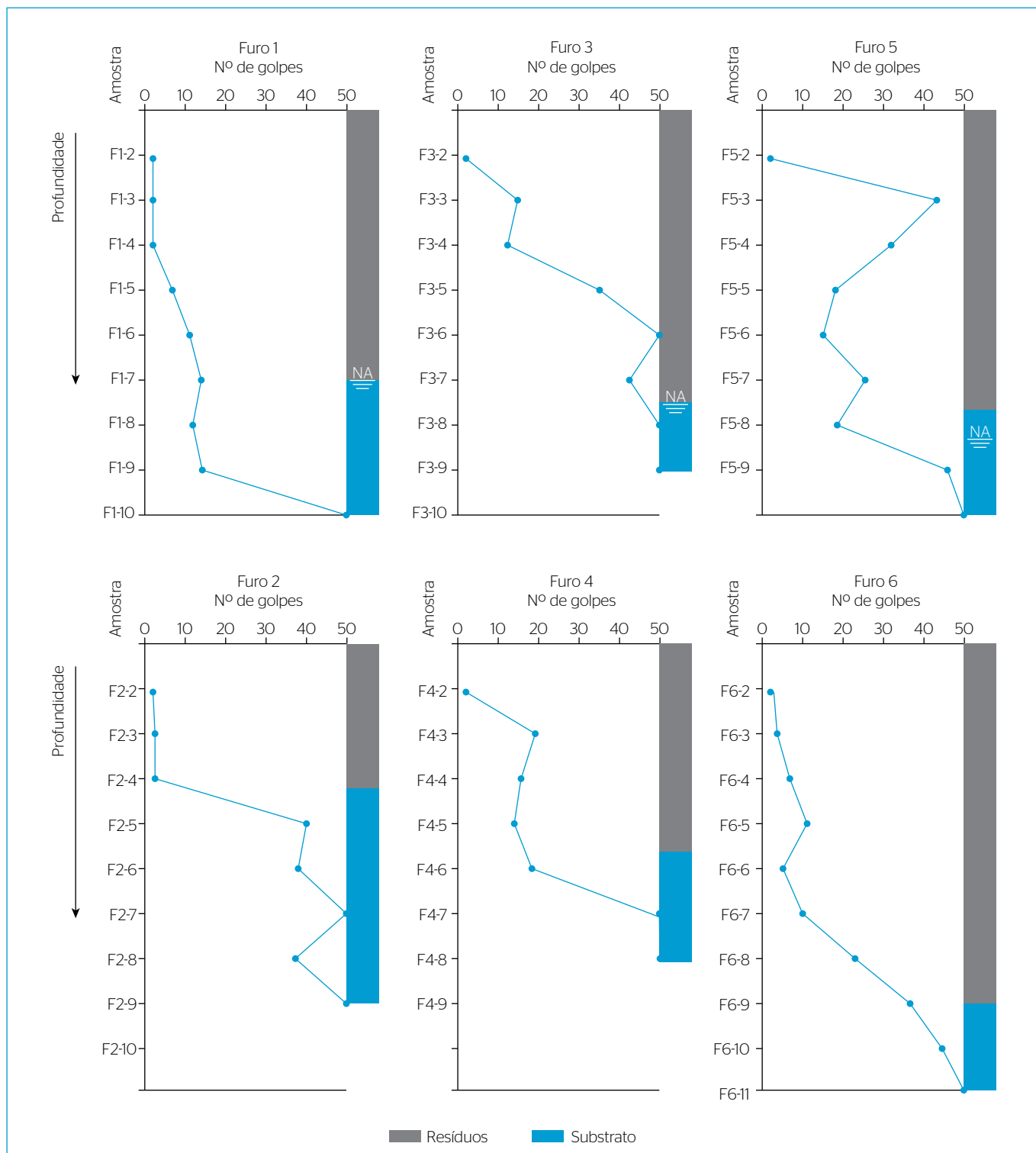


Figura 7 - Difratogramas de raios X representativos (A) dos resíduos presentes no depósito e do substrato, sendo (B) o elúvio e (C) o colúvio.

ambientais. Além de possuírem menor chance de conter contaminantes em sua composição, os resíduos de serragem são gerados em maior quantidade. O aproveitamento desses efluentes será ainda mais promissor com a substituição dos teares convencionais pelo de fios diamantados, pois seria minimizado o conteúdo de Fe e Ca dos resíduos de serragem.

### Resistência física do depósito

Os resultados dos testes de resistência física do tipo SPT (Figura 8) mostram que a camada de resíduo é, em termos gerais, pouco compacta, o que pode ser comparado a um solo de baixa resistência. O substrato, por sua vez, apresenta nível impenetrável à percussão nos primeiros três metros logo abaixo do depósito.



**Figura 8 -** Perfis dos ensaios de resistência física (sondagem *Standard Penetration Test*) no depósito de resíduos, adentrando no substrato geológico. A camada de maior resistência (impenetrável à percussão) ocorre sempre no substrato.

Assim, as camadas de resíduo não são apropriadas para apoiar fundações rasas (do tipo sapata ou bloco), mas é possível o uso de fundações profundas como estaca ou tubulão, que chegam nos níveis mais profundos do subsolo (CAMPOS, 2015). Nos furos 3 e 5, o resíduo apresenta nível bastante rígido, chegando à resistência que se denomina, nesse tipo de ensaio, como impenetrável à percussão, o qual viabilizaria o uso de fundações rasas caso a resistência se mantivesse elevada em profundidade. Os níveis de maior resistência dentro do depósito de resíduo podem ser consequência do acúmulo de granalha de aço que, após oxidação, compõe crostas lateríticas compactas.

É importante destacar que esse depósito não passou por processo de compactação artificial, conforme os procedimentos exigidos para conformação de aterros, tampouco foram secos ou desidratados conforme a normativa do IEMA. A adoção desses procedimentos certamente melhoraria as condições do depósito em termos de resistência física e estabilidade para fins de construção civil de pequena carga.

As observações colocadas anteriormente não dispensam a necessidade fundamental de se adotar todas as medidas de proteção preconizadas pelo órgão ambiental. Acrescenta-se que, em um processo efetivo de gestão de áreas potencialmente contaminadas, locais de disposição de rejeitos não são indicados para qualquer tipo de uso restritivo. Esses locais devem ser alvo de monitoramento ambiental detalhado para verificação de uma possível dispersão de elementos ou substâncias para o ambiente.

## CONCLUSÕES

Os resíduos finos de beneficiamento de rochas ornamentais armazenados no depósito estudado possuem granulção muito fina, sendo 76% das partículas de tamanho menor ou igual a 0,0625 mm. O teor de umidade dos resíduos, que fica exposto ao ar livre e acima do nível da água subterrânea, varia entre 26 e 60%. A confrontação entre os valores de umidade no depósito e no substrato indica que os resíduos possuem a propriedade de reter água.

O pH dos resíduos varia entre 8,2 e 10,5 e o do substrato, em contato direto com os resíduos, fica entre 6,2 e 9,8. Não foram observados valores de pH que indiquem periculosidade.

Na composição química dos resíduos predominam Si, Al e Fe, e em menor proporção ocorrem Ca, Na e K. Esses elementos compõem fases cristalinas correspondentes ao quartzo, plagioclásio, microclina, calcita, muscovita, biotita e zircão. A composição mineralógica do substrato apresenta basicamente quartzo e caulinita, não indicando a migração de material mineral entre o resíduo e as camadas subjacentes.

Os testes de resistência física realizados no sítio de deposição evidenciam camadas pouco compactas para receber fundações rasas (do tipo sapata ou bloco), sendo necessário, portanto, a compactação do terreno ou a utilização de fundações profundas, por exemplo, do tipo estaca ou tubulão. É provável que a concentração de Fe em alguns níveis contribua para o aumento da resistência do resíduo.

## FONTE DE FINANCIAMENTO

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES).

## REFERÊNCIAS

- ACCHAR, W.; VIEIRA, F.A.; HOTZA, D. (2006) Effect of marble and granite sludge in clay materials. *Materials Science and Engineering*, v. 419, n. 1-2, p. 306-309. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2006.01.021>
- AGUIAR, L.L.; TONON, C.B.; NUNES, E.T.; BRAGA, A.C.A.; NEVES, M.A.; DAVID, J.A. de O. (2016) Mutagenic potential of fine wastes from dimension stone industry. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 125, p. 116-120. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2015.11.035>
- ALMEIDA, N.; BRANCO, F.; SANTOS, J.R. (2007) Recycling of stone slurry in industrial activities: application to concrete mixtures. *Building and Environment*, v. 42, n. 2, p. 810-819. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.09.018>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1984) *NBR 7181: Solo - Análise Granulométrica - método de ensaio*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (1995) *NBR 6502: Rochas e Solos - terminologia*. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2001) *NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - método de ensaio*. ABNT/CB-02 - Comitê Brasileiro de Construção Civil. Rio de Janeiro: ABNT.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). (2004) *NBR 10004: Resíduos Sólidos - classificação*. Rio de Janeiro: ABNT.
- BRAGA, F.S.; BUZZI, D.C.; COUTO, M.C.L.; LANGE, L.C. (2010) Caracterização ambiental de lamas de beneficiamento de rochas ornamentais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 15, n. 3, p. 237-244.
- BRASIL. (2010) Presidência da república. *Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010*. Brasília: Casa Civil. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm)>. Acesso em: 26 abr. 2018.

- CAMPOS, J.C. (2015) *Elementos de Fundações em Concreto*. São Paulo: Oficina de Textos. 544 p.
- ÇELIK, M.Y.; SABAH, E. (2008) Geological and technical characterization of Isehisar (Afyon-Turkey) marble deposits and the impact of marble waste on environmental pollution. *Journal of Environmental Management*, v. 87, n. 1, p. 106-116. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.01.004>
- CHIODI, C.F. (2004) *Consumo interno, perfil de utilização e estrutura de comercialização das rochas ornamentais e de revestimento no Brasil*. Minas Gerais: ABIROCHAS.
- DERMONT, G.; BERGERON, M.; MERCIER, G.; RICHER-LAFLÈCHE, M. (2008) Metal-contaminated soils: remediation practices and treatment technologies. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, v. 12, n. 3. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-025X\(2008\)12:3\(188\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-025X(2008)12:3(188))
- ESPÍRITO SANTO. (2016) Secretaria 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: SEAMA/IEMA. Disponível em: <<https://sogi8.sogi.com.br/Arquivo/Modulo113.MRID109/Registro1255369/instrucao%20normativa%20iema%20n%2011%20de%2011%20102016.pdf>>. Acesso em: 4 maio 2017.
- FERNÁNDEZ-CALIANI, J.C.; BARBA-BRIOSQ, C. (2010) Metal immobilization in hazardous contaminated minesoils after marble slurry waste application - a field assessment at the Tharsis mining district (Spain). *Journal of Hazardous Materials*, v. 181, n. 1-3, p. 817-826. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.05.087>
- FETTER, C.W. (2001) *Applied Hydrogeology*. 4 ed. New Jersey: Prentice Hall. 598 p.
- FREITAS, J.J.G. de; RAYMUNDO, V.; JESUS, H.C. (2012) Características químicas dos resíduos de serragem segregados de rochas ornamentais do estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 42, n. 3, p. 615-624. <http://dx.doi.org/10.5327/Z0375-75362012000300014>
- FYFE, W.; LEONARDOS, O.H.; THEODORO, S.C.H. (2006) Sustainable farming with native rocks: the transition without revolution. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 78, n. 4, p. 715-720. <http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652006000400007>
- HEM, J.D. (1985) *Study and Interpretation of Chemical Characteristics of Natural Water*. 3. ed. Alexandria: United States Geological Survey - USGS. 264 p.
- KABAS, S.; FAZ, A.; ACOSTA, J.A.; ZORNOZA, R.; MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S.; CARMONA, D.M.; BECH, J. (2012) Effect of marble waste and pig slurry on the growth of native vegetation and heavy metal mobility in a mine tailing pond. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 123, p. 69-76. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.07.008>
- KARACA, Z.; PEKIN, A.; DELIORMANLI, A.H. (2012) Classification of dimension stone wastes. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 19, n. 6, p. 2354-2362. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-012-0745-z>
- KLEIN, C.; DUTROW, B. (2008) *Manual of Mineral Science*. Nova Jersey: John Wiley & Sons. 675 p.
- MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. (1989) *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. Piracicaba: Potafos. 201 p.
- MENEZES, R.R.; FERREIRA, H.S.; NEVES, G.A.; FERREIRA, H.C. (2002) Uso de rejeitos de granitos como matérias-primas cerâmicas. *Cerâmica*, São Paulo, v. 48, n. 306, p. 92-101. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132002000200008>
- MOREIRA, J.M.S.; FREIRE, M.N.; HOLANDA, J.N.F. (2003) Utilização de resíduo de serragem de granito proveniente do estado do Espírito Santo em cerâmica vermelha. *Cerâmica*, São Paulo, v. 49, n. 312, p. 262-267. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-69132003000400012>
- NESBITT, H.W.; YOUNG, G.M. (1984) Prediction of some weathering trends of plutonic and volcanic rocks based on thermodynamic and kinetic considerations. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 48, n. 7, p. 1523-1534. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90408-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90408-3)
- NEVES, M.A.; NADAI, C.P.D.; FONSECA, A.B.; PRADO, A.C.A.; GIANNOTTI, J.G.; RAYMUNDO, V. (2013) pH e umidade dos resíduos finos de beneficiamento de rochas ornamentais. *Revista Escola de Minas*, v. 66, n. 2, p. 239-244. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672013000200016>
- OLIVEIRA, C.N.; RIBEIRO, R.C.C.; QUEIROZ, J.P.C. (2010) *Aplicação de resíduos de mármore na produção de cosméticos*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral - CETEM. (Série Tecnologia Ambiental.)
- PÉREZ-SIRVENT, C.; GARCÍA-LORENZO, M.L.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, M.J.; NAVARRO, M.C.; MARIMÓN, J.; BECH, J. (2007) Metal-contaminated soil remediation by using sludges of the marble industry: Toxicological evaluation. *Environment International*, v. 33, n. 4, p. 502-504. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2006.11.003>
- PRADO, A.C.; TAGUCHI, S.P.; NEVES, M.A.; SOARES, R.H.; FONSECA, A.B. (2012) Use of fine wastes from dimension stone industry in the manufacture of ceramic. *Materials Science Forum*, v. 727-728, p. 703-709. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.727-728.703>
- RAYMUNDO, V.; NEVES, M.A.; CARDOSO, M.S.N.; BREGONCI, I.S.; LIMA, J.S.S.; FONSECA, A.B. (2013) 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. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000100007>
- ROWELL, D.L. (2014) *Soil Science: Methods & Applications*. Nova York: Routledge. 368 p.
- SPARKS, D.L. (2003) *Environmental Soil Chemistry*. San Diego: Elsevier. 352 p.
- SANTOS, M.M.A.; DESTEFANI, A.Z.; HOLANDA, J.N.F. (2013) Caracterização de resíduos de rochas ornamentais provenientes de diferentes processos de corte e beneficiamento. *Matéria*, v. 18, n. 4, p. 1442-1450. <http://dx.doi.org/10.1590/S1517-70762013000400005>

TAGUCHI, S.P.; SANTOS, J.C.; GOMES, T.M.; CUNHA, N.A. (2014) Avaliação das propriedades tecnológicas de cerâmica vermelha incorporada com resíduo de rocha ornamental proveniente do tear de fio diamantado. *Cerâmica*, v. 60, n. 354, p. 291-296. <http://dx.doi.org/10.1590/S0366-691320140002000020>

THEODORO, S.H.; LEONARDOS, O.H. (2006) The use of rocks to improve family agriculture in Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 78, n. 4, p. 721-730. <http://dx.doi.org/10.1590/S0001-37652006000400008>

TOZSIN, G.; OZTAS, T.; AROL, A.I.; KALKAN, E. (2015) Changes in the chemical composition of an acidic soil treated with marble quarry and marble cutting wastes. *Chemosphere*, v. 138, p. 664-667. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.07.063>

VALARELLI, J.V.; NOVAIS, R.F.; VAZ DE MELO, M.T.; LEAL, E.D. (1993) Ardósias verdetes de Cedro do Abaeté na produção de termofosfato potássico fundido e sua eficiência agrônômica. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 65, n. 4, p. 363-375.

VARADACHARI, C. (1997) Potash fertilizer from biotite. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 36, n. 11, p. 4768-4773. <https://doi.org/10.1021/ie970220u>

ZANUZZI, A.; AROCENA, J.M.; VAN MOURIK, J.M.; FAZCANO, A. (2009) Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma*, v. 154, n. 1, p. 69-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.09.014>

