

**EFEITO DA INTEMPÉRIE EM ARENITOS SILICIFICADOS: ESTUDOS  
SOBRE VARIAÇÃO DE CARACTERÍSTICAS DO ARENITO POROSO  
VERMELHO APÓS LONGOS PERÍODOS DE INTEMPÉRIE, POR MEIO DA  
ALTERAÇÃO QUÍMICA**

Alexandre M.D.P. Coelho <sup>1</sup>; Denise B. Menezes <sup>2</sup>

**Resumo** – Os arenitos silicificados da formação Botucatu vêm, há séculos, sendo utilizados pela indústria de construção civil da região de São Carlos e Araraquara. Um desses litotipos, o arenito poroso vermelho (doravante referido como APV) vem sendo tratado como rejeito da extração de litotipos mais silicificados comercializados (arenitos vermelho e amarelo). Com o intuito de reduzir a produção de rejeitos, a indústria de extração de rochas da região vem manifestando interesse no aproveitamento do APV. Tendo este intuito em mente, esta pesquisa foi realizada com o objetivo de expandir os estudos de viabilidade do APV realizados anteriormente por pesquisadores da área. As avaliações foram feitas por meio dos efeitos do uso de ácido muriático em amostras de APV através de verificação da variação de valores como massa, tenacidade em placas e índices físicos em amostras após exposição a este ácido comum na limpeza de rochas e indícios de seus efeitos negativos no litotipo. Os resultados demonstram como o uso do ácido muriático em superfícies de APV causam alterações severas das qualidades estruturais e cosméticas da rocha.

**Abstract** – The silicified sandstones of the Botucatu formation have been, for centuries, used by the civil engineering industry of the region of the São Carlos and Araraquara municipalities. One of the Botucatu's lithotypes, red porous sandstone (henceforth named RPS), is regarded as a waste product of the extraction of other of the most silicified lithotypes commercialized (red and yellow sandstones). With the intention of reducing waste creation, the quarrying industry in the region have shown interest in the use of RPS. With these questions in mind, this research was executed with the objective of expanding upon previous RPS viability studies executed by researchers of the field. The research was intended to determine the effects of the use of muriatic acid in samples of RPS by means of determining changes in values like mass, resistance to impact and other physical indexes after exposure to the acid common in rock cleaning and evidence of negative effects in the lithotype. The results show that use of muriatic acid in surfaces made of RPS led to severe alterations of the rock's structural and cosmetic qualities.

**Palavras-Chave** –Alteração acelerada, Placas pétreas, Impacto de corpo duro.

---

<sup>1</sup> Grad., Eng. Civil, Universidade Federal de São Carlos, alexandre.petrini@estudante.ufscar.br

<sup>2</sup> Geol., Profa., Dra., Universidade Federal de São Carlos, denisebm@ufscar.br

## 1. INTRODUÇÃO

Os arenitos silicificados da formação Botucatu foram extensivamente utilizados pela indústria de engenharia civil da região de São Carlos como rochas ornamentais para uso em calçamentos e paredes e ainda possuem usos em calçamentos. Um dos litotipos que ocorrem nas áreas de extração é o arenito poroso vermelho (APV) que, apesar de ser considerado como rejeito da extração de outros arenitos, vem tendo sua viabilidade para uso como rocha ornamental estudada por pesquisadores do departamento de engenharia civil da UFSCar como Moraes (2018).

Devido a seu uso como revestimentos e calçamentos, rochas ornamentais como o arenito estão frequentemente expostas às intempéries naturais e alterações químicas causadas pelas atividades humanas, normalmente por processos de limpeza. A execução desses processos sem o conhecimento dos efeitos que os produtos empregados possam vir a causar na rocha podem levar à aceleração da alteração da mesma e o surgimento de patologias.

Para a aplicação de rochas de revestimento, devem ser levadas em consideração três variáveis: a proteção da estrutura no âmbito dos efeitos de alteração provocados pelo ambiente; a adequação ao uso em termos das características físico-mecânicas da rocha, como absorção d'água, condutividade térmica, resistência à flexão, desgaste, tração e impacto; e as qualidades estéticas da mesma, levando em consideração as tendências do mercado e os desejos do cliente. (PARAGUASSU et al., 2017).

Ensaio de índices físicos e de resistência para rochas de revestimento são normatizados segundo NBR 15845, partes 1 a 8 (ABNT 2015). Já os ensaios de alteração acelerada com objetivo de determinar mudanças nas características das rochas utilizadas para revestimento não são normatizados no Brasil. Diversos ensaios com esta finalidade foram elaborados por Frascá (2003), visando estabelecer uma metodologia para ensaios de alteração acelerada que permitam antecipar as alterações sofridas pelas rochas de revestimento em situação de uso, adequada à realidade brasileira.

Portillo (1988), em estudo dos arenitos silicificados da Formação Botucatu na região, verificou materiais de extrema dureza e resistência apresentadas em ensaios mas já observava a grande heterogeneidade que ocorre, possível de ser constatada nas pedreiras da região, que apresentam interações de camadas mais silicificadas, com camadas com acréscimo de óxido de ferro e outras friáveis. Para caracterizá-los realizou em amostras distintas, diversos ensaios de resistência física e também resistência a ácido clorídrico (HCl) e hidróxido de sódio (NaOH). Destes ensaios, concluiu que “O material mostrou-se resistente a essas soluções.”

Ensaio em vários exemplos de arenitos silicificados da formação Botucatu foram feitos por Porto (2016) em amostras extraídas de pedreiras do município, incluindo o APV. Foi observado durante ensaios de absorção d'água do APV que algumas amostras atingiam a massa saturada somente alguns minutos após o início do teste, indicando altos valores de absorção de água. Além do mais, foi observada a “inconstância desta rocha em relação à absorção e à evaporação da água”, devido a valores intermediários de absorção superiores aos finais.

A viabilidade do uso do APV como rocha ornamental para revestimento foi estudada por Moraes (2018) que realizou ensaios de caracterização tecnológica como diferentes tipos de secagens, índices físicos, impacto de corpo duro e alteração química. A partir dos resultados obtidos do ensaio de alteração acelerada realizados segundo a metodologia criada por Frascá (2003), Moraes conclui que o litotipo tem baixa resistência ao ácido muriático e ao hidróxido de sódio, apesar de apresentar excelentes resultados no intuito de secagem rápida ao sol e à sombra.

A potencial aplicação do litotipo na indústria de construção civil, como rocha ornamental/ de revestimento, implica que o APV será invariavelmente submetido a processos de limpeza, utilizando produtos químicos comuns como o ácido muriático. Por isso é de extrema importância determinar quais são os efeitos causados por produtos de limpeza, de modo a maximizar a vida útil da rocha nesta aplicação.

## 2. OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo determinar as alterações das características do arenito poroso APV já intemperizado naturalmente, após exposição ao ácido muriático (ácido clorídrico impuro), conforme procedimento proposto por Frascá (2003).

Outros objetivos foram:

- Observar alterações visuais indesejáveis no contexto do uso ornamental das rochas, buscando contribuir com a previsão de problemas advindos do intemperismo natural ou do uso de produtos empregados em limpeza de rochas.
- Avaliar possíveis utilizações ou impedimentos de uso do litotipo em revestimentos.

## 3. METODOLOGIA

Para realização da pesquisa foram seguidas as etapas apresentadas na no fluxograma da Figura 1.

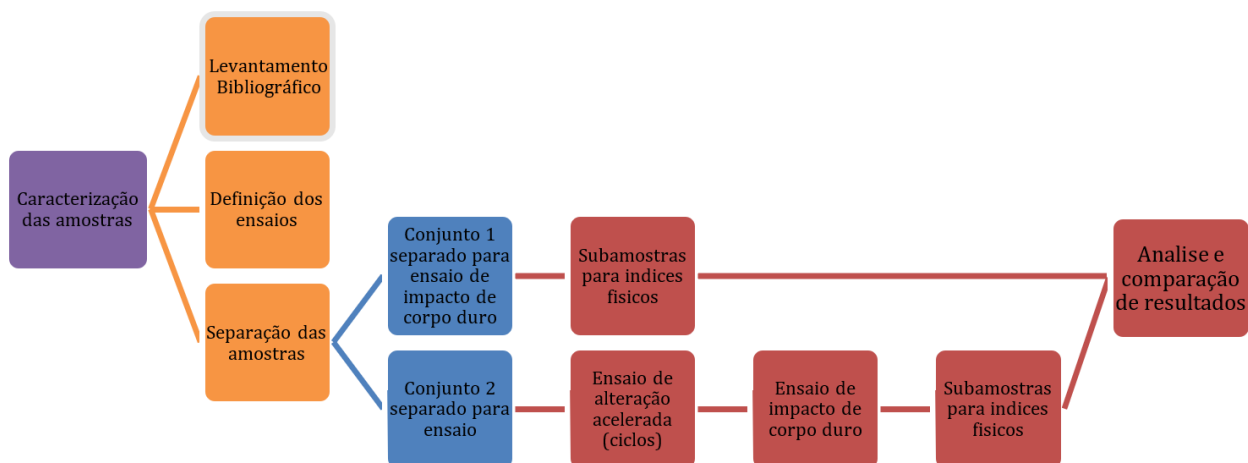


Figura 1. Fluxograma das etapas da pesquisa

As metodologias adotadas seguiram procedimentos de normas da ABNT e outros não normatizados, desenvolvidos por Frascá (2013) e adotados por Moraes et al. (2018).

### 3.1 Separação das amostras

As amostras, que estavam expostas ao tempo, (Figura 2) foram separadas em 5 pares de corpos com características de densidade, textura e aparência semelhantes; estes pares então foram separados em dois grupos experimentais (1 e 2), cada um tendo um representante de cada par.



Figura 2. Placas do conjunto 2 antes do ensaio de alteração acelerada.

### 3.2 Procedimento para o ensaio de alteração acelerada

Foi utilizada a metodologia criada por Frascá (2003) a partir de normas internacionais, devido à falta de normatização nacional, para o ensaio de alteração acelerada em rochas de revestimento. A partir desta metodologia foram determinados os procedimentos para a execução deste ensaio em amostras de APV: placas nas dimensões de 200mm x 200mm e espessura de uso foram pesadas e deixadas em imersão parcial no ácido muriático por um período de 30 dias, com observações diárias e troca de solução a cada dois dias; após isso, os corpos foram secos ao ar por mais 30 dias e finalmente secos em estufa e sua massa final foi determinada. O objetivo destes ensaios é simular de maneira acelerada as alterações sofridas por rochas de revestimento em diversas situações. Estas amostras foram posteriormente sujeitas ao impacto de corpo duro.

### 3.3 Ensaios segundo as normas ABNT

#### 3.3.1 Ensaio de Impacto de corpo duro

Foi utilizada a norma NBR 15845-8 (ABNT 2015b) que trata sobre o ensaio de impacto de corpo duro em rochas ornamentais, delineando as características necessárias do equipamento, dimensões das amostras a serem testadas, execução do ensaio, análise de resultados e elaboração do relatório final. As placas utilizadas seguiram a norma, que dita que as placas tenham dimensões de 200mm x 200mm e espessura de uso. Foram dois conjuntos de placas ensaiados, sendo o primeiro com placas de rochas deixadas por aproximadamente 2 anos expostas ao tempo e o segundo com placas deixadas à intempérie natural e posteriormente submetidas ao ensaio de alteração acelerada.

#### 3.3.2 Ensaio de índices físicos

Foi utilizada a norma NBR 15845-2 (ABNT 2015a) que trata sobre a execução de ensaios de índices físicos como absorção de água, densidade aparente e porosidade aparente. Como os ensaios estavam sendo realizados com placas, e foram ensaiadas amostras destas placas antes e após o ensaio de intemperismo, os formatos dos corpos de prova não foram os da norma, mas sim placas com dimensões 5x5x1 cm. As sub amostras foram retiradas das placas, sendo parte antes do ensaio de intemperismo acelerado e as demais das placas já ensaiadas, para comparações.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Impacto de corpo duro do conjunto 1

A energia de ruptura das placas do conjunto 1 foi, em média, 8,237 J, com valor mediano de 7,355 J e moda de 5,884 J. O desvio padrão (s) dos resultados foi de 3,457 J, com coeficiente de variação ( $\delta$ ) de 41,963%, indicando uma variabilidade grande dos resultados (Tabela 1). A placa 7 precisou de uma altura de impacto considerada “anômala” para romper, sendo essa ao redor de 2 vezes maior que a média das outras amostras. Estas características de rompimento da placa e seu aspecto, levaram-nos a considerá-la mais silicificada.

Tabela 1. Alturas e energias de ruptura do conjunto 1.

Corpo	Altura de ruptura [m]	Energia de ruptura [J]
1	0,750	7,355
2	0,800	7,845
4	0,600	5,884
7	1,450	14,219
10	0,600	5,884

Retirando a placa anômala (7) da consideração dos resultados (para representar os valores de uma população de amostras mais generalizada), temos uma média de 6,742 J, moda de 5,884J, mediana de 6,619 J. O novo desvio padrão (s) é 1,011 J e o novo coeficiente de variação ( $\delta$ ) foi de 14,993%.

### 4.2 Alteração acelerada do conjunto 2

Após a realização do ensaio de alteração acelerada, as placas afetadas apresentaram não só um exagero na sua coloração avermelhada, mas também um escurecimento de certas áreas e a aparição de regiões esbranquiçadas causadas pela cristalização de cristais de composição desconhecida, aspecto acicular e coloração branca (Figura 3).



Figura 3. Face da placa 3 após o ensaio, com áreas descoloridas amareladas e partes com cristais brancos precipitados, ao meio.

A massa das amostras após a imersão parcial em ácido foi reduzida, em média, 456,800 g (23,19%), com valores medianos de 434 g e 23,33 %. O desvio padrão (s) da variação de massa foi de 65,952g e 2,118% para porcentagem de perda. Estes valores levam à coeficientes de variação

( $\delta$ ) de 14,438% (massa) e 9,133% (porcentagem de perda). Os conjuntos foram amodais. (Tabela 2).

Tabela 2. Cálculo de variação de massa das placas do conjunto 2.

Corpo	Massa inicial (g)	Massa final (g)	Variação de massa (g)	Porcentagem de variação
3	1949	1515	434	22,27
5	2015	1545	470	23,33
6	1688	1260	428	25,36
8	2263	1700	563	24,88
9	1935	1546	389	20,10

A perda de ao redor de 25% da massa dos litotipos e as mudanças de coloração dão indícios de perda da cimentação de óxido de ferro das placas, corroborada pela coloração amarronzada da solução residual do ensaio de alteração química.

#### 4.3 Impacto de corpo duro do conjunto 2 e comparação com o conjunto 1

A média da energia de ruptura do conjunto 2 foi de 4,413 J, o conjunto de resultados é bimodal (4,413 J e 3,922 J), com valor médio de 4,413 J. O desvio padrão (s) foi de 0,600 J e o coeficiente de variação ( $\delta$ ) foi de 13,608%, similar ao  $\delta$  do grupo 1 (14,993%), quando desconsiderada a placa 7 (Tabela 3).

Tabela 3. Alturas e energias de ruptura do conjunto 2.

CORPO	Altura de ruptura [m]	Energia de ruptura [J]
3	0,550	5,393
5	0,450	4,413
6	0,400	3,922
8	0,400	3,922
9	0,450	4,413

Inicialmente, a média dos valores de diferença de energia ( $\Delta w$ ) e porcentagem de variação foi de 3,824 J e 39,149 %, respectivamente. Os desvios padrões obtidos foram 3,851 J e 24,366%, levando a valores altíssimos de coeficientes de variação ( $\delta$ ): 101% para diferença de energia e 62% para porcentagem de variação. Isto se deve aos valores obtidos do par experimental "E", que contém a placa 7, designada anômala por causa de sua elevada tenacidade (Tabela 4).

Tabela 4. Cálculo de variação de energias de ruptura entre os conjuntos experimentais.

Par (placas)	Energia conjunto 1 [J]	Energia conjunto 2 [J]	Diferença de energia [J]	Porcentagem de variação
A (4,3)	5,884	5,393	0,490	8,333 %
B (1,5)	7,355	4,413	2,942	40,000 %
C (2,6)	7,845	3,922	3,922	50,000 %
D (10,9)	5,884	4,413	1,471	25,000 %
E (7,8)	14,219	3,922	10,296	72,414 %

Retirando-se o par experimental "E" da consideração para elaboração dos cálculos com fim de obter valores mais representativos daqueles que são encontrados mais comumente no litotipo estudado; obtemos valores de média de 2,206 J ( $\Delta w$ ) e 30,833 % (porcentagem de variação),

desvios padrões de 1,524 J e 18,181% e coeficientes de variação ( $\delta$ ) para diferença de energia e porcentagem de variação de 69% e 59%, respectivamente.

#### 4.4 Índices físicos

O ensaio de índices físicos foi realizado em dois grupos de sub amostrais provenientes do conjunto experimental 2, denominados A e B. O grupo A é composto por partes das amostras 3,5,6,8 e 9 que foram cortadas antes do ensaio de alteração acelerada e, portanto, denominado de “grupo são”. O grupo B é composto de partes das mesmas amostras que foram alteradas e pode ser chamado de “grupo alterado” (Figura 4).

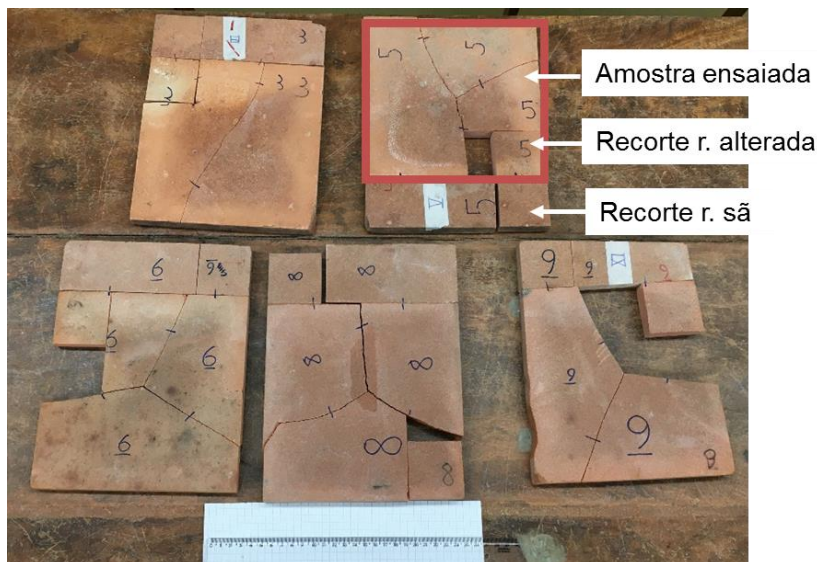


Figura 4. Sub amostras para índices físicos retiradas dos recortes das amostras sãs (conjunto A) e das amostras alteradas ensaiadas (conjunto B).

Os grupos foram ensaiados simultaneamente e os resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Valores de massa das amostras.

ID do corpo	Estado	Msub	Msat	Msec
3A	São	64,170	118,920	112,790
3B	Alterado	63,020	117,600	111,360
5A	São	66,800	122,980	117,310
5B	Alterado	71,310	131,330	125,540
6A	São	65,390	122,640	114,970
6B	Alterado	59,880	114,680	105,170
8A	São	72,830	133,690	126,220
8B	Alterado	76,980	140,940	133,390
9A	São	71,530	131,300	123,300
9B	Alterado	72,920	133,820	125,210

Onde:  $M_{sub}$  é a massa submersa dos corpos;  $M_{sat}$  é a massa saturada dos corpos;  $M_{sec}$  é a massa seca dos corpos.

#### 4.4.1 Densidade aparente

No geral, o valor de densidade aparente das amostras foi reduzido como resultado da alteração pelo ácido muriático. No entanto, houve exceções: as placas 5 e 8 sofreram um aumento da densidade aparente. (Tabela 6).

Tabela 6. Resultados de densidade aparente ( $\rho_a$ )

ID do corpo	$\rho_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]
3A	2060,091
3B	2040,308
5A	2088,110
5B	2091,636
6A	2008,210
6B	1919,161
8A	2073,940
8B	2085,522
9A	2062,908
9B	2055,993
Média Sã	2058,652
Média Alt	2038,524

Isto pode ter ocorrido devido à cristalização de sais dentro dos poros das placas, flutuações dos valores medidos pela balança, “aprisionamento” de água por capilaridade em poros parcialmente preenchidos por cimentos e/ou outras impurezas ou, como notado por Porto (2016) na discussão de seus ensaios de índices físicos em arenitos Botucatu porosos, à rápida absorção de água e umidade do ar pelas placas, podendo afetar os resultados das medições.

#### 4.4.2 Porosidade aparente

A variação da porosidade aparente das placas se deu de maneira inversamente proporcional aos valores de densidade aparente: o conjunto passou por um aumento dos valores de porosidade aparente, com exceção das placas 5 e 8. A redução do valor de  $\eta_a$  destas placas pode corroborar a teoria da cristalização de sais nos poros das mesmas. (Tabela 7).

Tabela 7. Resultados de porosidade aparente ( $\eta_a$ )

ID do corpo	$\eta_a$ %
3A	11,196
3B	11,433
5A	10,093
5B	9,647
6A	13,397
6B	17,354
8A	12,274
8B	11,804
9A	13,385
9B	14,138
Média Sã	12,069
Média Alt	12,875



#### 4.4.3 Absorção de água

O valor de absorção de água segue, por natureza, o valor de porosidade aparente: houve um aumento geral com reduções nas placas 5 e 8 (Tabela 8).

Tabela 8. Resultados de absorção de água

ID do corpo	Absorção %
3A	5,435
3B	5,603
5A	4,833
5B	4,612
6A	6,671
6B	9,043
8A	5,918
8B	5,660
9A	6,488
9B	6,876
Média Sã	5,869
Média Alt	6,359

## 5. CONCLUSÕES

Ao final dos ensaios realizados, foi possível constatar que as heterogeneidades observadas entre as amostras do mesmo litotipo são suficientes para obtermos alguns resultados díspares, como no caso da placa 7 não alterada e sua resistência elevada observada no ensaio de impacto de corpo duro. Sem os seus dados que foram de 14,219 J, a média da energia de ruptura foi de 6,742 J para as placas de rochas não alteradas.

Os efeitos do ácido muriático nas placas que passaram por alteração acelerada foram evidentes. Considerando as amostras ensaiadas no impacto de corpo duro, a média da energia de ruptura foi de 4,413 J, 30,83% menor que das rochas não alteradas. Estas placas alteradas também apresentaram uma perda de massa média de 23,19 % e também de densidade aparente, que foi de 2058,65 kg/m<sup>3</sup> nas sub amostras sãs, para 2038,52 kg/m<sup>3</sup> nas alteradas. Considerando-se as mudanças de coloração da rocha, são claros os indícios de perda da cimentação de óxido de ferro, corroborada pela coloração amarronzada da solução residual do ensaio de alteração química. A alteração causa perdas de massa e resistência.

No geral, comparando-se as sub amostras sãs e alteradas, houve aumento de porosidade e de % de absorção de água, acompanhando a diminuição da densidade aparente, exceto para as sub amostras das placas 5 e 8, que apresentaram valores aumentados, indicando a necessidade de uma investigação a estrutura interna das rochas, por meio de lâminas petrográficas.

As mudanças visuais nos arenitos alterados foram muito evidentes e desabonadoras para a o uso das placas, que apresentaram não só variações de coloração mas também o aparecimento de crescimento de cristais de composição desconhecida, aspecto acicular e coloração branca. Apesar de não ter sido possível determinar a composição dos cristais no momento, é sabido que foram criados como resultado de precipitação da solução contendo o ácido muriático e os produtos da reação do mesmo com o arenito poroso vermelho.

## AGRADECIMENTOS

Ao Laboratório de Geociências, ao Laboratório de Geotecnia, ao Laboratório de Estradas, ao Laboratório de Materiais de Construção e aos técnicos Marcão, Zé, Bill, do DECiv. Projeto PUICT aprovado pela ProPq – UFSCar.

## REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15845-2*: Rochas para revestimento - Parte 2: Determinação da densidade aparente, da porosidade aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2015a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *ABNT NBR 15845-8*: Rochas para revestimento - Parte 8: Determinação da resistência ao impacto de corpo duro. Rio de Janeiro: ABNT, 2015b.

FRASCÁ, M.H.B.O. *Estudos experimentais de alteração acelerada em rochas graníticas para revestimento*. Tese de doutorado (Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia), Instituto de Geociências USP, SP, Brasil, 2003.

MORAES, D. C. *Ensaio tecnológico em Arenitos silicificados: estudo de aproveitamento de rejeito da extração mineral*. Relatório de Iniciação Científica, (PIBIT, CNPq), DECiv, CCET, UFSCar. São Carlos, SP, 2018.

MORAES, D. C.; PORTO A. C.; MENEZES D. B.; BONUCELLI T. J. Ensaio tecnológico em arenitos silicificados: estudo de aproveitamento de rejeito da mineração. In: 16º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2 a 6 de setembro de 2018, Maksoud Plaza Hotel | São Paulo | SP. *Anais* [...]. São Paulo: ABGE, 2018 artigo 139, 10p. Disponível em: <http://www.schenautomacao.com.br/cbge/anais/trabalhos.php>, Acesso em 18 de agosto de 2020.

PARAGUASSÚ, A.B. (Org.); RODRIGUES, J.E. (Org.); RIBEIRO, R. P. (Org.); FRAZÃO, E. B. (Org.). *Indústria da Pedra: da Extração à Aplicação Final*. 2. ed. , 2017. 143p.

PORTILLO, E. Z. F. *Considerações sobre a caracterização tecnológica, a exploração e os usos do arenito Botucatu silicificado na região de São Carlos – SP*. Dissertação de Mestrado (Geotecnia). EESC, USP. São Carlos, SP, 1988.

PORTO, A. C. *Sistematização de Ensaio tecnológico para a montagem de uma litoteca de rochas ornamentais e agregados*. Relatório de Iniciação Científica, (PIBIT, CNPq), DECiv, CCET, UFSCar. São Carlos, SP, 2016.

PORTO, A. C.; MORAES, D. C.; MENEZES, D. B.; BONUCELLI, T. J. Caracterização para uso ornamental de rochas que são rejeitos da extração de arenito silicificado. *Anais: I Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana*. São Carlos (SP). p. 39 – 52, 2017.