



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APLICAÇÃO DE PÓ DE PEDRA EM UM ATERRO

Aluno: Igor Carcanholo Iasco Pereira

Matrícula: 11211ECV052

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia, dezembro de 2019.

RESUMO

O setor de construção civil brasileira utiliza uma imensa quantidade de agregados naturais. Isto impulsionou a busca por alternativas à extração de agregados de jazidas naturais, uma vez que esta exploração gera danos irreparáveis ao meio ambiente. Uma das alternativas encontradas foi o aproveitamento do material residual da britagem de rochas basálticas. Este processo gera resíduos finos com diâmetro inferior a 0,075 mm, classificado como um material pulverulento. A quantidade deste material não deve exceder 3% da massa de agregados para uso em concreto, e por isso deve ser retirado dos agregados, se tornando um resíduo do processo de britagem. O material usado neste trabalho, denominado pó de pedra, contém partículas com diâmetros inferiores a 6,3 mm, incluindo a parte mais fina, inferior a 0,075 mm. Este trabalho visa analisar o uso de pó de pedra para a realização de um aterro contido lateralmente por um muro de arrimo, avaliando seu desempenho em comparação a um solo natural. Uma análise de deslocamentos foi realizada através de um *software* de elementos finitos. Não foram observadas diferenças significativas no desempenho do pó de pedra em relação ao solo, porém o pó de pedra se mostrou uma alternativa mais econômica.

Palavras-chave: pó de pedra, resíduo de britagem, aterro.

ABSTRACT

The construction field in Brazil uses an immense amount of natural aggregates. This need promoted the search for new alternatives to the extraction of aggregates from natural sources, as it generates irreparable damage to the environment. One of the alternatives found was the use of the residues of basalt rock crushing in quarries. This process generates fine residues with diameters smaller than 0.075 mm. Such powdery material cannot exceed 3% of the aggregates mass in order to be used in concrete; therefore, it is removed from the aggregates and becomes a residue of the crushing process. The material used in this work, named rock dust, contains particles smaller 6.3 mm and includes the finer portion, smaller than 0.075 mm. This study aims at analyzing the use of rock dust in an embankment that is laterally restricted by a retaining wall. The residue performance is compared to a natural soil. A comparison in terms of displacement is made through a finite elements software. The difference of the performance of the materials was not significant, although the rock dust had shown to be a more economical alternative.

Key-words: rock dust, quarry residue, embankment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estocagem do resíduo na pedreira	12
Figura 2 - Perfil traçado com camadas de propriedades semelhantes agrupadas	18
Figura 3 – Curva granulométrica das amostras	20
Figura 4 – Curvas de compactação das amostras de solo e pó de pedra	22
Figura 5 – Primeira etapa. Perfil do talude natural.....	24
Figura 6 – Quarta etapa. Aterro com carregamento distribuído.....	25
Figura 7 - Deslocamento vertical absoluto do pó de pedra	26
Figura 8 – Deslocamento vertical absoluto com o pó de pedra Erro! Indicador não definido.	
Figura 9 - Deslocamento vertical absoluto com o solo	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coeficientes α , correção do módulo de elasticidade.	15
Tabela 2 - Coeficiente de correlação entre SPT e Es.	15
Tabela 3 - Coeficiente de Poisson.	15
Tabela 4 - Peso específico de solos arenosos.	16
Tabela 5 - Peso específico de solos argilosos.	16
Tabela 6 - Parâmetros médios do solo.	17
Tabela 7 - Composição granulométrica dos materiais.	20
Tabela 8 - Massas específicas dos grãos.	21
Tabela 9 – Limites de Atterberg.	21
Tabela 10 – Umidades ótimas e massas específicas úmidas.	22
Tabela 11 – Dados dos materiais para modelagem numérica.	23
Tabela 12 - Dados das camadas de solo no terreno original.	23
Tabela 13 – Orçamento dos aterros.	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	7
1.1	Objetivos	7
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1	Agregados e sua extração.....	8
2.2	Pesquisas sobre aplicação do resíduo de britagem.....	9
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	11
3.1	Características do solo e do pó de pedra	11
3.1.1	Análise granulométrica	13
3.1.2	Massa específica dos grãos	13
3.1.3	Limites de Atterberg	13
3.1.4	Compactação Proctor Normal.....	13
3.2	Perfil geotécnico do terreno	14
3.3	Modelagem numérica.....	18
3.4	Orçamento	19
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	20
4.1	Resultados experimentais.....	20
4.2	Dados para o perfil de solo original	23
4.3	Análise numérica do aterro	24
4.4	Orçamento	27
5	CONCLUSÃO.....	29
	REFERÊNCIAS.....	30
	FOLHA DE ASSINATURAS	32
	ANEXO	33

1 INTRODUÇÃO

Anualmente a construção civil brasileira consome 320 milhões de metros cúbicos de areia, sendo a extração de areia natural responsável pela retirada da cobertura vegetal, pela degradação dos cursos d'água e por danos ao bioma local, dificultando a obtenção de licenças ambientais para a exploração de novas jazidas (MENOSSI, 2004). Assim a substituição da areia natural por subprodutos da britagem de rocha aparece como alternativa para mitigar os mencionados problemas ambientais.

Os subprodutos da britagem são resíduos finos gerados na produção de britas e areias artificiais. Estes geralmente são estocados ao ar livre, podendo ocorrer seu transporte pela água da chuva e vento ao entorno da pedreira. O descarte ou a estocagem incorreta deste material pode gerar transtornos ambientais, de modo que seu aproveitamento seja economicamente e ambientalmente necessário (CUCHIERATO, 2000).

Além do aspecto ambiental, o uso de resíduos da britagem de basalto apresenta um apelo econômico na região do Triângulo Mineiro. Na bacia do rio Paraná existem grandes jazidas de rocha basáltica, as quais estão próximas ao perímetro urbano. A exploração do basalto e a britagem pode ser realizada próximo aos centros consumidores, diminuindo assim o custo logístico, que é muito significativo para agregados. Essas condições tornam atraente a utilização do basalto em obras que exigem substituição de grandes volumes de materiais.

De acordo com a NBR 9935 (ABNT, 2011), o material granular resultante da britagem de rocha que passa na peneira de abertura 6,3 mm é denominado pó de brita. O material utilizado neste trabalho, resíduo do processo de britagem de basalto, foi estudado no contexto da construção de um aterro sobre o qual foi apoiado um tanque de gás com fundação em radier. O aterro foi projetado para vencer um desnível de aproximadamente 5 m no terreno natural em uma obra localizada no município de Uberlândia.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal verificar a hipótese de que o aterro construído com pó de brita apresenta desempenho compatível com um aterro de solo local.

Como objetivos secundários tem-se a análise do comportamento mecânico do pó de brita em aterro e avaliar sua viabilidade econômica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agregados e sua extração

Agregados para a construção civil são materiais granulares, sem forma e volume definidos geralmente inertes com dimensões e propriedades para uso em concreto e argamassa NBR 9935 (ABNT, 2011).

Os agregados podem ser divididos em naturais e artificiais. Os agregados naturais são aqueles que podem ser utilizados tal e qual são encontrados na natureza a menos de lavagem e seleção. Os artificiais são aqueles resultantes de processos industriais, incluindo-se a britagem de rochas e pedregulhos NBR 9935 (ABNT, 2011).

A extração de agregados naturais, como as areias, é feita comumente em áreas de mata ciliar, consideradas áreas de preservação permanente (APPs). Os problemas desta extração, que causa danos ambientais irreparáveis, são citados por Mattos e Lobo (1992): o desmatamento de APPs, causa a erosão das encostas e assoreamento dos corpos d'água, compactação do solo devido ao tráfego de máquinas pesadas e a contaminação do solo e água. Além da questão ambiental, considera-se que para a maioria das regiões as jazidas localizadas a distâncias maiores que 100 km do mercado consumidor não são viáveis economicamente (La Serna e Rezende, 2013). Portanto, se justifica a busca por alternativas ao uso de areias naturais.

Uma alternativa ao uso de areias naturais é a utilização de areias provenientes da britagem, processo de beneficiamento mecânico que reduz jazidas rochosas a materiais com dimensões apropriadas para o uso na construção civil. Uma vez que se torna cada vez mais difícil encontrar depósitos de areia próximos aos grandes centros urbanos. (La Serna e Rezende, 2013).

Os agregados são bens de baixo valor unitário, mas com enormes volumes de utilização e comercialização dentre todos os produtos de mineração. A dificuldade de transporte destes grandes volumes gera onerosos custos logísticos, uma vez que estes podem ser superiores ao valor do material. Assim, o uso de areias artificiais se torna atrativo devido à proximidade das pedreiras às cidades. Entretanto, a utilização destas como agregado de concreto é limitada pela presença do material pulverulento, com diâmetro inferior à 0,075

mm. A presença de material pulverulento não deve ultrapassar 3% em massa para que este possa ser utilizado como agregado de concreto (ABNT, 2009).

O material pulverulento é um resíduo produzido em todas as fases do beneficiamento da rocha. Porém, deve ser retirado para a utilização da brita e areia artificial. O armazenamento deste material é problemático, uma vez que este material é poluente e não tem destinos normatizados. (NEVES, 2005)

O beneficiamento de rochas, a britagem, gera diferentes produtos os quais são comercializados em faixas granulométricas definidas pela norma NBR 9935 (ABNT, 2011). Cada graduação tem um diferente uso na construção civil. Materiais produzidos por britagem com diâmetros inferiores a 6,3 mm são definidos como pó de pedra.

A produção da brita é dividida em três etapas básicas: a extração, a britagem e a estocagem. Durante a primeira etapa do processo são extraídos grandes blocos de basalto das minas por meio de explosivos. Posteriormente este material é transportado até o britador, onde são reduzidos por processos mecânicos, isto é, triturados para se obter produtos com granulometrias padrão. (NEVES, 2005)

As britagens podem ser divididas em primária, secundária, terciária e quaternária. A quantidade de processos depende da granulometria a ser comercializada e da técnica utilizada pelo britador. O resíduo fino é gerado em todas as etapas. (NEVES, 2005)

A antiga norma NBR7225 que foi cancelada definia pó de pedra como “Material proveniente do britamento de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075 mm”. Não havia uma faixa de granulometria normatizada que incluísse todos os diâmetros abaixo de 4,8 mm incluindo os diâmetros inferiores à 0,075 mm. Porém, a norma atual NBR9935 define como pó de pedra como o material resultante da britagem de rocha que passa na peneira de malha 6,3 mm.

2.2 Pesquisas sobre aplicação do resíduo de britagem

Há uma grande quantidade de pesquisas que visam utilizar a parte mais fina do resíduo em argamassas, de modo que avaliam os efeitos do material pulverulento na mistura, fornecendo bons resultados de durabilidade, e um material com compacidade elevada. (INEIA, 2017)

Há pesquisas que visam utilizar o resíduo mineral para a remineralização do solo devido ao bom equilíbrio de macro e micronutrientes do basalto. Algumas vantagens apresentadas pelo uso do pó de brita são: o fornecimento lento de nutrientes para o solo, reequilíbrio do pH do solo e controle da erosão do solo. (LIVI, 2016)

Este trabalho propõe um outro uso ao resíduo da britagem, com aplicação em geotecnia para sua utilização como material para aterro.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a viabilidade técnica e econômica da aplicação do pó de pedra em aterro compactado, este trabalho contou com quatro etapas: a caracterização de materiais, a definição do perfil do terreno com o aterro, a modelagem numérica e o orçamento.

Em laboratório foram realizados ensaios de caracterização e de compactação do pó de brita e do solo, que serviram de embasamento para definição de parâmetros que seriam usados na modelagem numérica. Com base em um laudo de sondagem do terreno da obra, foi definido o perfil do terreno a ser analisado e então o programa de elemento finitos RS2 (ROCSCIENCE, 2019) foi usado para análise de tensões e recalques. Por fim foi realizado um orçamento simplificado para análise do quesito econômico.

3.1 Características do solo e do pó de pedra

O pó de pedra e o solo utilizados são os mesmos usados na obra em que foi executado o aterro.

O pó de pedra é mostrado na Figura 1 próximo à uma régua com escala milimétrica.

Uma amostra de 40 kg de pó de pedra foi coletada na pedreira, que se encontra a aproximadamente 25 minutos do centro da cidade de Uberlândia. Este é estocado ao ar livre, como pode ser observado na Figura 1. Para impedir que o vento leve o material para os arredores, se pulveriza água sobre as pilhas várias vezes ao dia.

O solo utilizado é proveniente dos arredores de Uberlândia. A localização da área do empréstimo não foi fornecida pela construtora, porém, todo o solo substituído na obra foi retirado do mesmo local, o que garante a homogeneidade da amostra coletada com o material a ser utilizado para o aterro.

O solo era estocado ao ar livre no terreno da obra e não havia controle da umidade ou qualquer outro controle tecnológico prévio à utilização em aterros. Foi feita a coleta de 40 kg de amostra deformada.

Para ambos os materiais foram realizados ensaios de análise granulométrica, massa específica dos grãos, limite de liquidez, limite de plasticidade e compactação.

Figura 1 – Pé de Pedra próximo a uma régua



Fonte: Autor, 2019.

Figura 2 - Estocagem do resíduo na pedreira



Fonte: Autor, 2019

3.1.1 Análise granulométrica

O ensaio de granulometria é o processo utilizado para a determinação em percentual em massa que cada faixa granulométrica das partículas representa na massa total ensaiada. Para solos finos, faz-se a utilização dos processos de peneiramento e sedimentação. Este ensaio é padronizado pela NBR 7181 (ABNT, 2016c).

3.1.2 Massa específica dos grãos

O ensaio para determinação da massa específica dos grãos é padronizado pela NBR 6458 em seu anexo B (ABNT, 2016a). Neste ensaio se determina a massa de um picnômetro com solo e água com a massa do picnômetro preenchido só com água para se obter o volume de água deslocado pelos grãos. A massa específica dos grãos é calculada pela relação entre massa dos grãos e volume dos grãos.

3.1.3 Limites de Atterberg

Os solos podem apresentar diferentes tipos de consistência a qual está diretamente ligada a quantidade de água presente. Essa consistência pode ser sólida, semissólida, plástica ou a de um fluido denso. Existem valores limites de teor de umidade que separam um estado de consistência do outro. São chamados de limites de consistência. Estes limites, determinados empiricamente, refletem uma série de propriedades dos solos finos e são utilizados nos sistemas de classificação do solo. (LABORATÓRIO DE GEOTECNIA UFBA, 2019)

O teor de umidade que separa o estado plástico do estado líquido é chamado de limite de liquidez (LL). É o valor de umidade abaixo do qual o solo tem comportamento plástico. A umidade que delimita o estado semissólido do plástico é conhecida como limite de plasticidade (LP). Abaixo desse valor o solo começara a fissurar ao tentar ser moldado.

3.1.4 Compactação Proctor Normal

O ensaio de compactação consiste na aplicação de uma energia de compactação estabelecida pela NBR 7182 (ABNT, 2016b) sendo esta energia expressa em um número de golpes de um soquete padrão sobre o solo contido no molde. A massa específica resultante é função da umidade presente no solo e do próprio tipo de solo.

A partir dos resultados, se traça a curva de compactação representada pela densidade seca em função da umidade. A curva define uma densidade seca máxima à qual corresponde a umidade ótima.

O ensaio Proctor Normal utiliza o cilindro de volume 1.000 cm³, sendo a amostra submetida a 26 golpes de um soquete com massa de 2,5 kg e caindo de 30,5 cm de altura. (ABNT, 2016b).

3.2 Perfil geotécnico do terreno

O perfil geotécnico do terreno foi definido a partir dos ensaios de sondagem fornecidos pela construtora. O boletim técnico do ponto mais próximo à área do aterro realizado se encontra no ANEXO. Este boletim foi utilizado para estimar os parâmetros inseridos no software RS2 (ROCSCIENCE, 2019).

Para a estimativa do ângulo de atrito interno, φ , foi utilizada a correlação empírica fornecida por Teixeira (1996, apud Hachich et al, 1998):

$$\varphi = \sqrt{20N} + 15^\circ \quad (1)$$

Onde N é o índice de resistência à penetração do SPT (N_{SPT}).

Para a estimativa da coesão, c, foi utilizada a correlação empírica fornecida por Teixeira e Godoy (1996 apud Hachich et al, 1998):

$$c = 10 \times N_{SPT} \frac{kN}{m^2} \quad (2)$$

O módulo de deformabilidade foi obtido pelo método de Teixeira e Godoy (1996 apud Hachich et al, 1998):

$$Es = \alpha \times K \times N_{SPT} \quad (3)$$

Em que Es é o módulo de deformabilidade (GPa); α é o fator de correlação do módulo de elasticidade com o N_{SPT} (Tabela 1); K (GPa) é um coeficiente que depende do tipo de solo (Tabela 2).

Tabela 1 - Coeficientes α , correção do módulo de elasticidade.

Solo	α
Areia	3
Silte	5
Argila	7

Fonte: Teixeira e Godoy (1996, apud Hachich et al, 1998).

Tabela 2 - Coeficiente de correlação entre SPT e Es.

Solo	K (GPa)
Areia com pedregulhos	1,1
Areia	0,9
Areia siltosa	0,7
Areia argilosa	0,55
Silte arenoso	0,45
Silte arenoso	0,35
Argila arenosa	0,3
Silte argiloso	0,25
Argila siltosa	0,2

Fonte: Teixeira e Godoy (1996, apud Hachich et al, 1998).

O coeficiente de Poisson utilizado foi sugerido por Teixeira e Godoy (1996) conforme o tipo de solo (Tabela 3). Esta tabela foi utilizada para obtenção do coeficiente de Poisson para o terreno e para as amostras.

Tabela 3 - Coeficiente de Poisson.

Solo	ν
Areia pouco compacta	0,2
Areia compacta	0,4
Silte	0,3-0,5
Argila saturada	0,4-0,5
Argila não saturada	0,1-0,3

Fonte: Teixeira e Godoy (1996, apud Hachich et al, 1998).

O peso específico das camadas de solo foi adotado a partir da Tabela 4 para solos arenosos e da Tabela 5 para solos argilosos.

Tabela 4 - Peso específico de solos arenosos.

Solos Arenosos				
N_{spt}	Compacidade	Peso específico (kN/m³)		
		Seca	Úmida	Saturada
<5	Fofa	16	18	19
5-8	Pouco compacta			
9-18	Medianamente compacta	17	19	20
19-40	Compacta	18	20	21
>40	Muito compacta			

Fonte: Godoy (1972, apud Hachich et al, 1998).

Tabela 5 - Peso específico de solos argilosos.

Solos argilosos		
N_{spt}	Consistência	Peso específico (kN/m³)
≤2	Muito mole	13
3-5	Mole	15
6-10	Média	17
11-19	Rija	19
≥20	Dura	21

Fonte: Godoy (1972, apud Hachich et al, 1998).

Na Tabela 6, de Joppert (2007), são mostrados parâmetros médios de solos a partir de correlação com tipo de solo e o NSPT. Esta tabela foi utilizada para se estimar os parâmetros: coesão efetiva, módulo de elasticidade e ângulo de atrito das amostras de solo e do pó de pedra. A partir da classificação do material levando em conta a granulometria e o peso específico, obtido através do ensaio de compactação, pôde-se estimar os outros parâmetros.

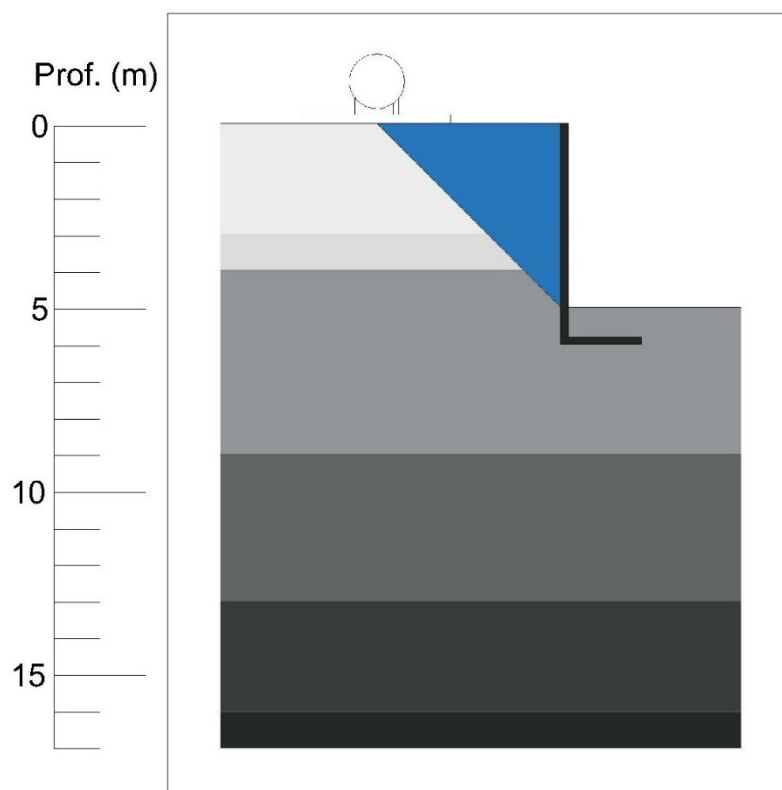
Tabela 6 - Parâmetros médios do solo.

Tipo de solo	Faixa N _{spt}	Módulo de elasticidade (t/m ²)	Peso específico		Ângulo de atrito φ°	Coesão efetiva (t/m ²)
			Natural (t/m ³)	Saturado (t/m ³)		
Areia pouco siltosa / pouco argilosa	0-4	2000 - 5000	1,7	1,8	25 °	-
	5-8	4000 - 8000	1,8	1,9	30 °	-
	9-18	5000 - 10000	1,9	2,0	32 °	-
	19-41	8000 - 15000	2,0	2,1	35 °	-
	≥41	16000 - 20000	2,0	2,1	38 °	-
Areia média e fina muito argilosa	0-4	2000	1,7	1,8	25 °	0,0
	5-8	4000	1,8	1,9	28 °	0,5
	9-18	5000	1,9	2,0	30 °	0,8
	19-41	10000	2,0	2,1	32 °	1,0
Argila porosa vermelha e amarela	0-2	200 - 500	1,5	1,7	20 °	0,8
	3-5	500 - 1000	1,6	1,7	23 °	1,5
	6-10	1000 - 2000	1,7	1,8	25 °	3,0
	≥10	2000 - 3000	1,8	1,9	25 °	3,0 a 7,0
Argila siltosa pouco arenosa	0-2	100	1,7	1,8	20 °	0,8
	3-5	100 - 250	1,8	1,9	23 °	1,5
	6-10	250 - 500	1,9	1,9	24 °	2,0
	11-19	500 - 1000	1,9	1,9	24 °	3,0
	20-30	3000 - 10000	2,0	2,0	25 °	4,0
	≥30	10000 - 15000	2,0	2,0	25 °	5,0
Argila arenosa pouco siltosa	0-2	500	1,5	1,7	15 °	1,0
	3-5	500 - 1500	1,7	1,8	15 °	2,0
	6-10	1500 - 2000	1,8	1,9	18 °	3,5
	11-19	2000 - 3500	1,9	1,9	20 °	5,0
	≥20	3500 - 5000	2,0	2,0	25 °	6,5
Turfa/argila orgânica	0-1	40 - 100	1,1	1,1	15 °	0,5
	2-5	100 - 150	1,2	1,2	15 °	1,0
Silte arenoso pouco argiloso	5-8	800	1,8	1,9	25 °	1,5
	9-18	1000	1,9	2,0	26 °	2,0
	19-41	15000	2,0	2,0	27 °	3,0
	≥41	20000	2,1	2,1	28 °	5,0

Fonte: Joppert (2007).

O perfil foi traçado a partir do boletim de sondagem presente no ANEXO. Camadas com propriedades semelhantes foram agrupadas e calculado o N_{SPT} médio para as mesmas. O aterro em questão está mostrado na Figura 3 em azul. Sobre o terreno está apoiado um radier com um tanque de gás.

Figura 3 - Perfil traçado com camadas de propriedades semelhantes agrupadas



Fonte: Autor, 2019.

3.3 Modelagem numérica

Este aterro será simulado em um software que utiliza o método dos elementos finitos, que é um procedimento de análise numérica para se encontrar soluções aproximadas para equações diferenciais a partir de valores de contorno. Este método subdivide um problema em pequenas partes, os elementos finitos. Esta técnica aplicada à geotecnia permite a inclusão de distintas propriedades em elementos não similares e a identificação de efeitos localizados, como concentração de tensões e recalques.

O critério de ruptura utilizado nas análises deste trabalho é o Mohr-Coulomb, que pode ser chamado de modelo linear elástico perfeitamente plástico. Neste modelo a parcela elástica define deformações recuperáveis enquanto a parcela plástica define deformações irreversíveis. A ruptura por cisalhamento é representada neste modelo, e a relação tensão deformação demonstra o comportamento elástico-linear até a ruptura, momento precedido

pelo aumento da deformação sem aumento de tensão, fase de escoamento do material. (BEZERRA, 2018).

3.4 Orçamento

Os quantitativos foram estimados conforme a prática corrente da construtora. Não foram utilizadas as tabelas de preço conhecidas como as do SINAPI (Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil) uma vez que a precificação não existiria para as duas situações por ser um novo método de aterro e ainda, não considerariam as especificidades deste projeto. A precificação ocorreu da forma que se acredita que a construtora faria, com preços de fornecedores locais.

Quanto ao procedimento:

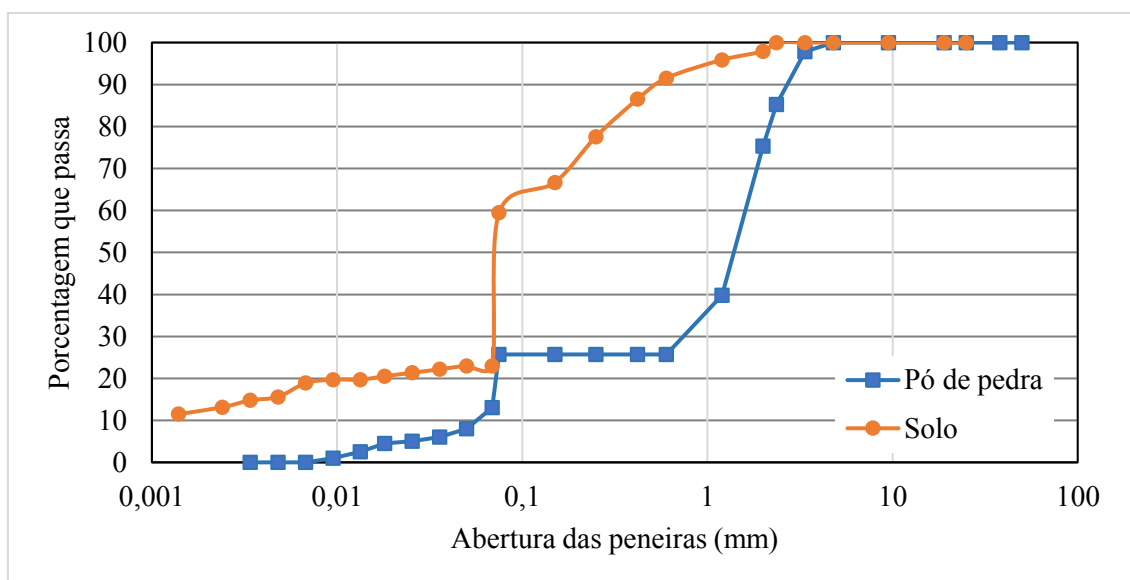
- Primeiro foi levantada a quantidade de material a ser utilizado. Depois, estimado o tempo de trabalho necessário. A partir destas informações foi possível estimar os custos para a situação real.
- Os preços, com exceção do pó de pedra, foram coletados com ao menos dois fornecedores, e escolhido o menor preço. O preço do pó de pedra foi levantado apenas com a pedreira que forneceu o material da amostra.
- O preço da hora de mão de obra de cada funcionário foi fornecido pela construtora.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados experimentais

Foram realizados ensaios de granulometria, massa específica dos solos e o ensaio de compactação Proctor normal. Os resultados da caracterização foram usados para se obter o peso específico dos materiais usados no aterro e para que os parâmetros de resistência e deformabilidade fossem estimados de modo criterioso. As curvas granulométricas encontram-se na Figura 3 e as porcentagens de cada fração são mostradas na Tabela 7.

Figura 4 – Curva granulométrica das amostras



Fonte: Autor (2019)

Tabela 7 - Composição granulométrica dos materiais.

Fração granulométrica	Porcentagem de material	
	Solo	Pó de pedra
Pedregulho	2,1%	24,6%
Areia Grossa	2,1%	35,6%
Areia Média	9,3%	14,1%
Areia Fina	27,1%	0,0%
Silte	46,3%	25,7%
Argila	13,1%	0,0%

Fonte: Autor (2019)

Com base na Tabela 7, o solo pode ser classificado como silte arenoso pouco argiloso e o pó de pedra pode ser classificado como areia siltosa com pedregulhos. Cabe mencionar que 100% do pó de pedra tem diâmetro inferior a 6,3 mm, que é o critério estabelecido pela ABNT (2011) para que o material seja classificado como tal.

As massas específicas dos grãos das amostras, usadas nos cálculos das análises granulométricas estão exibidas na Tabela 8.

Tabela 8 - Massas específicas dos grãos.

Solo	Pó de pedra
2,55 g/cm ³	2,77 g/cm ³

Fonte: Autor (2019)

Os limites de Atterberg são mostrados na Tabela 9, onde se nota que ambos os materiais apresentam plasticidade, embora os índices de plasticidade sejam baixos. Estes dados servem para complementar a caracterização dos materiais e não foram usados diretamente nas análises do aterro.

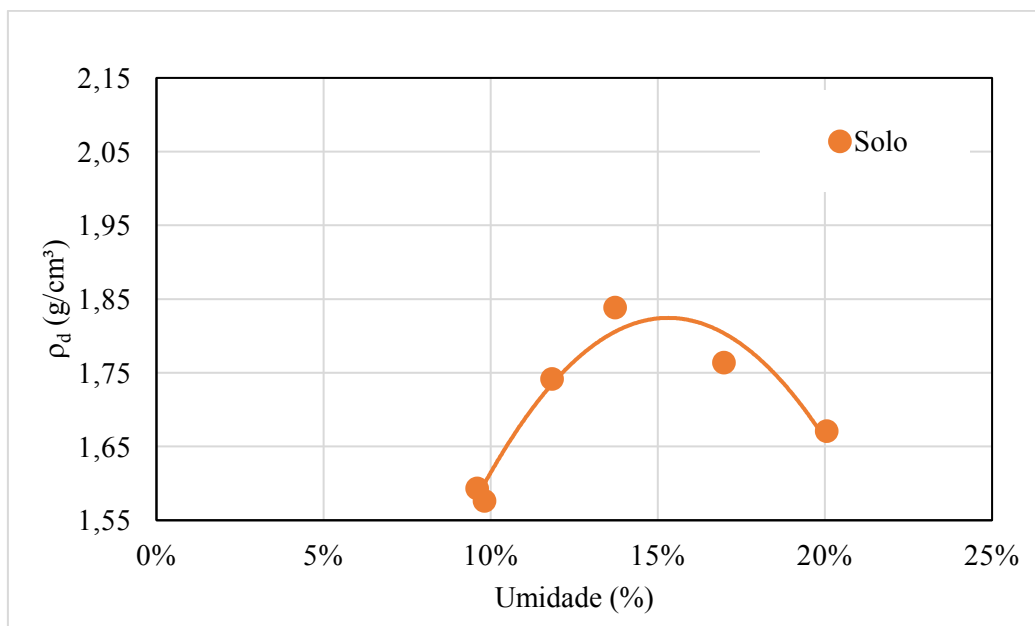
Tabela 9 – Limites de Atterberg.

Parâmetro	Solo	Pó de pedra
LP	19,2%	13,8%
LL	29,5%	18,1%
IP	10,3%	4,3%

Fonte: Autor (2019)

A curva de compactação da amostra de solo é mostrada na Figura 4. Nota-se que o solo apresenta um ponto de máximo bem definido, ao contrário do pó de pedra que apresenta um comportamento particular. Durante a execução do ensaio foi percebido que o pó de pedra não consegue reter umidades maiores que 11,7%, havendo exsudação de água em todas as tentativas de se moldar o material com umidades superiores a essa. Por isso, para este trabalho, a umidade ótima foi considerada como a umidade que experimentalmente forneceu a máxima massa específica seca.

Figura 5 – Curvas de compactação da amostra de solo



Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 10 estão dispostas as umidades ótimas das duas amostras e suas massas específicas úmidas, que foram usadas na análise numérica.

Tabela 10 – Umidades ótimas e massas específicas úmidas.

Parâmetro	Solo	Pó de pedra
w ótima	13,73%	11,78%
ρ_s	2,09 g/cm^3	2,34 g/cm^3

Fonte: Autor (2019)

A partir da caracterização e aplicando o método apresentado em 3.2, foram obtidos os parâmetros necessários para a modelagem no programa RS2, que são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Dados dos materiais para modelagem numérica.

Parâmetro	Solo	Pó de pedra
Peso específico	20,60 kN/m ³	22,86 kN/m ³
Ângulo de atrito	28°	38°
Coesão	5 kN/m ²	0 kN/m ²
Es	20 GPa	16 GPa
Poisson	0,4	0,4

Fonte: Autor (2019)

4.2 Dados para o perfil de solo original

A partir do boletim de sondagem anexo e do método apresentado em 3.2, foi possível calcular os dados apresentados na Tabela 12. Estes valores foram inseridos no programa RS2.

Tabela 12 - Dados das camadas de solo no terreno original.

Prof. (m)	Nspt	Classificação do Material	Nspt médio	Peso específico (kN/m ³)	Coesão (kN/m ²)	Ângulo de atrito φ°	Es (GPa)	Poisson
1	3	Argila arenosa, muito mole a mole						
2	2		2	13	23	21,8 °	4,9	0,4
3	2							
4	3	Areia Argilosa, fofa	3	19	30	22,7 °	4,95	0,2
5	6							
6	7	Argila arenosa, com pedregulhos, muito mole a média	6	17	60	26,0 °	12,6	0,4
7	9							
8	6							
9	2							
10	4	Areia Silto-Argilosa, fofa a pouco compacta	6	19	55	25,5 °	26,95	0,2
11	7							
12	6							
13	5							
14	12	Argila Arenosa, rija a dura	15	20	150	32,3 °	31,5	0,4
15	14							
16	19							
17	40	Argila arenosa, dura	40	21	400	43,3 °	84	0,4

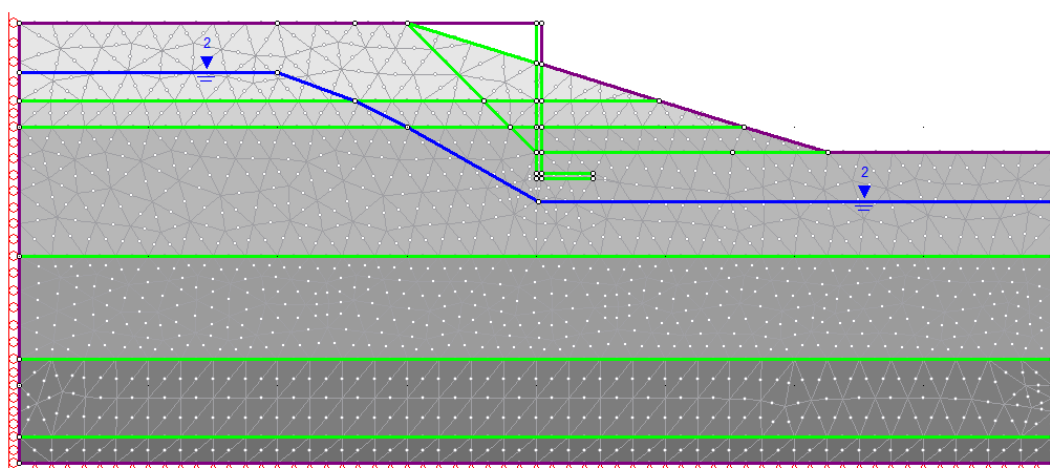
Fonte: Autor (2019)

4.3 Análise numérica do aterro

A simulação do perfil geotécnico no software RS2 foi realizada em quatro etapas. A primeira etapa foi a construção do perfil do talude natural, a qual pode ser observada na Figura 5, a segunda foi uma escavação, a terceira foi a construção do aterro e um muro de concreto, e a quarta foi a colocação de um carregamento distribuído. O solo foi restringido lateralmente em X. O muro de concreto foi considerado suficientemente rígido para evitar deslocamentos horizontais. Foram utilizados elementos triangulares com 6 nós. A configuração da quarta etapa pode ser observada na Figura 7.

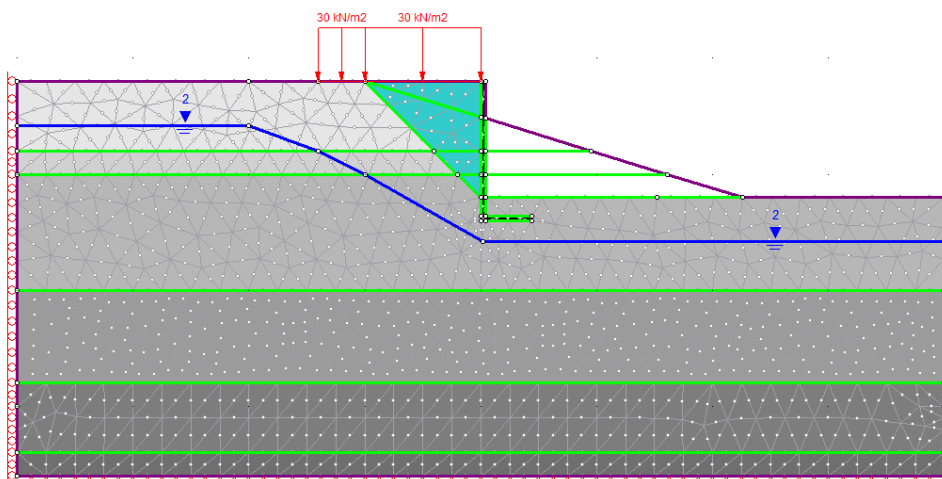
O carregamento distribuído é devido a um reservatório de gás que seria apoiado sobre a região aterrada. A carga aproximada do reservatório foi fornecida pela construtora e era de aproximadamente 2 toneladas e ficaria em uma área de 4 m x 4 m, 3 m distante da face do muro. O programa utilizado considera apenas duas dimensões. Assim, foi feita uma simplificação que resultou em aproximadamente 5 kN/m². Esta carga por segurança foi aumentada para um carregamento distribuído de 30 kN/m² e ainda distribuída até a crista do muro de arrimo.

Figura 6 – Primeira etapa. Perfil do talude natural.



Fonte: Autor, 2019.

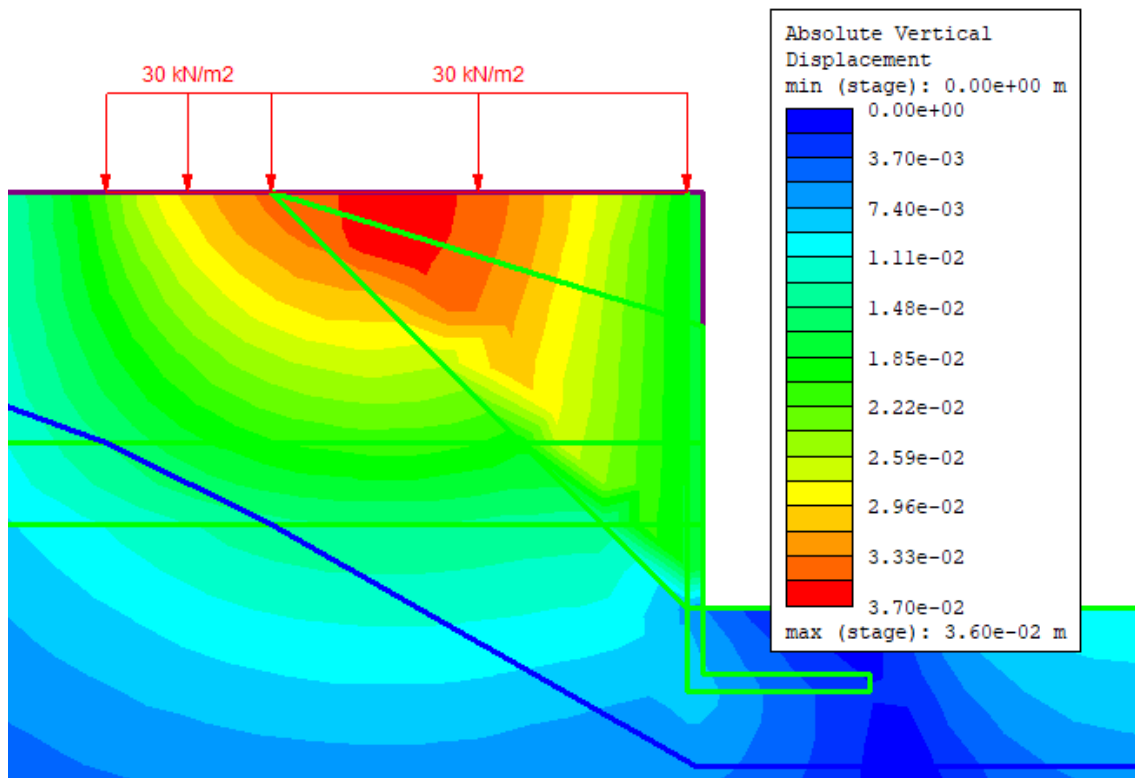
Figura 7 – Quarta etapa. Aterro com carregamento distribuído.



Fonte: Autor (2019)

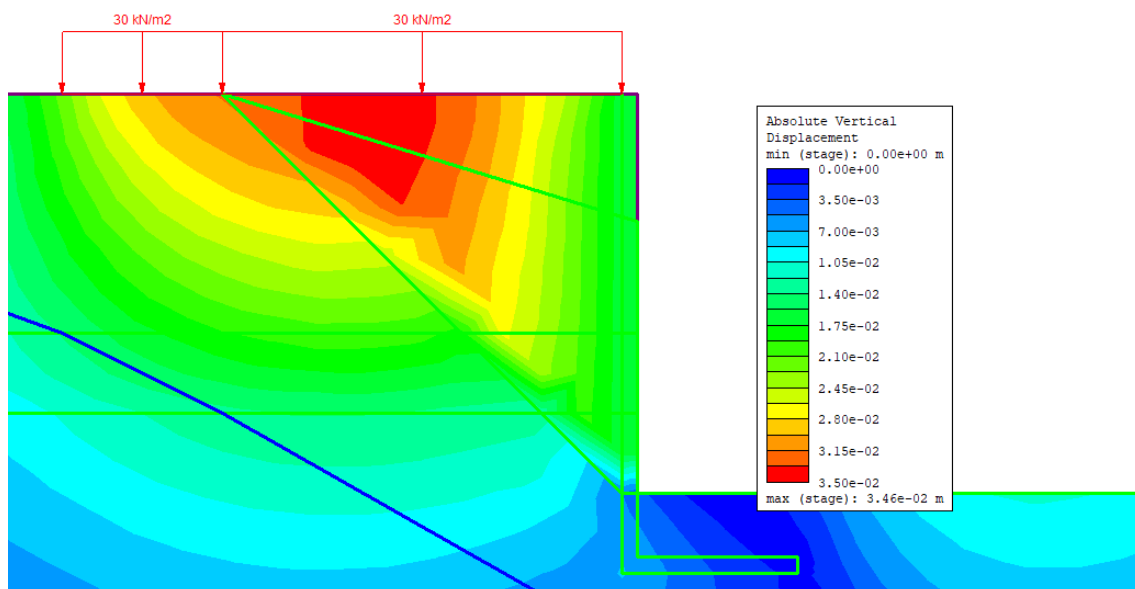
O deslocamento vertical máximo apresentado na simulação com o aterro de solo e na simulação com o aterro de pó de pedra foi similar, sendo 3,6 centímetros para o pó de pedra e 3,46 para o solo. Estes resultados podem ser vistos na Figura 7 para a amostra de pó de pedra. Para a amostra de solo os resultados podem ser observados na Figura 8. O que leva a concluir que o resíduo apresenta características tão satisfatórias quanto o solo utilizado para o aterro neste nível de carregamento.

Figura 8 - Deslocamento vertical absoluto do pó de pedra



Fonte: Autor (2019)

Figura 9 - Deslocamento vertical absoluto com o solo



Fonte: Autor (2019)

4.4 Orçamento

O orçamento realizado neste trabalho utilizou dados fornecidos pela construtora e por fornecedores locais.

Algumas especificidades foram consideradas para este orçamento. O material solo era estocado na obra, porém, em um local longe do aterro a ser realizado. Para o transporte interno deste material deveria ser contratado um caminhão e uma retroescavadeira, uma vez que o fornecedor não poderia mandar os caminhões constantemente durante a execução do aterro. Este material deveria ser estocado na obra antes da execução. Durante a execução deveria se adicionar uma etapa ao processo, carregamento e transporte. O material seria então descarregado e espalhado com outra retroescavadeira. O pó de pedra não era estocado na obra e a pedreira forneceria caminhões de 12 m³ de forma ininterrupta durante a execução do aterro.

O resíduo apresenta comportamento granular, recomenda-se que materiais granulares sejam compactados por meio de placas vibratórias enquanto o solo seja compactado por meio de percussão, compactadores chamados popularmente de “tipo sapo”. A especificação encontrada no site de uma empresa que fabrica ambos equipamentos é que a placa vibratória tem o dobro do rendimento do compactador do tipo sapo. Assim, a mão de obra será dobrada para a utilização do solo.

Para o orçamento foram previstos 2 dias de trabalho de 9 horas para execução do aterro com pó de pedra e 4 dias de trabalho para execução com solo. Foi considerada uma equipe de 3 serventes para operar o compactador e espalhar as camadas de material. Os preços e os quantitativos podem ser observados na Tabela 13.

Tabela 13 – Orçamento dos aterros.

Descrição	Solo			Pó de pedra		
	Qnt.	Preço	Total	Qnt.	Preço	Total
Placa vibratória (diária)	-	-	-	2	90	180
Sapo (diária)	4	120	480	-	-	-
Preço de material (m ³)	172,5	35	6037,5	172,5	35	6037,5
Preço de frete (R\$/m ³)	-	-	-	172,5	7,5	1293,8
Retroescavadeira (diária)	8	700	5600	2	700	1400
Mão de obra (h)	108	14	1512	54	14	756
Total (R\$)	R\$	13.629,50		R\$	9.667,25	

Fonte: Autor (2019)

Ao se analisar o orçamento na Tabela 13 pode se concluir que o uso do resíduo fornece sim uma solução viável e rápida para a execução deste aterro. Para esta obra o valor é inferior ao uso de solo como material para o aterro. Esta diferença foi devido ao maior uso de mão de obra com o material aqui referido como solo.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram realizadas análises experimentais e numéricas para verificar a viabilidade de aplicação de pó de pedra como substituto de um solo siltoso na construção de aterro. A etapa experimental subsidiou a análise numérica com dados de peso específico e orientou a estimativa de parâmetros de resistência e compressibilidade.

A partir das simulações feitas no *software* RS2 o material tem uma deformação vertical absoluta muito semelhante ao solo ao ser utilizado. Este trabalho não teve a intenção de verificar o dimensionamento do aterro a ser realizado, apenas a comparar o desempenho dos dois materiais.

Uma vez que o desempenho dos materiais se provou semelhante se prosseguiu para a fase de orçamento. A técnica de orçamento utilizada, não foi a de tabelas conhecidas como a SINAPI uma vez que a precificação não existiria para as duas situações por não considerar as especificidades da obra. A precificação ocorreu da forma que a construtora faria, com preços de fornecedores locais.

Ao se analisar o orçamento pode-se concluir que a rapidez oferecida ao se trabalhar com o pó de pedra é o fator com mais impacto para a sua utilização por diminuir os custos com mão de obra. Uma vez que o preço do material foi o mesmo preço encontrado para o solo, porém, deveria se pagar frete. Além disso, a característica do pó de pedra exudar a água pode ser benéfica para uma obra que esteja sendo executada durante situações adversas.

A conclusão final deste trabalho é que o resíduo da britagem desta pedreira pode ser utilizado para o aterro em questão, apresentando vantagens econômicas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458** – Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2016a.

_____. **NBR 7182** – Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2016b.

_____. **NBR 7181** – Solo -Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016c.

_____. **NBR 7211** – Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

_____. **NBR 9935** – Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

BEZERRA et al.. **Estudo de viabilidade da utilização do resíduo do pó de pedra como agregado miúdo em concreto**. 2017. VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Campo Grande – MS. 2017.

CUCHIERATO, Gláucia. **Caracterização tecnológica de resíduos da mineração de agregados da região metropolitana de São Paulo (RMSP), visando seu aproveitamento econômico**. 2000. 201p. Tese (doutorado) – Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências – São Paulo, 2000. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-23102015-183808/en.php>>. Acesso em: dez. 2018.

HACHICH et al. **Fundações: teoria e prática**, 2. Ed. São Paulo, SP. Pini, 1998. ISBN 85-7266-098-4, 1998. 750p.

INÉIA, Adriano. **Viabilização da substituição da areia natural pelo pó de pedra basáltica na argamassa autonivelante**. 2017. 94p. Monografia (trabalho de conclusão de curso) – Centro Universitário UNIVATES – Lajeado, 2017.

JOPPERT JR, IVAN. **Fundações e Contencões de Edifícios** – São Paulo: Pini ISBN 978-85-7266-177-5, 2007. 221p.

LA SERNA, Humberto Almeida; REZENDE, Márcio Marques. **Agregados para a construção civil**. 2013. DNPM. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/publicacoes/serie-estatisticas-e-economia-mineral/outras-publicacoes-1/8-1-2013-agregados-minerais>> Acesso em Dez 2018.

LABORATÓRIO DE GEOTECNIA UFBA. Limites de Atterberg. Disponível em: <<http://www.geotecnia.ufba.br/?vai=Extens%E3o/Ensaios%20de%20Laborat%F3rio/Limites%20de%20Atterberg>> Acesso em: set. 2019.

LIVI, A. **Uso de pó de rocha, termofosfato e adubo orgânico na produção de hortaliças**. 2016. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/594/1/LIVI.pdf>> Acesso em: Set. 2018.

MENOSSE, Rômulo Tadeu. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** 2004. vi, 97 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2004. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/90740>>. Acesso em: dez. 2018.

MATTOS, S. C.; LOBO, R. L. M. **Areia para construção civil em Goiás: da produção, danos ambientais e propostas de mitigação.** In: SIMP. GEOL. CENTRO-OESTE, 5, 1995. Anais... SBG, 1995.

NEVES, Patricia Bomfim das. **Características de fragmentação e microestruturais de rochas e seu comportamento na britagem para a produção de agregado.** 2005. XXI 129p. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ – Rio de Janeiro, 2005.

ROCSCIENCE. **RS2** - 2D elasto-plastic finite element program for slope and excavation stability analyses. Versão 2019. Toronto: Rocscience Inc., 2019.

TEIXEIRA, A. T.; GODOY, N. S. **Análise, Projeto e Execução de Fundações Rasas.** Fundação: Teoria e Prática. São Paulo, SP, PINI, 1996.

FOLHA DE ASSINATURAS

Aluno: Igor Carcanholo Iasco Pereira

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Giovana Bizão Georgetti

Uberlândia, 05 de Dezembro de 2019.

