



ITPAC – INSTITUTO TOCANTINENSE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS
FAPAC – FACULDADE PRESIDENTE ANTÔNIO CARLOS – LTDA
FACULDADE DE ENGENHARIA

LUIZ CARLOS NOLÊTO DE OLIVEIRA NETO

**MODELAGEM GEOLÓGICO/GEOTÉCNICA E NUMÉRICA DE LAVRA DE MINA –
ESTUDO DE CASO**

PORTO NACIONAL - TO
2018

LUIZ CARLOS NOLÊTO DE OLIVEIRA NETO

**MODELAGEM GEOLÓGICO/GEOTÉCNICA E NUMÉRICA DE LAVRA DE MINA –
ESTUDO DE CASO**

Projeto de Pesquisa submetido ao curso de Engenharia Civil do Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos Porto – ITPAC PORTO NACIONAL, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Área: Engenharia Geotécnica

Orientador: Prof^a. Dr^a Talita C. Miranda

**PORTO NACIONAL – TO
2018**

LUIZ CARLOS NOLÊTO DE OLIVEIRA NETO

**MODELAGEM GEOLÓGICO/GEOTÉCNICA E NUMÉRICA DE LAVRA DE MINA –
ESTUDO DE CASO**

Projeto de pesquisa apresentado ao Instituto Tocantinense Presidente Antônio Carlos ITPAC/FAPAC, Porto Nacional, como requisito parcial para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Civil, sob a orientação da Professora Dr^a. Talita Caroline Miranda e submetida à avaliação da Banca Examinadora em Maio de 2018.

Data da aprovação: 30 de Maio de 2018

APROVADO (X) REPROVADO ()

Banca Examinadora

Orientador: Dr^a. Talita Caroline Miranda

Examinador 1: Me. Alexandre Cerqueira de Jesus

Examinador 2: Me. Douglas Santos Freitas Augusto dos Santos

RESUMO

O uso dos recursos minerais está cada vez maior e com isto vem aumentando a necessidade de otimização dos processos de extração. Neste contexto durante a concepção de como se irá efetuar uma lavra de uma mina qualquer, deve-se levar em consideração a forma da cava e as características mecânicas do maciço rochoso, isto ditará o formato de exploração e a configuração final da mina. Portanto, é imprescindível optar pelo método de análise que contemple uma vasta gama dos parâmetros do solo e das rochas existentes na mina. O objetivo deste trabalho é a análise da concepção da mina, através da análise de estabilidade por modelagem geológica/geotécnica e numérica utilizando elementos finitos. Para tal, é preciso conhecer e modelar o maciço rochoso com base nas sondagens existentes e determinar por estimativa os parâmetros geomecânicos do maciço. Com este modelo geológico tridimensional serão feitas análises de estabilidade global por meio de elementos finitos para seções bidimensionais críticas e assim avaliar qual será a melhor forma de exploração da mina em estudo.

Palavras-chave: Estabilidade da mina. Modelagem geológica/geotécnica. Modelagem numérica.

ABSTRACT

The use of resources is increasing and with this is increasing the optimization of extraction processes. This context during an order for presentation in the one of a must to take ining to forming the cava and the mechanical characteristics of rocky mass, to dictate or model of exploration and to final configuration of mine. Therefore, it is essential for the method of analysis that it covers a wide range of soil and rock parameters in the mine. The objective of this work is an analysis of the concept of the mine, through the stability analysis by geological/geotechnical and numerical modeling. What is necessary to know and model the rock mass based on the existing soundings and having the geometric parameters of the massif. The three-dimensional geological model consisting of analyzes of global wealth by means of finite elements for the critical and asymmetric two-dimensional dimensions will be the best method of production of the mine under study.

Keywords: Stability of the mine. Geological/geotechnical modeling. Numerical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lavra por bancada, no Espírito Santo	13
Figura 2 - Lavra por tiras, mina de bauxita no Pará	13
Figura 3 - Processo de dragagem	14
Figura 4 - Esquema de uma lavra por subníveis	15
Figura 5 - Esquema de mineração por subníveis	16
Figura 6 - Esquema de mineração por corte e enchimento	16
Figura 7 - Mineração por longwall	17
Figura 8 - Formas geométricas dos taludes	20
Figura 9 - Horizontes intermediários (Vista Nordeste).....	21
Figura 10 - Esquema do ciclo das rochas	25
Figura 11 - Planos de clivagem	26
Figura 12 - Círculos de Mohr e envoltória de resistência	27
Figura 13 - Passo a passo da metodologia	29
Figura 14 - Comparação entre os poços 1 e 2	31

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 OBJETIVOS	9
2.1 OBJETIVO GERAL:	9
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
3 REFERENCIAL TEÓRICO	10
3.1 HISTÓRICO DE EXPLORAÇÃO NO BRASIL	10
3.2 HISTÓRICO DE EXPLORAÇÃO NO TOCANTINS	11
3.3 TIPOS DE MINAS	12
3.3.1 Lavra por bancada	12
3.3.2 Lavra por tiras	13
3.3.3 Lavra por dragagem	13
3.3.4 Mineração tipo subníveis (<i>sublevel stoping</i>)	14
3.3.5 Mineração em salões e pilares (<i>room-and-pillar</i>)	15
3.3.6 Mineração tipo corte e enchimento (<i>cut-and-fill</i>)	16
3.3.7 Mineração tipo <i>longwall</i>	17
3.4 IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO (GEOLÓGICO/GEOTÉCNICO)	17
3.5 TALUDES	18
3.6 MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOTÉCNICA	20
3.6.1 Finalidade	20
3.6.2 Tipos de Modelos (Aplicação)	21
3.6.3 Geoestatística	22
3.7 MODELAGEM NUMÉRICA	24
3.7.1 Parâmetros de Resistência	24
3.7.2 Método dos Elementos Finitos Aplicado na Mineração	27
4 METODOLOGIA	29
4.1 ESTUDO DE CASO	29
4.2 MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOTÉCNICA	30
4.3 MODELAGEM NUMÉRICA	32
5 RESULTADOS ESPERADOS	33
6 CRONOGRAMA	34
7 ORÇAMENTO	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36
ANEXOS	42

1 INTRODUÇÃO

O uso do solo/rocha está presente na vida dos homens desde antes deixarem de ser considerados nômades. Pois sempre necessitaram dos minerais para construir armas, acessórios, joias e outros materiais. Mas desde a revolução industrial que o uso dos materiais presentes no subsolo deu uma grande guinada, pois surgiram novas demandas sem precedentes.

Essa nova ordem mundial desencadeou avanços tecnológicos, muitas vezes não por simples entusiasmo, mas por necessidades de atender os anseios do mercado. Essa grande procura se dá pela enorme dependência das indústrias pelos mais diversos minerais, como, por exemplo, ferro que é empregado nas mais diversas esferas de produção.

Mas antes de o minério ser extraído existe o estudo da mina, onde se fará a caracterização do maciço, a forma do minério e outros aspectos, isto para que a forma de extração seja a mais adequada para tais condições encontradas. E com essa visão que este estudo foi pensado, auxiliar na estabilidade da mina, através da modelagem geológica/geotécnica e numérica.

O processo de corte de aterro está presente em todos os processos de desmonte do corpo do minério, e devido a este procedimento, se realiza no maciço um alívio de pressão e que sem as devidas medidas para se mitigar os distúrbios, podem haver problemas imediatos ou futuros, uma das principais perturbações do alívio de pressão, como explica Conguê (2011), é o Efeito Tschobotarioff.

Correspondendo a esses problemas que afetam a estabilidade do maciço, se nota a necessidade de uma investigação geológica para que os parâmetros do local onde será o empreendimento, ou onde é o empreendimento, sejam destrinchados e que em decorrência disso possa ter um entendimento do que existe no local, como o nível da água por exemplo.

Uma das mais eficientes maneiras de se entender o maciço é o uso de modelos geológicos, pois são construídos, principalmente, em decorrência de sondagens e ensaios. A compilação dos dados para a criação dos modelos são um pouco extensos, pois agregam vários conhecimentos como a geoestatística, que trabalha no campo próprio para a geotecnia e será mais explorado no decorrer do estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Gerar um modelo geológico/geotécnico do maciço rochoso de uma mina de exploração de minério, utilizando técnicas de geoestatística e avaliar a estabilidade dos taludes por modelagem numérica, pelo Método dos Elementos Finitos (MEF).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Produzir o modelo bi e tridimensional do maciço da mina, com base nos resultados da investigação geotécnica, com o auxílio computacional;
- Estimar as características geotécnicas e geomecânicas;
- Criar um modelo numérico bidimensional por MEF para análise de estabilidade de taludes.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 HISTÓRICO DE EXPLORAÇÃO NO BRASIL

Segundo o Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), desde a “descoberta” do Brasil sempre houve a busca pela extração de matéria prima. Um grande exemplo desta extração foi o famoso ciclo do ouro, que se estendeu por uma região hoje compreendida como os estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins e Mato Grosso (IBRAM, 2003).

A exploração mineral brasileira, como já dito, remonta ao Brasil Colonial, mais precisamente no século XVII. Onde o principal, se não o único minério que mais interessava, era o ouro. Mas apenas no século seguinte que os colonizadores conseguiram de fato encontrar em boa quantidade seu minério tão precioso, na forma, primeiramente, de aluvião (GIL, 2014).

Alguns métodos de extração foram documentados, conforme Germany (p.6, 2002) diz:

Os veios que penetravam nas encostas eram perseguidos por galerias perfuradas com ponteiros e malhos e, quando necessário, eram detonados também com pólvoras caseiras. O minério era em seguida carregado igualmente por pás em carrinhos de mão. Os poços verticais ou inclinados, que se faziam necessários para acompanhar as camadas ou veios, eram perfurados da mesma forma, sendo o minério içado em baldes de madeira por sarilhos manuais. O transporte mais longo era feito em carroções por tração animal. As aberturas eram sempre de seções acanhadas, pouco iluminadas, dificultando o trabalho e causando danos à saúde dos operários (a maioria escravos) que nelas trabalhavam. A falta de conhecimento geológico dificultava sobremaneira o trabalho.

Porém como o passar dos anos no século XIX, a extração desenfreada e a idéia de que o ouro “superficial” tinha se extinguido, houve o declínio do ciclo do ouro no país. Mas quando isso ocorreu já existiam outras minas, que seu intuito era de se explorar outros materiais, como o ferro e carvão, por advento da revolução industrial, segundo o IBRAM (2003) e Gil (2014).

Para o Ministério de Minas e Energia (MME) com a crescente implantação de minas no território brasileiro, o governo viu a necessidade de se legislar sobre o tema. Por exemplo, com a promulgação da primeira constituição republicana, vinculou-se a propriedade do subsolo ao solo, mas com as novas constituições foi quebrada esta ideia (MME, 2013).

No mundo atual as novas regras e conhecimentos são totalmente outros, que visam extrair de forma sustentável, com responsabilidade social, pensando na preservação ambiental. Tudo isso incluso nos objetivos financeiros de todas as operações minerárias (IBRAM, 2003).

3.2 HISTÓRICO DE EXPLORAÇÃO NO TOCANTINS

A história tocantinense se confunde com a data de criação do estado, 05 de Outubro de 1988, mas seu território antes ligado ao Estado de Goiás já estava presente na história nacional. Como por exemplo, durante a descoberta do ouro na região, existiram excursões e depois extração no que hoje é o Estado do Tocantins e ajudou no desenvolvimento de Porto Real (hoje Porto Nacional) devido ao escoamento da produção do ouro (DOURADO, 2010).

Mas pensando na história recente do estado, houve investimento na área mineralógica, como, por exemplo, de uma das minas de ouro mais importantes do Brasil, estando localizada no município de Almas. Ela teve uma vida de cinco anos (1996-2001) e que produziu 27,31 toneladas de ouro (MELFI *et al.*, 2016).

O estado possui várias jazidas e que tem uma vasta gama de minerais com potencial para sua extração. Essa afirmação é feita em cima de um estudo realizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) através do Programa Nacional de Prospecção dos Elementos do Grupo da Platina (PNPP), onde sua área de estudo se deu na Barra do Gameleira (TO-03) e encontrou jazidas de Elementos do Grupo da Platina (EGP) (CPRM, 2000).

No município de Porto Nacional existe também a exploração do solo no ramo de, não apenas na agricultura, mineração. Em uma avaliação realizada pela Companhia de Mineração do Tocantins (MINERATINS) em todos os municípios, se fez um levantamento das principais atividades mineralógicas. E no município portuense existe, principalmente, a extração de areia, seixos, argila e de feldspato (MINERATINS, 2008).

3.3 TIPOS DE MINAS

A escolha pelo tipo de lavra é realizado depois de muitos estudos de levantamento para se conhecer o local, o minério a ser extraído, sua forma, a profundidade da jazida e pôr fim a escala de produção, isto de acordo com o Curso de Mineração Básico - Modulo II, disponibilizado pela Vale (VALER, 2017).

Embora a escolha pelo tipo de lavra leve em consideração fatores importante como já mencionado, existem apenas duas escolha básicas, que são a lavra a céu aberto e lavra subterrânea (GERMANY, 2002). Embora se diferencie no processo de retirada, os dois métodos preconizam: o transporte do minério retirado até os pontos de descarga, para que possa ser transportado para as indústrias onde serão realizadas as operações de beneficiamento, de acordo com os fins pretendidos para cada mineral (QUEVEDO, 2009).

Segundo Fernandes *et al.*, (2007), a lavra de céu aberto no Brasil se desenvolve fundamentalmente em:

3.3.1 Lavra por bancada

Para VIDAL *et al.* (2014) este método é dividido em diferentes níveis e cada um evolui lateralmente, tendo em vista que essa evolução se dá de forma sequencial. Já as características como a altura dos níveis e profundidade da cava são atribuídas pelas funções morfológicas, características físico-mecânicas e das expectativas de produção, como mostra a figura 1.

Figura 1 - Lavra por bancada, no Espírito Santo



Fonte: CETEM/MCTI (2010).

3.3.2 Lavra por tiras

O Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) através do convênio Minerais do Paraná SA (MINEROPAR), mostra que este tipo de lavra é bastante utilizado em jazidas onde os depósitos minerais se distribuem em camadas horizontais e que a altura da camada seja inferior ao tamanho lateral, como mostra a figura 2 (DNPM/MINEROPAR, 2010).

Figura 2 - Lavra por tiras, mina de bauxita no Pará



Fonte: Divulgação/MPF.

3.3.3 Lavra por dragagem

O Ministério de Minas e Energia (MME) aborda os métodos de lavra, e em dragagem diz que se utilizam dragas nos leitos dos rios. Geralmente é executada contra a corrente e quando necessário se faz um represamento para que as condições

de trabalho/operação melhorem. Uma grande vantagem deste método é que diferente dos demais, um único aparelho faz o trabalho de inúmeros outros, isto é, a draga desmonta, carrega, transporta e beneficia isso tudo em uma única operação, como mostra a Figura 3 (MME, 2018).

Figura 3 - Processo de dragagem



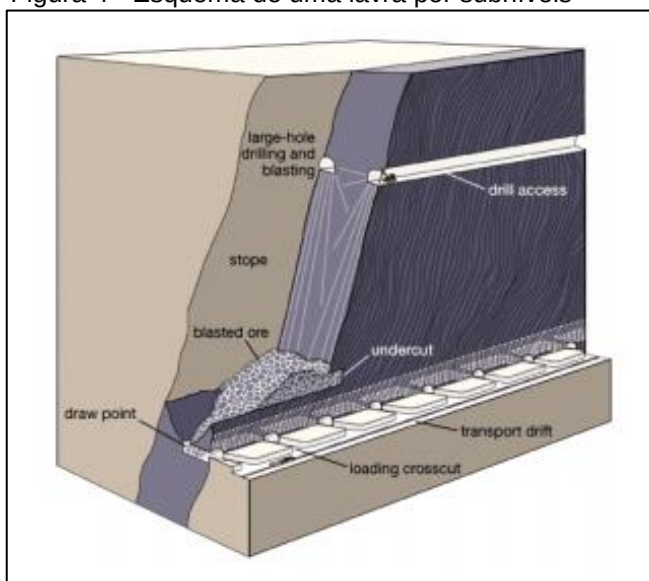
Fonte: Porto e Navios (2018).

Para Fernandes *et al.* (2015) a lavra subterrânea existe vários métodos de extração, como por exemplo:

3.3.4 Mineração tipo subníveis (*sublevel stoping*)

O uso deste tipo de extração mineral, em geral, é ascendente. O desmonte do maciço é realizado por volumosos veios verticais, depois desta etapa o curso de escoamento é realizado por meios dos gargalos de produção. Este método só é empregado quando a inclinação do corpo mineral possui uma inclinação bastante proeminente e o uso de mais de um subnível nos horizontes se aplicam quando o maciço é robusto, como mostra a Figura 4 (ALVARENGA, 2012).

Figura 4 - Esquema de uma lavra por subníveis



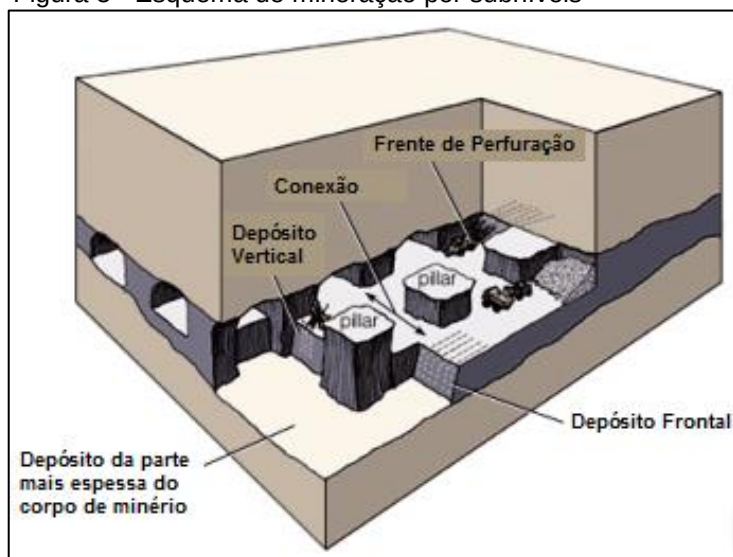
Fonte: Atlas Copco (1997).

3.3.5 Mineração em salões e pilares (*room-and-pillar*)

Este esquema de mineração se emprega bastante maquinário para sua implantação e execução, e as limitações do tipo de máquinas que se pode utilizar, se dá, essencialmente, pelas dimensões das camadas. Agora, a escolha pelo tipo de equipamento para a perfuração se faz em função da consistência de rocha a ser explorada, para casos onde a rocha é dura se aplica a perfuração pela carreta jumbo, mas em rochas brandas a perfuração por rotação é aplicada (GERMANY, 2002).

Enquanto a execução da forma da mina por salões e pilares, Cury (2017) expõe que é realizado extensas escavações, porém, se utiliza o próprio corpo do maciço como sustentação, ou seja, durante as escavações são deixados pilares entre essas câmaras, de acordo com a Figura 5.

Figura 5 - Esquema de mineração por subníveis

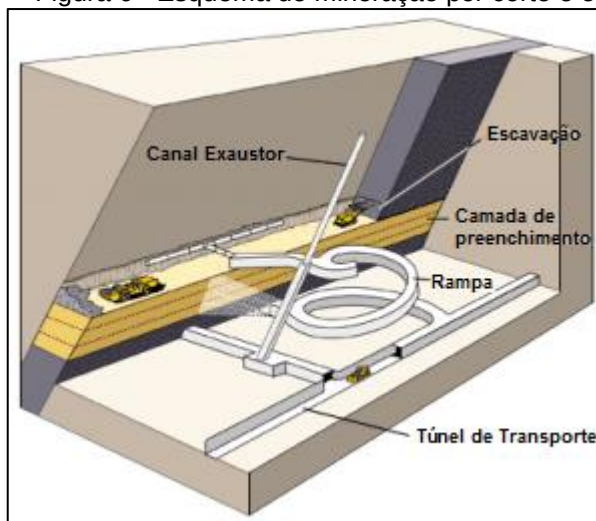


Fonte: Modificado de Atlas Copco (1980).

3.3.6 Mineração tipo corte e enchimento (*cut-and-fill*)

Para Alvarenga (2012) é uma lavra constantemente executado de forma ascendente e se dá de forma que com a retirada total do minério a sustentação do corpo da mina é feita pelo material de preenchimento, e ainda provê de piso para que auxilie na retirada da próxima porção de minério. Esse enchimento ainda ajuda nas variações quanto à continuidade e homogeneidade dos atributos do minério, um exemplo é a Figura 6 abaixo.

Figura 6 - Esquema de mineração por corte e enchimento



Fonte: Atlas Copco, 1997.

3.3.7 Mineração tipo *longwall*

As principais características da lavra em *longwall* são: menor despesa com a abertura da mina, seu rendimento é o maior em relação à área, devido a isso tem uma remuneração em menor tempo e muitos outros benefícios (CARDOZO, 2015).

Alvarenga (2012) expôs que as profundidades comuns para a execução deste tipo de lavra ficam entre os 300 e 1600m, o desmonte da porção do minério é feito, em grande parte, por desmontadores contínuos. Sua aplicabilidade é para corpos planos de grande altura e pequena espessura (até 4 m) com grande extensão horizontal, como mostra a Figura 7 abaixo.

Figura 7 - Mineração por longwall



Fonte: CAT (2018).

3.4 IMPORTÂNCIA DA CARACTERIZAÇÃO DO MACIÇO (GEOLÓGICO/GEOTÉCNICO)

No livro *A Arte da Guerra*, escrito por Sun Tzu no século IV a.C., uma de suas estratégias é que antes de se iniciar uma batalha é necessário conhecer o inimigo. Com esse pensamento, antes de qualquer trabalho no solo/rocha é preciso uma investigação a fim de conhecer suas características e comportamentos, para que através de análise possa verificar se atende ou não as solicitações do projeto, ou ainda criar um projeto que o maciço suporte (JAQUES, 2014).

A geologia nada mais é que uma ciência que trata a origem, estrutura e evolução das rochas (REBELO *et al.*, 2013), já a geotecnia ou a engenharia geotécnica é uma aplicação dos princípios da mecânica dos solos e rochas para o desenvolvimento de fundações, contenções e estruturas de terra (DAS; SOBHAN, 2011).

A falta de conhecimento, aliada a negligência e outros fatores podem ser preponderantes para que se ocorra um acidente. A geotecnia brasileira foi surpreendida no ano de 2007, quando alguns acidentes ocorreram no país. Que foram o desabamento da Linha 4 do metrô de São Paulo, o rompimento da barragem de rejeitos em Minas Gerais e a tragédia no Rio de Janeiro, quando houve os desabamentos na região serrana (SAYÃO, 2007).

De acordo com o editorial da Edição Nº 31 do dia 10 de Junho de 2009, publicada pela revista eletrônica Geotecnia, da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS), com o título “Barragens: tragédia anunciada” mostra um caso que aconteceu no estado do Piauí. Porém o que realmente chama a atenção não é o caso isolado, mas sim o histórico de 100 acidentes em barragens anuais no Brasil.

Embora a geotecnia brasileira venha passando por problemas, houve inovações nas áreas metodológicas, analíticas, numéricas e tecnológicas. Essas inovações ajudaram a mitigar alguns problemas, pois atuam na previsão do comportamento dos terrenos, problemas quanto a sismos, métodos de melhoramento e muitos outros (CARDOSO, 2015).

3.5 TALUDES

As superfícies inclinadas de solos e/ou rochas, sendo elas idealizadas pelo homem ou moldadas pela natureza, são denominados taludes artificiais e taludes naturais, respectivamente (TORRES; BARROS; CHISSOLUCOMBE, 2017). Mas eles não se diferenciam apenas nos seus nomes, pois os taludes artificiais têm sua constituição conhecida, pois foi imposta pelo homem. Já os naturais são o fruto de uma fusão de condições geológicas e ambientais (CALLE, 2000).

Entretanto, além desta divisão entre os taludes do ponto de vista de sua criação, Silva (2006) enunciou que há outra em decorrência de suas finalidades, isto é, existem os taludes urbanos e os que são implantados na exploração mineral.

Justaposto a esta afirmação, as análises para a concepção da forma que o maciço irá receber após a intervenção humana, também terão uma certa divisão para melhor formulação dos problemas envolvidos.

Mantendo esse pensamento, o empenho para conseguir as informações de onde o talude será executado é imprescindível, pois como Reis (2010) disse a exploração mineral, como um todo, é realizada em fronteiras distintas e o anseio por mais matéria prima faz com que a lavra atinja limites cada vez mais extremos.

Os taludes em si, estão suscetíveis a problemas que causam sua instabilidade, e posteriormente podem sofrer com distúrbios, como são os casos citados por Calle (2000), que são deslizamentos, corridas de lama e até mesmo pequenos pontos de erosão. A consequência desses casos, mesmo que considerados insignificantes, podem gerar problemas a longo ou curto prazo, e catastróficos eventos, pois podem atingir grandes empreendimentos e o mais importante, vidas humanas.

Fazendo uma comparação de duas linhas de estudos diferentes, Calle (2000) citou os principais problemas ocorridos no seu estudo e Reis (2010) atenta para o fato de que na mineração, não se pode apenas levar em consideração, durante as análises de instabilidades dos taludes, o que os métodos convencionais preconizam. Que de acordo com ele, visam prever as prováveis frentes que ocorrerá ruptura e ainda incorporam a essa linha de pensamento que o talude se torna estável quando os esforços atuantes são inferiores que os resistentes. Para ele, deve ser adicionado aos métodos convencionais, os estudos acerca das deformações sofridas pelo corpo do maciço.

Seguindo a linha de pensamento, nas análises para a estabilidade dos taludes em minas, há mais uns acréscimos que devem ser ponderados, que são a influência do mineral nas condições mais limites que se possa chegar com segurança, às exigências de que a cava deve ter taludes ainda mais íngremes e mais altos, aliados a viabilidade econômica e variabilidade espacial das características geológicas, tudo de acordo com que Castro (2004).

Para Damasceno (2008) as bancadas das minas dão aos taludes a estabilidade, mas no caso de minas profundas a instabilidade global é um grande problema, pois os riscos de uma instabilidade global são muito grandes. Mantendo esse pensamento, para o mesmo autor as rupturas de parte de bancadas são comuns,

afetando pouco os taludes, mas existe a possibilidade de as bancadas serem estáveis mas os taludes globais (alcançando a profundidade máxima da mina) não.

Para Torres, Barros e Chissolucombe (2017) as formas geométricas encontradas nos taludes são basicamente essas presentes na Figura 8, cada um empregado de acordo com a necessidade:

Figura 8 - Formas geométricas dos taludes



Fonte: Torres, Barros e Chissolucombe (2017).

3.6 MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOTÉCNICA

3.6.1 Finalidade

A modelagem geológica nada mais é que uma representação gráfica do maciço rochoso de um local delimitado, isto é, quando se tem um interesse de se instalar ou já existe algum empreendimento em uma região e que necessite de informações mais detalhadas, se utiliza esta técnica (DAMASCENO, 2008).

Através disso, o modelo de um maciço permite sua manipulação, ou seja, quando se gera o modelo pode-se extrair o realismo e a simplicidade, com o realismo confere-se o modelo real e com a simplicidade se faz a manipulação experimental (PÉREZ, 2008).

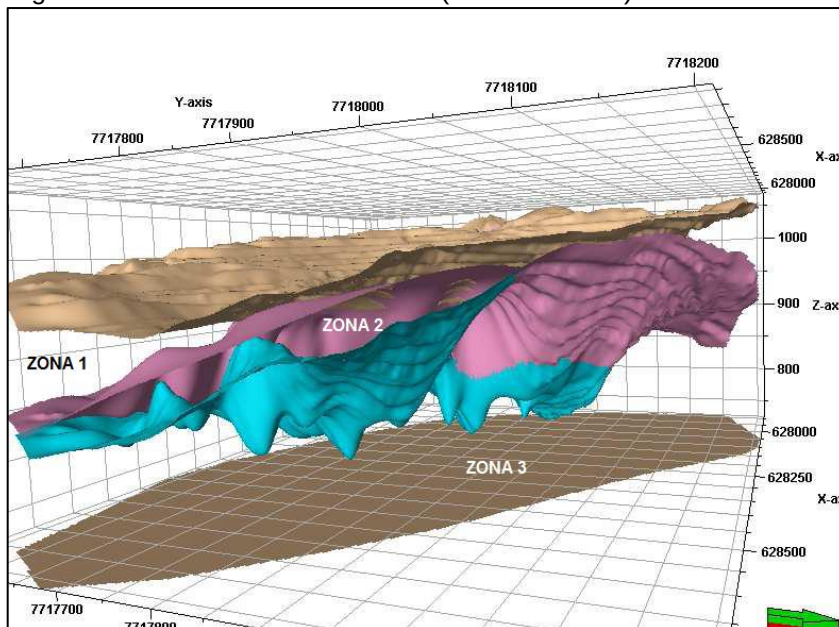
Este tipo de investigação é muito explorado no ramo da Engenharia de Petróleo, onde as necessidades por informações sobre os poços são preponderantes para que haja uma boa extração. Um exemplo disto foi um estudo realizado sobre um campo onshore com 80 poços, eles encontraram problemas como fraturas durante a

perfuração, e elaboraram o modelo geológico geomecânico para uma melhor compreensão das estruturas/horizontes do terreno (PILOTTO *et al.*, 2016).

No que tange o recolhimento de amostras, a quantidade e posicionamento variam de acordo com as características do terreno escolhido, pois de acordo com o que Felgueiras e Câmara (2001) disseram, superamostragens em um campo predominantemente plano provoca uma repetição de informações desnecessárias, já em relação a terrenos onde o relevo é bem acidentado o uso de poucos pontos traduz em uma escassez de informações, e isso refletirá na qualidade final do estudo.

Esses cuidados para se evitar o que ocorreu no estudo do Damasceno (2008), onde eles identificaram ao fim da modelagem que o programa, no caso o Petrel® 2004, teve uma taxa de liberdade muito grande, pelo fato de que as sondagens se concentraram no centro da mina. Esta centralização das sondagens é a principal causa da criação pelo programa de horizontes questionáveis, pois como foi dito, os horizontes produzidos foram visualmente incoerentes, como visto na Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Horizontes intermediários (Vista Nordeste)



Fonte: Damasceno (2008).

3.6.2 Tipos de Modelos (Aplicação)

A gama de utilização desta ferramenta para melhorar a compreensão do solo é bastante vasta, além do caso citado anteriormente pode ser utilizado também

obtendo às tensões e pressões *in situ* através da modelagem 3D (MARCHESI, et al., 2016).

Mas além de analisar “um todo” pode ser utilizado para análise de pequenas porções, como é o caso de um estudo realizado entre a Petrobras e o laboratório australiano *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), onde utilizaram amostras de Travertino com falhas artificiais, isto para avaliar a influência da reativação de falhas depois de sofrer carregamentos, com o resultado apontando a alteração da permeabilidade da rocha (CORRÊA *et al.*, 2016).

Outro exemplo de que se pode utilizar a modelagem é o caso de o estudo da mina Morro da Mina pertencente a Vale, que se localiza na cidade de Conselheiro Lafaiete-MG, onde se utilizou informações (relatórios técnicos) para a elaboração do modelo através do software Petrel® 2004 (DAMASCENO, 2008).

3.6.3 Geoestatística

Na criação dos modelos de solo se utiliza técnicas de interpolação, elas se diferenciam basicamente em determinísticos e geoestatísticos. Os métodos determinísticos são fundamentados nos valores obtidos em uma área e usam fórmulas próprias a esses valores. Já os geoestatísticos são modelos estatísticos probabilísticos, que buscam, basicamente, correlacionar à similaridade dos intervalos e a direção das amostras (MATOS, 2005).

Durante um estudo quanto maior for o volume de informações mais detalhado e preciso será seu resultado, mas quando, por qual quer que seja o motivo, não se obtêm as informações necessárias podem surgir resultados um tanto questionáveis a cerca da realidade, e os métodos determinísticos não são recomendados. E justamente, neste caso, o emprego da geoestatística é imprescindível para realizar as estimativas necessárias para preencher as lacunas (STURARO, 2015).

Nos métodos geoestatísticos “convencionais” a estimativa dos dados se dá basicamente por meio de interpolações espaciais, como por exemplo, triangulação, média das altitudes das amostras vizinhas e outros (MATOS, 2005). Mas em casos onde a escassez de informações esses métodos convencionais possuem limitações,

e para realizar a estimativa nesses casos é empregado o método de Krigagem, por exemplo (CAMARGO, 1998).

A krigagem basicamente faz uma descrição mais exata da estrutura espacial das informações e, em detrimento a isso, produz uma rica representação da distribuição da estimativa (SILVA *et al.*, 2008). Com isso a principal diferença entre a krigagem e os demais interpoladores é a importância que é dada as amostras, ou seja, a importância das informações são determinadas a partir de uma análise espacial, bem como realiza estimativas não parciais e com uma variância mínima (MATOS, 2005).

De acordo com Landim e Sturaro (2002) existem três tipos de krigagem, sendo eles:

- Krigagem Simples: Usada quando, em uma área, a média os dados estatísticos são considerados constantes;
- Krigagem Ordinária: É o inverso da simples, isto é, este tipo de krigagem é adotado quando a média dos dados não é constante em toda a área, dita como flutuante ou móvel;
- Krigagem Indicativa: Para os autores é uma aplicação da ordinária, mas com a variável que resulta de uma função não linear.

O método de krigagem mais disseminado no campo de estudo da geoestatística é o ordinário e será utilizado neste estudo, pois, em resposta do que já foi dito, o resultado do emprego, são reduzidos valores da variância de erro. Mas nem tudo são flores, por que neste modelo se utiliza uma suavização das estimativas, e não é bem vista, pois os valores estatísticos máximos distribuídos tendem a ser menosprezados e os mínimos superestimados (ROCHA; LOURENÇO; LEITE, 2007).

Mas para combater esse problema, quando se utiliza a krigagem ordinária, se faz uma correção. Esta correção foi utilizada por Santos *et al.* (2011), quando para suavizar as discrepâncias entre os resultados, eles inseriram um fator de correção, que foi obtido a partir da variabilidade para cada variável adotada.

Para outros autores ao invés de adicionar aos cálculos um fator de correção, foram mais longe, e Yamamoto (2005 *apud* ROCHA; LOURENÇO; LEITE, 2007, p.38) propôs um método de correção para o efeito de suavização, que proporciona uma precisão global das estimativas presentes e ainda mantêm as características essenciais que pesam durante a escolha da krigagem ordinária, que são a precisão local através da reprodução das médias locais.

3.7 MODELAGEM NUMÉRICA

Enquanto a modelagem geológica se faz para se conhecer o resultado da junção dos parâmetros do solo, a modelagem numérica é produzida para realizar simulações construtivas e ainda agregar modelos construtivos que reproduzam os comportamentos dos mais diversos constituintes presentes no maciço do solo (LIMA, 2002).

Para Felgueiras e Câmara (2001) com a modelagem numérica ou simplesmente Modelo Numérico de Terreno (MNT) pode-se produzir:

- Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- Avaliação do corte de aterro para estudos de estradas e barragens;
- Apoio para estudos de geomorfologia e erodibilidade, através da construção de mapas de declividade;
- E a mais importante aplicação a apresentação tridimensional.

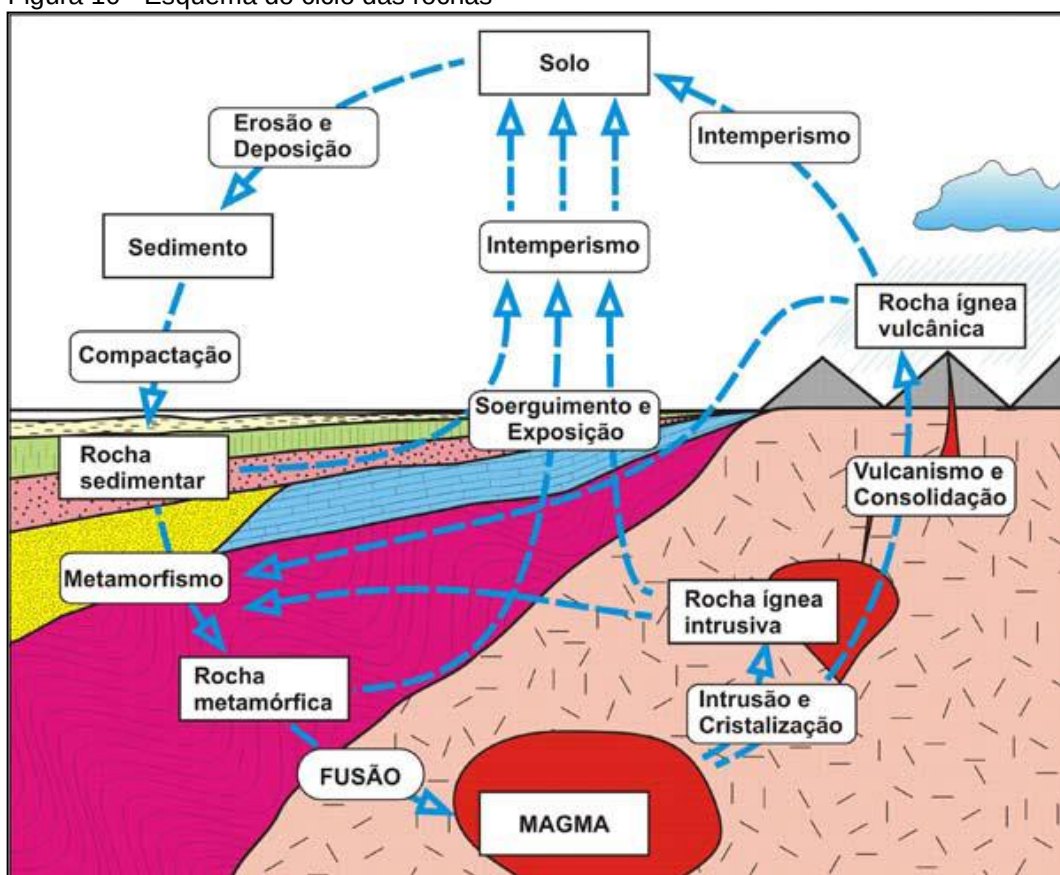
As aplicações para a modelagem numérica podem ser qualitativas, que são a visualização do modelo usando projeções geométricas, e quantitativas, cálculos dos volumes e geração dos mapas, como, por exemplo, da declividade (FELGUEIRAS; CÂMARA, 2001). Pensando na parte quantitativa, o uso do Modelo dos Elementos Finitos (MEF) permite a determinação do estado de tensão e deformação de um corpo de geometria arbitrária que pode estar sujeita a ações externas (AZEVEDO, 2003).

No ramo da geotecnia o MEF nos dias atuais é a ferramenta numérica mais eclética para se realizar a investigação nas interações de solo-estrutura. Isso pelo fato que esse recurso agrega a modelagem um tom mais realístico aos comportamentos do maciço, pois preserva as características como a geometria e os parâmetros do solo e muitos outros atributos (MORE, 2003).

3.7.1 Parâmetros de Resistência

Universalmente as rochas são classificadas em 3 tipos, as ígneas, metamórficas e as sedimentares, sendo elas diferenciadas de acordo com sua origem (CARNEIRO; GONÇALVES; LOPES, 2009), a Figura 10 mostra a distinção através do ciclo das rochas.

Figura 10 - Esquema do ciclo das rochas



Fonte: Carneiro, Gonçalves e Lopes (2009).

Porém o que realmente dá certas características específicas às rochas são seus constituintes, isto é, seus minerais. Os minerais constituintes são agrupados em essenciais e os acessórios, sendo que os minerais essenciais são predominantes na constituição das rochas, o que influencia nos comportamentos geomecânicos do maciço, já os acessórios estão presentes em pequenas proporções (NUNES, 2009).

Ainda sobre a mineralogia das rochas existem propriedades importantes que os minerais conferem às rochas, que são a clivagem e a sua dureza. A clivagem nada mais é que uma propriedade que os minerais, como mostra a Figura 11, têm de se partirem de acordo com uma superfície plana e paralelas, e a dureza é a resistência aos riscos que o mineral concede ao maciço e é medido na escala Mohs (VAINE, 2005).

Figura 11 - Planos de clivagem



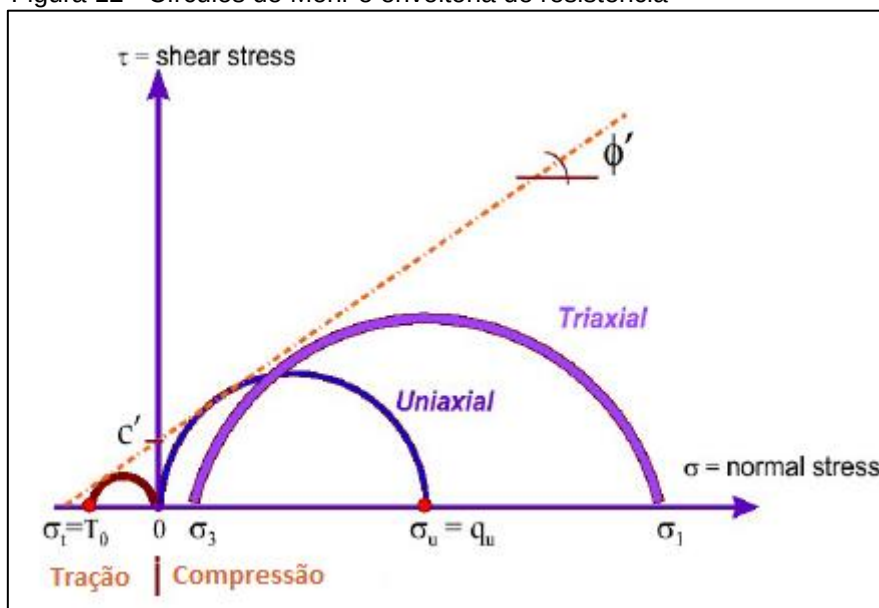
Fonte: Biopensamentos (2010).

Assim como os solos, as rochas se encontram 3 fases bem distintas, que são a fase sólida, líquida e gasosa. Mas para fins de estudos de suas propriedades, se considera que em uma rocha intacta se encontra os: componentes minerais, poros e o sistema de microfissuras, todas essas características se traduzem no seu comportamento geotécnico (NUNES, 2009).

Para a construção do modelo numérico irá se utilizar propriedades físicas descritas como preponderantes para a classificação, por assim dizer, da qualidade da rocha para os devidos fins, que são os seguintes: coesão, ângulo de atrito, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson, que serão obtidos com seus respectivos ensaios.

A coesão consiste na maior ou menor agregação dos componentes das rochas e é responsável pela velocidade de incisão linear e pelo processo de desobstrução (PENTEADO, 1983). O ângulo de atrito é responsável principalmente no caso do ganho de resistência em locais onde as descontinuidades estão presentes e para sua obtenção, assim como a coesão, é feita com a execução dos ensaios de tração direta, compressão uniaxial e triaxial, com isso se obtém os círculos de Mohr, como mostra a Figura 12 abaixo (NUNES, 2009).

Figura 12 - Círculos de Mohr e envoltória de resistência



Fonte: Modificado de Nunes (2009).

O comportamento do maciço rochoso é definido pela relação das tensões aplicadas e das deformações produzidas, isto é, com o carregamento é normal que o corpo como um todo se deforme, e a elasticidade é uma das responsáveis por este processo de deformação. Para a obtenção do módulo de elasticidade a ISRM (1981) recomenda se utilizar três métodos que são: Módulo Tangente, Módulo Médio, Módulo Secante (PANITZ, 2007).

Por fim, o coeficiente de Poisson é uma relação entre as deformações longitudinais e axiais, é importante para a modelagem por que a natureza do maciço rochoso é heterogênea, e consequentemente existem incertezas nas propriedades elásticas (SYDENSTRICKER *et al.* 2004). Para a determinação do coeficiente de Poisson se utiliza o ensaio de compressão uniaxial (NUNES, 2009).

3.7.2 Método dos Elementos Finitos Aplicado na Mineração

Existe uma ferramenta bastante utilizada para se fazer uma análise bastante confiável e que é o reflexo praticamente perfeito da realidade, o Método dos Elementos Finitos (MEF). Que consiste em uma análise matemática que realiza uma segmentação de um meio contínuo em pequenos elementos, sem

modificar suas propriedades iniciais e avaliando cada parte em relação ao todo (LOTTI *et al.*, 2006).

Para Azevedo (2003) quando um problema relacionando análise estrutural surge, o processo de tratamento se dá basicamente por uma classificação das suas características, que são: geometria, modelo do material constituinte e as ações aplicadas. Agora levando para o MEF, seu modo de formulação e aplicação está sujeito a simplificações específicas a cada tipo de problema, para o autor ainda há aspectos que devem ser levados em consideração antes da análise estrutural do problema, sendo eles: Análise dinâmica ou estática, análise não linear (que será empregado neste estudo) ou linear e por fim seu tipo de estrutura.

No âmbito da mineração, o uso do MEF consiste basicamente na análise da estabilidade dos taludes das minas. O uso desta plataforma de análise foi empregado na engenharia geotécnica primeiramente em uma barragem de terra, que levou em consideração a lei construtiva não linear, desde então este método se mostrou bastante promissor para os geotécnicos (NOGUEIRA, 2016).

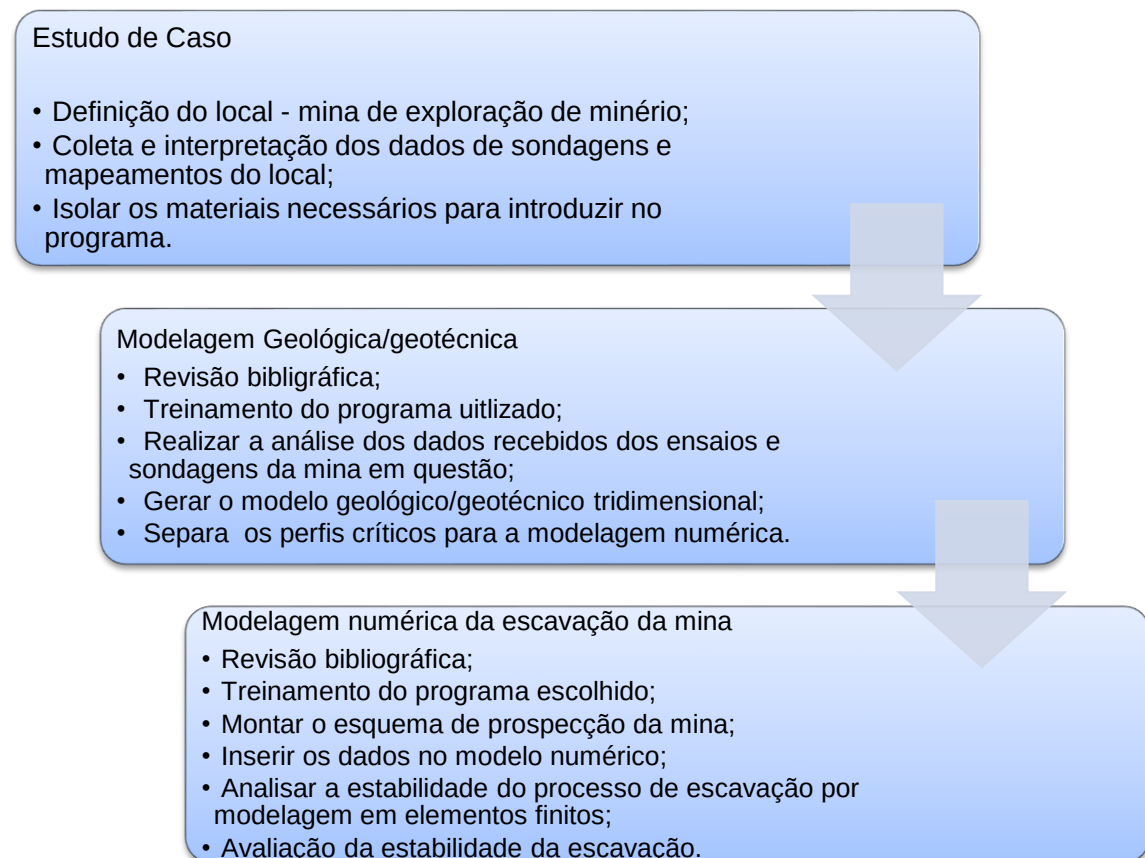
Segundo Braga (2016) o uso do MEF é bastante utilizado no que tange a previsão das magnitudes dos deslocamentos que uma massa do solo sofrerá. Mas ainda pondera que para se obter resultados confiáveis deve-se levar em consideração os requisitos: conhecer o comportamento tensão vs deformação, adotar um modelo construtivo que seja capaz de reproduzir as particularidades do maciço e está a disposição um programa capaz para se fazer tal simulação.

Embora o método em questão se mostre como um dos mais completos, por poder trabalhar com distintas geometrias, materiais heterogêneos e anisotrópicos, forças de massa e superfícies variáveis, apresenta também suas limitações ou desvantagens pois necessita de recursos computacionais mais sofisticados que a maioria. Devido a isso, seu uso é bastante empregado na modelagem 2D, pois com tantas variáveis a modelagem tridimensional se transforma em um enorme problema de elaboração (FREITAS, 2016).

4 METODOLOGIA

Iremos adotar a metodologia para a obtenção do modelo geológico adotado pela PUC-Rio, e de um conjunto de trabalhos, como por exemplo, Pilotto *et al.* (2016). As etapas deste trabalho estão resumidamente apresentadas na Figura 13, e cada uma destas etapas são descritas a seguir.

Figura 13 - Passo a passo da metodologia



Fonte: Elaboração própria.

4.1 ESTUDO DE CASO

Na parte do estudo de caso, primeiramente será escolhida uma mina de exploração de minério, a escolha da mina é de suma importância, pois nossos dados serão retirados da mina em questão. E o próximo passo é justamente a coleta e interpretação dessas informações, que serão basicamente os dados acerca das sondagens e mapeamentos do maciço.

Com isso, as amostras escolhidas irão representar a variação do fenômeno espacial do local da mina. Para se chegar ao objetivo do trabalho, que é a produção do modelo do maciço, é necessário que durante as escolhas das amostras se considere a quantidade e o seu posicionamento, tudo isso englobando o corpo do maciço.

Por fim, a coleta e interpretação das informações recebidas objetiva a importação e os devidos tratamentos dos dados para o programa modelador, que se buscará ter como exemplo o que Pilotto *et al.* (2016) realizou, isto engloba o terceiro passo do estudo de caso, que nada mais é que isolar os materiais necessários para ser introduzidos no programa, ainda a ser escolhido.

Nesta etapa é necessário utilizar software específico, como por exemplo o Petrel® que utiliza a geoestatística para a definição dos horizontes, tipos de rocha e distribuição das propriedades mecânicas. Esta etapa será feita em parceria com o GTEP (Grupo de Tecnologia em Engenharia de Petróleo) da Pontifícia Universidade Católica do Rio (PUC-Rio), que irá obter o modelo geológico, perfis e os mapas bi e tridimensionais da mina que serão utilizados no modelo numérico. O item a seguir descreve os passos metodológicos que serão utilizados para a obtenção do modelo geológico.

4.2 MODELAGEM GEOLÓGICA/GEOTÉCNICA

Seguindo a linha de execução de Pilotto *et al.* (2016), a etapa da modelagem geológica/geotécnica, serão previstas as propriedades de perfis e propriedades mecânicas. Inicia-se com a devida revisão bibliográfica, que por sinal existem estudos que seguem basicamente a mesma linha de pensamento no Brasil, mas se concentrando bastante na região sudeste.

Logo após será realizado o treinamento do programa escolhido para a modelagem geológica/geotécnica. Dando sequência ao treinamento, é de fato usar o programa para a realização do modelo, mas seguindo a linha de pensamento de Damasceno (2008) o uso do programa que ele utilizou se obedeceu aos seguintes passos:

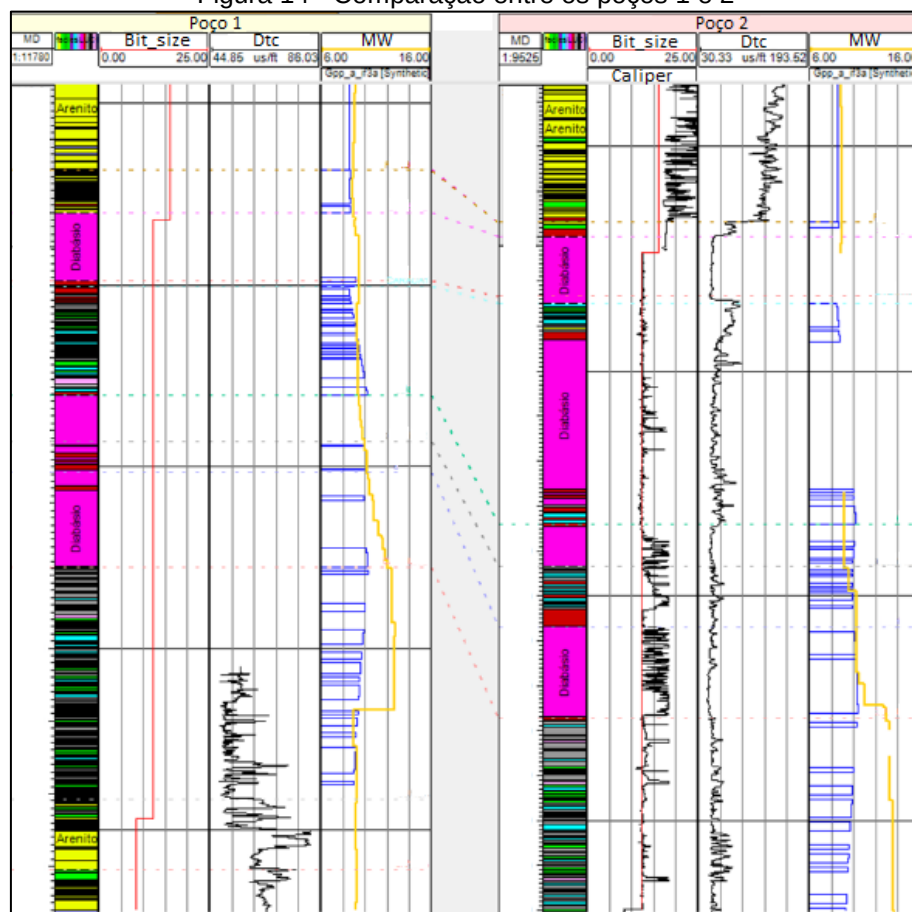
- Criação do *Horizons*: sua determinação produz a formação da superfície da mina e seus limites inferiores, através de mapas topográficos, que foi auxiliado pelo AutoCAD;

- Criação dos *Well Heads*: é a alocação, em relação as dimensões da mina, dos furos das sondagens pelo sistema adotado pelo autor;
- Criação dos *Well Paths*: para o conhecimento das trajetórias dos furos, contendo neles os valores de MD (*Measured Dept*);
- Criação dos *Well Logs*: onde as informações ao longo dos furos serão utilizadas.

Contudo, durante a escolha e uso das sondagens para gerar o modelo da mina, não irá se utilizar todas as amostras para gerar o processo de modelagem, pois irá se utilizar o processo de retroanálise para a contestação dos resultados obtidos, e isso faz com que se separe algumas amostras para a realização desta etapa.

Para Marchesi *et al.* (2016) a retroanálise foi realizada para o estudo acerca da estabilidade de poços, onde dois poços foram utilizados para a contraprova, que foram o poço 1 e 3, logo abaixo na Figura 14 foi realizado a comparação do poço 1 (da retroanálise) com o poço 2:

Figura 14 - Comparação entre os poços 1 e 2



Fonte Marchesi et al (2016)

Finalizando a modelagem geológica/geotécnica se realizará a escolha dos perfis críticos para a elaboração da próxima modelagem que será responsável pelo estudo da estabilidade da mina.

4.3 MODELAGEM NUMÉRICA

O primeiro passo para o emprego da modelagem numérica é também a revisão bibliográfica em torno da proposta do estudo, que consiste em corrigir os erros e preponderar os acertos. Logo após realizar o treinamento do programa escolhido para a modelagem numérica, que será o software em elementos finitos: Optimus®, um software gratuito.

A etapa seguinte será a montagem do esquema de prospecção da mina, para que no passo seguinte quando se for gerar modelo numérico se utilize os dados preponderantes aquele sistema de lavra, a céu aberto ou subterrânea, que no decorrer do trabalho esses sistemas foram mais aprofundados.

Agora é onde começa a parte importante do estudo que é a análise da estabilidade do processo de escavação, que será realizado com o auxílio da modelagem numérica que foi realizada pelo método de elementos finitos, que os passos de utilização é resultado do programa adotado. E finalizando o passo a passo da modelagem numérica para a escavação da mina será realizada a avaliação da estabilidade da escavação.

Portanto durante o último passo da modelagem numérica é necessário realizar a análise de todo o corpo da mina, minimizando ao máximo se analisar apenas uma parte e negligenciando outra. Que com base nos perfis e no esquema de prospecção da mina será possível avaliar a estabilidade global da mesma.

5 RESULTADOS ESPERADOS

No decorrer do trabalho espera-se desenvolver levando em consideração o estudo próprio de construção de um modelo geológico/geotécnico condizente com os dados de investigação e a simulação por modelagem (MEF) dos passos de escavação real da mina. Avaliando assim qual será a melhor forma de escavação da mina, seja geométrica, quanto temporal (ritmo de exploração do minério).

Portanto, se espera que os frutos decorrentes deste estudo seja uma forma de se mitigar os problemas encontrados antes, durante e depois da lavra da mina. Pois a análise empregada é uma modelo que se assemelha com o comportamento real do maciço da mina.

Através disso, quando a mina escolhida for devidamente destrinchada pelos métodos descritos, a investigação seja de forma coesa e de fácil compreensão, para que a concepção se assemelhe ao máximo aos modelos elaborados nos programas específicos.

6 CRONOGRAMA

Tabela 1 - Cronograma das etapas de pesquisa

Etapas	Ano 2018										
	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Concepção do Projeto											
Revisão da Literatura											
Cadastramento do Projeto											
Estudo de Caso*											
Modelagem Geológica/geotécnica*											
Modelagem Numérica*											
Revisão dos Resultados											
Entrega e Apresentação											

*Foi exposto na tabela apenas o nome das atividades principais, mas os prazos foram estimados de acordo com o apresentado na metodologia. Fonte: Elaboração própria.

7 ORÇAMENTO

Tabela 2 - Quantidade e custo dos materiais

MATERIAIS	QUANTIDADE	PREÇO UNITÁRIO (R\$)	PREÇO TOTAL (R\$)
Impressões	50	0,25	12,5
Folhas A4	1 resma (500 folhas)	18	18
Encadernação	2	5	10
Caneta	2	3	6
TOTAL	-	-	46,5

Fonte: Elaboração própria.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVARENGA, J. F. (2012). **Estudo de índices Operacionais da Lavra Subterrânea no Brasil**. Ouro Preto-MG, Brasil, Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral (PPGEM).

AZEVEDO, A. F. M. (2003). **Método dos Elementos Finitos**. Porto-Portugal. Universidade de Engenharia do Porto, acesso em 26 de Abril de 2018, disponível em: http://civil.fe.up.pt/pub/apoio/ano5/aae/Livro_MEF_AA.htm.

Biopensamentos (2010). **Clivagem**. Acesso em 26 de Abril de 2018, disponível em: <http://gracieteoliveira.pbworks.com/w/page/51163169/Clivagem>.

BRAGA, A. L. (2016). **Simulação Numérica Acoplada, via MEF, da Construção de um Depósito de Rejeito de Minério de Ferro**. Ouro Preto-MG. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral - PPGEM.

CALLE, J. A. C., (2000). **Análise de Ruptura de Talude em Solo não Saturado**. São Carlos-SP, Brasil. Universidade Federal de São Paulo (USP), Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos USP.

CAMARGO, E. C. G. (17 de Outubro de 1998). **GEOESTATÍSTICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES**. In: Câmara, G. & Medeiros, J. S. eds. Acesso em 18 de Abril de 2018, disponível em Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf.

CARDOSO, A. S. (2015). **Desenvolvimento da Geotecnia - Condicionantes Gerais e Específicas**. Artigo na Revista Geotecnia edº 135 , p. 5-41, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).

CARDOSO, F. A. C. (2015) **LONGWALL: Estado da Arte, Geomecânica, Planejamento e Aplicação**. Porto Alegre-RS, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM).

CARNEIRO, C. D. R.; GONÇALVES, P. W., & LOPES, O. R. (2009). **O Ciclo das Rochas na Natureza**. Campinas-SP. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Acesso em 29 de Abril de 2018, disponível em: https://www.ige.unicamp.br/terraedidatica/v5/pdf-v5/TD_V-a5.pdf.

CASTRO, W. (2004). **Síntese de Estudos de Estabilidade de Taludes – Minas de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto , Rio Grande do Sul, Brasil.

CAT (2018). **Cortador longwall EL3000**. Acesso em 27 de Abril de 2018, disponível em: https://www.cat.com/en_US/news/machine-press-releases/cat-sup-174-sup-el3000longwallshearerdelivershighproductioninmid.html.

Companhia de Mineração do Tocantins (MINERATINS). (Novembro de 2008). **Avaliação e Diretrizes para o Setor Mineral do Estado do Tocantins**. Palmas-TO, Brasil. Ministério de Minas e Energia (MME), Secretaria de Geologia, Mineração e Transformação Mineral. Acesso em 15 de Abril de 2018, disponível em:

<http://www.mme.gov.br/documents/1138775/1732815/Diagn%C3%B3stico+do+Setor+Mineral+do+Estado+do+Tocantins/2a192c0e-42ff-4658-83cc-ba1e54c6b363;jsessionid=7AEC13D53D06433B6701A5B7F8CABCDF.srv155>.

CONGUÊ, L. G. (Novembro de 2011). **Aplicação do Programa Peise para a Avaliação do Efeito Tschebotarioff**. Fortaleza, Ceará, Brasil. Universidade Federal do Ceará (UFC), Departamento de Engenharia Estrutural e de Construção Civil.

CORRÊA, R. S. M.; VELLOSO, R. Q.; KIEWIET, M. C. D. N.; FALCÃO, F. O. L. **Modelagem do Comportamento Tensão-deformação e Análise da Variação de Permeabilidade de Zonas de Falha em Travertinos** 2016 Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil CBMR/ABMS e ISRM, 2016.

CURY, A. (2017). **Lavra de Minas**. São Paulo-SP, editora: Oficina de Textos.

DAMASCENO, C. S. (Janeiro de 2008). **Modelagem Geológica e Geomecânica 3D e Análises de Estabilidades 2D dos Taludes da Mina de Morro da Mina, Conselheiro Lafaiate, MG, Brasil**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

DAS, B. M., & SOBHAN, K. (2011). **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**, Tradução da 8ª edição norte-americana. Editora Trilha.

Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM/MINEROPAR). (02 de Maio de 2010), **Plano Diretor**. Acesso em 15 de Abril de 2018, disponível em MINEROPAR:

http://www.mineropar.pr.gov.br/arquivos/File/publicacoes/plano_diretor/relatorio/apresentacao_sumario.pdf.

DOURADO, B. B. (2010). **EDUCAÇÃO NO TOCANTINS: Ginásio Estadual de Porto Nacional**. Goiânia-GO, Universidade Federal de Goiás (UFG), Faculdade de Educação, Programa de Pós-Graduação em Educação.

FELGUEIRAS, C. A.; CÂMARA, G. (2001). **Modelagem Numérica de Terreno**. Introdução a Ciência da Geoinformação, Instituto Nacional de Pesquisas Especiais (INPE) - 8081-PRE/3896. p. 39.

FERNANDES, F. R., MATOS, G. M., CASTILHO, Z. C., & LUZ, A. B. (2007). **TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS BRASIL 2015: Geociências e Tecnologia Mineral**. Rio de Janeiro-RJ, Serviço geologia do Brasil (SGB/CPRM), Centro de Tecnologia Mineral (CETEM).

FREITAS, J. (2016). **Elaboração do Modelo Geomecânico Tridimensional para a Reavaliação e Setorização Geotécnica do Realces da Mineração Caraíba**. Ouro Preto-MG. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP). Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia.

GERMANY, D. J. (2002). **A Mineração no Brasil**. Rio de Janeiro, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Acesso em 20 de Abril de 2018, disponível em: <https://www.finep.gov.br/images/a-finep/fontes-de-orcamento/fundos-setoriais/ct-mineral/a-mineracao-no-brasil.pdf>.

GIL. (Março de 2014). **Avaliação da Expansão do Complexo de Carajás através da Teoria de Opções Reais**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

H. HAMRIN (1997). **Guide to Underground Mining Methods and Applications**. Stockholm: Atlas Copco.

H. HAMRIN (1980). **Guide to Underground Mining Methods and Applications**. Stockholm: Atlas Copco.

IBRAM (2003). **Mineração do Brasil**. p.1-144, Manaus-AM, Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM), acesso em 19 de Abril de 2018, disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00004226.pdf>.

JACQUES, D. S. (2014). **Caracterização e Classificação de Maciços Rochosos da Mina de Volta Grande, Nazareno, Minas Gerais**. Viçosa, Minas Gerais-MG, Brasil, Universidade Federal de Viçosa (UFV).

LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R. (2002). **Krigagem Aplicada à Elaboração de Mapas Probabilísticos de Riscos** - Texto Didático 06. Universidade Estadual Paulista (UNESP), campos de São Claro SP, Departamento de Geologia Aplicada (IGCE), Laboratório de Geomatemática.

LIMA, A. P. (Setembro de 2002). **Deformabilidade e estabilidade de taludes em solo grampeado**. Dissertação de Mestrado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

LOTTI, R. S.; MACHADO, A. W.; MAZZIEIRO, E. T.; JÚNIOR, J. L. (2006). **Aplicabilidade Científica do Método dos Elementos Finitos**. Rev. Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial, Maringá, v. 11, n. 2, p. 35-43, Apr. 2006. Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-54192006000200006&lng=en&nrm=iso>. acesso em 20 Maio 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-54192006000200006>.

MARCHESI, V., PILOTTO, D., ALMEIDA, L. F., GONÇALVES, C., FONTOURA, G., ROUBAUD, G., et al. (2016). **Modelagem Geomecânica 3D como Ferramenta para Otimização da Perfuração de Poços – Estudo de Caso**. Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas. Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil: CBMR/ABMS e ISRM, 2016.

MATOS, A. C. O. C. (2005). **Implementação de Modelo Digitais de Terreno para Aplicações na Área de Geodésia e Geofísica na América do Sul**. São Paulo, São Paulo, Brasil. Universidade Federal de São Paulo (USP).

MELF, A. J.; MISI, A.; CAMPOS, D. A.; CORDANI, U. G. (2016). **RECUSOS MINERAIS NO BRASIL: Problemas e Desafios**. Rio de Janeiro-RJ, parceria entre a Academia Brasileira de Ciências (ABC) e a VALE.

Ministério de Minas e Energia (MME). (2013). **Histórico da Mineração Brasileira**. Acesso em 10 de Abril de 2018, disponível em Ministério de Minas e Energia:

http://www.mme.gov.br/documents/10584/1594105/Linha_do_tempo.pdf/acb3a5a9-9f7d-4d18-9191-58b1ed375791.

Ministério de Minas e Energia (MME). **Métodos de Lavra**. (s.d.). Acesso em 16 de Abril de 2018, disponível em Ministério de Minas e Energia: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/177708/M%C3%A9todos+de+Lavra/4a5b23b4-d07a-46c5-9efd-8f9b136e8860?version=1.0>.

MORE, J. (Junho de 2003). **Análise Numérica do Comportamento de Cortinas Atirantadas em Solos**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil. Dissertação de Mestrado pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

NOGUEIRA, R. T. (2016). **Simulação Numérica e Equilíbrio Limite aplicado a Retroanálise de Taludes em Mineração de Carvão**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais (PPGEM).

NUNES, A. L. S. (2009). **Princípios Básicos de Mecânicas das Rochas**. Rio de Janeiro, Brasil. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ/COPPE).

PANITZ, J. S. P. (13 de Setembro de 2007). **Desenvolvimento e Implementação de Metodologias para a Determinação da Deformabilidade e Tensões em Maciços Gnáissicos**. Rio de Janeiro-RJ, Brasil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

PENTEADO, M. M. (1980). **Fundamentos de Geomorfologia**. p. 185, 3ª edição. Rio de Janeiro-RJ. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (IBGE). Acesso em 19 de Maio de 2018, disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81427.pdf>.

PÉREZ, Y. A. R. (Março de 2008). **Caracterização Geométrica e Parametrização de Depósitos Transicionais Recentes e sua Aplicação na**

Modelagem de Reservatório Petrolíferos. Natal- RN, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRGN), Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG).

PILOTTO, D., MARCHESI, V., ALMEIDA, L. F., GOLÇALVES, C., & FONTOURA, S. (2016). **Modelagem Geológica e Geomecânica para Fins de Perfuração em Campos Onshore.** Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas. Belo Horizonte : CBMR/ABMS e ISRM 2016.

QUEVEDO, J. M. (09 de Outubro de 2009). **Modelo de Simulação para o sistema de carregamento e transporte em mina a céu aberto.** Rio de Janeiro-RJ, Brasil. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).

REBELO, D., ANDRADE, A., BONITO, J., & MARQUES, L. (2013). **Geologia - Manual do Aluno.** Timor-Leste, Timor-Leste: Ministério da Educação da República Democrática de Timor-Leste.

REIS, R. C. (Outubro de 2010). **Estudo de Estabilidade de Talude da Mina de Tapira - MG.** Ouro Preto-MG, Brasil, Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.

Revista Eletrônica ABMS, **BARRAGENS: Tragédia Anunciada.** Edição Nº 31 – 10/06/2009. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS): acesso em 15 de Abril de 2018, <http://www.emtermos.com.br/abms/ed31/31nota0.html>.

ROCHA, M. M.; LOURENÇO, D. A.; LEITE , C. B. B. (2007). **Aplicação de Krigagem com Correção do Efeito de Suavização em Dados de Potenciometria da Cidade de Pereira Barreto - SP.** São Paulo-SP. Revista do Instituto de Geociências – USP.

SANTOS, P. C.; SANTANA, A. C.; BARROS, P. L. C.; QUEIROZ, J. C. B.; & VIEIRA, T. O. (2011). **O emprego da geoestatística na determinação do tamanho “ótimo” de amostras aleatórias com vistas à obtenção de estimativas dos volumes dos fustes de espécies florestais em Paragominas, estado do Pará.** Acesso em 23 de Abril de 2018, disponível em SciELO, Manaus, v. 41, n.2, p. 213-222.

SAYÃO, A. (16 de Janeiro de 2007). **A Engenharia Geotécnica no Brasil.** Acesso em 16 de Abril de 2018, disponível em Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica : http://www.ibracon.org.br/Metro/ABMS_16_01.pdf.

Serviço Geológico do Brasil (CPRM). (2000), **Geologia e Resultados Prospectivos da Área Barra do Gameleira - Tocantins.** Goiânia-GO. Ministério de Minas e Energia, Secretaria de Minas e Metalurgia. Acesso em 23 de Abril de 2018, disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/1610>.

SILVA, E. M. (2006). **Análise de Estabilidade de Taludes em Solos de Alteração de Rochas Metamórficas do Quadrilátero Ferrífero.** Viçosa-MG,

Brasil. Universidade Federal de Viçosa (UFV), Pós-Graduação em Engenharia Civil.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B. (2008), **Avaliação de Interpoladores Estatísticos e Determinísticos na Estimativa de Atributos do Solo em Agricultura de Precisão**. Idesia-Chile, v. 26, n. 2, p. 75-81, acesso em 19 de Abril de 2018, disponível em: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292008000200010.

STURARO, J. R. (2015). **Apostila de Geoestatística Básica**. Rio Claro-SP, Brasil Universidade Estadual Paulista (UNESP), Departamento de Geologia Aplicada (IGCE).

SYDENSTRICKER, R. M., COUTINHO, A. L., MARTINS, M. A., ALVEZ, J. L., & LANDAU, L. (2004). **Efeitos do Coeficiente de Poisson e Análise de erro de Tensões em Tectônica de Sal**. 3º Congresso Brasileiro de P&D Petróleo e Gás (p. 6). Rio de Janeiro : Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás - IBP.

TORRES, R. T., BARROS, M. R., & CHISSOLUCOMBE, I. (2017). **Estabilidade de Taludes**. CEPE - IV Congressp de Ensino, Pesquisa e Extensão da UEG . Acesso em 20 de Abril de 2018, <http://www.anais.ueg.br/index.php/cepe/article/viewFile/10600/7820>.

TZU, Sun (ano da tradução para o português, 2006) **A Arte da Guerra**. tradução de Sueli Barros Cassal, Porto Alegre, 2006, vol 207, p.152, L&PM
VAINE, M. E. (2005). **Geologia na Escola** - Caderno 4. Curitiba-PR: Serviço Geológico do Paraná (MINEROPAR). Acesso em 21 de Abril de 2018, disponível em: <http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=97>.

VALER. (08 de Novembro de 2017). **CURSO DE MINERAÇÃO BÁSICO - Módulo II: Geologia de Mina e Operações de Lavra**. Acesso em 19 de Abril de 2018, disponível em Vale: <http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/environmental-social/Paginas/curso-basico-de-mineracao.aspx>.

VIDAL, F. W., PINHEIRO, J. R., CASTRO, N. F., & CARANASSIOS, A. (2014). **Lavra de Rochas Ornamentais**. Centro de Tecnologia Mineral (CETEM), Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI).

ANEXOS

Os Currículos *Lattes* da orientadora e do autor deste trabalho seguem nas próximas páginas.