



CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUO DE BRITAGEM E SUA AVALIAÇÃO COMO AREIA ARTIFICIAL

SILVA, G.B.¹, SOUZA, F.R.², GOMES, A.C.F.³

¹Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), Departamento de Engenharia de Minas.
E-mail: gbrandaominas@gmail.com

²Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Departamento de Engenharia de Minas.

³Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas (PPGEM) da
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). E-mail: anaclaudiafranccgomes@gmail.com

RESUMO

O resíduo de britagem, ou pó de pedra, é considerado rejeito oriundo do beneficiamento de agregados em várias pedreiras no país. A preocupação ambiental sobre a quantidade destes resíduos gerados e os seus impactos ambientais associados, bem como a escassez de jazidas naturais de areia, fazem com que sejam crescentes os estudos de caracterização deste material. O presente trabalho alcançou a caracterização física por peneiramento combinado e análise de massa específica por picnometria e a caracterização química pelo método ICP-OES do rejeito de britagem de pedreira de Goiás que foi tratado no equipamento ERAL (planta compactada de hidrociclonagem). Após o estudo do material processado pelo ERAL, verificou-se que o produto gerado está dentro da zona de areia utilizável segundo a NBR 7211, sendo classificado como areia grossa. Além disso, características como a massa específica ($2,88\text{g/cm}^3$) teor de material pulverulento (4%), módulo de finura (2,94), e dimensão máxima característica (2,4mm) também indicam que o rejeito pode ser utilizado como areia artificial. Dessa forma, após caracterização satisfatória, o mesmo deve ser avaliado quanto ao método de dimensionamento do concreto e características de resistência a compressão do concreto formado para de fato poder ser comercializado como areia.

PALAVRAS-CHAVE: Equipamento ERAL, Planta de hidrociclonagem, Areia de britagem, Rejeito de pedreira, Pó de pedra.

ABSTRACT

The product of crushing, or stone powder, is considered mining tailing by the processing of aggregates in several mines in Brazil. In addition to that, the increasing of environmental concern about the amount of waste generated and its associated environmental impacts, as well as the scarcity of natural deposits, are stimulating the characterization studies of this kind of material". The present work reached the physical and chemical characterization by combined sieving and analysis of density by pycnometry of the tailing from a mine in Goiás that was treated in the ERAL equipment (compactated hydrocyclone plant). After characterization it was found that the product generated is within the zone usable according to NBR 7211, and it has properties such as powdery content, fineness modulus, relative density and maximum size, technical features that meet the standard for artificial sand usage.

KEYWORDS: Artificial sand, ERAL equipment, Hydrocyclone, Mining tailing.

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos principais consumidores de matéria-prima mineral. Segundo a Agência Nacional de Mineração (ANM), apenas no ano de 2015, a produção total de areia declarada no Relatório Anual de Lavra (RAL) foi de 89,4 milhões de toneladas, porém a própria instituição declara não ter conhecimento da totalidade da areia produzida no país anualmente (ANM, 2016).

Dentro desse setor, o agregado miúdo natural, amplamente utilizado nessa indústria, é lavrado de leitos de rios, provocando a retirada da cobertura vegetal, degradação dos cursos d'água e demais danos ao meio ambiente. Assim, órgãos responsáveis pela fiscalização do meio ambiente, como o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), vêm enrijecendo as leis de exploração de áreas próximas dos centros urbanos. Como consequência, as empresas mineradoras têm sido forçadas a extrair essa areia em locais cada vez mais distantes do mercado consumidor, o que aumenta o preço final do produto.

Visto toda essa problemática, profissionais da mineração buscam substituir a areia natural pelos rejeitos gerados no beneficiamento mineral. O pó de pedra é um resíduo oriundo da britagem, que, quando tratado corretamente, pode obter características semelhantes à areia natural a ponto de ser comercializado (Santos, 2017).

Atualmente, o pó de pedra possui baixo valor comercial de mercado, pois é considerado um “material marginal”, muitas vezes permanecendo estocado nos pátios das pedreiras, formando pilhas que provocam impactos ambientais. Além disso, o pouco conhecimento sobre esse material tem levado a sua mistificação injustificada – os responsáveis pelos empreendimentos acreditam que o material não tem utilidade e/ou valor econômico associado, sendo apenas um entulho. Entretanto, com a evolução de equipamentos específicos de cominuição e classificação, esses finos, devidamente processados, podem vir a substituir a areia natural (PERACIO *et al.* 2018).

1.1 Características da areia comercial

Para classificar a areia de acordo com as exigências do mercado é preciso analisar suas propriedades físicas e químicas. Os parâmetros de agregados exigidos pelas normas técnicas exigem adequação das propriedades:

- Granulometria – Segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005), os grãos devem estar entre a faixa granulométrica de 4,75 mm até 0,075 mm, podendo apresentar determinada porcentagem retida acumulada nas peneiras de 4,8; 2,4; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,075 mm.
- Densidade relativa – A NBR NM 52 (ABNT, 2003) apresenta uma forma de calcular a massa específica da areia, porém não fornece uma faixa ideal de densidade relativa para a fabricação de concreto.
- Umidade – A NBR 9775 (ABNT, 1987) não fornece um valor mínimo para o teor de umidade da areia, porém os trabalhos de Santos (2017) e Santos (2018), indicam que o teor de umidade pode variar muito em pedreiras de agregados a céu aberto devido as condições climáticas, e para um melhor aproveitamento

da areia na fabricação de concreto o teor de umidade deve ser o menor possível, não ultrapassando de 15 %.

- Quantidade de material pulverulento – Segundo a NBR NM 46 (ABNT, 2003), a quantidade de material pulverulento não pode ultrapassar o valor de 10 %.
- Módulo de finura – Grandeza adimensional que classifica a areia como fina, média ou grossa, para isso é preciso que a areia apresente um módulo de finura entre 1,55 e 3,50.
- Dimensão máxima característica– Representa o material de maior granulometria encontrado na areia, e, segundo a NBR 7211 (ABNT, 2005) este parâmetro não pode ultrapassar o valor de 4,8 mm.

1.2 Estudos recentes sobre a substituição de areia natural por areia artificial

As referências que serão discutidas neste tópico são estudos recentes sobre a substituição da areia natural pela areia artificial. Todos os autores citados concordam que o aproveitamento do resíduo de britagem pode contribuir para a diminuição das pilhas ou barragens de rejeito estocadas e seus impactos ambientais associados. Para tanto, as mineradoras devem investir na caracterização tecnológica desse material.

Perácio *et al.* (2018) simularam um circuito de britagem laboratorial composto por alimentador, britador de mandíbulas, peneira vibratória e moinho de disco para a fabricação de areia artificial a partir de brita 0 de origem gnáissica em João Monlevade-MG. A densidade foi analisada por picnometria ($2,44 \text{ g/cm}^3$) e a análise de tamanhos foi feita por peneiras de 4,75 a 0,075mm. Os autores não alcançaram uma faixa granulométrica entre os limites máximo e mínimo estabelecidos NBR 7211 (ABNT, 2005), o que indica que uma nova etapa de moagem deve ser adicionada ao processo.

Santos (2018) analisou um método de dosagem experimental para argamassas de revestimento utilizando a areia artificial como agregado miúdo. O autor propôs um método de ensaio de dosagem que foi verificado através de ensaios de teor de ar incorporado, resistências à compressão e à tração, módulo de elasticidade, absorção de água, porosidade, fissurabilidade, e imagens de microscópio digital. A argamassa foi composta por cimento Portland do tipo II com escória de alto forno, cal hidratada do tipo I e areia artificial de britagem de gnaiss (rejeito de pedreira). Logo, o método proposto é eficiente e permite obter argamassas de revestimento de boa qualidade utilizando areia artificial.

Santos (2017) avaliou a fabricação de areia artificial a partir de britagem de rocha basáltica em Guaporé no Rio Grande do Sul como alternativa de areia natural na composição de argamassa para assentamento. Foi realizada a caracterização física da areia já britada e uma substituição gradual da variedade natural na argamassa (25, 55, 75 e 100%). Todas as substituições propostas atenderam aos requisitos estabelecidos por norma. A areia artificial foi então considerada viável neste trabalho.

1.3 Planta compactada de hidrociclonagem ERAL

O ERAL, ou planta compactada de hidrociclonagem, é um equipamento ainda pouco conhecido projetado para a lavagem e classificação de areias. O equipamento é composto por 3 elementos principais: Grupo de Bombeamento, hidroclone e peneira desaguadora.

Sobre o seu funcionamento, o material é recebido por uma peneira vibratória (lavagem e classificação) e o *undersize* é bombeado para um hidroclone cujo objetivo é descartar as partículas inferiores a 0,075 mm. A fração maior que este tamanho é direcionada para outra peneira desaguadora e corresponde ao produto; enquanto a inferior corresponde ao rejeito e é encaminhado para pilhas ou barragens de rejeito.

As vantagens desta planta compactada de hidrociclonagem são a rapidez na montagem, facilidade de operação, facilidade na manutenção (equipamento de pouco desgaste), e pouca demanda de espaço.

O presente trabalho contempla a caracterização de rejeito de britagem que foi tratado pelo ERAL com o intuito de avaliar se o material pode ser classificado como areia artificial/comercializável; o que além de gerar capital para a pedreira, diminuiria o impacto ambiental associado, visto que até então, o material era descartado como rejeito.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O material estudado corresponde ao rejeito de britagem, ou pó de pedra (<3,0 mm) de pedreira localizada em Santa Bárbara-GO. O rejeito foi tratado pelo equipamento ERAL da fabricante FURLAN em escala piloto.

Sobre a amostragem deste material, coletas diárias com cerca de 1,5 kg no período de um mês foram feitas na saída do ERAL. A fração coletada foi desaguada em peneiras de 4,00 e 3,0mm (verificação da fragmentação), pesado em balança (precisão de 0,01g) e colocado em estufa elétrica (100^o a 105^oC) por 24 h, esfriada em temperatura ambiente e novamente pesada para cálculo de teor de umidade (T_{H_2O}) segundo a Equação 1.

$$T_{H_2O} (\%) = \frac{\text{massa úmida} - \text{massa seca}}{\text{massa seca}} \quad (1)$$

O pó de pedra passou então por de Rifles (n^o 90/12, n^o 30/16 e n^o 10/16 grelhas da marca Dialmatica), formando alíquotas que alimentaram a caracterização. Cerca de 100g alimentaram cada teste de picnometria (triplicata, picnômetro de 100mL e água destilada) para a determinação da massa específica, 330g, a análise granulométrica (corte a úmido em 0,075mm combinado com peneiramento a seco com peneiras da série Tyler da Bertel), e outros 100g, a análise química (quantitativa, em amostra preparada por digestão multiácida e dosada em espectrometria óptica de Emissão Atômica por Plasma de Argônio, ICP-OES).

A análise granulométrica respeitou a massa máxima por peneira proposta por Gaudin (Equação 2):

$$M = \left[\frac{d_i + d_s}{2} \right] \cdot p \cdot A \cdot n \quad (2)$$

Onde M é a massa máxima retida em cada peneira (g); d_i a abertura da peneira em questão (cm); d_s a abertura da peneira imediatamente acima utilizada (cm); p a densidade da amostra (g/cm^3); A área da malha da peneira ($314,16 \text{ cm}^2$); e n o número de camadas de partículas (3 – proposto por Gaudin).

A curva de distribuição granulométrica obtida permitiu a determinação:

- Da dimensão máxima característica (DMC) que corresponde à abertura (mm) da malha da peneira na qual o agregado apresenta uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa;
- Do módulo de finura (MF) que é a soma das porcentagens retidas acumuladas em massa de um agregado, nas peneiras de série normal, dividida por 100, que permite a classificação da areia em fina, média ou grossa conforme a Equação 3.

$$MF = \left[\frac{\sum \% \text{ Passante acumulada}}{100} \right] \quad (3)$$

- Do teor de material pulverulento (TMP) prejudicial a aderência da areia a pasta de cimento e argamassa através da metodologia estabelecida pela NBR NM 46/2003. Segundo a norma, o material inferior a abertura de 0,075mm (seco) deve ser pesado (A), depositado em um béquer com água onde o material em suspensão é descartado e o afundado (B) é novamente seco e peneirado. O TMP é dado pela Equação 4.

$$TMP(\%) = \left[\frac{A-B}{A} \right] \cdot 100 \quad (4)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como resultado da caracterização física do rejeito de britagem provindo de pedreira em Santa Bárbara-GO, produto do equipamento ERAL, a análise de massa específica, obtida por picnometria, foi de $2,88 \text{ g}/\text{cm}^3$ com desvio padrão de 0,06. Sobre este resultado, os trabalhos de Santos (2017), Santos (2018), e Peracio *et al.* (2018) encontraram valores de massa específica para areia artificial entre 2,10 e $3,00 \text{ g}/\text{cm}^3$, em função da rocha matriz.

O teor de umidade (obtido pela Equação 1) encontrado foi de 13% que está de acordo com a NBR 9775/1987 que indica o valor máximo de 15% para areia.

A análise de distribuição granulométrica realizada se encontra na Tabela 1 onde é possível observar as aberturas (mm) das peneiras utilizadas, sugeridas pela NBR 7211/2005, e que a massa retida (g) não ultrapassa a massa máxima estimada por Gaudin (g) em nenhuma das malhas; o peneiramento realizado é então considerado válido. A Tabela 1 também apresenta a %Retida acumulada onde observa-se que o DMC , abertura em que este parâmetro é menor que 5% equivale a abertura de 2,4mm. Este resultado já era esperado, uma vez que o material foi classificado por peneiras de 4,0 e 3,0mm antes de alimentar o ERAL.

Tabela 1: Classificação do rejeito de britagem segundo a NBR 7211/2005

Análise da distribuição granulométrica do rejeito de britagem				Limites recomendáveis NBR 7211 (%Retida acumulada)				
Abertura das peneiras (mm)	Massa Gaudin(g)	Massa retida(g)	%Retida acumulada	Zona Utilizável		Zona ótima		
				Limite Inferior	Limite Superior	Limite inferior	Limite Superior	
6,300	2062,90	0,00	0,00	0,0	0,0	0,0	0,0	
4,800	1506,46	0,00	0,00	0,0	7,0	0,0	0,0	
2,400	977,16	1,10	0,34	0,0	10,0	0,0	5,0	
1,200	488,58	69,20	21,56	0,0	25,0	10,0	20,0	
0,600	244,29	82,74	46,93	5,0	50,0	20,0	30,0	
0,300	122,15	53,36	63,29	15,0	70,0	35,0	55,0	
0,150	61,07	48,30	78,10	50,0	95,0	65,0	85,0	
0,075	30,54	30,00	87,30	85,0	100,0	90,0	95,0	
Fundo	-	41,40	-	-	-	-	-	
Balço de massa		Total pesado	326,10	Cálculo para Massa de Gaudin	Área peneira(cm ²)	314,16	MF areia	1,55<Fina<2,20
		Total alimentado	330,00		ρ (g/cm ³)	2,88	Limites utilizáveis	2,20<Média<2,90
		% Perda de massa	1,18		n	3		2,90<Grossa<3,50

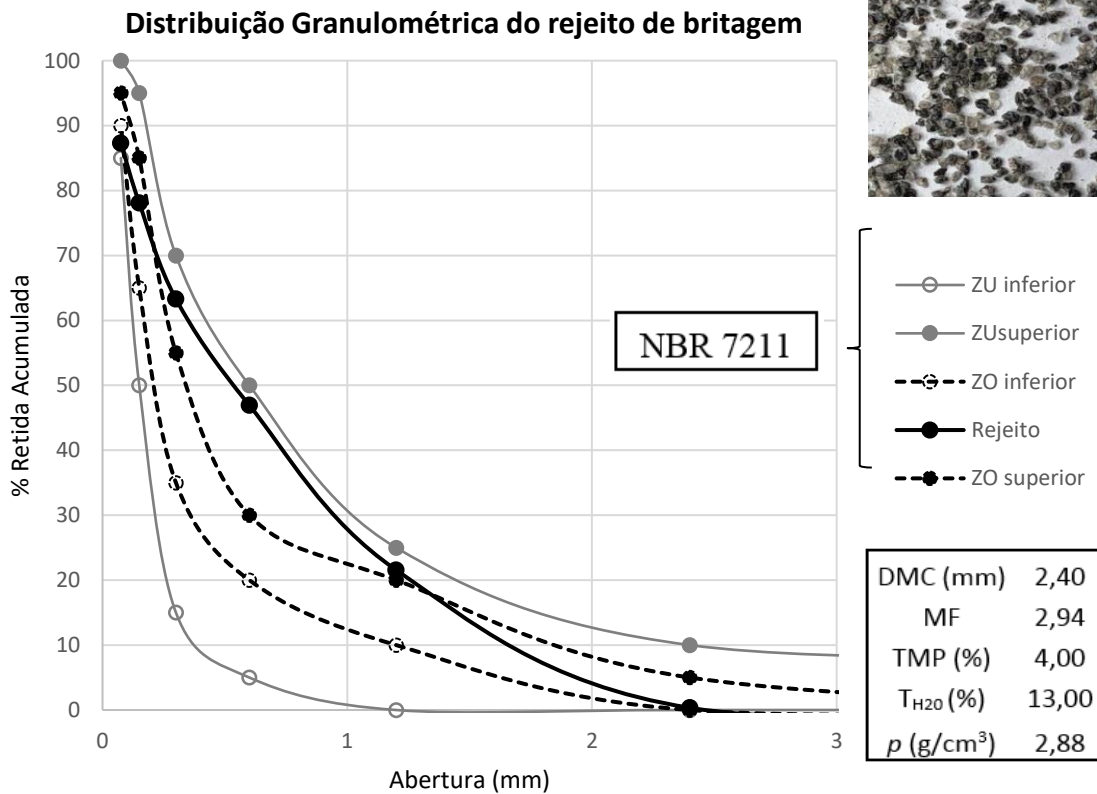


Figura 1: Classificação do rejeito de britagem segundo a NBR 7211





A comparação entre a %Retida acumulada do rejeito com os limites na NBR 7211/2005 está representada na Figura 1 onde observa-se que o rejeito está dentro dos limites inferior e superior da zona utilizável, mas está fora da zona ótima, sendo um pouco mais grosseiro, o que classifica o material como areia grossa. Caso seja necessário adequar a areia artificial para a zona ótima, uma moagem precedente ao ERAL ou *blend* com areia fina, seriam

possíveis alternativas. A figura 1 também traz uma imagem do produto do equipamento ERAL.

O módulo de finura MF de 2,94 também está representado na Tabela 1 (calculado pela Equação 3) e confirma que o rejeito é classificado como areia grossa. Já o teor de material pulverulento (TMP), calculado pela Equação 4, alcançou um valor de 4%. Este valor está de acordo com a NBR NM 46/2003 que indica que o TMP não pode ultrapassar 10%.

Por fim a Tabela 2 ilustra o equipamento ERAL e também contém os elementos químicos encontrados na análise química e os principais minerais esperados, visto que o rejeito tratado pelo ERAL tem origem em rocha gnáissica diorítica (informação obtida pelo responsável pela pedreira). O intuito de se conhecer a composição química do material é nortear testes futuros aonde a areia artificial será utilizada na fabricação de concreto.

Tabela 2: Análise química do rejeito de britagem

Análise Química ICP-OES		Principais minerais esperados	
Elemento químico	Quantidade (mg/kg)	Feldspatos: ex: (K, Na Ca) (Si, Al) ₄ O ₈	
As	9,00		
Ca	2,42	Quartzo: SiO ₂	
Cd	<2,00		
Cr	263,00	Micas: ex: (KAl ₂ [Si ₃ AlO ₁₀](OH,F ₂))	
Cu	8,00		
Fe	4,83		
K	3,89		
Mg	2,12		
Mn	0,17		
Mo	<4,00		
Ni	70,00		
P	911,00		
Pb	15,00		
S	610,00		
Zn	83,00		

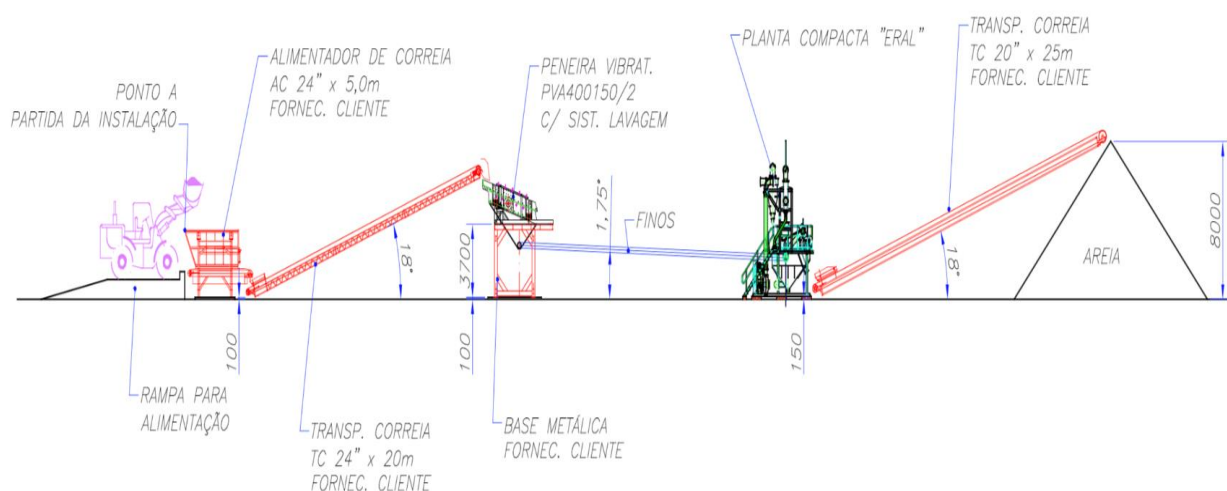


Figura 2: Fluxograma de pedreira com a operação do equipamento ERAL

Como o equipamento ERAL utilizado é, por hora, pouco conhecido, a Figura 2 traz uma ilustração lateral de pedreira com a planta de hidrociclonação compactada instalada. Nela é

possível observar que o ROM é direcionado para um alimentado de correia que encaminha o material até peneiras que o classificam para que ele possa, por fim, ser tratado pelo ERAL.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho caracterizou rejeito de britagem de pedreira no estado de Goiás tratado pelo equipamento ERAL. A caracterização física apontou uma massa específica de $2,88\text{g/cm}^3$, e a análise granulométrica mostrou que o rejeito está dentro da zona utilizável para areia segundo a NBR 7211 sendo classificada como grossa. Os valores encontrados para os parâmetros *DMC* de 2,40 mm, *MF* de 2,94, *TMP* de 4,00% e T_{H20} de 13% estão dentro das normas aplicáveis e confirmam que o material pode ser classificado como areia artificial segundo suas características físicas.

Entretanto, para a comercialização desse material, que até então era descartado como rejeito, são necessários outros testes que visam a sua aplicação, como por exemplo, a moldagem de corpos de prova que investigam a reação álcali agregado, e as características de resistência à compressão do concreto formado.

Dessa forma, ainda que as características físicas do rejeito sejam satisfatórias para a sua classificação como areia artificial, o resíduo precisa ser melhor estudado para que possa ser comercializado para este fim.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Faculdade de Engenharia da UFMT, ao PPGEM, as empresas BRITAGO e FURLAN, e as instituições CAPES e CNPQ que permitiram o desenvolvimento da presente pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7211: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2005.

_____. NBR 9775: Determinação da umidade superficial em agregados miúdos – Especificação. Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR NM 46: Determinação do material fino que passa através da peneira 75 μm , por lavagem– Especificação. Rio de Janeiro, 2003.

ANM, Agência Nacional de Mineração; Anuário Mineral Brasileiro, 2016. Disponível em: <<http://www.anm.gov.br>> acesso em 2019.

Perácio, L.H.R; Duarte, F.F; Ferreira, T.E.D; Ferreira, E.E; Alexandrino, J.S. Simulação de um circuito de britagem para a produção de areia de britagem a partir de brita 0 (zero) gnáissica. Brazilian Applied Science Review p.2295, 2018.

Santos, T.F. Substituição da areia natural por areia de britagem de rochas basálticas para argamassa de assentamento. [Monografia]. Programa de graduação em Engenharia civil do Centro Universitário Univates, Lajeado; 2017.

Santos, W.J; *et al.* Proposta de Método de dosagem para argamassas de revestimento com areia artificial de britagem; vol.18 n.1, Porto Alegre, 2018.