



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AMANDA CALDEIRA DE OLIVEIRA
VITOR MORAES DA CRUZ

***COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UMA
VOÇOROCA LOCALIZADA NO CAMPUS ALTO
PARAOPEBA, EM OURO BRANCO, MG.***

OURO BRANCO, MG
DEZEMBRO DE 2018

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS ALTO PARAPEBA**

**AMANDA CALDEIRA DE OLIVEIRA
VITOR MORAES DA CRUZ**

***COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UMA
VOÇOROCA LOCALIZADA NO CAMPUS ALTO
PARAOPEBA, EM OURO BRANCO, MG.***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em cumprimento às exigências do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João Del-Rei.

ORIENTADOR: Tales Moreira de Oliveira

**OURO BRANCO – MG
DEZEMBO DE 2018**

**AMANDA CADEIRA DE OLIVEIRA
VITOR MORAES DA CRUZ**

***COMPORTAMENTO GEOTÉCNICO DE UMA
VOÇOROCA LOCALIZADA NO CAMPUS ALTO
PARAOPEBA, EM OURO BRANCO, MG.***

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São João del-Rei, *Campus* Alto Paraopeba, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

A Banca Examinadora, composta pelos membros abaixo, avaliou este TCC:

Tales Moreira de Oliveira – Orientador

Leandro Neves Duarte – Examinador 1

Douglas Sousa – Examinador 2

Ouro Branco, __/__/__

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Deus pela força e disposição para realizarmos com sucesso todos os desafios impostos durante este trabalho.

Aos nossos pais, familiares e amigos, que sempre nos apoiaram e nos incentivaram com muito amor e carinho.

Somos gratos à Marcele e ao Fábio pelo companheirismo e amor, estando sempre presentes nas horas de estudos, dificuldades e alegrias.

Ao INFRAGEO, em especial Tamires e Caio, que foram essenciais no desenvolvimento das atividades, nos ensinando cada passo a seguir com muita prestatividade e disposição.

À Universidade Federal de São João del-Rei pelo suporte e infraestrutura.

Ao nosso orientador prof. Tales Moreira de Oliveira pela oportunidade, orientação, paciência e apoio neste trabalho.

A todos os professores e técnicos que nos ajudaram e proporcionaram o conhecimento para fazer deste trabalho um sucesso.

RESUMO

A região do Alto Paraopeba está inserida numa Formação Geológica Geotécnica de grande potencial erosivo e a aproximadamente doze anos, no *Campus* Alto Paraopeba, da Universidade Federal de São João Del-Rei, cidade de Ouro Branco, Minas Gerais, instalou-se um processo erosivo que atualmente encontra-se no estágio de uma voçoroca, classificada segundo a metodologia de Oliveira (1999) como do tipo II, desconectada. Em consequência deste processo existem riscos potenciais à segurança do *Campus* inclusive levando à ruptura de uma das pistas de acesso. Com o propósito de entender a gênese e a concepção de um modelo geológico geotécnico para voçoroca, avaliar a estabilidade dos taludes formados pelo aprofundamento da ravinação e levantar a perda média anual de material inconsolidado, desenvolveu-se um estudo geológico da região. Estudou-se um levantamento planialtimétrico, executado por aerofotogrametria, com uso de drone e caracterizou-se o solo local por meio de ensaios de campo e laboratório. Os resultados obtidos mostram que a voçoroca possui em média, uma perda de partículas na ordem de 1580,5m³ por ano. Além disso, o solo presente tem origem em rocha metamórfica gnáissica, apresentando composição amplamente heterogênea. O solo indicou ainda condição de argilas pré-adensadas e comportamento bilinear quando submetido ao ensaio de cisalhamento direto. Esses resultados permitiram entender então, os processos geotécnicos responsáveis pela formação da voçoroca e a sua evolução.

Palavras-chave: erosão, voçoroca, geotecnia, solo, meio ambiente, Alto Paraopeba.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização da voçoroca no CAP.....	10
Figura 2 - Morfologia das erosões	14
Figura 3 - Modelo de classificação de ravinas e voçorocas.....	16
Figura 4 - Principais formas de voçorocas encontradas em Manaus.....	16
Figura 5 - Detalhes dos perfis transversal e longitudinal	18
Figura 6 - Mapeamento da voçoroca para cálculo da área e do volume	19
Figura 7 - Pluviometria e temperaturas médias em 2018 para Ouro Branco - MG	22
Figura 8 - Vegetações das Regiões Sul e Sudeste.....	22
Figura 9 - Mapa de Solos do Estados de Minas Gerais.....	23
Figura 10 - Mapa dos Complexos Mineralógicos.....	24
Figura 11 - Perfil geológico-geotécnico da Voçoroca localizada no Campus Alto Paraobepa	28
Figura 12 - Seções analisadas para a estabilidade de taludes.....	28
Figura 13 – Seção 6: Lado esquerdo com fator de segurança menor que 1,5 ..	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da erosão pelos fatores ativos.....	13
Tabela 2 - Classificação granulométrica	26

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Curva de Adensamento da Amostra 4.....	40
Gráfico 2. Envoltória de ruptura da Amostra 4.....	40

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Considerações Gerais.....	10
1.2	Objetivos Geral e Específicos.....	11
1.3	Organização do Trabalho.....	11
2	REVISÃO LITERÁRIA.....	12
2.1	Erosão.....	12
2.1.1	Classificação das Erosões.....	12
2.1.2	Erosão hídrica.....	14
2.1.3	Classificação das voçorocas.....	15
2.2	Erosividade causada pelas chuvas e erodibilidade dos solos.....	17
2.3	Taxa de evolução das voçorocas.....	17
2.4	Estudo topográfico da voçoroca.....	18
2.5	Movimentos de terra.....	19
2.6	Aspectos gerais da região do Campus Alto Paraopeba.....	20
2.6.1	Clima.....	21
2.6.2	Vegetação.....	22
2.6.3	Hidrografia.....	23
2.6.4	Solos.....	23
2.6.5	Geologia.....	24
2.7	Estudo geológico geotécnico dos solos.....	25
2.7.1	Caracterização de solo.....	25
2.7.2	Parâmetros de resistência do solo.....	27
3	ARTIGO.....	30
4	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45
5	ANEXOS.....	50

5.1	Curvas Granulométricas	50
5.2	Ensaio de Adensamento – Amostra 4	53
5.3	Ensaio de Cisalhamento Direto – Amostra 4	54

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

A degradação e o transporte do solo ou rocha pela ação de agentes intempéricos como a água e o vento recebe o nome de erosão, que provém do latim *erodere* e significa “corroer”. A evolução da erosão ao longo do tempo depende de características geológicas e geomorfológicas da região em degradação. Além disso, fatores externos, como escoamento superficial e ações antrópicas, e fatores internos, como potencial de erodibilidade do solo, também influenciam diretamente no processo erosivo (Carvalho et al. 2017).

Em relação aos processos erosivos, as voçorocas merecem destaque, pois segundo Oliveira e Brito (1998) se referem ao último estágio da erosão hídrica, quando geralmente o seu aprofundamento atinge o lençol freático, levando a um desprendimento contínuo de particulados do solo. Além disso, podem levar a graves problemas ambientais, sociais e econômicos, como empobrecimento do solo, riscos à segurança e alto investimento para a sua recuperação (Lima, 2016).

Nos taludes da porção sudoeste do *Campus Alto Paraopeba* (CAP), da Universidade Federal de São João Del-Rei (UFSJ), em Ouro Branco, Minas Gerais, iniciou-se um processo erosivo há aproximadamente doze anos. No decorrer do tempo, a degradação evoluiu para voçoroca e atualmente o local apresenta riscos de acidentes, além de ter comprometido parte de uma das vias que dão acesso ao campus, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Localização da voçoroca no CAP.



Fonte: adaptado de Google Earth, 2018

O presente trabalho tem como objetivo o entendimento do processo de formação da voçoroca explicado à luz da geotecnia. Para tanto, foram desenvolvidos ensaios de campo e laboratório a fim de classificar e caracterizar os solos encontrados na voçoroca, bem como estimar a taxa média anual de perda de solo a partir de um levantamento planialtimétrico aplicando aerofotogrametria com utilização de drone.

Pretende-se conceber um modelo geológico geotécnico para a área afetada e entender a gênese da voçoroca sobre os pontos de vista da geotecnia e geologia local. Assim, os resultados deste trabalho poderão auxiliar no desenvolvimento do plano de recuperação ambiental da área degradada, na escolha da melhor solução de engenharia para a intervenção no processo evolutivo da erosão.

1.2 Objetivos Geral e Específicos

Este trabalho teve como principal objetivo entender, através da geotecnia, o processo de formação da voçoroca localizada no CAP a partir de ensaios de campo e laboratório.

Os objetivos específicos são:

- I. Caracterizar e classificar o solo;
- II. Caracterizar os parâmetros de resistência do solo: coesão (C) e ângulo de atrito (ϕ);
- III. Estimar a erodibilidade dos taludes, bem como a taxa anual de perda de solo a partir do levantamento planialtimétrico da área;

Somando aos dois objetivos anteriores, um objetivo secundário deste trabalho é elucidar o talento e a criatividade de outros alunos de graduação para que possam dar continuidade a estudos no âmbito das erosões hídricas na região do Alto Paraopeba.

1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho foi dividido em três partes principais:

Na primeira, tem-se uma introdução geral sobre a temática abordada neste trabalho, elencando também os objetivos gerais e específicos.

Na segunda etapa, faz-se uma sintética revisão literária. Nesse momento, aborda-se fundamentalmente sobre o processo evolutivo de forma geral e os

principais métodos de classificação das voçorocas. Além disso, expõem-se de forma sucinta sobre os aspectos gerais da região do Alto Paraopeba. Finalmente são apresentados os principais conceitos e teorias sobre o estudo dos solos em geral, utilizados nesse estudo.

A terceira etapa deste trabalho dedica-se à apresentação de um artigo intitulado “Comportamento geotécnico de uma Voçoroca localizada no Campus Alto Paraopeba, em Ouro Branco, MG”.

O trabalho é finalizado com as referências bibliográficas das quais o estudo foi embasado e validado, além dos anexos que mostram os resultados das curvas granulométricas das amostras, do ensaio de adensamento pelos métodos de Pacheco e Silva e Casagrande, e do ensaio de cisalhamento direto.

2 REVISÃO LITERÁRIA

2.1 Erosão

Carvalho et al. (2006) explicaram que a degradação e o transporte do solo ou rocha pela ação de agentes como a água, o vento, o gelo e o homem recebe o nome de erosão, que provém do latim *erodere* e significa “corroer”. Esse processo está associado a fatores como tipo de solo, cobertura vegetal, tempo, clima e relevo do local estudado. Rocha (2007) diz que as erosões são um fenômeno geológico recorrente e por consequência tem alto potencial de modificação do ambiente causando, de forma direta ou indireta, o desenvolvimento do relevo local.

2.1.1 Classificação das Erosões

O processo erosivo, assim como vários outros processos geotécnicos, evolui gradativamente e possui várias classificações e uma delas é quanto à gênese. Elas podem ser qualificadas como erosão natural ou antrópica. Salomão e Iwasa (1995, apud Lima 2016) disseram que as erosões naturais (ou geológicas) evoluem em condições de conformidade com a formação do solo. Já as do tipo antrópica (ou acelerada) apresentam intensidade acima da formação do solo, não possibilitando seu restabelecimento de forma natural.

Em 1982, Zachar (apud Carvalho et. al, 2006) propôs uma terminologia para categorizar os tipos de erosão mais importantes, destacando a combinação entre os agentes erosivos e a ação da gravidade. A Tabela 1 mostra esta classificação com

pequenas alterações realizadas por Carvalho et. al (2006). Apesar do homem ser o principal agente desencadeador de vários dos tipos de erosão descritos, nesta classificação, a erosão antrópica é apresentada separadamente.

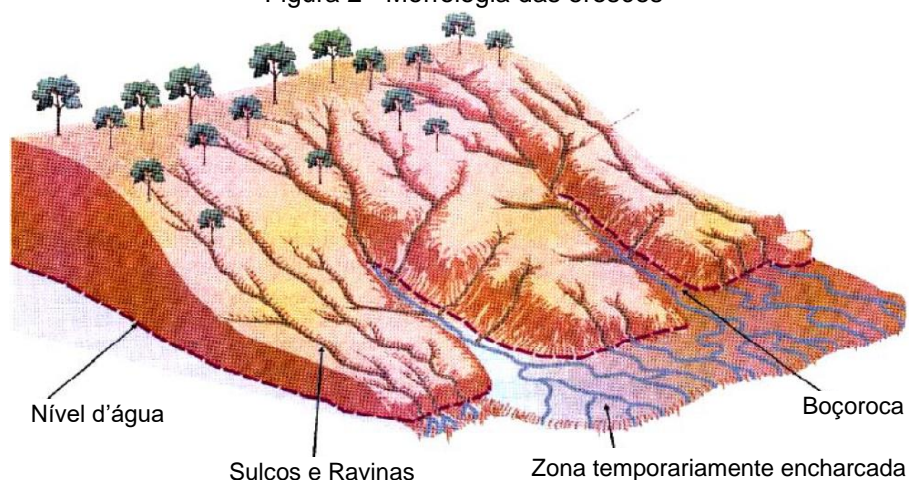
Tabela 1 - Classificação da erosão pelos fatores ativos.

Fator	Termo
1. água	erosão hídrica
1.1. chuva	erosão pluvial
1.2. fluxo superficial	erosão laminar
1.3. fluxo concentrado	erosão linear (sulco, ravina e voçoroca)
1.4. rio	erosão fluvial
1.5. lago, reservatório	erosão lacustrina ou límica
1.6. mar	erosão marinha
2. geleira	erosão glacial
3. neve	erosão nival
4. vento	erosão eólica
5. terra, detritos	erosão soligênica
6. organismos	erosão organogênica
6.1. plantas	erosão fitogênica
6.2. animais	erosão zoogênica
6.3. homem	erosão antropogênica

Fonte: Zac har (1982), apud Carvalho et. al (2006).

No entanto, Carvalho et al. (2006) sugerem que as erosões podem ser classificadas em quatro principais grupos, sendo eles: erosão hídrica, erosão eólica, erosão glacial e erosão organogênica. Neste trabalho deu-se foco nas erosões hídricas, pois a erosão localizada no CAP é predominantemente deste tipo, com caráter fluvial e antrópico. Nesse sentido, Carvalho et al. mostram que o grupo das erosões hídricas ainda se subdivide em erosão laminar (ou superficial), erosão interna (ou subsuperficial) e erosão linear (sulcos, ravinas e voçorocas), dependendo do seu grau de desenvolvimento (Figura 2).

Figura 2 - Morfologia das erosões



Fonte: Karmann (2000 apud Rocha 2007).

2.1.2 Erosão hídrica

Se tratando de erosões hídricas, elas se iniciam, geralmente, de forma laminar. Conforme mostra por Rocha (2007), nesse estágio da erosão ocorre a remoção de uma camada fina de solo de maneira suave e relativamente uniforme, em toda a superfície do terreno. Nesse caso, o desprendimento das partículas do solo se dá principalmente pelo impacto das gotas de chuva e do escoamento superficial. A erosão laminar carrega as partículas mais leves do solo e, para a agricultura, a porção de solo que possui maior valor por ser mais ativa, é a formada pelas menores partículas. Assim, é possível mensurar os seus impactos sobre a fertilidade do solo. Uma característica visual é a mudança na coloração do solo.

Segundo o mesmo autor, quando há concentração de água e a energia do fluxo superficial aumenta (velocidades maiores), a erosão passa a ser classificada como linear. O primeiro estágio recebe o nome de sulco, onde há o início da formação de canais, porém o corte é pouco profundo no solo, atingindo até 10cm de profundidade, como identificou Carvalho et al. (2017). Este último autor defende que a erosão laminar e a erosão em sulcos podem coexistir, isto é, não há um ponto que limite o final da erosão laminar e o início da erosão em sulcos. Isso acontece porque o solo possui partes menos erodíveis, resultando em erosões laminares, e porções mais erodíveis, originando os sulcos. Ainda de acordo Rocha (2007), o segundo estágio das erosões lineares se verifica quando há o aprofundamento do sulco em virtude da continuidade do fluxo concentrado e posto isso, a erosão passar a ser denominada como ravina.

As voçorocas integram o último estágio do processo erosivo, que acontece quando as ravinas não são tratadas a tempo e atingem o lençol freático, onde o regime de erosão subsuperficial passa a contribuir no processo erosivo. Nesse mesmo pensamento, Carvalho et al. (2006, p. 54) pontuam que na voçoroca atuam vários processos erosivos, como erosão superficial, interna, solapamentos, desabamentos, escorregamentos de taludes e quedas de blocos. Em conjunto, esses processos deixam este estágio da erosão com alto poder destrutivo que se desenvolvem, muitas vezes, remontando da jusante para montante.

A erosão interna ou *piping* se trata da formação de canais em forma de tubos que podem evoluir para grandes cavidades no subsolo. Esse fenômeno pode ser associado à antigos formigueiros, cujos vazios favorecem a infiltração da água e a erosão interna, ou ainda a fluxo de percolação com gradientes hidráulicos elevados (Carvalho et al. 2006).

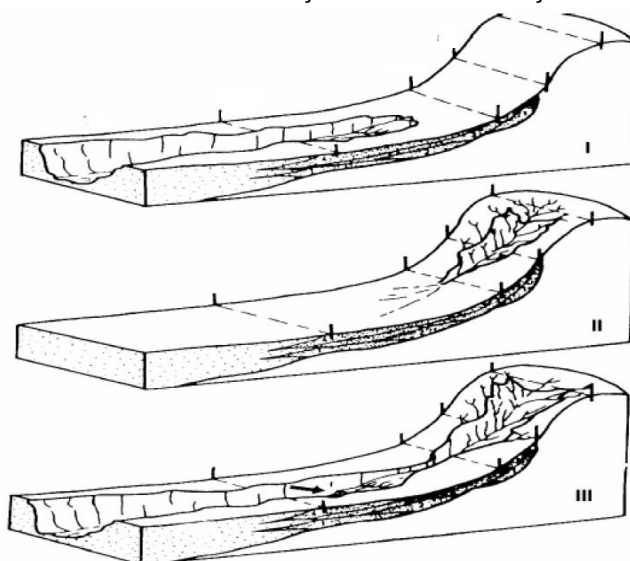
2.1.3 Classificação das voçorocas

Segundo Guerra (2005), as voçorocas são canais d'água intermitentes onde há o fluxo da água durante e após os eventos chuvosos e, diferentemente das ravinas, as voçorocas não podem ser recuperadas por operações manuais e simplificadas com o trato do solo. Além disso, as voçorocas estão propícias a se formar com grandes volumes de escoamento superficial concentrados. É comum observar voçorocas em pastagens e provavelmente, é a principal forma de erosão em bacias hidrográficas.

Oliveira (1999) propôs um modelo de classificação para voçorocas, onde ele as agrupou em três padrões principais descritos abaixo e identificados na Figura 3:

- I. Formas conectadas a rede regional de canais onde prevaleceriam os fluxos superficiais;
- II. Formas desconectadas e que ocorrem nas encostas superiores das cabeceiras de drenagem, com fluxos superficiais dominantes e
- III. Formas resultantes da junção das duas anteriores, com uma interação de fluxos superficial e subsuperficial

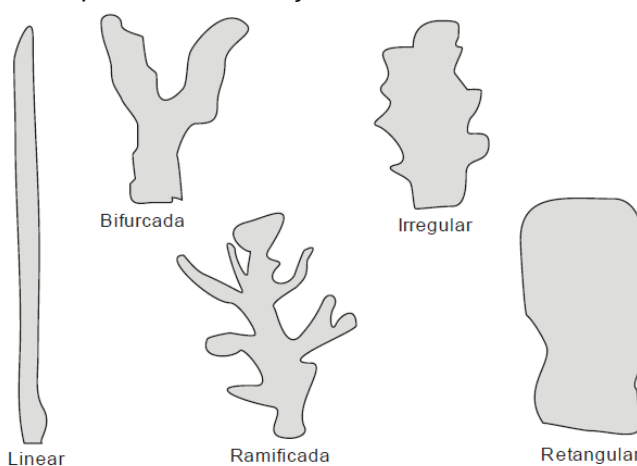
Figura 3 - Modelo de classificação de ravinas e voçorocas



Fonte: Oliveira (1999).

Quando as erosões são avaliadas em relação a sua vista superior, ou em planta, Vieira (2008) propôs uma classificação inspirado nas principais formas das voçorocas na região de Manaus (Figura 4). Cada forma é resultante de processos erosivos específicos com influência do relevo, geologia, litologia, solo, cobertura vegetal e drenagem superficial.

Figura 4 - Principais formas de voçorocas encontradas em Manaus



Fonte: Vieira (2008).

Quando a seção transversal da erosão é avaliada, ou seja, a calha, Santos (1997, apud Rocha 2007) explica que durante a fase madura da voçoroca, ela atinge a forma aproximada de “U”, quase sempre em grandes dimensões. À medida que

ocorre a estabilização do fundo da voçoroca, ela passa a apresentar a conformação de “V”. Nessa fase, as paredes atingem um quadro de equilíbrio, cuja profundidade é limitada pelo substrato rochoso.

2.2 Erosividade causada pelas chuvas e erodibilidade dos solos

Carvalho et al. (2006) afirmam que o processo erosivo depende tanto de fatores externos, tais como potencial erosivo da chuva, a taxa de escoamento superficial e a infiltrabilidade do solo, bem como de fatores internos, como por exemplo a desagregabilidade e erodibilidade do solo. Nesse sentido, a evolução da erosão ao longo do tempo depende diretamente de fatores como características geológicas e geomorfológicas da região local.

A erosividade é uma característica intrínseca das chuvas que indica a capacidade de um evento chuvoso erodir o solo. Alguns fatores influenciam diretamente na erosividade, tais como a intensidade precipitada, energia cinética e características das gotas da chuva. Destes, a intensidade da chuva é o parâmetro que mais afeta a erosividade, bem como afeta a capacidade de infiltração do solo, conseqüentemente influência na taxa de escoamento superficial. Por outro lado, a erodibilidade representa a fragilidade do solo à erosão. Dentre as várias características dos solos, aquelas que mais destacam no estudo da erodibilidade são a combinação granulométrica (textura), o teor de matéria orgânica, o grau de compactação do solo e a estabilidade dos grãos. É importante destacar que os parâmetros de erodibilidade não são estáticos no tempo e modificam-se com o aumento do teor de umidade do solo (Soil Science Society Of America, 1975; Evans, 1984; Guerra, 1994; Lozet e Mathieu, 2002, apud Vieira 2008).

2.3 Taxa de evolução das voçorocas

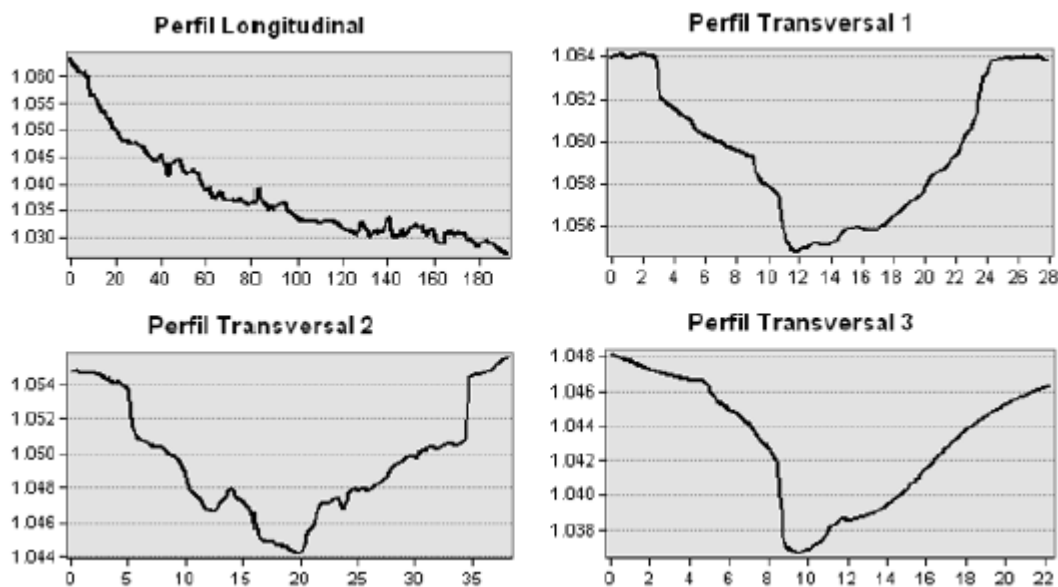
No Brasil, duas técnicas têm sido mais utilizadas nos estudos sobre evolução das bordas de voçorocas. Segundo Drumond (2006), “[A] primeira é a avaliação aerofotogramétrica efetuada com a comparação de aerofotos de diferentes datas e a segunda é pelo método das estacas instaladas ao longo do entorno da erosão”.

2.4 Estudo topográfico da voçoroca

A aerofotogrametria realizada por Souza (2018) teve o auxílio de um veículo aéreo não tripulado (VANT), popularmente conhecido como drone. O sobrevôo resultou no geoprocessamento da voçoroca através da retirada de aerofotografias em alta resolução da região estudada. Além disso, aliado ao VANT, foi utilizado um receptor de GNSS geodésico (do inglês: *Global Navigation Satellite System*) que tem a função de auxiliar o sistema do VANT na retirada de pontos geográficos.

O estudo mostrou o perfil longitudinal e três perfis transversais da voçoroca, indicando seu comprimento de aproximadamente 180m e sua profundidade de 10m a 12m (Figura 5).

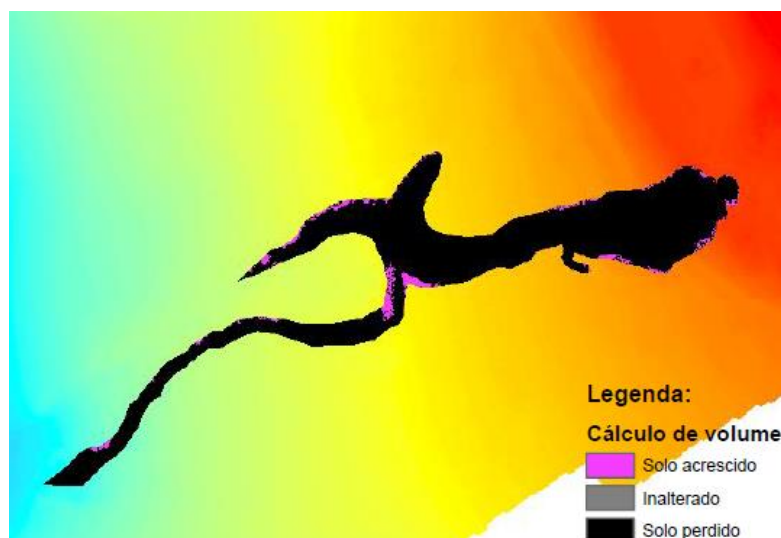
Figura 5 - Detalhes dos perfis transversal e longitudinal



Fonte: Souza, 2018

Souza ainda estimou os valores de área e volume da voçoroca, apresentando 3.995 m² e 18.966 m³ respectivamente (Figura 6).

Figura 6 - Mapeamento da voçoroca para cálculo da área e do volume



Fonte: Souza, 2018

2.5 Movimentos de terra

Oliveira (1995 apud Drumond, 2006) salienta que os processos de movimentos de massa são significativos para o surgimento e progressão das erosões. Desse modo, além dos processos hídricos atuando sobre a voçoroca, os movimentos de massa, tais como os escorregamentos rotacionais e planares, quedas, tombamentos e rastejos, podem agir simultaneamente no processo de voçorocamento.

Segundo o Departamento de Águas e Energia Elétrica de São Paulo (DAEE/IPT, 1989), os principais agentes instabilizadores de taludes, gerando movimentos de massas são:

- Relevo – quanto maior a declividade do terreno, maiores as chances de ocorrência de movimentos de massa;
- Clima – os índices pluviométricos, o regime das águas subterrâneas, nível do lençol freático e as taxas de insolação no solo também são fatores que intensificam os movimentos gravitacionais de massa;
- Características geológico-geotécnicas do terreno - diferentes rochas e solos apresentam variadas resistências, que proporcionam maior ou menor estabilidade às encostas;
- Vegetação – aumentam a estabilidade do maciço, além de atuarem na prevenção da deflagração de erosão e;

- Ação humana – cortes, aterros, desmatamento, canais de drenagem mal dimensionados etc. tendem a modificar o equilíbrio das encostas.

Sucintamente, Drumond (2006) descreve os principais movimentos de massa associados ao voçorocamento. Estes são:

- Escorregamentos rotacionais – também denominados *slumps*, é o solapamento basal desencadeado pela ação da erosão interna (*piping*) nas voçorocas. As fendas de tração que desenvolvem na superfície do solo, devido ao fluxo d'água pluvial também favorecem a ocorrência desse tipo de movimento de massa;
- Escorregamentos planares – fenômeno de movimento de massa que ocorre ao longo de planos de menor resistência ao cisalhamento do saprólito ou rocha alterada;
- Quedas de blocos – movimento de queda desencadeado pelo descalçamento basal provocado pelo efeito cachoeira, ou pelo *piping* em canais laterais das voçorocas, ou ainda pela ação da água percolada por entre as fendas de tração na superfície do solo;
- Rastejo – também denominado *creep*, é o fenômeno de movimento lento da massa de sedimentos, bem como do solo de baixa coesão, que quando saturado pelas águas das chuvas torrenciais, fluem lentamente para jusante.

2.6 Aspectos gerais da região do Campus Alto Paraopeba

O Campus Alto Paraopeba, da UFSJ, está localizado nos limites de divisa entre os municípios de Congonhas e Ouro Branco, em Minas Gerais, distando aproximadamente 100km da capital mineira, Belo Horizonte (CODAP, 2010). Segundo dados do aplicativo *Google Earth*, o CAP se instala em uma altitude média de 1.067m.

O município de Ouro Branco faz parte da região central de Minas Gerais e é o município mais próximo ao Campus Alto Paraopeba (CAP), servindo de moradia para a maioria dos estudantes. A cidade foi fundada em 1664 e emancipada em 1953. Seu desenvolvimento ocorreu, principalmente, aos pés da Serra de Ouro Branco, formação geológica que representa o marco inicial da Serra do Espinhaço. Além de ser parte da região central do estado, a cidade de Ouro Branco ainda faz

parte de outras duas regiões: a região do Quadrilátero Ferrífero e a microrregião do Alto Paraopeba.

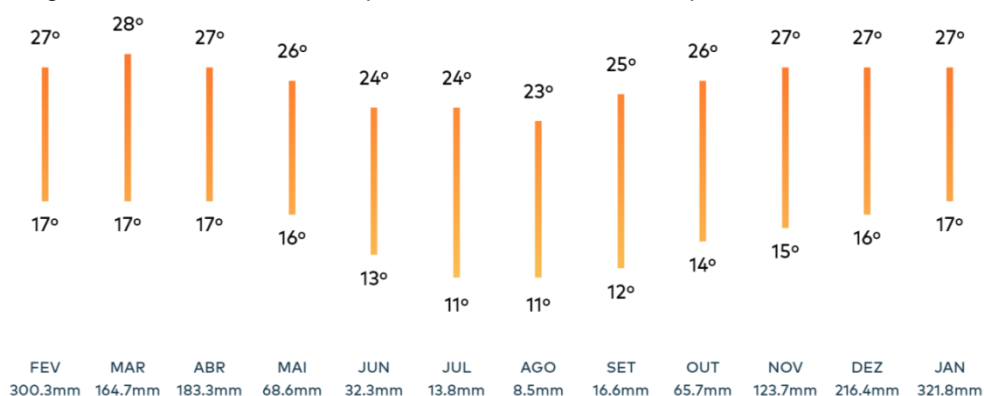
Segundo a revista CODAP (2010), a região do Alto Paraopeba possui área física de aproximadamente de 2 mil km², ocupando cerca de 0,36% do território de Minas Gerais. Ao todo, 13 municípios compõem a região referida, dos quais estão Belo Vale, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Entre Rios de Minas, Jeceaba, Ouro Branco e São Brás do Suaçuí. Um dos principais afluentes do Rio São Francisco, o Paraopeba, dá o nome à região. Na língua Tupi, Paraopeba significa “rio de águas rasas e de pouca profundidade”.

Já a região do Quadrilátero Ferrífero, que compreende a porção centro-sudeste do estado de Minas Gerais, área de cerca de 7 mil km² e abrange parte dos municípios de Bom Jesus do Amparo, São Gonçalo do Rio Abaixo, Barão de Cocais, Santa Bárbara, Catas Altas, Alvinópolis, Mariana, Ouro Preto, Ouro Branco, Congonhas, Jeceaba, Belo Vale, Moeda, Itabirito, Rio Acima, Brumadinho, Mario Campos, Sarzedo, Ibirité, Nova Lima, Raposos, Sabará, Caeté, Belo Horizonte e Santa Luzia. O Quadrilátero Ferrífero é internacionalmente prestigiado como um dos maiores territórios minerais do mundo. As rochas encontradas nessa região remontam parte da história do planeta associada ao Arqueano e Paleoproterozoico e destacam-se por seu significativo patrimônio geológico e mineiro (Ruchkys e Machado, 2013).

2.6.1 Clima

Três tipos de clima ocorrem em Minas Gerais: tropical semiárido, tropical semiúmido e tropical de altitude (Descubra Minas, 2018). Segundo a classificação de Koppen, a cidade de Belo Horizonte - MG pode ser classificada como Cwa, ou clima tropical de altitude (autor desconhecido). Ouro Branco apresenta temperatura média anual de 19,4°C, pluviometria anual na faixa de 1474,9mm. A Figura 7 mostra as médias de pluviometria e temperaturas no ano de 2018.

Figura 7 - Pluviometria e temperaturas médias em 2018 para Ouro Branco - MG



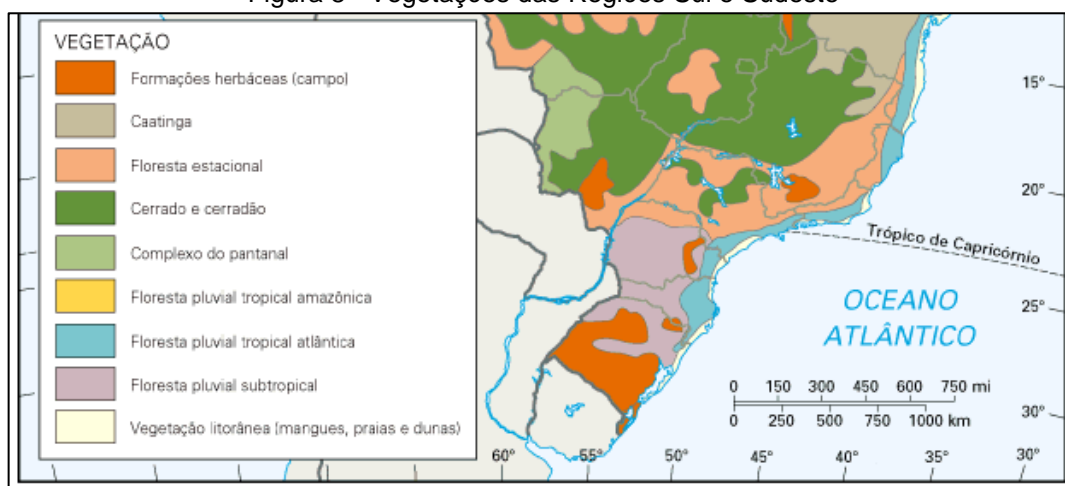
Fonte: Tempo Agora. 2018

2.6.2 Vegetação

De acordo com a Redação Pensamento Verde (2013), a vegetação predominante da região do Alto Paraopeba é a Floresta estacional, que faz parte do bioma da Mata Atlântica (Figura 8). É caracterizada pelo clima com duas estações bem marcadas, sendo uma seca e outra chuvosa. Esse tipo de mata apresenta uma alta densidade de árvores e servem de habitat para diversos animais e plantas menores, essenciais para a manutenção da vida humana e do ciclo de oxigênio.

Apesar do bioma característico ser Mata Atlântica, o *Campus* Alto Paraopeba está inserido numa região de alta antropização, com extensas área utilizadas para plantação de eucaliptos e pastagem.

Figura 8 - Vegetações das Regiões Sul e Sudeste



Fonte: Redação Pensamento Verde. 2013

2.6.3 Hidrografia

A cidade de Ouro Branco está inserida nas bacias do Rio São Francisco e do Rio Doce. Tem como principais corpos hídricos que atravessam a cidade, o Ribeirão Ouro Branco e o Córrego Água Limpa (Pitanga et al, 2015).

2.6.4 Solos

Para a região do grupo Dom Silvério, que compreende as cidades de Mariana, Rio Espera, Ponte Nova e Viçosa, cerca de 70% da área é constituída por um latossolo vermelho-amarelo distrófico, antigo, profundo e com horizontes pouco diferenciados. Além disso, na porção oeste identificam-se afloramentos rochosos e solos da subclasse podzólico vermelho amarelo eutrófico, com horizontes bem desenvolvidos e diferenciados (Brandalise 1991, Baltazar & Raposo 1993, Gradim 2014, Raposo 1991, apud Simões, 2018).

A partir da Figura 9, que mostra parte do Mapa de Solos do Estado de Minas Gerais, idealizado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente (FEAM et. al) em parceria com outras instituições é possível inferir que, em Ouro Branco, há presença de latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), latossolo vermelho distrófico (LVd), cambissolo háplico distrófico (Bxbd) e neossolo litólico distrófico (RLd).

Figura 9 - Mapa de Solos do Estados de Minas Gerais



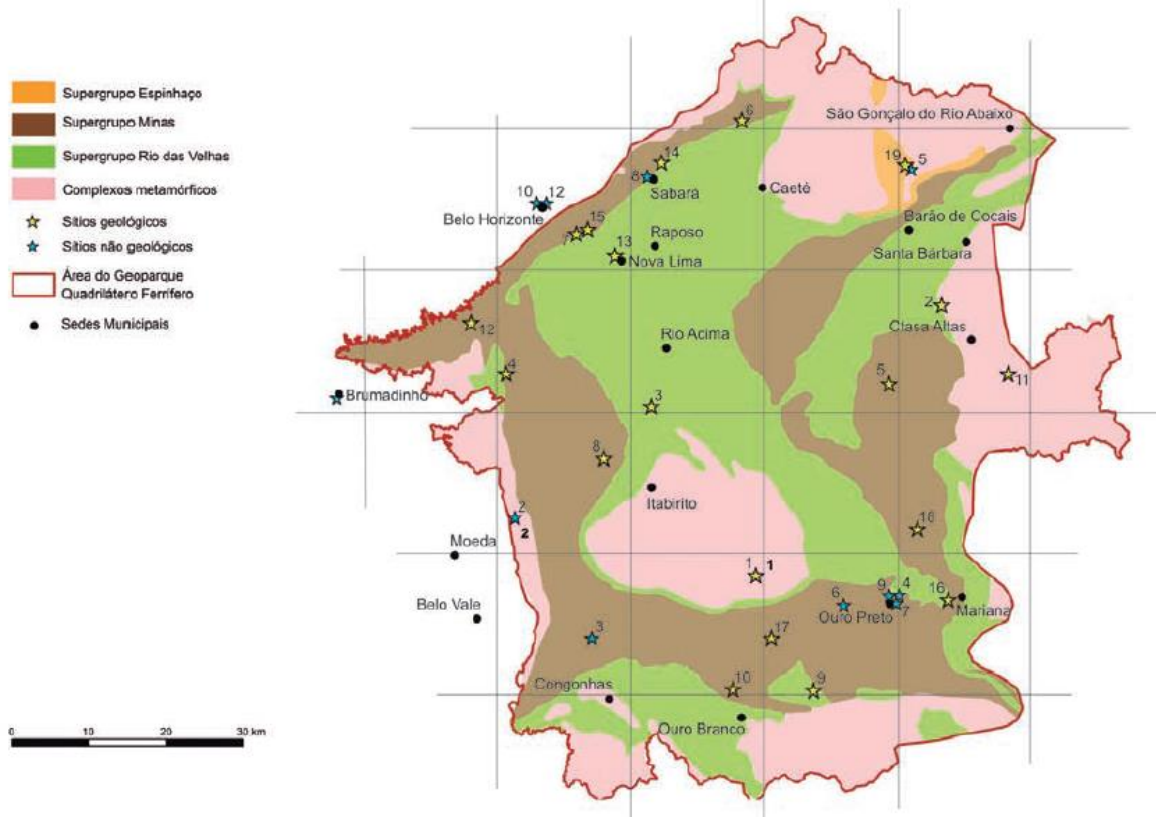
Fonte: Adaptado de FEAM et. al (2010)

2.6.5 Geologia

A estrutura geológica das porções de terras emersas do Brasil é formada predominantemente por bacias sedimentares, que abrange cerca de 64% do território. O restante é formado por escudos cristalinos ou crátons que se formaram na era pré-cambriana (arqueozoico-proterozoico) (Terra e Coelho, 2005).

De acordo com a Figura 10, Ouro Branco está inserido no Supergrupo Rio das Velhas. Destaca-se pela presença também dos Supergrupo Minas e Complexos Metamórficos. A estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero consiste, na escala regional, de conjuntos de terrenos granito-gnáissicos arqueanos, sequências vulcanossedimentares arqueanas, sequências sedimentares, vulcanossedimentares proterozóicas e coberturas sedimentares recentes. Terrenos greenstone arqueanos associados a rochas metassedimentares compõem o Supergrupo Rio das Velhas (CPRM Serviço Geológico do Brasil, 2018).

Figura 10 - Mapa dos Complexos Mineralógicos



Fonte: Azevedo (2011)

2.6.5.1 Geologia local

O *Campus* Alto Paraopeba se encontra em uma área constituída majoritariamente por ortogneisses do tipo tonalito-trondhjemitó-granodiorito, ou TTG, com formações subordinadas de anfibolitos, metabásicas, metultrabásicas, granitos e granodioríticos. CPRM (2011, apud Tresse 2018).

Segundo Lima et al. (2014), o conjunto TTG compõe uma associação gnáissica de alto grau. Nesse sentido, os compostos geológicos de TTG podem ser observados em rochas ígneas, vulcânicas e félsicas, intrudidas por gnaisses.

2.7 Estudo geológico geotécnico dos solos

2.7.1 Caracterização de solo

Para a caracterização do solo da voçoroca existente no CAP e determinação das suas principais propriedades geotécnicas foram realizados ensaios laboratoriais com amostras de solo retiradas do interior da voçoroca. Os ensaios realizados estão descritos a seguir.

2.7.1.1 Massa Específica dos Sólidos

Este ensaio tem por objetivo a determinação da massa específica dos grãos de solo que passam na peneira 4,8 mm. Todos os procedimentos foram realizados em conformidade com a norma NBR 6508 (ABNT, 1984).

2.7.1.2 Granulometria

O ensaio de granulometria dos solos tem por objetivo a determinação da porcentagem em peso do solo dentro de faixas específicas do tamanho das partículas em relação a uma amostra representativa de solo com massa conhecida. A granulometria do material foi obtida seguindo as recomendações da norma NBR 7181 (ABNT, 1984). As faixas de classificação granulométrica, que estão descritas na norma NBR 6502 (ABNT, 1995), são as seguintes:

Tabela 2 - Classificação granulométrica

Tipologia do Solo	Diâmetro da Partícula (mm)
Areia Grossa	0,6 – 2,0
Areia Média	0,2 – 0,6
Areia Fina	0,06 – 0,2
Silte	0,002 – 0,06
Argila	< 0,002

. Fonte: Adaptado de NBR 6205 (ABNT, 1995)

2.7.1.3 Limites de Atterberg

A determinação dos estados de consistência dos solos é feita de forma empírica, através dos ensaios que descrevem os Limites de Atterberg. Nesse trabalho foram definidos os Limites de Liquidez e os Limites de Plasticidade.

O ensaio de Limite de Liquidez foi realizado de acordo com a NBR 6459 (ABNT, 1984). Tem como finalidade obter o teor de umidade no qual o solo passa do estado líquido para o estado plástico. O método utiliza o aparelho padronizado de Casagrande.

O Limite de Plasticidade é o valor da umidade na qual o solo passa do estado plástico para o estado semissólido. O ensaio para tal determinação foi realizado seguindo a NBR 7180 (ABNT, 1984).

2.7.1.4 Ensaio de Perda de Massa por Imersão

A fim de determinar a Perda de Massa por imersão dos solos, foi seguida a DNER-ME 256/94. Porém, as amostras não foram compactadas como orientado em norma, apenas entalhadas a partir de amostras indeformadas, de acordo com as dimensões do molde padrão do ensaio. Na realidade, o objetivo deste ensaio foi analisar, de forma indireta, a erodibilidade do solo, ou seja, medir o quanto o solo é susceptível ao desprendimento e ao transporte de partículas quando em contato com a água.

2.7.1.5 Ensaio de Adensamento Unidimensional

O adensamento é o processo gradual de redução de volume de uma camada de solo saturado e de baixa permeabilidade, promovido pela drenagem da água presente nos vazios, até total dissipação do acréscimo de poropressão exercida na

porção do solo. Seguindo as recomendações da ABNT NBR 12007/1990, o ensaio de adensamento unidimensional é fundamental para a obtenção de parâmetros de compressibilidade do solo, necessários para a estimativa de recalques por adensamento.

2.7.1.6 Classificação dos Solos

Existem dois métodos notórios de classificação dos solos: o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), e o Sistema da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), método americano também conhecido como TRB.

2.7.2 Parâmetros de resistência do solo

Para a determinação das propriedades de resistência do solo têm-se dois importantes ensaios: Cisalhamento direto e Sondagem a Percussão.

2.7.2.1 Cisalhamento Direto

O ensaio de cisalhamento direto é um ensaio simples, realizado em laboratório, que permite a determinação da resistência ao corte de um corpo de prova de solo. A partir do ensaio é possível obter os parâmetros de resistência do solo, tais como a coesão (C') e o ângulo de atrito (ϕ'). Os procedimentos para realização do ensaio podem ser encontrados na norma americana ASTM D3080 (2011).

2.7.2.2 Sondagem a Percussão (SPT)

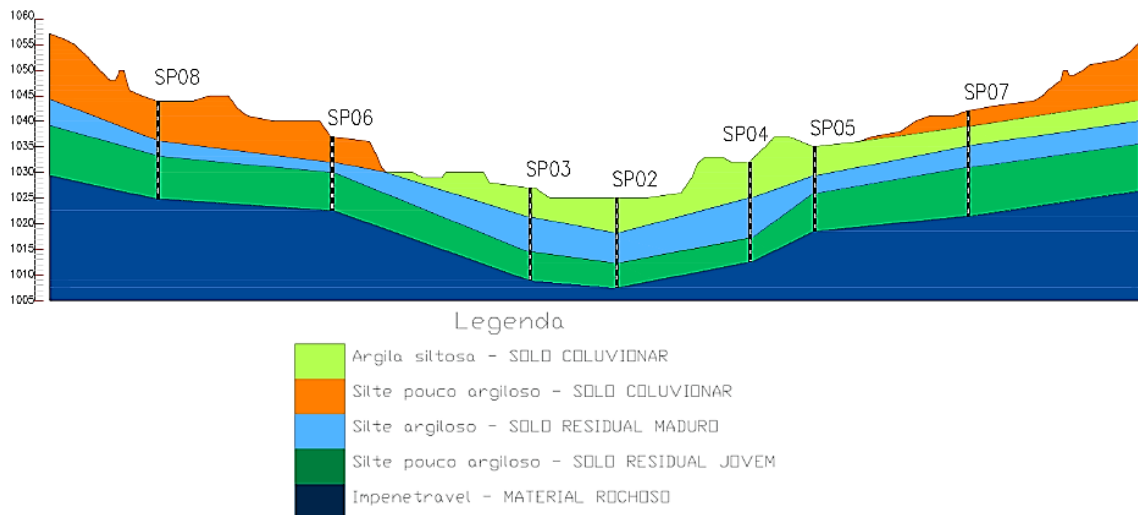
A sondagem a percussão, ou SPT, é um procedimento de simples reconhecimento do subsolo, de acordo com as recomendações da ABNT NBR 6484/2001, com uso do amostrador padronizado "RAYMOND" ou SPT.

A resistência à penetração é representada pelo índice de resistência à penetração, NSPT, que é a soma do número de golpes de um martelo com peso de 65 kgf, caindo em queda livre de uma altura de 75 cm, necessários à penetração dos 30 cm finais do amostrador padronizado SPT.

2.7.2.2.1 Perfil geológico-geotécnico da voçoroca através do SPT

Romualdo e Romão (2018), através do SPT disponibilizado pelo acervo da Universidade Federal de São João del-Rei, contendo 7 furos de sondagem, realizaram o perfil geológico-geotécnico da voçoroca localizada no Campus Alto Paraopeba (CAP), como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Perfil geológico-geotécnico da Voçoroca localizada no Campus Alto Paraopeba

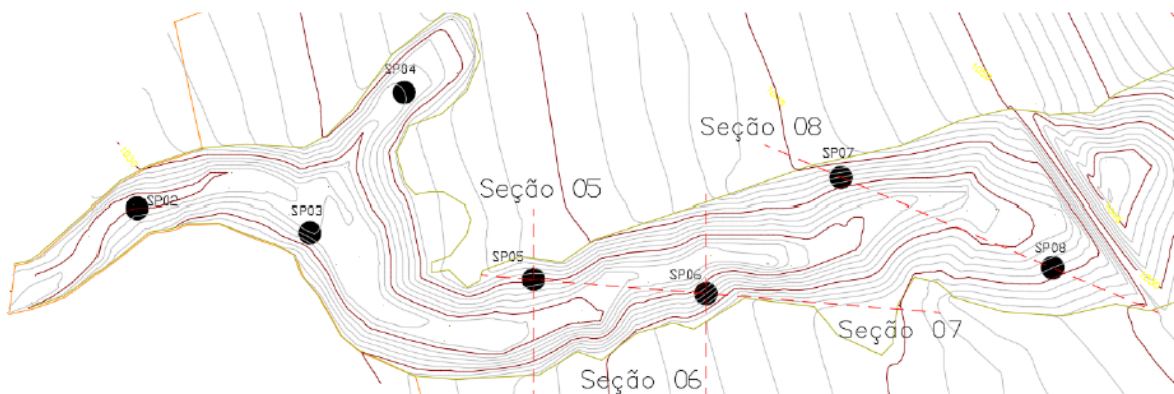


Fonte: Romualdo e Romão, 2018.

2.7.2.2.2 Análise de estabilidade de taludes através do SPT

De posse do SPT ainda, Romualdo e Romão (2018) determinaram, a partir de uma análise probabilística de estabilidade de taludes em seções consideradas críticas. Tais seções foram aquelas que apresentaram risco à segurança da Universidade. As seções analisadas foram as seções 5, 6, 7 e 8 que passam pelos furos SP05, SP06, SP07 e SP08 de acordo com a Figura 12.

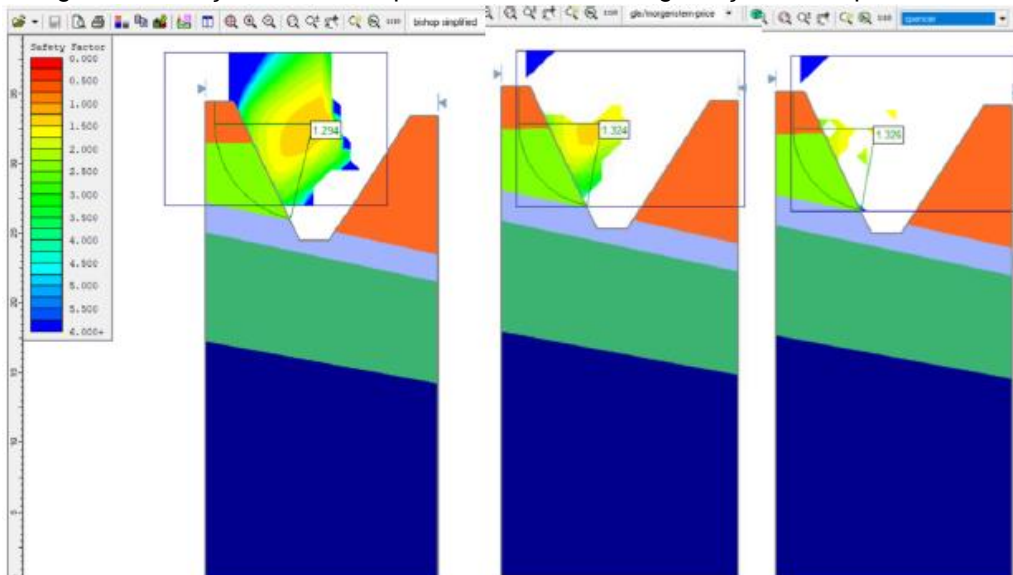
Figura 12 - Seções analisadas para a estabilidade de taludes



Fonte: Romualdo e Romão, 2018.

Os fatores de segurança foram calculados pelo software *Slide* utilizando 3 métodos diferentes. O lado direito da seção 5 e lado esquerdo da seção 6 (Figura 13) apresentaram fatores de segurança menores que 1,5, valor mínimo estabelecido pela NBR 11682 (ABNT, 1991).

Figura 13 – Seção 6: Lado esquerdo com fator de segurança menor que 1,5



Fonte: Romualdo e Romão, 2018.

3 ARTIGO

Comportamento geotécnico de uma Voçoroca localizada no Campus Alto Paraopeba, em Ouro Branco, MG.

RESUMO: A região do Alto Paraopeba está inserida numa Formação Geológica Geotécnica de grande potencial erosivo e a aproximadamente doze anos, no *Campus* Alto Paraopeba, da Universidade Federal de São João Del-Rei, cidade de Ouro Branco, Minas Gerais, instalou-se um processo erosivo que atualmente encontra-se no estágio de uma voçoroca, classificada segundo a metodologia de Oliveira (1999) como do tipo II, desconectada. Em consequência deste processo existem riscos potenciais à segurança do *Campus* inclusive levando à ruptura de uma das pistas de acesso. Com o propósito de entender a gênese e a concepção de um modelo geológico geotécnico para voçoroca, avaliar a estabilidade dos taludes formados pelo aprofundamento da ravinação e levantar a perda média anual de material inconsolidado, desenvolveu-se um estudo geológico da região. Estudou-se um levantamento planialtimétrico, executado por aerofotogrametria, com uso de drone e caracterizou-se o solo local por meio de ensaios de campo e laboratório. Os resultados obtidos mostram que a voçoroca possui em média, uma perda de partículas na ordem de 1580,5m³ por ano. Além disso, o solo presente tem origem em rocha metamórfica gnáissica, apresentando composição amplamente heterogênea. O solo indicou ainda condição de argilas pré-adensadas e comportamento bilinear quando submetido ao ensaio de cisalhamento direto. Esses resultados permitiram entender então, os processos geotécnicos responsáveis pela formação da voçoroca e a sua evolução.

PALAVRAS-CHAVE: Erosão, Voçoroca, Geotecnia, Solo, Meio ambiente, Alto Paraopeba.

ABSTRACT: The Alto Paraopeba area is part of a Geological Geotechnical Formation with high erosive potential and approximately twelve years ago, at the Campus Alto Paraopeba of the Federal University of São João Del-Rei, in Ouro Branco, MG, started an erosion process that now has reached the status of gully, classified by Oliveira's method (1999) as type II, disconnected. As consequence of this process there are potential risks to the Campus's safety including leading one of

the access lanes to rupture. With the purpose to understand the genesis and the concept of the gully's geological geotechnical model, assess the stability of the slopes formed by the ravines deepening and estimate the annual unconsolidated material loss, a geological study of the area was carried out. A study of a planialtimetric survey, conducted by aero photogrammetry using a drone device, was made as well as characterization of the local soil through laboratory and field testing. The results show the gully has an average particle loss of 1580,5 m³ per year. In addition, the present soil has origins in gneiss rock, showing a very widely heterogenous composition. Also, the soil indicated conditions of pre consolidated clay and bilinear behavior when submitted to direct shear testing. Therefore, the results allowed to understand the geotechnical processes responsible for the erosion formation and its development.

KEY WORDS: Erosion, Gullies, Geotechnical, Soil, Environment, Alto Paraopeba.

1 INTRODUÇÃO

A degradação e o transporte do solo ou rocha pela ação de agentes intempéricos como a água e o vento recebe o nome de erosão, que provém do latim *erodere* e significa “corroer”. A evolução da erosão ao longo do tempo depende de características geológicas e geomorfológicas da região em degradação. Além disso, fatores externos, como escoamento superficial e ações antrópicas, e fatores internos, como potencial de erodibilidade do solo, também influenciam diretamente no processo erosivo (Carvalho et al. 2017).

Se tratando de erosões hídricas, essas se iniciam de forma laminar. Conforme Rocha (2007), nesse estágio ocorre a remoção suave de uma camada fina de material inconsolidado. Quando há concentração de água e a energia do fluxo superficial aumenta, a erosão passa a ser linear. O primeiro estágio recebe o nome de sulco, onde há o início da formação de canais. Quando há o aprofundamento do sulco em virtude da continuidade do fluxo concentrado, denomina-se ravina. O último estágio da erosão hídrica recebe o nome de voçoroca. Segundo Guerra (2005), as voçorocas são canais d'água intermitentes onde há o fluxo da água durante e após as chuvas. As voçorocas, diferentemente das ravinas, não podem ser recuperadas por operação manual ou simplificada, podendo levar a graves

problemas ambientais, sociais e econômicos, como empobrecimento do solo, riscos à segurança e alto investimento para a sua recuperação (Lima, 2016).

Nos taludes da porção sudoeste do *Campus Alto Paraopeba* (CAP), da Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ), em Ouro Branco, Minas Gerais, iniciou-se um processo erosivo a aproximadamente doze anos. No decorrer do tempo, a degradação evoluiu para voçoroca e atualmente o local apresenta riscos de acidentes, além de ter comprometido parte de uma das vias de acesso ao *Campus* (Figura 1).



Figura 1. Localização da voçoroca no CAP. Fonte: Adaptado de *Google Earth*, 2018.

Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo o entendimento do processo de formação da voçoroca explicado à luz da geotecnia.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para atender o objetivo proposto, foi elaborado um esquema, constituído de quatro fases interdependentes como mostrado na Figura 2.

A primeira fase consistiu em uma análise preliminar do local, onde foram verificados aspectos como geologia local, avaliação do processo erosivo, por meio de arquivo fotográfico aéreo, e visita técnica à área de estudo.

Na segunda etapa realizou-se um estudo do volume médio de perda anual de partículas através de um levantamento planialtimétrico realizado por Souza (2018). Com o auxílio de um veículo aéreo não tripulado (VANT), popularmente conhecido como drone, o sobrevoo resultou no geoprocessamento da voçoroca através da retirada de aerofotografias em alta resolução. Aliado ao VANT, foi utilizado um

receptor de GNSS (do inglês: *Global Navigation Satellite System*) que teve a função de fazer a orientação geodésica das ortofotos, para obtenção de um mosaico georreferenciado e de um Modelo Digital de Elevação (MDE). Assim, foi possível obter um estudo planialtimétrico da área e do volume, que serviu de base para o cálculo da perda média de partículas da voçoroca.

A terceira etapa consistiu na definição do perfil geológico-geotécnico do terreno a partir de sete sondagens de simples reconhecimento tipo SPT realizada no entorno da voçoroca. Inicialmente foi observado a aproximação entre os números de golpes de todos os furos, a classificação do solo e a profundidade de cada camada. Assim, o perfil geral foi realizado alinhando os resultados da sondagem, a fim de se verificar a ligação entre as camadas e determinar a estratigrafia do terreno presente na região da voçoroca.

Para caracterizar e entender o comportamento do solo, foram retiradas 6 amostras do interior da voçoroca a uma profundidade de aproximadamente 6 metros. Assim, realizaram-se os seguintes ensaios:

- Análise Granulométrica – ABNT NBR 7181/1984;
- Limite de Liquidez – ABNT NBR 6459/1984;
- Limite de Plasticidade – ABNT NBR 7180/1984;
- Massa Específica dos Sólidos – ABNT NBR 6508/1984;
- Perda de Massa por Imersão – DNER-ME 256/94;
- Adensamento – ABNT NBR 12007/1984;
- Cisalhamento Direto – ASTM D3080/11.

A partir destes resultados, e dos perfis geológicos-geotécnicos obtidos foi possível analisar a estabilidade dos taludes em 4 seções consideradas críticas devido às suas proximidades às edificações da Universidade. Os métodos utilizados foram Bishop Simplificado, Morgenstern-Price e Spencer, através do *software* Slide. Além disso, foi analisado as curvas de nível do perfil topográfico da voçoroca. Para classificá-la foi levado em consideração a concepção de Oliveira (1999). De acordo com o autor, as voçorocas podem ser classificadas em três padrões principais:

- Tipo I: Conectada à rede hidrológica da região;
- Tipo II: Desconectada à rede hidrológica da região;
- Tipo III: Interação entre os tipos I e II.

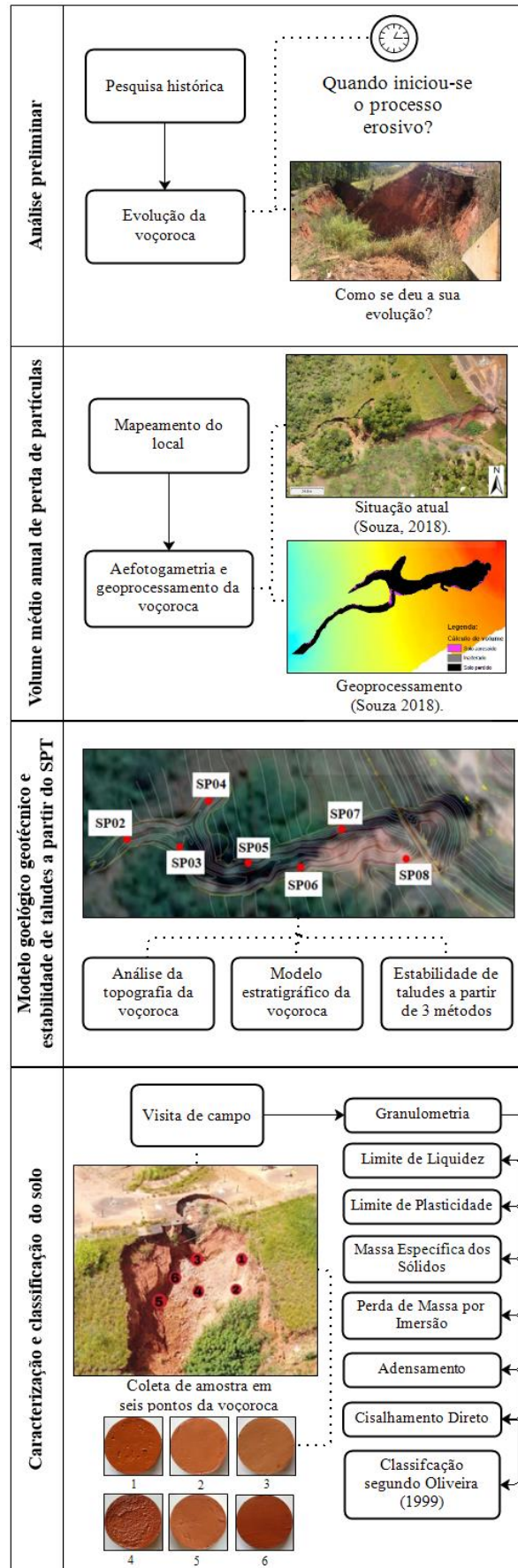


Figura 2. Modelo esquemático da metodologia utilizada.

3 RESULTADOS

3.1 Aspectos gerais do *Campus*

O *Campus* Alto Paraopeba (CAP), da UFSJ, está localizado no município de Ouro Branco, em Minas Gerais, distando aproximadamente 100 km da capital mineira, Belo Horizonte, e se instala em uma altitude média de 1.067m (CODAP, 2010).

Ouro Branco faz parte também do Quadrilátero Ferrífero. Assim como os demais solos encontrados nessa região, os solos presentes na voçoroca, são considerados muito ácidos. Isso é explicado pela presença dos óxidos de ferro que tendem a tonar o pH mais baixo e a cobertura vegetal herbácea, característica de Campos limpos (Lemes, 2009).

Segundo Azevedo et. al. (2012), o *Campus* Alto Paraopeba se encontra em uma área de formação geológica originada por rochas metassedimentares e metavulcânicas pertencentes ao Supergrupo Rio das Velhas. Ele é constituído majoritariamente por ortognaisse do tipo tonalito-trondhjemitó-granodiorito (TTG) de idade arqueana, ou seja, 2,61 – 2,78 bilhões de anos (CPRM, 2011 apud Tresse, 2018). Segundo Lima, Vasconcelos e Gomes (2014), o conjunto TTG compõe uma associação gnáissica de alto grau intrudida, composta por diversos minerais, dentre eles o quartzo, feldspato e biotita.

3.2 Processo evolutivo da voçoroca

Não se sabe ao certo em que momento foi deflagrado o processo erosivo em questão. De acordo com Ferreira e Santos (2015), em março de 2006 (Figura 3) a erosão já se apresentava como ravina devido ao aprofundamento, mas visualmente não havia tomado grandes proporções.

O volume erodido foi aumentando de forma gradual, com maior desprendimento de partículas e a erosão não cresceu em relação à jusante, quando se observa a Figura 4, o que indicou que o vetor de desenvolvimento da erosão era no sentido da cabeceira.

É evidente que os movimentos de massa ocorreram de forma desordenada e

que quando atingiu o nível de voçoroca passou a ter uma conformação mais retangular na cabeceira, culminando inclusive na instabilidade e ruptura de parte da via de acesso ao *Campus* que se encontra interditado até os dias atuais (Figura 5).



Figura 3. Vista aérea da erosão em 2006.

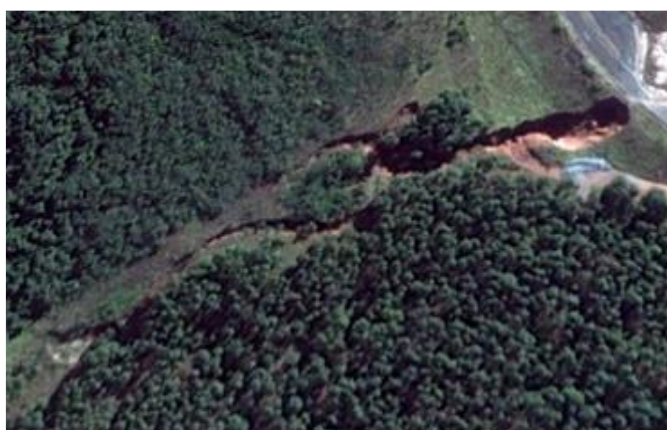


Figura 4. Vista aérea da erosão em 2011.



Figura 5. Vista aérea da erosão em 2018 (Souza, 2018).

3.3 Volume médio anual de perda de partículas

O geoprocessamento de dados, a partir do levantamento planialtimétrico realizado por Souza (2018), permitiu estimar os atuais volume e área de projeção da voçoroca: 18.966m³ e 3.995m². Além disso, o comprimento encontrado foi de 180m e profundidade de máxima de 12m. De posse destes dados e do ano de início do processo erosivo, foi possível estimar o volume médio anual de perda de partículas em 1.580,5 m³/ano de material inconsolidado.

3.4 Análise da topografia e dos resultados do ensaio SPT

A topografia analisada da voçoroca apresentou valores elevados de inclinação, com as curvas de nível apresentando diferenças de até 15m.

Através das sete sondagens tipo SPT realizadas, concebeu-se o perfil geológico-geotécnico da voçoroca localizada no *Campus Alto Paraopeba* (CAP), como mostrado na Figura 6.

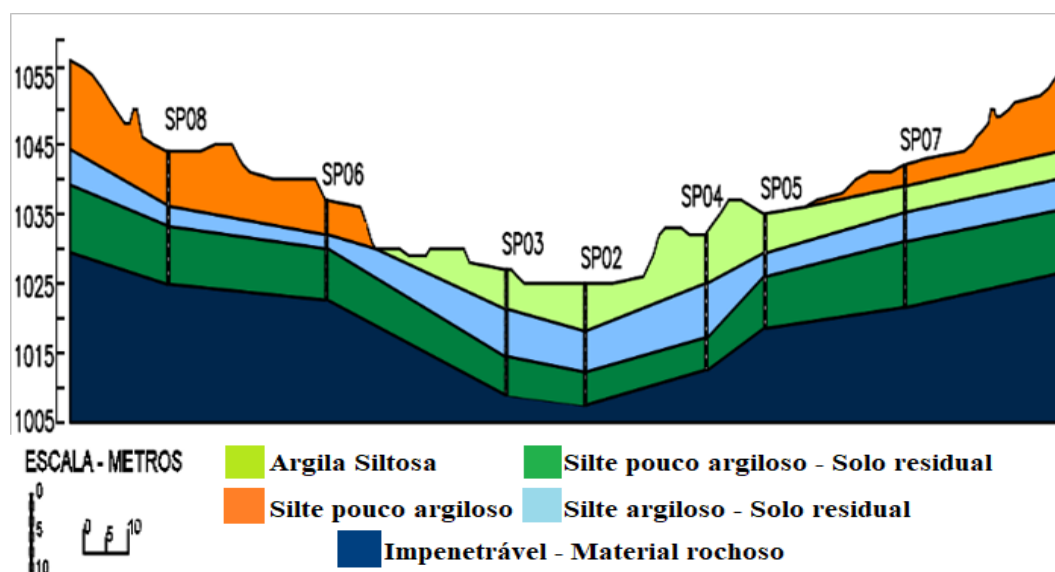


Figura 6. Perfil estratigráfico da Voçoroca localizada no Campus Alto Paraopeba – Pontos do SPT em série.

3.5 Caracterização e classificação dos solos

Nas primeiras visitas em campo, procurou-se identificar aspectos que pudessem indicar o estado atual da erosão. Verificou-se que os taludes

apresentaram pouca ou nenhuma recomposição vegetal, o que indica que a erosão ainda se encontra ativa, além de apresentar solo solto. Foi notada também a presença de uma rede pluvial aparente e possíveis desvios de água drenada para a voçoroca, apresentando então, fluxo maior que o escoamento superficial natural. Também foi possível identificar diversas trincas de tração inseridas nas paredes da voçoroca.

Devido à insegurança ao acesso no interior da voçoroca, não foi possível identificar visualmente o afloramento do nível d'água. Contudo, na sondagem tipo SPT realizada em agosto de 2018, com profundidades que variaram de 14,45 m a 20,45 m, em nenhum dos sete furos executados encontrou-se nível d'água.

Assim é possível classificar a voçoroca, segundo a metodologia de Oliveira (1999), como voçoroca do tipo II, ou seja, desconectada da rede de drenagem (canal subsuperficial), sendo predominantemente erodida pelo fluxo superficial e outros movimentos de massa.

3.5.1 Ensaio de Caracterização

Inicialmente foi realizado uma análise tátil visual das amostras, permitindo obter uma classificação prévia da textura do solo. Todas as amostras apresentaram pouca aspereza.

Quase todas as amostras apresentaram coesão suficiente para se moldar corpos de prova, exceto a Amostra 3, que apresentou baixíssima coesão. Analisando a resistência de torrões de solo seco, observou-se que em todas as amostras, os torrões apresentaram pouca resistência quando quebrados. Dispersando os solos em água, verificou-se média velocidade de sedimentação. Já em relação à impregnação do solo úmido na palma da mão, foi observado que todas as amostras saíram com certa dificuldade quando colocadas em água corrente.

Os parâmetros obtidos após as análises experimentais das amostras de solo, como Limite de Liquidez (LL), Limite de Plasticidade (LP), Índice de Plasticidade (IC), Perda de Massa por Imersão (PMI) e Massa Específica (ρ) estão exibidos na Tabela 1.

De acordo com as curvas granulométricas, os solos apresentaram maior porcentagem de silte, variando de 56,13% a 82,00% entre as amostras. Além disso,

foi possível classificar as amostras de acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos solos (SUCS) como solo siltoso ou argilas de plasticidade média a alta.

Tabela 1. Resultado das análises por amostra.

Amostras	LL (%)	LP (%)	IP (%)	PMI (%)	ρ (g/cm ³)	SUCS
1	51,50	33,33	18,17	5,16	2,775	MH
2	63,00	32,72	30,28	1,22	2,775	CH
3	42,34	28,90	13,44	58,63	2,657	CH
4	63,24	33,75	29,49	0,78	2,751	CH
5	72,71	39,79	32,92	25,82	2,764	MH
6	54,37	37,01	17,36	24,18	3,268	MH

MH – Silte; CH – Argilas de plasticidade média a alta.

A Tabela 2 resume os resultados, mostrando as médias e o desvio padrão, bem como a variação existente em cada ensaio.

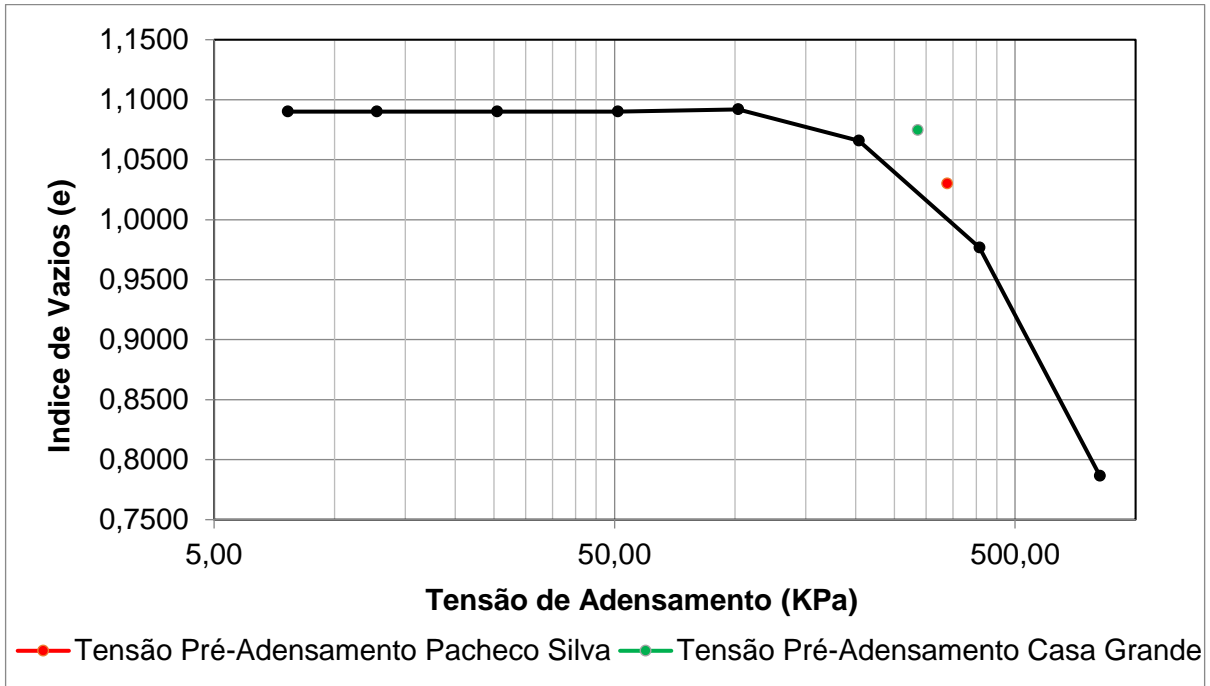
Tabela 2. Variação dos ensaios de caracterização das amostras.

Parâmetros	Média	Desvio padrão	Faixa de valores
LL (%)	57,86	9,74	48.12 - 67.6
LP (%)	34,25	3,42	30.83 - 37.67
IP (%)	23,61	7,50	16.11 - 31.11
PMI (%)	19,30	20,34	0,00 - 39,64
ρ (g/cm ³)	2,83	0,20	2.63 - 3.03
ρ_r	2,83	0,20	2.63 - 3.04

3.5.2 Ensaio de Adensamento

O ensaio de adensamento unidimensional foi realizado com a Amostra 4, em sete estágios de carregamento com tensões iguais a: 7,64 kPa, 12,74 kPa, 25,47 kPa, 50,94 kPa, 101,88 kPa, 203,77 kPa, 407,54 kPa e 815,08 kPa. O Gráfico 1 mostra a curva de Índices de Vazios x Tensão de Adensamento gerada a partir dos resultados. A partir da curva é possível estimar a tensão de pré-adensamento da Amostra 4 pelos métodos de Pacheco Silva e Casa Grande, respectivamente, como 338,84 kPa e 286,00 kPa. Isso resultou numa tensão de pré-adensamento média de 312,42 kPa.

Gráfico 1. Curva de Adensamento da Amostra 4.

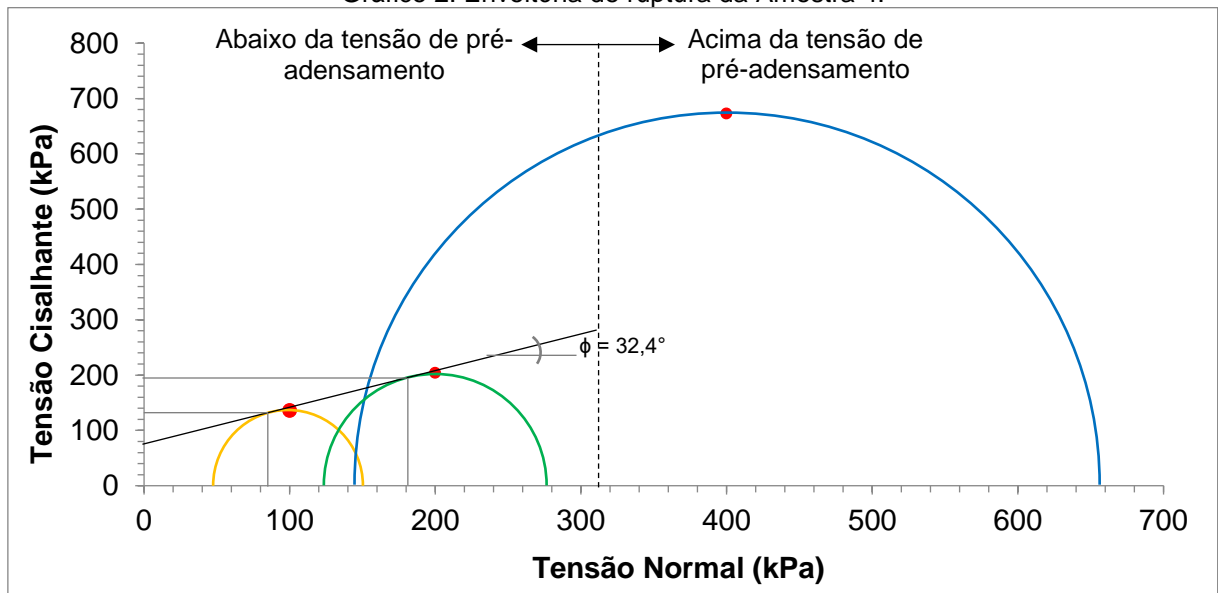


A razão de pré-adensamento, ou OCR, estimada para a Amostra 4, que possui peso específico aparente de 26,99 kN/m³, é de 1,93.

3.5.3 Ensaio de Cisalhamento Direto

O Gráfico 2 abaixo mostra os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados para 3 corpos de prova da Amostra 4, para diferentes tensões normais (100 kPa, 200 kPa e 400 kPa). A coesão encontrada foi de 80 kPa e o ângulo de atrito foi de 32,4°.

Gráfico 2. Envoltória de ruptura da Amostra 4.



3.6 Análise de Estabilidade das Paredes da Voçoroca

De posse do perfil estratigráfico apresentado na Figura 6 e com base nos resultados de todos os ensaios realizados, a estabilidade das paredes formadas pelo processo erosivo em quatro seções consideradas mais críticas, foram analisadas. As seções foram as 5, 6, 7 e 8 que passam pelos furos SP05, SP06, SP07 e SP08 de acordo com a Figura 16.

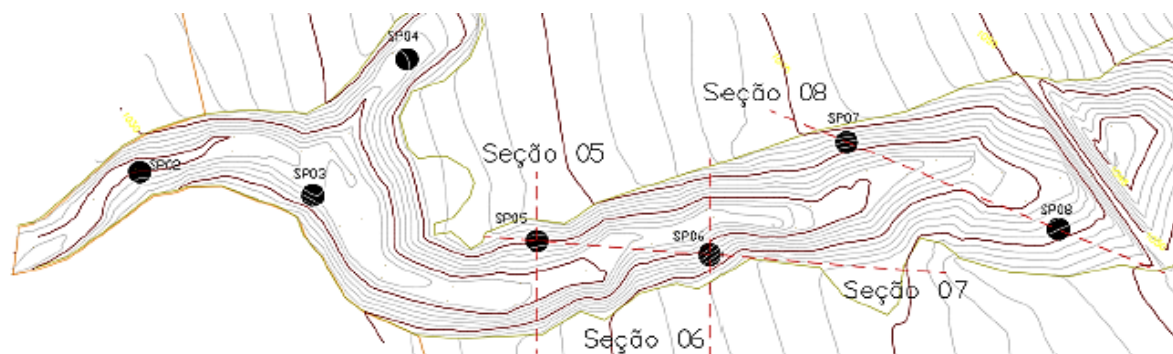


Figura 7. Seções analisadas para a estabilidade de taludes.

Os resultados da análise de estabilidade são mostrados na Tabela 3 que apresenta os fatores de segurança de cada seção analisada. Os fatores foram calculados pelo software *Slide* utilizando 3 métodos diferentes.

Tabela 3. Fatores de segurança.

Seção	Lado da Seção	Fator de Segurança		
		Método de Bishop Simplificado	Método de Morgenstern-Price	Método de Spencer
05	Esquerdo	1,731	1,792	1,815
	Direito	1,489	1,493	1,479
06	Esquerdo	1,294	1,324	1,326
	Direito	1,899	1,924	1,923
07	Esquerdo	2,635	2,652	2,658
	Direito	2,174	2,175	2,168
08	Esquerdo	1,910	1,922	1,916
	Direito	2,620	2,611	2,613

4 DISCUSSÃO

O solo estudado proveniente da voçoroca localizada no CAP possui origem em rochas metamórficas de gnaiss, cuja composição mineralógica tende a ser amplamente diversificada. Isso dá fortes indícios para justificar a variabilidade dos

resultados de caracterização nas seis amostras estudadas. A variação da coloração das amostras é outro indício que corrobora a esta afirmação, mesmo estas sendo retiradas de locais tão próximos.

Como ressaltado por Lemes (2009), o solo encontrado nesta região apresenta pH ácido e vegetação predominantemente rasteira. Por sua vez esse tipo de vegetação favorece a formação de fluxos superficiais concentrados, o que facilita o desenvolvimento do processo erosivo através de sulcos e como visto na Figura 3, a erosão se iniciou em um talude na qual a vegetação é rasteira. Além disso, a inclinação dos taludes, mostrada pela diferença elevada das curvas de níveis, determina uma alta velocidade do escoamento superficial, fazendo com que o processo erosivo se intensifique ainda mais.

Segundo a classificação SUCS, uma porção das amostras são CH (argilas de plasticidade média a alta) e a outra MH (solos siltosos), contrastando em partes com a análise granulométrica e o perfil geológico gerado pela análise dos ensaios SPT (Figura 6) que mostraram uma maior porção de silte. Todavia, a classificação SUCS não foge da realidade, uma vez que o solo apresenta elevado índice de plasticidade, característica de solos argilosos. Assim, é possível concluir que o solo da voçoroca é tipicamente constituído de silte argiloso. Este tipo de solo tende a apresentar baixo coeficiente de permeabilidade o que corrobora para uma maior intensidade de escoamento, já que o volume infiltrado tende a ser baixo.

No presente estudo, a taxa de perda de massa por imersão (PMI), obtida aplicando a metodologia MCT, para corpos de prova moldados, foi utilizada como parâmetro indicativo do potencial de erodibilidade do solo. Em termos médios, o solo apresentou uma PMI de 19,30%. Porém, um coeficiente de variação aproximadamente igual a 95% indica uma alta heterogeneidade, o que significa dizer que porções do solo podem apresentar-se mais estáveis que outras. Assim, avaliando-se a estabilidade global da voçoroca, mesmo que parte do solo tenha apresentado de média a baixa erodibilidade, as porções mais erodíveis tendem a perder mais massa, podendo modificar inclusive as características dos materiais vizinhos.

Em termos de estabilidade, as paredes são consideradas estáveis. Porém, a passagem e fluxo laminar da água proveniente da chuva, acarreta perda de solos nos solos susceptíveis a erosão e modificam a geometria do problema, podendo

trazer a instabilidade.

Analisando o comportamento da Amostra 4 no ensaio de adensamento, percebe-se que a OCR é superior a 1. O solo está na faixa de comportamento de argilas pré-adensadas. A variação no estado de tensões ocasionado pela remoção de sobrecarga superficial, pela perda de solo originada do processo erosivo, pode ser citada como uma das causas do pré-adensamento.

Além disso, pode-se observar que no ensaio de cisalhamento direto obteve-se um comportamento bilinear, comum para solos argilosos pré-adensados. Isso significa dizer que existem mais de um par de valores de c' e ϕ' para o solo, sendo a tensão de pré-adensamento a limitante entre um comportamento e outro. Assim, os valores de c' e ϕ' considerados foram do comportamento sobreadensado.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo procurou compreender e descrever, à luz da geotecnia, o atual comportamento do solo presente em uma voçoroca encontrada no *Campus* Alto Paraopeba.

Verificou-se que o solo é residual originário majoritariamente de uma rocha ortognaisse do tipo tonalito-trondhjemito-granodiorito (TTG), remetente à era arqueana. Por esse motivo, o solo apresenta alta variabilidade mineralógica, resultando num comportamento complexo e variável. Essa característica do solo da voçoroca levou-o a apresentar diferentes graus de erodibilidade mesmo para amostras retiradas próximas umas das outras.

Embora a análise granulométrica e o perfil geológico gerado pelos ensaios SPT apresentaram um maior percentual de silte em todos os pontos amostrais, o comportamento do solo em outros ensaios laboratoriais se aproximou ao comportamento de uma argila, indicando que os argilominerais apresentam alta atividade. Assim, foi possível caracterizá-los como silte argilosos.

Apesar dos materiais apresentarem parâmetros de resistências razoáveis e serem estáveis sobre o ponto de vista da estabilidade de taludes analisados pelo equilíbrio limite, verifica-se que a baixa permeabilidade aliada ao fluxo laminar gerado pela água da chuva, pode desencadear um processo de erodibilidade, que ocorrendo em regiões mais profundas, solapam a base ou o pé dos taludes levando,

inclusive, massas de solos mais estáveis a ruptura. Isso desencadeia um processo complexo e dinâmico, resultando na intensificação da erosão que, por sua vez, depende de inúmeros fatores do ambiente local e fatores intrínsecos do material. A voçoroca do *Campus* Alto Paraopeba é complexa devido ao seu alto grau de heterogeneidade e se encontra ativa, apesar dos seus taludes se apresentarem estáveis globalmente.

A partir desses conceitos então, este trabalho poderá auxiliar no desenvolvimento de um plano de recuperação ambiental da área degradada, na escolha da melhor solução de engenharia para a intervenção no processo evolutivo da erosão.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12007**: ensaio de adensamento unidimensional. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484**: sondagem de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio. Rio de Janeiro, 2001.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: rochas e solos. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 1984.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: análise granulométrica. Rio de Janeiro, 1984.

ANDRADE, A. G. e CHAVES, T. A. Manejo contra a erosão. **Revista Agro DBO**, São Paulo, ano 9, n. 36, DBO Editores Associados 2012. p. 42-46.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **D3080**: standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. West Conshohocken, 2011.

AZEVEDO, Ú. R.; MACHADO, M. M. M.; CASTRO, P. T. A.; RENGER, F. E.; TREVISOL, A. e BEATO, D. A. C. Geoparque Quadrilátero Ferrífero (MG): proposta. In: SCHOBENHAUS, C.; SILVA, C. R. **Geoparques do Brasil**: propostas. Rio de Janeiro: CPRM Serviço Geológico do Brasil, 2012. p. 183-220.

CABRAL, L. N., SILVA, J. A., MEDEIROS, M. C., SOUZA, C. A. A aula de campo como instrumento facilitador da aprendizagem em Geografia no ensino fundamental.

Revista online Educação Pública, B3 em ensino, Qualis, Capes 2016. Disponível em: <http://educacaopublica.cederj.edu.br/revista/artigos/a-aula-de-campo-como-instrumento-facilitador-da-aprendizagem-em-geografia-no-ensino-fundamental>.

Acesso em 20 nov 2018

CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; MASCARENHA, M. M. A. et al. **Erosão em borda de reservatório**. Goiânia, v. 3, Gráfica UFG 2017. 587 p.

CARVALHO, J. C.; SALES, M. M.; SOUZA, N. M.; MELO, M. T. **Processos erosivos no centro-oeste brasileiro**. Brasília, FINATEC 2006. 464 p.

CAVA, F. 2018. **Mecânica Dos Solos**: limite de liquidez. Blog Além da Inércia. Disponível em: <https://alemdainercia.wordpress.com/2018/07/04/mecanica-dos-solos-limite-de-liquidez/>. Acesso em: 15 nov. 2018

CODAP – CONSÓRCIO PÚBLICO PARA DESENVOLVIMENTO DO ALTO PARAOPEBA. Alto Paraopeba, um dos maiores polos de desenvolvimento do país. **Revista CODAP**, Conselheiro Lafaiete, edição maio, VFazitto Comunicação e Consultoria Ltda 2010. 51 p.

CPRM SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Governo Federal. Disponível em: https://www.cprm.gov.br/publique/media/gestao_territorial/geoparques/estrada_real/geologia_estratigrafia.html. Acesso em: 15 out. 2018

DAEE – DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. **Controle de erosão**: base conceituais e técnicas; diretrizes para o planejamento urbano e regional, orientações para o controle do boçorocas urbanas. São Paulo: DAEE/IPT, 1989. 92 p.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2006.

DESCUBRA MINAS. SENAC MINAS. Disponível em: http://www.descubraminas.com.br/MinasGerais/Pagina.aspx?cod_pgi=1802. Acesso em: 26 out. 2018

DNER – DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **ME 256**:

solos compactados com equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. Rio de Janeiro, 1994.

DRUMOND, F. N. **Caracterização e quantificação dos processos erosivos de uma voçoroca na bacia do riacho Manoel Félix no complexo metamórfico do Bação, Quadrilátero Ferrífero – MG.** Dissertação de Mestrado em Geologia. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais. 2006.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTATUAL DE MEIO AMBIENTE; UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA; UNIVERSIDADE FEDERAL DE LAVRAS; FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLÓGICO DE MINAS GERAIS. **Mapa dos solos do Estado de Minas Gerais Belo Horizonte:** Fundação Estadual de Meio Ambiente, 2010. Disponível em: <http://www.feam.br/noticias/1/949-mapas-de-solo-do-estado-de-minas-gerais>.

Acesso em: 10/12/2018

FERREIRA, G. A. E SANTOS, C. M. **Estudo de Avaliação da Erosão no Campus Alto Paraopeba, Ouro Branco, Minas Gerais.** Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal de São João Del-Rei. Ouro Branco, Minas Gerais. 2015.

GUERRA, A. J. J. Experimentos e monitoramentos em erosão dos solos. **Revista Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 16, Universidade de São Paulo 2005. p. 32-37.

LEMES, F. O. A. **Relações florísticas, fitossociológicas e aspectos edáficos de comunidades de campos rupestres da Serra do Itacolomi e Serra do Ouro Branco, Minas Gerais.** Dissertação de mestrado em Ecologia de Biomas Tropicais. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais. 2009.

LIMA, G. C.; VASCONCELOS, K. A. V. E GOMES, P. I. M. A. **Terrenos Gnáissicos de Alto Grau e Zonas de Sutura.** Dissertação de mestrado em Geologia/Geotecnia. Universidade Federal do Pará. Belém, Pará. 2014.

LIMA, P. G. **Mecanismos de evolução de voçorocas e quantificação dos impactos associados por modelagem matemática: estudo de caso da voçoroca mangue seco, São Gonçalo do Bação (MG).** Dissertação de Mestrado em

Geotecnia. Universidade Federal de Ouro Preto. Ouro Preto, Minas Gerais. 2016.

OLIVEIRA, A. M. S. E BRITO, S. N. A. **Geologia da Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998. 587 p.

OLIVEIRA, M. A. T. Processos erosivos e preservação de áreas de risco de erosão por voçorocas. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S.; BOTELHO, R. G. M. (Org.). **Erosão e Conservação dos Solos - Conceitos, Temas e Aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1999. p. 57-94.

PITANGA, H. N.; SILVA, T. O.; RODRIGUES, F. D.; FERREIRA, M. A.; PINTO, P. M. P. Áreas de risco no município de Ouro Branco-MG: identificação e relação com o crescimento urbano da região do alto Paraopeba. **Revista de Geografia**, Recife, v. 32, n. 3, Universidade Federal de Pernambuco 2015. p. 202-221.

REDAÇÃO PENSAMENTO VERDE. Pensamento Verde. 2013. Disponível em: <https://www.pensamentoverde.com.br/meio-ambiente/classificacoes-e-o-mapa-da-vegetacao-do-brasil/>. Acesso em: 8 nov. 2018

ROCHA, E. A. V. **Avaliação do processo evolutivo e da dinâmica erosiva: um estudo de caso no município de Ipameri-GO**. Dissertação de Mestrado em Geografia. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, Minas Gerais. 2007.

RUCHKYS, U. A.; MACHADO, M. M. M. Patrimônio geológico e mineiro do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - caracterização e iniciativas de uso para educação e geoturismo. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, v.70, Universidade Federal do Paraná 2013. p. 120-136.

SOUZA, R. M. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) para mapeamento de voçoroca em Ouro Branco, MG, Brasil, e avaliação de perda de solo para proposição de alternativas de tratamento**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, Minas Gerais. 2018.

TEMPO AGORA. Médias Climáticas. Disponível em: <https://www.tempoagora.com.br/previsao-do-tempo/MG/OuroBranco>. Acesso em: 8 nov. 2018

TERRA, L. E COELHO, M. A. **Geografia Geral: o espaço natural e socioeconômico**. São Paulo: Moderna, 2005. 448 p.

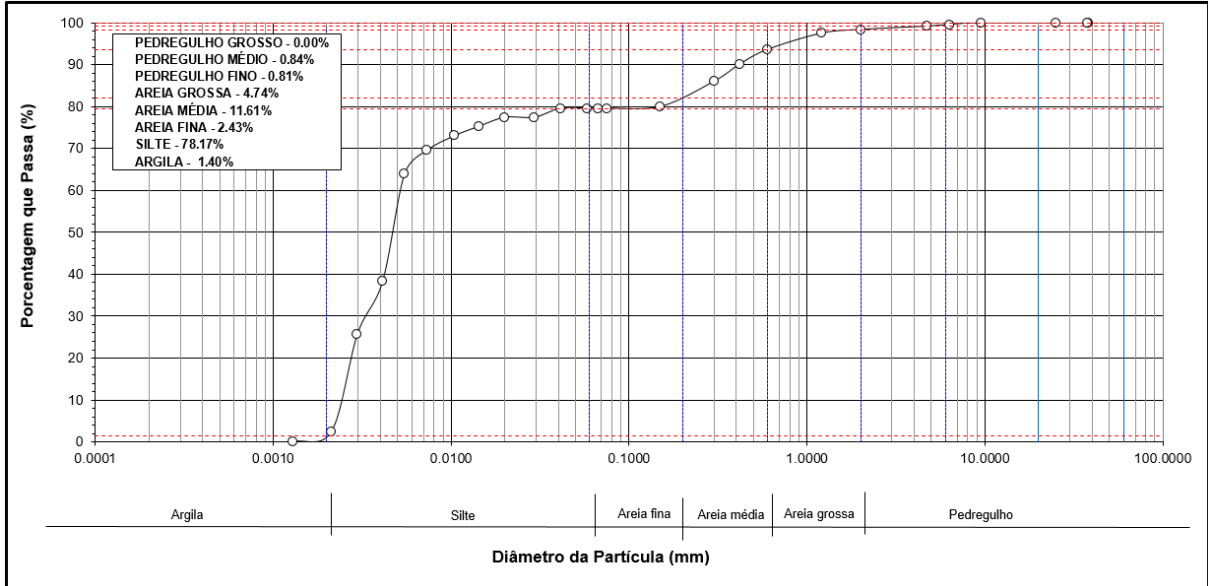
TRESSE, T. S. **Caracterização geotécnica do campo experimental na Universidade Federal de São João Del Rei**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade Federal de São João Del-Rei. Ouro Branco, Minas Gerais. 2018.

VIEIRA, A. F. G. **Desenvolvimento e distribuição de voçorocas em Manaus (AM): principais fatores controladores e impactos urbano-ambientais**. Tese de doutorado em Geografia. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina. 2008.

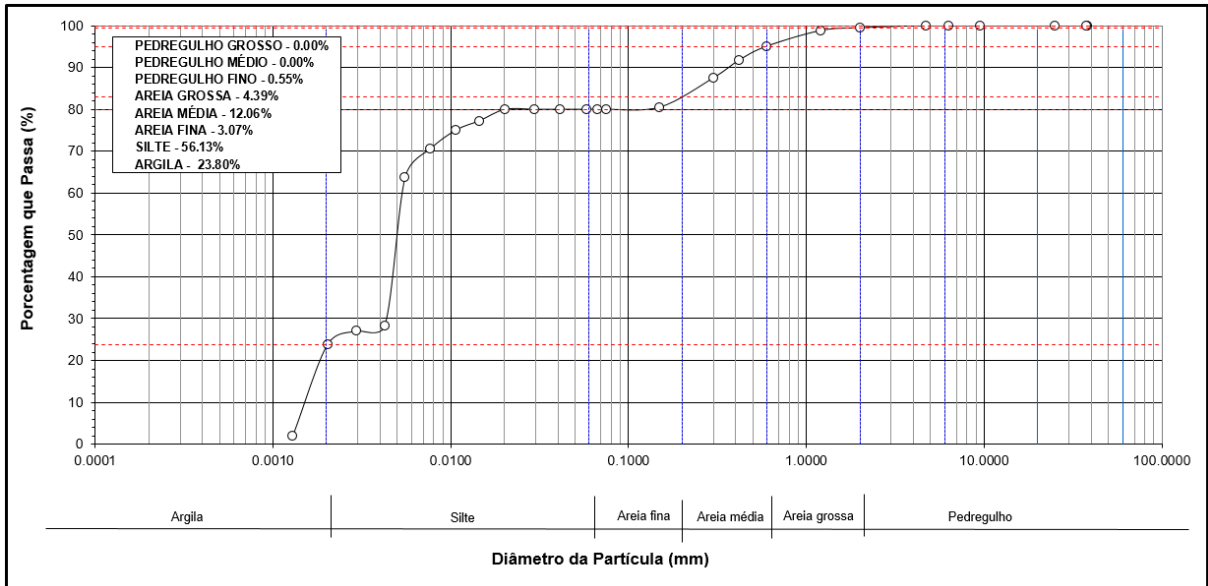
5 ANEXOS

5.1 Curvas Granulométricas

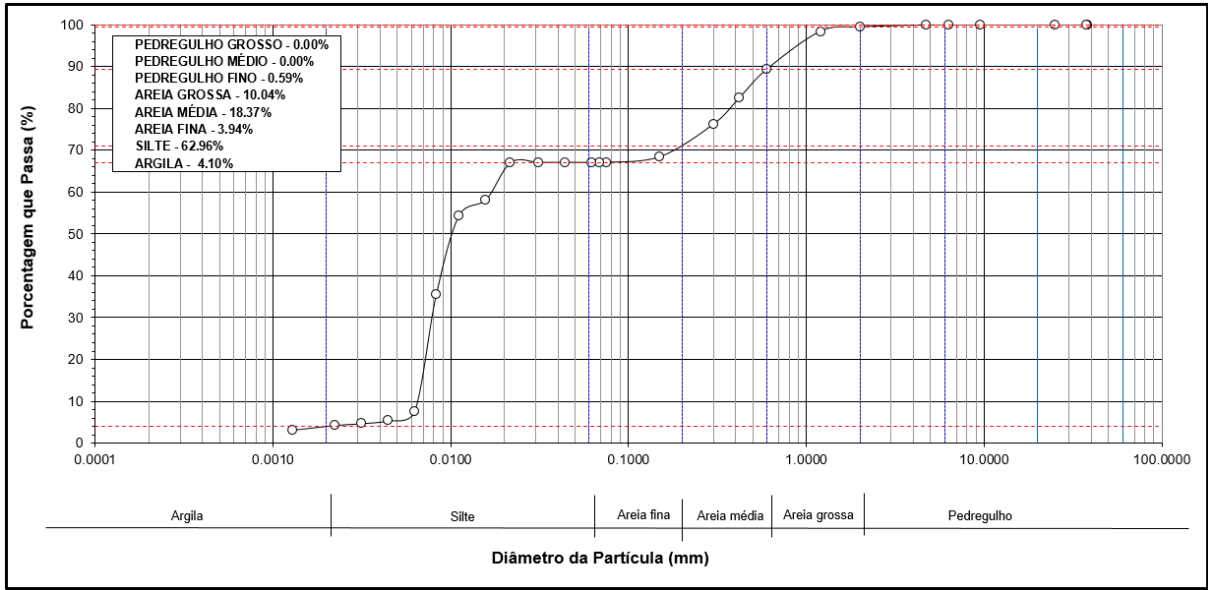
Curva Granulométrica da Amostra 01



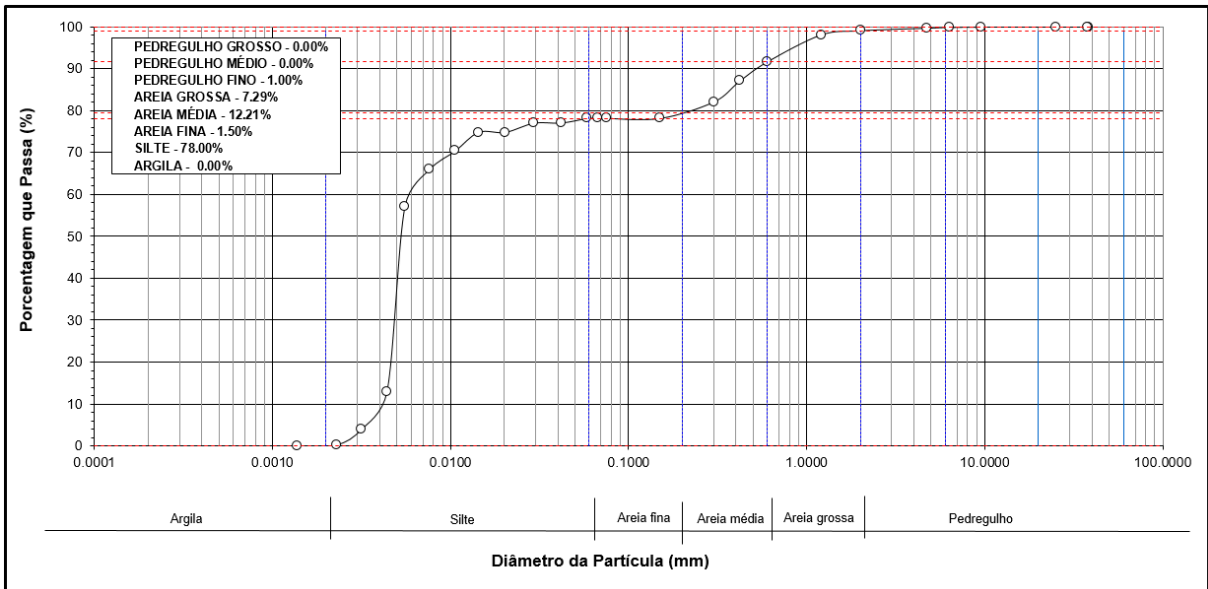
Curva Granulométrica da Amostra 02



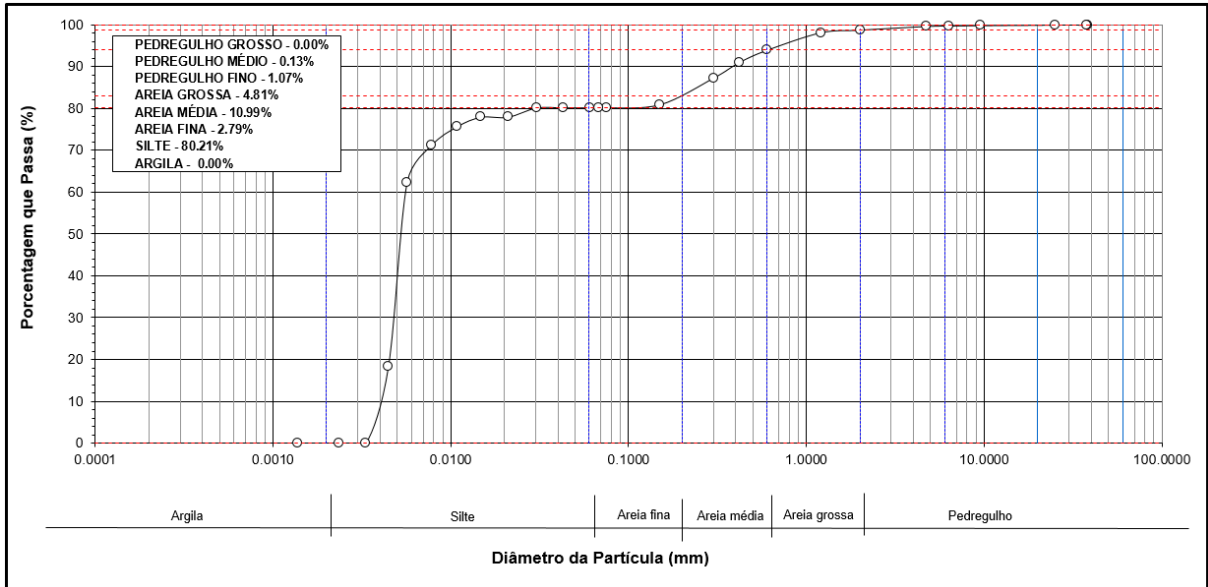
Curva Granulométrica da Amostra 03



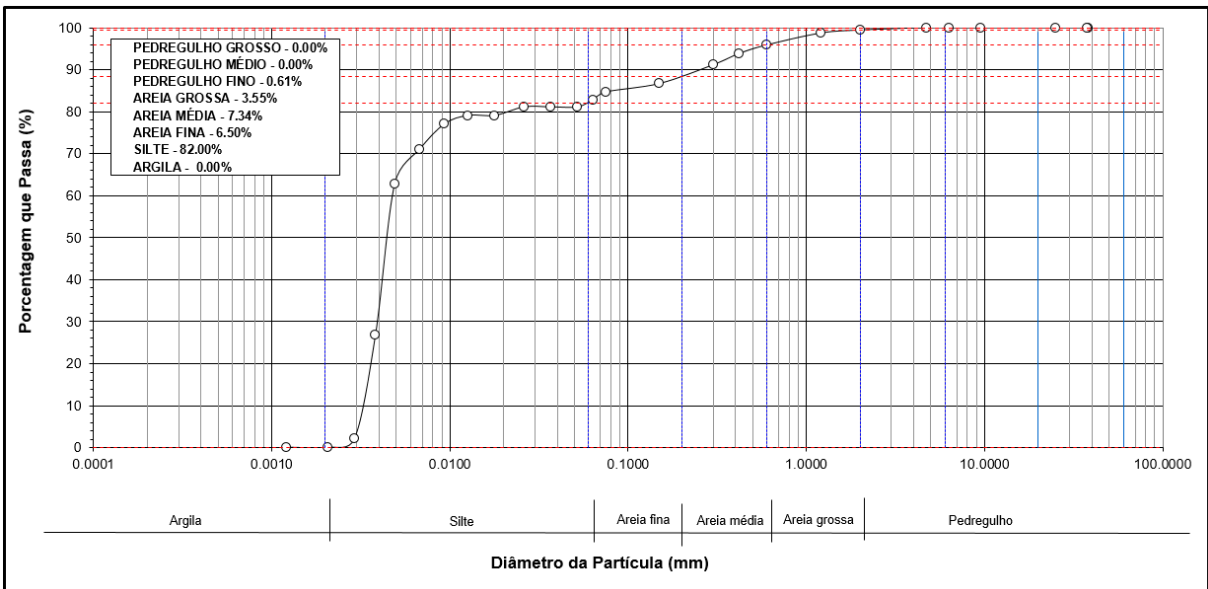
Curva Granulométrica da Amostra 04



Curva Granulométrica da Amostra 05

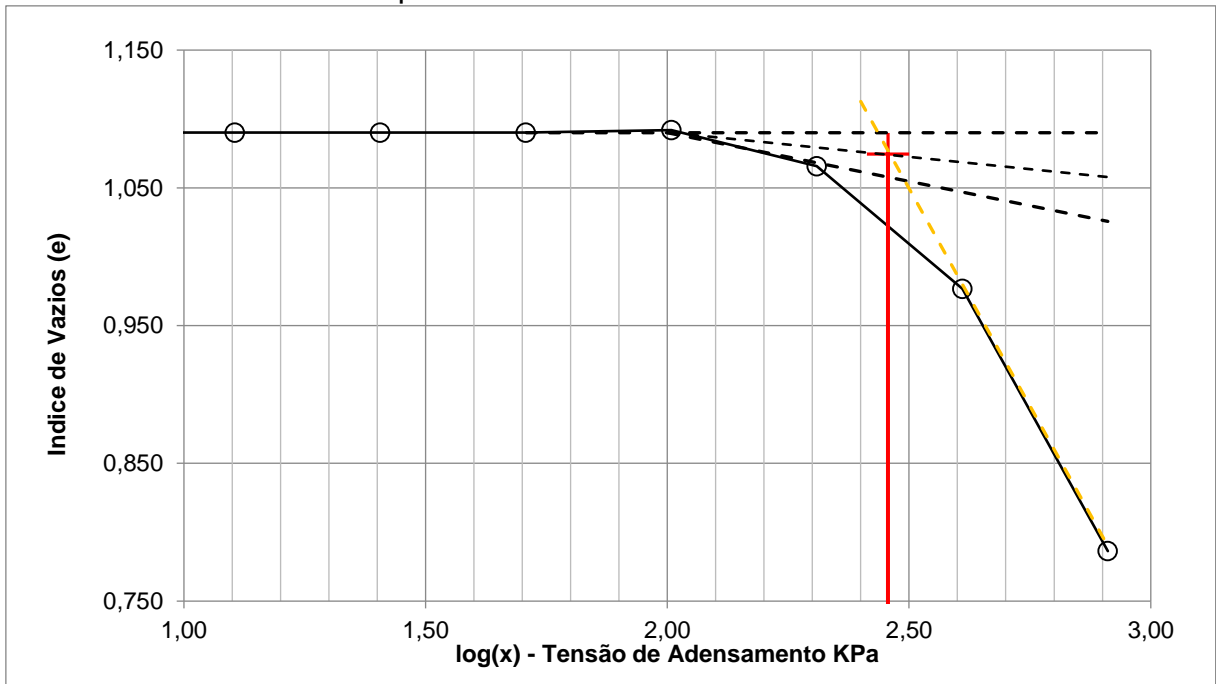


Curva Granulométrica da Amostra 06

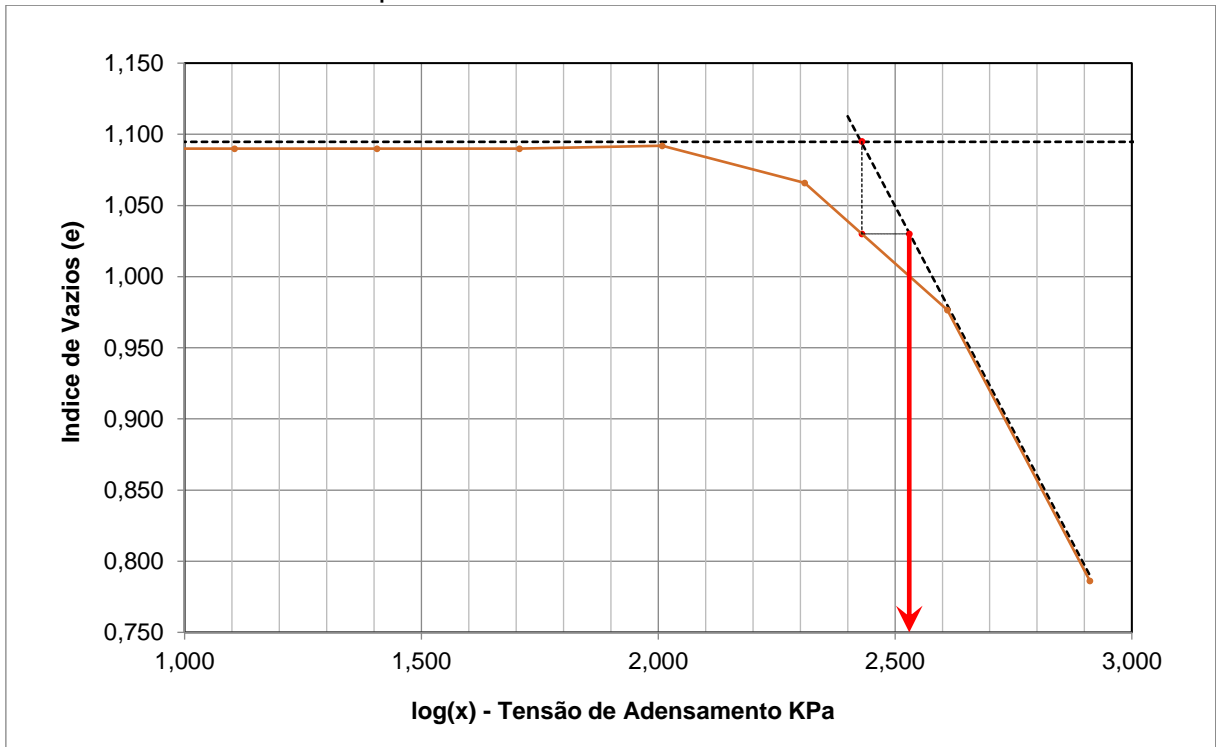


5.2 Ensaio de Adensamento – Amostra 4

Tensão de pré-adensamento - método Casa Grande

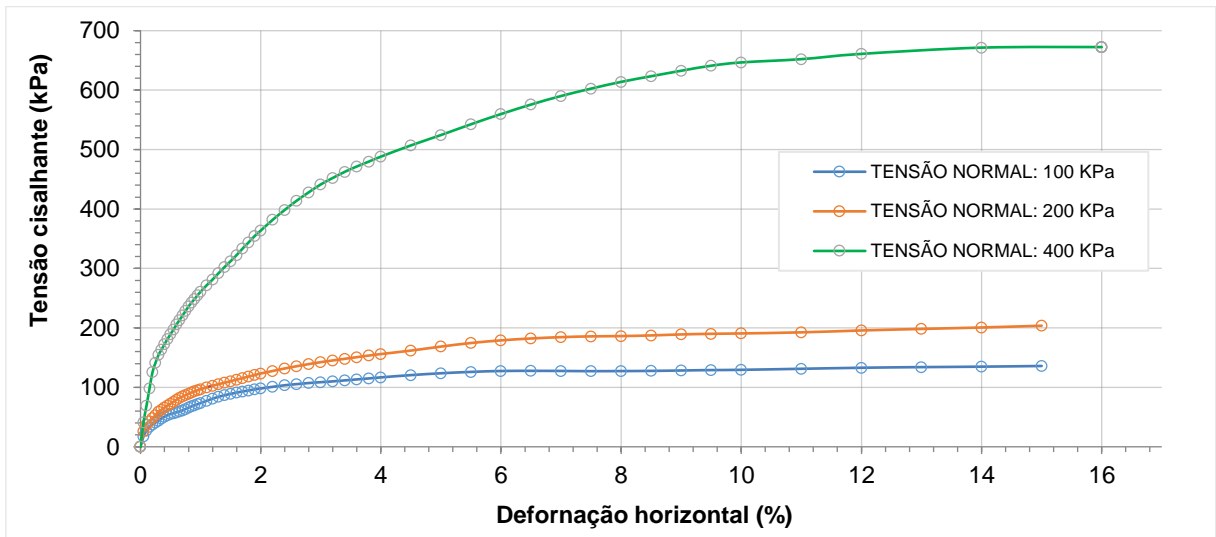


Tensão de pré-adensamento - método Pacheco e Silva



5.3 Ensaio de Cisalhamento Direto – Amostra 4

Curvas de resistência ao cisalhamento



Curva de Deformação Vertical x Deformação

