

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL – PPGEM

**ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA
MODELAGEM GEOMÉTRICA E CUBAGEM DE MACIÇOS ROCHOSOS**

Ítalo Marcolino do Carmo

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Recife
2013

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS – CTG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL – PPGEM

**ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS PARA
MODELAGEM GEOMÉTRICA E CUBAGEM DE MACIÇOS ROCHOSOS**

Ítalo Marcolino do Carmo

Engenheiro de Minas

Trabalho realizado no Laboratório de Planejamento de Lavra do Departamento de Engenharia de Minas, do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Mineral - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Minerais Industriais

Recife
2013

Catálogo na fonte
Bibliotecário Vimário Carvalho da Silva, CRB-4 / 1204

C287e

Carmo, Ítalo Marcolino do.

Estudo comparativo de ferramentas computacionais para modelagem geométrica e cubagem de maciços rochosos. - Recife: O Autor, 2013.

xi, 97 folhas, il., color., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Julio Cesar de Souza.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2013.

Inclui Referências, listas de figuras e de tabelas.

1. Engenharia Mineral. 2. Modelagem. 3. Modelo digital. 4. Maciços rochosos. 5. Bloco. I. Souza, Julio Cesar de (orientador). II. Título.

622.35 CDD (22. ed.)

UFPE
BCTG/2014-020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MINERAL

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA

DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE

ITALO MARCOLINO DO CARMO

**“ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS
PARA MODELAGEM GEOMÉTRICA E CUBAGEM DE MACIÇOS
ROCHOSOS”**

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: MINERAIS INDUSTRIAIS

A comissão examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do Dr. Júlio César de Souza

Ítalo Marcolino do Carmo, Aprovado.

Recife, 29 de Outubro de 2013

Prof. Dr. Júlio César de Souza

Orientador (UFPE)

Prof. Dr. Márcio Luiz de Siqueira Campos Barros

Examinador Interno (UFPE)

Prof. Dr. Almany Costa Santos

Examinador Externo (UFPE)

Prof. Dr. José Lins Rolim Filho

Examinador Externo (UFPE)

*"Minha energia é o desafio,
minha motivação é o impossível,
e é por isso que eu preciso
ser, à força e a esmo, inabalável!"*

(Augusto Branco)

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Ednilda Marcolino, pelos ensinamentos, apoio e inspiração para viver a vida com muita garra e determinação.

Ao meu amigo e orientador Prof. Dr. Júlio Cesar de Souza pela ajuda e orientação para a construção deste trabalho.

À todos meus Professores que além de educadores serão eternos mestres em minha formação moral.

Aos meus amigos que torceram por mim e a toda minha família.

Ao Senhor do Universo por ter me feito um sonhador!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo.....	2
1.2. Objetivos específicos	2
1.3. Justificativa.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Métodos de Avaliação de Reservas Minerais	4
2.1.1. Métodos Convencionais	5
2.1.1.1. Método das seções ou perfis.....	7
2.1.1.2. Método dos polígonos.....	9
2.1.1.3. Método dos triângulos.....	10
2.1.1.4. Método das matrizes de blocos.....	11
2.1.1.5. Método dos contornos	12
2.1.1.6. Método do inverso de uma potência da distância.....	13
2.1.2. Métodos Computacionais	17
2.2. Modelagem geométrica de depósitos minerais	19
2.3. Avaliação do volume de sólidos	22
2.4. Dimensionamento de cava final	22
2.4.1. Etapas fundamentais para dimensionamento da cava final.....	24
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	26
3.1. Domínios Morfoestruturais	27
3.2. Localização e acesso da área de estudo.....	28
3.3. Aspectos Fisiográficos e Geomorfológicos	30
3.4. Aspectos Geológicos.....	32
3.4.1. Geologia Regional.....	32
3.4.2. Geologia Local.....	34
4. MATERIAIS E MÉTODOS	42
4.1. SKETCHUP PRO 8.0	43
4.1.1. Metodologia do uso do software SKETCHUP	45
4.2. SURFER 9.0	51
4.2.1. Metodologia do uso do software Surfer 9.0	52
4.3. AutoCad 2010.....	55
4.3.1. Metodologia do uso do software AutoCad 2010	56

4.4.	AUTOCAD CIVIL 3D 2014	60
4.4.1.	Metodologia do uso do software AUTOCAD CIVIL 3D 2014.....	61
4.5.	DATAMINE STUDIO 3.0	66
4.5.1.	Metodologia do uso do <i>software</i> DATAMINE STUDIO 3.0.....	67
4.6.	Definição da área base	70
4.7.	Definição da cava experimental	71
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.1.	Modelo 1 – SketchUp Pro 8	73
5.2.	Modelo 2 – Dados colhidos em campo com o uso de GPS	80
5.3.	Modelo 3 – Ortofotocartas	85
5.4.	Comparação entre os modelos elaborados.....	91
6.	CONCLUSÕES.....	94
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Exemplos esquemáticos de alguns dos métodos de extensão clássicos para avaliação de jazidas minerais: A, B, C e D: Poligonais, E: Triangulares e F: Seções.
- Figura 2. Configurações possíveis de blocos de cubagem para os métodos convencionais
- Figura 3. Ilustração da construção de polígonos, a cada qual é atribuído um teor em substância útil
- Figura 4. Configurações de triângulos diferentes (A e B) para o mesmo conjunto de dados
- Figura 5. Ilustração do método das matrizes de blocos: ajuste de blocos entre sondagens
- Figura 6. Esquematização da estimação de blocos através do método do inverso de uma potência da distância
- Figura 7. Modelo tridimensional de blocos de um depósito hipotético
- Figura 8. Principais aplicações da geoestatística para a avaliação de uma jazida mineral
- Figura 9. Principais aplicações da geoestatística para a avaliação de uma jazida mineral (adaptado de Jimeno,1997).
- Figura 10. Mapa de Localização da Área
- Figura 11. Mapa de acesso à área do maciço rochoso estudado.
- Figura 12. Localização do maciço rochoso destacado em vermelho.
- Figura 13. Mostra a sistema de cisalhamentos atuantes na área em estudo, incluindo o seu par conjugado e as direções das fraturas de tensão atuante sobre o corpo.
- Figura 14. Campo de tensões atuante sobre área em questão incluindo o eixo σ_3 , que constitui a direção ideal para a abertura da pedreira.
- Figura 15. Imagem ilustrativa da interface do software SKETCHUP PRO 8.0
- Figura 16. Interface inicial do SketchUp Pro 8
- Figura 17. Captação da imagem do terreno a partir do Google Earth

- Figura 18. Terreno em 3D utilizando a ferramenta “ativar o terreno”
- Figura 19. Ferramenta “retângulo”
- Figura 20. Utilização das ferramentas “selecionar” e mover
- Figura 21. Campo “comprimento”
- Figura 22. Planos equidistantes
- Figura 23. Intercepção do modelo de bloco com o terreno
- Figura 24. Curvas de nível
- Figura 25. Curvas de nível sem a imagem do Google Earth
- Figura 26. Interface software Surfer 9.0
- Figura 27. Interface inicial do software Surfer
- Figura 28. Itens do menu do Software Surfer
- Figura 29. Acesso a planilha de dados no Software Surfer 9.0
- Figura 30. Planilha com as coordenadas UTM do maciço rochoso
- Figura 31. Exemplo de malha gerada a partir do uso do software 9.0
- Figura 32. Resultado da digitalização das ortofotocartas da região de Jussaral.
- Figura 33. Legenda dos mapas utilizados da FIDEM
- Figura 34. Construção das curvas de nível no AUTOCAD 2010 a partir dos mapas da FIDEM
- Figura 35. Curvas de nível geradas a partir da digitalização dos mapas da FIDEM
- Figura 36. Área do maciço rochoso para a modelagem computacional
- Figura 37. Figura ilustrativa da interface do Software AutoCAD® Civil 3D®
- Figura 38. Ferramenta “Open” e janela “Select File” na interface do AutoCad Civil 3D
- Figura 39. Ferramenta “Join” na interface do AutoCad Civil 3D
- Figura 40. Ferramenta “Edit Polyline” na interface do AutoCad Civil 3D
- Figura 41. Utilização da ferramenta “Edit Polyline” para seleção de múltiplas *polylines*.
- Figura 42. Utilização da ferramenta “Spline” para suavizar as curvas de níveis

- Figura 43. Antes e depois da suavização através da utilização das ferramentas do AutoCad Civil 3D
- Figura 44. Malha de triângulos modelada a partir do DATAMINE STUDIO 3.0
- Figura 45. Superfície gerada a partir de uma wireframe
- Figura 46. Modelo de blocos em contato com a superfície topográfica
- Figura 47. Área base interceptando as DTMs referentes a topografia do terreno gerada pelas diferentes metodologias aplicas
- Figura 48. Área base interceptando as DTMs referentes a topografia do terreno gerada pelas diferentes metodologias aplicas
- Figura 49. Cava experimental dentro da área base
- Figura 50. Cava experimental dentro do modelo de blocos limitada pela área base
- Figura 51. Superfície topográfica gerada a partir do SketchUp Pro 8
- Figura 52. Superfície topográfica gerada a partir do SketchUp Pro 8
- Figura 53. Superfície topográfica com as curvas de nível suavizadas a partir do uso do AutoCad Civil 3D
- Figura 54. DTM correspondente a topografia do terreno da área gerada a partir do DATAMINE
- Figura 55. Modelo de blocos gerado para dados do SketchUp Pro 8.0
- Figura 56. Vista em perfil de um plano Norte-Sul do modelo de blocos e topografia
- Figura 57. Modelo de blocos em contato com a área base
- Figura 58. Modelo de blocos em contato com cava experimental
- Figura 59. Cava experimental e topografia local
- Figura 60. Resultado do volume da cava experimental
- Figura 61. Curvas de nível geradas a partir do Surfer 9.0
- Figura 62. Modelo digital do terreno representativo da superfície topográfica da área
- Figura 63. Superfície topográfica do terreno confeccionada no DATAMINE STUDIO 3.0
- Figura 64. Modelo de blocos GPS
- Figura 65. Vista em perfil de um plano leste-oeste do modelo de blocos em contato com a área base

- Figura 66. Modelo de blocos em contato com a área base
- Figura 67. Modelo de blocos em contato com a cava experimental
- Figura 68. Topografia em contato com a cava experimental
- Figura 69. Resultado do volume da cava experimental
- Figura 70. Curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas
- Figura 71. Curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas
- Figura 72. Visão espacial das curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas
- Figura 73. Curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas
- Figura 74. Modelo de blocos dos dados obtidos com digitalização das ortofotocartas
- Figura 75. Vista em perfil de um plano leste-oeste do modelo de blocos em contato com a área base
- Figura 76. Modelo de blocos em contato com a área base
- Figura 77. Modelo de blocos em contato com a cava experimental
- Figura 78. Topografia em contato com a cava experimental
- Figura 79. Resultado do volume da cava experimental

LISTA DE TABELAS

Tabela I	Composição mineralógica dos tipos estudados
Tabela II	Composição mineralógica dos leucogranitos a biotita
Tabela III	Dados Tecnológicos do ortognaisse aflorante na Vila JussaraI
Tabela IV	Volumes calculados através das três metodologias
Tabela V	Percentual entre as diferenças de volumes
Tabela VI	Volumes calculados através das três metodologias
Tabela VII	Percentual entre as diferenças de volumes

RESUMO

A mineração normalmente tem fase inicial onde se desenvolve uma análise prévia da quantidade e qualidade do minério passível de ser extraído de um modo rentável. Neste contexto, é fundamental a elaboração de um modelo geomorfológico representativo do corpo mineral, que reflita de forma conveniente as suas características geológicas e geométricas. Nessa fase inicial a precisão dos resultados, em função da carência de dados de campo e necessidade de custos reduzidos, não é normalmente o fator decisivo na seleção dos alvos de pesquisa geológica de detalhe, admitindo-se variações de até 30% nos valores determinados. Conseqüentemente as incertezas são grandes e refletem a carência de informações associadas ao baixo investimento que se realiza nessa etapa. O desenvolvimento contínuo das ferramentas computacionais, em especial as ferramentas de computação gráfica, permite que modelos geométricos das ocorrências minerais possam ser elaborados de uma maneira rápida e precisa com baixo custo operacional. O objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia para modelagem geométrica de maciços rochosos a partir do uso de *softwares* de baixo custo e ilustrar na prática a aplicação da mesma para determinação do volume de maciços rochosos. Como caso de estudo, foi feita a modelagem de um maciço rochoso localizado no distrito de Jussaral, a sudoeste do município do Cabo de Santo Agostinho. Tal modelagem foi construída mediante a elaboração de um modelo de blocos do maciço rochoso a partir de 3 modelos digitais de terreno (DTM) elaborados com 3 metodologias distintas e comparação dos volumes do maciço rochoso em uma área pré-determinada (área base) e cubagem de reservas em uma cava hipotética (cava experimental) Os resultados foram comparados em termos de diferença percentual em relação ao dado mais confiável obtido em ortofotocartas confeccionadas pela Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife – FIDEM.

Palavras-chave: modelagem de maciços rochosos; ferramentas computacionais; modelo digital de terreno; modelo de blocos; avaliação de reservas

ABSTRACT

Mining typically has initial phase where develops a preliminary analysis of the quantity and quality of the ore could be extracted from a profitably. In this context, it is essential to draw up a model representative mineral body geomorphological reflect conveniently geological and geometrical characteristics. In this initial phase the accuracy of the results, due to the lack of field data and the need for reduced costs, is not usually the deciding factor in the selection of targets for detail geological survey, admitting up to 30% variations in certain values. Consequently the uncertainties are large and reflect the lack of information associated with the low investment that takes place in this step. The continuous development of computational tools, in particular the tools of computer graphics, allows geometric models of mineral occurrences can be prepared quickly and accurately with low operating costs. The goal of this dissertation is to develop a methodology for geometric modeling of rock masses from the use of low-cost software and illustrate the application of the same in practice for determination of volume of rock masses. As case study, modeling a rocky massif located in the Jussaral district, southwest of the city of Cabo de Santo Agostinho. Such modeling was built by drawing up a model for blocks of rock mass from 3 digital terrain models (DTM) drawn up on 3 distinct methodologies and comparison of volumes of rock mass in a pre-determined area (base area) and reserve space in a hypothetical cava (pit experimental) the results were compared in terms of percentage difference compared to most reliable data retrieved from Ortho-photo maps prepared by the Foundation for development of the metropolitan region of Recife- FIDEM.

1. INTRODUÇÃO

Na mineração, a gestão de recursos e reservas minerais é fundamental para a quantificação e qualificação das reservas, como também, para vida útil e lucratividade do empreendimento mineiro. Esta gestão se baseia especialmente no reconhecimento geológico do depósito mineral que está sujeito de ser materializado por vários tipos de modelos. Assim, o problema inicial detém-se no desenvolvimento de um modelo apropriado ao corpo mineralizado, o qual é baseado em informações recolhidas por meio de técnicas de prospecção geológica e levantamentos de campo. Todavia, além da precisão na quantificação dos recursos e reservas, o interesse pela maximização da recuperação do minério é fundamental, visto que tal maximização afetará a vida útil, a lucratividade e sustentabilidade do empreendimento.

A concepção de um modelo tridimensional de um depósito mineral susceptível a exploração a céu aberto é um dos aspectos cruciais para a avaliação do seu eventual potencial técnico-econômico. A sequência de avaliação tem algumas premissas fundamentais, dentre elas:

- Enquadramento geográfico e geológico;
- Geometria tridimensional do depósito mineral;
- Teor médio do depósito;
- Distribuição espacial dos teores no seio do depósito;
- Constrangimentos políticos, ambientais, técnicos, etc.

Por muito tempo, antes do desenvolvimento da tecnologia e da programação computacional, as denominadas técnicas clássicas (ou manuais) tais como o método dos polígonos, dos retângulos, dos triângulos, das seções, etc. eram as mais utilizadas como metodologias de extensão.

A rapidez, praticidade e confiabilidade dos processos que os computadores trouxeram à mineração através dos softwares, associado à sua capacidade de representar as distribuições dos teores ocorrentes num depósito mineral de um modo mais preciso, sofisticado e eficiente, fizeram com que o seu uso se tornasse cada vez mais fundamental nos empreendimentos mineiros.

1.1. Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia computacional para a modelagem geométrica de maciços rochosos utilizando ferramentas computacionais de baixo custo visando a determinação do volume de maciços rochosos, indicando alternativas de fácil acesso e baixo custo para avaliação preliminar de jazidas minerais de brita.

1.2. Objetivos específicos

- Realizar o cálculo de volumes de maciços rochosos a partir da utilização dos softwares Sketch Up Pro 8 e Surfer com dados obtidos do Google Earth, cartas topográficas (Ortofotocartas) e levantamento de campo (GPS).
- Indicar alternativas computacionais para geração de curvas de nível e elaboração de modelos digitais de terrenos – DTM's.

- Desenvolver metodologia para utilização do software DATAMINE STUDIO para modelagem geométrica de maciços rochosos através da geração de modelos de blocos e cálculo dos respectivos volumes.
- Comparar as diferentes ferramentas computacionais utilizadas no desenvolvimento da dissertação para cálculo de volumes de maciços rochosos e concluir sobre as vantagens e desvantagens de cada um e qualidade (confiabilidade) dos modelos geométricos gerados.
- Realizar a aplicação da metodologia para determinação do volume de um maciço rochoso que ocorre junto a Vila Jussaral, município de Cabo de Santo Agostinho – Pernambuco, Brasil.

1.3. Justificativa

A presente dissertação tem como justificativa a dificuldade e o alto custo para realização de levantamentos topográficos na fase inicial de avaliação de maciços rochosos com objetivo de produção de agregados para a construção civil – brita.

Considerando que na fase preliminar de avaliação de ocorrências de maciços para produção de brita os dados geológicos e geomorfológicos são escassos, os recursos alocados de baixo vulto e a precisão dos resultados não é crítica é possível a geração de modelos geométricos da morfologia dos maciços em estudo preliminar a partir de informações de fácil acesso e baixo custo como o Google Earth e ortofotocartas georeferenciadas.

Utilizando-se ferramentas computacionais tais como os softwares Autocad, Surfer e DATAMINE é possível a geração de modelos digitais de terreno (DTM's) de forma rápida e prática e a partir das DTM's gerar modelos geométricos de maciços rochosos que permitem o cálculo de volumes com custos bastante baixos se comparados ao custo de um levantamento topográfico de campo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Métodos de Avaliação de Reservas Minerais

A avaliação dos recursos e reservas minerais é atualmente um critério fundamental para o sucesso de qualquer empreendimento de mineração. Avaliações feitas com base em materiais amostrados estão sujeitas a erros. Uma estimativa confiável é essencial para os estudos de viabilidade e para a operação diária de uma mina.

A avaliação de recursos minerais é uma tentativa sistemática para qualificar e quantificar reservas minerais de interesse econômico. Uma avaliação pode incluir uma seqüência de atividades como uma avaliação mineral regional com amplos recursos e concluindo com uma análise mais detalhada com uma reavaliação de um ou mais sub-regiões de maior potencial econômico. Alternativamente, podemos realizar uma avaliação de recursos em um determinado estágio a partir da acumulação de dados. Uma primeira aproximação da região a ser estudada pode ser feita antes de quaisquer levantamentos geológicos detalhados, por qualquer um dos métodos de técnicas de avaliação, incluindo extrapolação ou analogia. Mapas geológicos, juntamente com dados básicos geoquímicos, geofísicos e de perfuração, e, se disponíveis, estudos de viabilidade detalhados de depósitos específicos podem ser usados para realizar uma avaliação de recursos detalhada.

Os gastos com atividades de avaliação de recursos minerais variam amplamente, indo de milhares à milhões de reais, e pode durar alguns dias à vários anos para ser concluído. Em geral, a avaliação de recursos utiliza os dados existentes, a fim de produzir estimativas da quantidade de recursos minerais economicamente viáveis que possam existir em uma área. Para uso em planejamento econômico esta informação é geralmente convertida em unidades financeiras.

Macfarlane (2000) sugere que, além da integração de pesquisa, avaliação, geologia e planejamento de funcionalidades de uma maior integração com certas funcionalidades financeiras ajudará a avaliação de Reservas Minerais para maximizar a riqueza relacionada ao jazimento mineral. Na realidade, essa ligação é entre planejamento estratégico e operacional, onde os objetivos corporativos primordiais são traduzidos em planos operacionais de mineração, onde poderá conseguir-se o crescimento desejado.

Os métodos para avaliação de reservas foram constantemente melhorados para produzirem resultados mais precisos e confiáveis. Este aperfeiçoamento foi resultado da crescente escassez de jazidas minerais ricas, ao grande investimento necessário à abertura de novas minas, bem como da evolução dos computadores, que permitiram o fácil manuseio de grande volume de dados, de maneira confiável. Segundo Guerra (1988), os métodos para avaliação de reservas podem ser classificados em três grandes grupos: métodos convencionais, métodos estatísticos e métodos geoestatísticos.

2.1.1. Métodos Convencionais

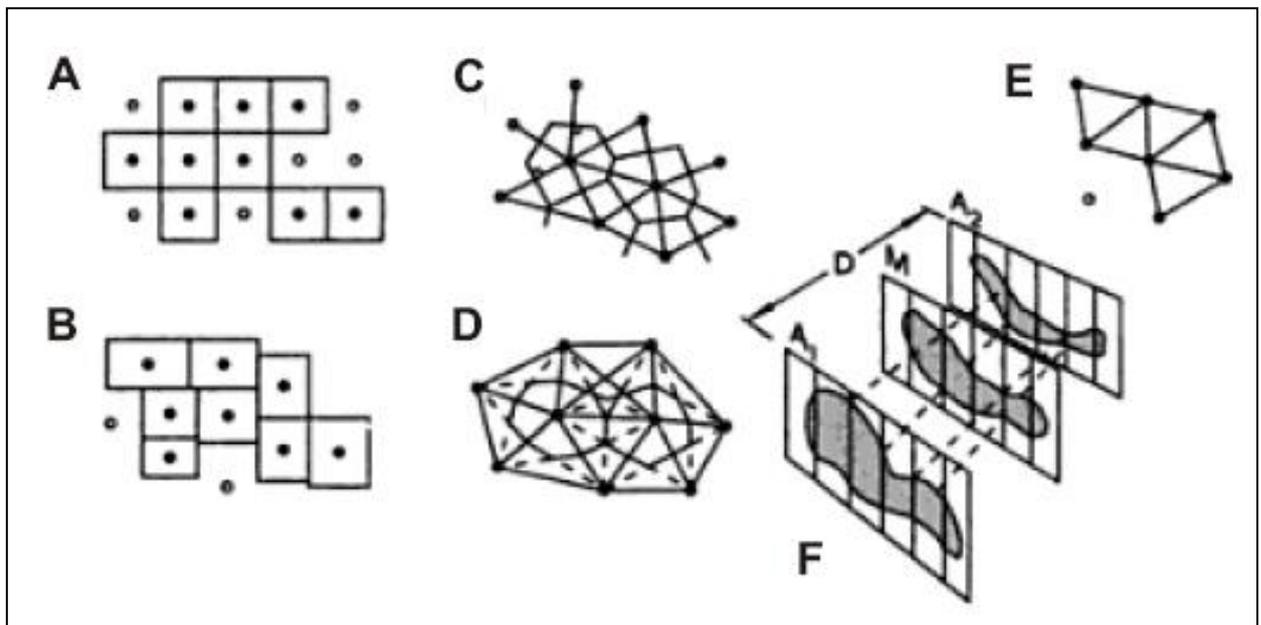
Os métodos convencionais, baseados nos princípios de interpretação de Popoff (1966), permitem realizar o cálculo de reservas usando fatores médios ponderados (teores, espessuras e volumes), os quais são então aplicados a áreas ou volumes de influência. Aplicando os princípios de interpretação, esses métodos permitem avaliar recursos em blocos de formas geométricas simples como prismas de seção triangular ou poligonal. Ainda segundo Popoff (1966), são descritos os métodos dos triângulos e dos polígonos. Annels (1991) apresenta uma revisão desses métodos com a descrição de um outro método, denominado métodos dos blocos matriciais.

Os métodos convencionais mais utilizados na avaliação de jazigos minerais são, segundo Revuelta & Jimeno (1997) os seguintes:

- Método das secções ou perfis (figura 1, F);
- Método dos polígonos (figura 1 A, B, C e D);
- Método dos triângulos (figura 1 E);
- Método das matrizes de blocos,
- Método dos contornos;
- Método do inverso de uma potência da distância (este método pode ser considerado, não propriamente clássico, mas geomatemático).

A figura abaixo ilustra simplificadaamente as áreas resumidas das secções em cada método.

Figura 1 – Exemplos esquemáticos de alguns dos métodos de extensão clássicos para avaliação de jazidas minerais: A, B, C e D: Poligonais, E: Triangulares e F: Secções.



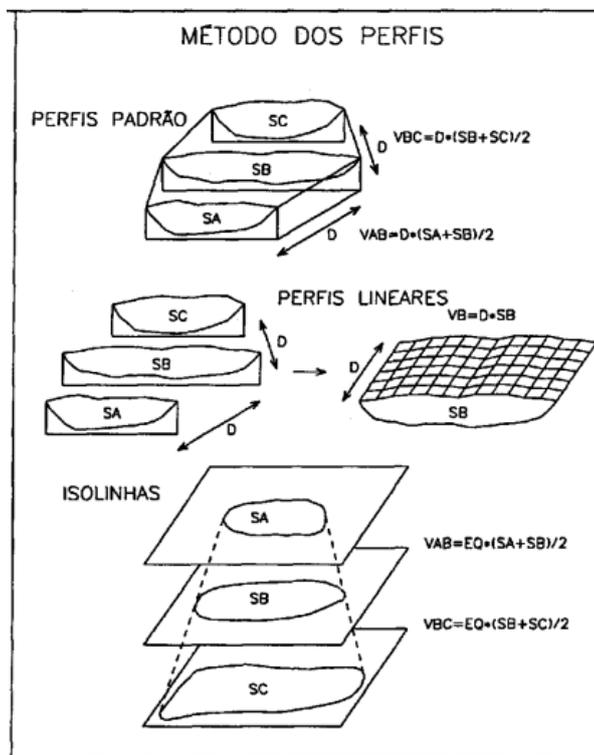
Fonte: adaptado de Sinclair e & Blackwell, (2002).

2.1.1.1. Método das seções ou perfis

Este método é, juntamente com o dos polígonos, um dos mais utilizados dentro do grupo dos métodos clássicos. Yamamoto (2001) afirma que a aplicação desse método pressupõe a possibilidade de subdividir o depósito em blocos por meio de seções ou plantas geológicas situadas a intervalos constantes ou não, dependendo da densidade dos trabalhos de pesquisa. Segundo Popoff(1966), os métodos dos perfis dependem do modo de construção dos blocos, dando origem aos seguintes métodos:

- Métodos dos perfis padrão – os blocos de cubagem são delimitados por duas seções adjacentes de amostragem e por uma superfície lateral.
- Métodos dos perfis lineares – nesse método os blocos de cubagem são obtidos aplicando-se o princípio dos pontos mais próximos. Cada bloco tem uma seção na parte central e é delimitado pela meia distância entre as seções adjacentes.
- Métodos das isolinhas – o cálculo de recurso ou reserva mineral pelo método das isolinhas pressupõe que os valores da variável de interesse variam gradual e continuamente dentro das fronteiras dos dados.

Figura 2 - Configurações possíveis de blocos de cubagem para os métodos convencionais



Fonte: desenhos esquemáticos baseados em Conde & Yamamoto, (1995).

A sua utilização do método das secções ou perfis é adequada a situações em que corpos mineralizados de geometria mais ou menos irregular foram investigados por meio de sondagens cujo alinhamento permite estabelecer cortes, perfis ou secções (figura 1, F). Este suposto alinhamento das sondagens é, à partida, uma das restrições deste método, pois nem sempre é possível garanti-lo no campo (Revuelta & Jimeno, 1997).

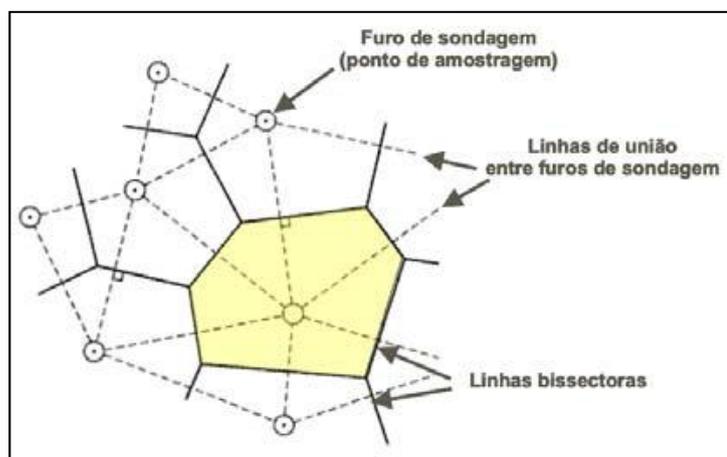
Interpolações de teores (ou de espessuras mineralizadas) são efetuadas para cada secção e a interpretação resultante das mesmas é projetada perpendicularmente para o volume de terreno que se estende até metade da distância às secções vizinhas. Deste modo, unindo-se as várias secções contíguas, é possível efetuar os cálculos para o depósito como um todo. Este aspecto pode levantar problemas de sobre-estimação de quantidade de minério, uma vez que existe o risco de interpretar como minério o que na realidade corresponderia a estéril (Revuelta & Jimeno, 1997). Isto ocorre, sobretudo, em depósitos cujos contatos estéril/minério são de natureza irregular.

O problema contrário também se coloca, isto é, pode haver sub-estimação da quantidade de minério em virtude de deficiências de interpretação entre secções contíguas.

2.1.1.2. Método dos polígonos

O método dos polígonos é mais adequado para os casos em que os pontos amostrados estejam distribuídos de um modo irregular (Revuelta & Jimeno, 1997). Este método não deve ser utilizado onde não há uniformidade de trabalhos de pesquisa e nos depósitos com variações (teor e espessura) muito elevadas, resultando em polígonos de tamanhos muito variados. Os polígonos são construídos desenhando linhas bissectoras perpendiculares às linhas que unem todos os pontos amostrados (figura 3). A cada polígono corresponde uma área e uma espessura, que, por exemplo, pode ser equivalente à altura das futuras bancadas de uma exploração a céu aberto ou à própria espessura mineralizada. Portanto, cada um dos polígonos terá associado um volume e conseqüentemente uma tonelagem e um teor em substância útil, o qual é função direta do teor da amostra contida no seu interior.

Figura 3 - Ilustração da construção de polígonos, a cada qual é atribuído um teor em substância útil



Fonte: adaptado de Sinclair & Blackwell, (2002).

O somatório de todos os polígonos resultará na quantidade total de minério com um determinado teor devidamente ponderado (Sinclair & Blackwell, 2002). A função de extensão utilizada por este método obedece à regra dos pontos mais próximos, a qual pressupõe que o valor de cada amostra é válido até metade da distância a cada amostra adjacente (Gama, 1986, a).

Para fazer juízo a esta situação, Revuelta & Jimeno (1997) sugerem uma técnica que consiste em definir subáreas de influência para cada polígono. Ou seja, para uma determinada sondagem, e dentro da sua área de influência, podem ser traçados novos polígonos com limites concretos de forma a se poder classificar as reservas minerais incluídas numa determinada zona, em, por exemplo, provadas, prováveis e possíveis. Esta técnica permite, segundo os autores, prevenir a existência de possíveis desvios face aos resultados obtidos.

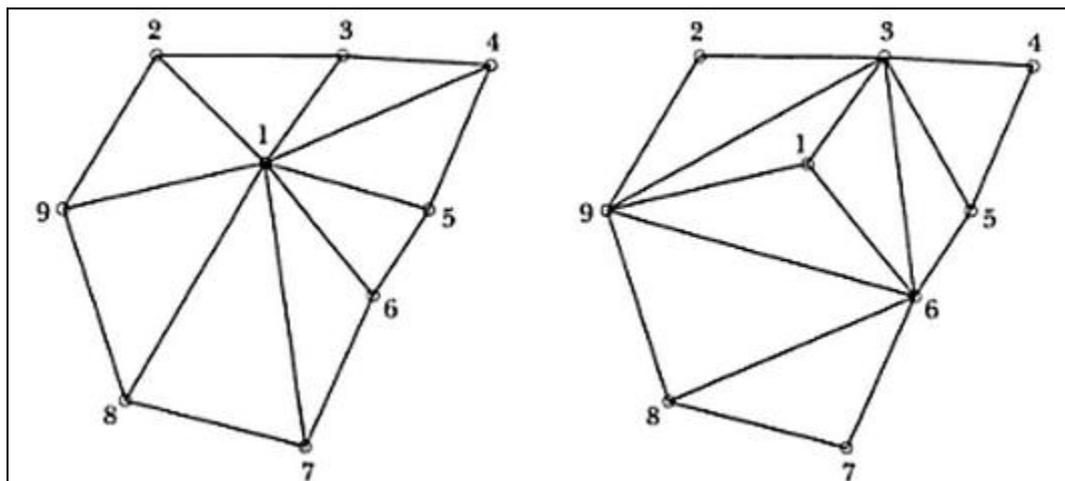
2.1.1.3. Método dos triângulos

Segundo Yamamoto (2001) esse método é baseado no princípio das mudanças graduais entre duas estações adjacentes que, sucessivamente unidas, geram uma malha triangular. Porém, a união sem nenhuma regra explícita pode levar a configurações de triângulos diferentes quando feitas por pessoas diferentes, de acordo com Popoff (1966).

Ainda sobre este método, Revuelta & Jimeno (1997) garante que tal metodologia fornece melhores resultados quando usada nos casos em que os corpos mineralizados possuem uma morfologia mais ou menos tabular e com inclinação inferior a 20°. Trata-se de um método muito útil em fases de prospecção, pois é rápido e, além disso, permite ir juntando novos valores à estimativa geral sem que para tal seja necessário refazer todos os cálculos efetuados.

Também evita, em grande parte, os erros de avaliação mencionados para o método dos polígonos, uma vez que para o teor de cada triângulo contribuem os três pontos amostrados, cujas linhas que os unem, definem o próprio triângulo (Revuelta & Jimeno, 1997).

Figura 4 - Configurações de triângulos diferentes (A e B) para o mesmo conjunto de dados



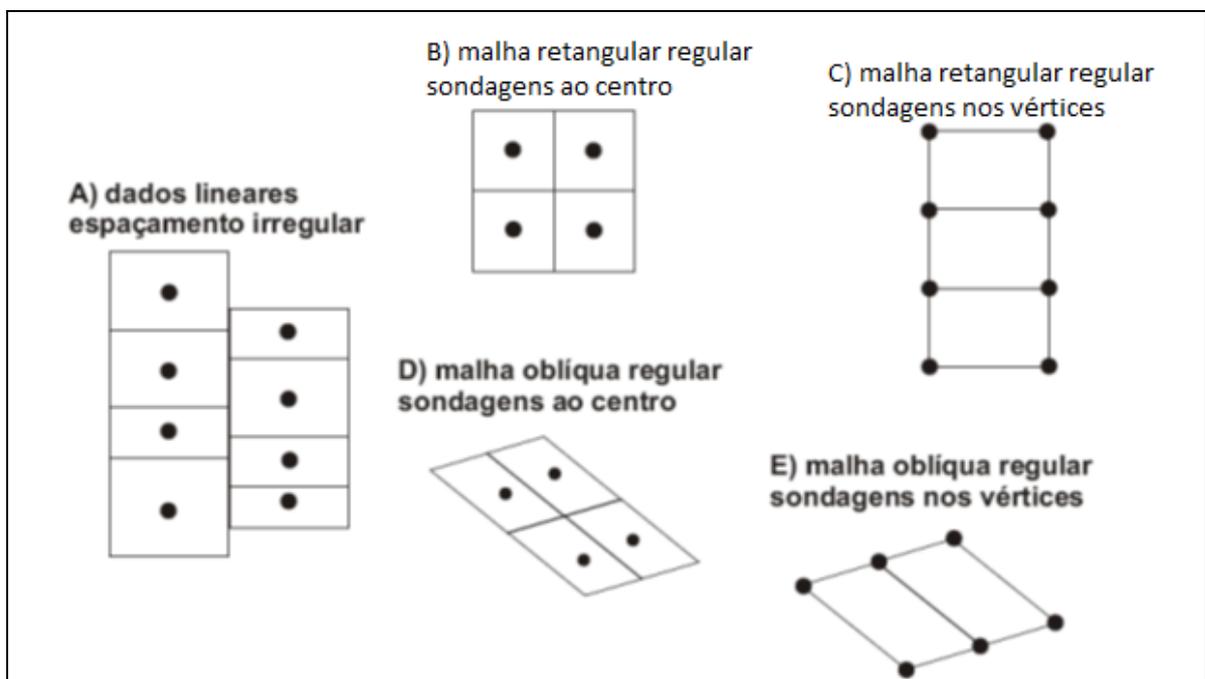
Fonte: Popoff (1966).

2.1.1.4. Método das matrizes de blocos

Quando a malha de pesquisa (sondagem) possui uma geometria regular em linhas, pode-se dividir o depósito em blocos regulares quadriláteros. Este método é similar ao dos polígonos e é aplicável nas fases de prospecção, em que é necessário obter resultados rápidos, em especial quando se tem dados oriundos de novas sondagens. É especialmente aplicável a mineralizações com morfologias tabulares e de pouca espessura (Revuelta & Jimeno, 1997). Podem-se utilizar aqui os princípios de interpretação da variação gradual ou dos pontos mais próximos.

Há duas maneiras de definir os blocos: atribuindo um bloco a cada sondagem; ou atribuindo um bloco a cada quatro sondagens. O segundo método é o mais preciso, pois inclui um maior número de sondagens. Geralmente, neste segundo método, a espessura atribuída ao corpo mineralizado resulta de uma média aritmética entre as quatro sondagens, ao passo que para obter o teor se realiza uma ponderação por espessuras entre as mesmas (Revuelta & Jimeno, 1997).

Figura 5 - Ilustração do método das matrizes de blocos: ajuste de blocos entre sondagens



Fonte: adaptado de Revuelta & Jimeno, (1997).

2.1.1.5. Método dos contornos

Este método é muito vantajoso quando se observam inclinações na distribuição dos dados. Portanto, pode ser aplicado com resultados satisfatórios nos casos em que as mineralizações têm mudanças suaves na sua espessura e nos seus teores, de tal forma que torna possível a obtenção, com precisão, de isolinhas de espessuras ou teores. Existem, por sua vez, três sub-métodos (Revuelta & Jimeno, 1997):

- Sobreposição de uma malha;
- Janela móvel;
- Reticulado.

O fator comum a todos estes sub-métodos é a necessidade de definir os limites superficiais do jazigo de modo a se poderem efetuar os cálculos das reservas minerais com o maior rigor possível. Nestes métodos, interpolam-se teores tendo por base uma malha regular de pontos amostrados, delimitando-se em seguida as isolinhas que contornam esses pontos. Como tal, a construção de isolinhas de teores é um procedimento comum, sobretudo em explorações a céu aberto como metodologia de controle, em que se usam os próprios furos de desmonte como pontos amostrais.

Mesmo em situações onde os dados são abundantes, este método pode ser inexato na altura da construção das isolinhas. Assim, devem ser tomadas precauções quando estas são construídas automaticamente, pois nem sempre estas honram os dados com o detalhe almejado. Isto porque durante a geração automática de isolinhas, existem rotinas estéticas inerentes ao processo que conferem suavidade às mesmas em zonas onde na realidade esta não existe, ou seja, onde a continuidade dos dados não é tão evidente.

2.1.1.6. Método do inverso de uma potência da distância

Esse método foi certamente o primeiro método analítico para interpolação de valores de variáveis de interesse em pontos não amostrados. Segundo Philip & Watson (1987), a primeira referência a esse método deve-se a R.C.Weaver, que publicou um artigo em 1964, descrevendo-o.

De modo geral, o método do inverso de uma potência da distância recorre a uma interpolação, não global, mas local, ou seja, só participam no cálculo os pontos amostrados mais próximos de cada ponto a quantificar (Gama, 1986,a) onde aplica-se um fator de ponderação a cada amostra que rodeia o ponto central de um bloco mineralizado. Esse fator de ponderação é o inverso da distância entre cada amostra e o centro do bloco, elevado a uma potência n , pode tomar um valor entre 1 e 3 ($3 > n > 1$). Segundo Barnes (1980), o valor de 2 ($n = 2$), é aquele que geralmente conduz a melhores resultados. Apenas as amostras que estão dentro de uma determinada zona de busca são ponderadas desta forma (Revuelta & Jimeno, 1997). Sabe-se que a escolha da potência é um passo muito importante para aplicação do método. Potências baixas tendem a suavizar os valores extremos, enquanto potências elevadas tendem a realçá-los.

A base do método está fundamentada no fato de que teores de amostras de furos vizinhos, em relação a um determinado ponto ou bloco do depósito, são proporcionais ao inverso das respectivas distâncias ou a uma potência destas. Sendo assim, amostras de furos próximos contribuirão com grande peso, em detrimento das amostras de furos distantes, que contribuirão com pequeno peso. Nesse sentido, observa-se aqui uma melhor aproximação da noção da zona de influência, igual à meia distância entre furos adjacentes, como no método dos polígonos.

Em termos conceituais, poderíamos considerar este um método de estimação de reservas mais parecido com os métodos geoestatísticos do que com os clássicos. O método em si funciona de forma semelhante a todos os restantes, ou seja, são estabelecidos blocos de avaliação aos quais se atribuem espessuras e teores e, a partir do seu volume, se obtêm as reservas em substância útil.

Os aspectos específicos a considerar na altura da sua utilização são os seguintes (Revuelta & Jimeno, 1997):

- Definição dos blocos de avaliação;
- Estabelecimento do fator de ponderação;
- Definição da área/raio de procura.

A equação geral para se interpolar o teor de um ponto ou bloco do depósito com coordenadas (x,y,z) pode ser escrita como:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i \cdot W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

onde o T_i é o teor da i -ésima amostra localizada no ponto de coordenadas (x_i, y_i, z_i) , W_i é o ponderador igual ao inverso de uma potência da distância entre a i -ésima amostra e o ponto a ser interpolado n é o número de pontos do subconjunto.

O ponderador W_i é calculado como:

$$W_i = \frac{1}{d_i^P} \quad (2)$$

onde P é a potência e d_i é a distância entre a i -ésima amostra de coordenadas (x_i, y_i, z_i) e o ponto a ser estimado com coordenadas (x, y, z) .

A distância d_i é calculada como:

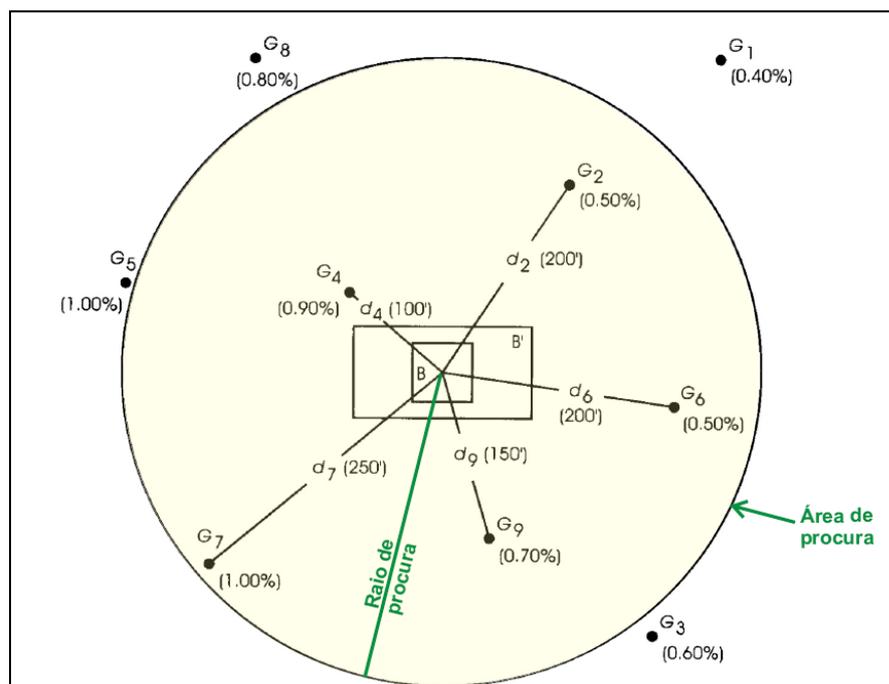
$$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} \quad (3)$$

A aplicação desse método requer a definição da potência a ser utilizada na ponderação, além do subconjunto de amostras de furos vizinhos, comum a todos os métodos computacionais.

No exemplo retirado de Sinclair & Blackwell (2002), que se ilustra na figura 6, está definido um raio de procura centrado no bloco B, cujo teor se pretende estimar. Nesta situação supõe-se a existência de isotropia, isto é, a ponderação é feita de igual modo em todas as direções do espaço, para uma dada distância, pelo que a área de procura corresponde a um círculo. Porém, segundo Barnes (1980), se os dados mostrarem que existe certa tendência nos valores (ou seja, anisotropia) e se as características dessa tendência forem bem conhecidas, é possível estabelecer uma elipse de procura, orientada de acordo com a anisotropia presente.

Sinclair & Blackwell (2002), sugerem uma adaptação do método do inverso da distância a estas situações, por meio de técnicas (raios de procura quadrantes e/ou octantes), que podem promover uma otimização da distribuição espacial dos dados usados para estimar blocos (ou pontos).

Figura 6 - Esquemática da estimação de blocos através do método do inverso de uma potência da distância



Fonte: adaptado de Sinclair & Blackwell, (2002).

Na figura 6, pode ainda ser verificado que existe um outro bloco B' (de maior volume), cuja estimativa é feita do mesmo modo que para o bloco B. Para ambos, é definido um fator de ponderação n , através do qual, as amostras mais perto ou mais afastadas terão um peso maior ou menor na estimativa.

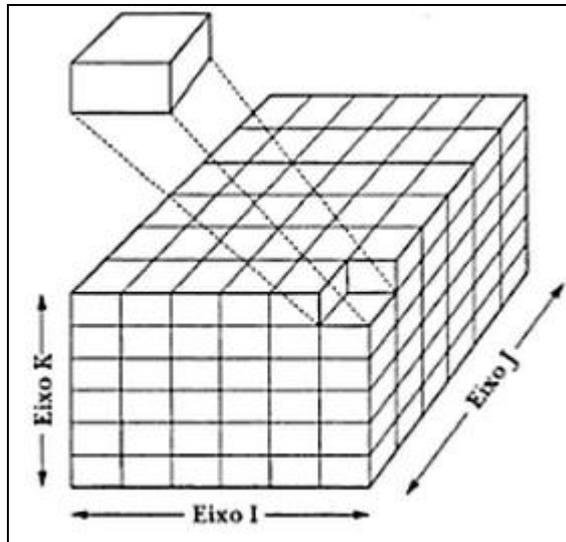
Sendo assim, quanto maior for o fator de ponderação, mais peso terão as amostras que estiverem mais próximas do bloco a estimar. Este aspecto levanta alguns problemas que se prendem com a arbitrariedade que sempre existe na altura de atribuir um valor a esse fator.

O inverso da distância é uma técnica de suavização que pressupõe uma certa continuidade espacial, e, portanto, não é aconselhável para situações em que os jazigos possuem limites muito bem definidos e com transições bruscas de valores entre zonas ricas e pobres (gradientes elevados), em termos de teor em substância útil, pois, dessa forma, pode estimar valores de tonelagens muito altos e teores baixos, comprometendo assim os estudos de viabilidade económica do empreendimento mineiro. Pelo contrário, é aplicável a jazigos em que as transições entre minério e estéril ocorrem de forma gradual, tratando-se, nestes casos, do método de avaliação clássico mais recomendável (Revuelta & Jimeno, 1997). Outro aspecto negativo é que, neste método, apenas se consideram as distâncias e os teores entre as amostras, e não a natureza geológica da jazida, que deve ser conhecida com o maior grau de detalhe possível (Gama, 1986, b).

2.1.2. Métodos Computacionais

De acordo com Yamamoto (2001), os métodos computacionais fazem uso das funções matemáticas de interpolação, as quais são aplicadas para o cálculo das variáveis de interesse nos blocos de cubagem. Os blocos de cubagem têm a forma geral de paralelepípedos e suas dimensões devem ser compatíveis com a densidade média de amostragem nas três direções. Ao conjunto de blocos de cubagem que compõem o depósito denomina-se modelo tridimensional de blocos (Figura 7)

Figura 7 – Modelo tridimensional de blocos de um depósito hipotético



Fonte: Yamamoto, (2001)

Os métodos computacionais são dos mais utilizados na área mineira, especialmente quando se está perante depósitos minerais de alto valor económico e comportamento muitas vezes errático (Revuela & Jimeno, 1997).

Observe-se que a grande diferença dos métodos convencionais para os computacionais está na geometria e na dimensão dos blocos de cubagem. No entanto, a principal diferença reside na forma de cálculo dos teores, em que os métodos computacionais fazem uso das funções matemáticas de interpolação, entre as quais: inverso da potência da distância e krigagem ordinária.

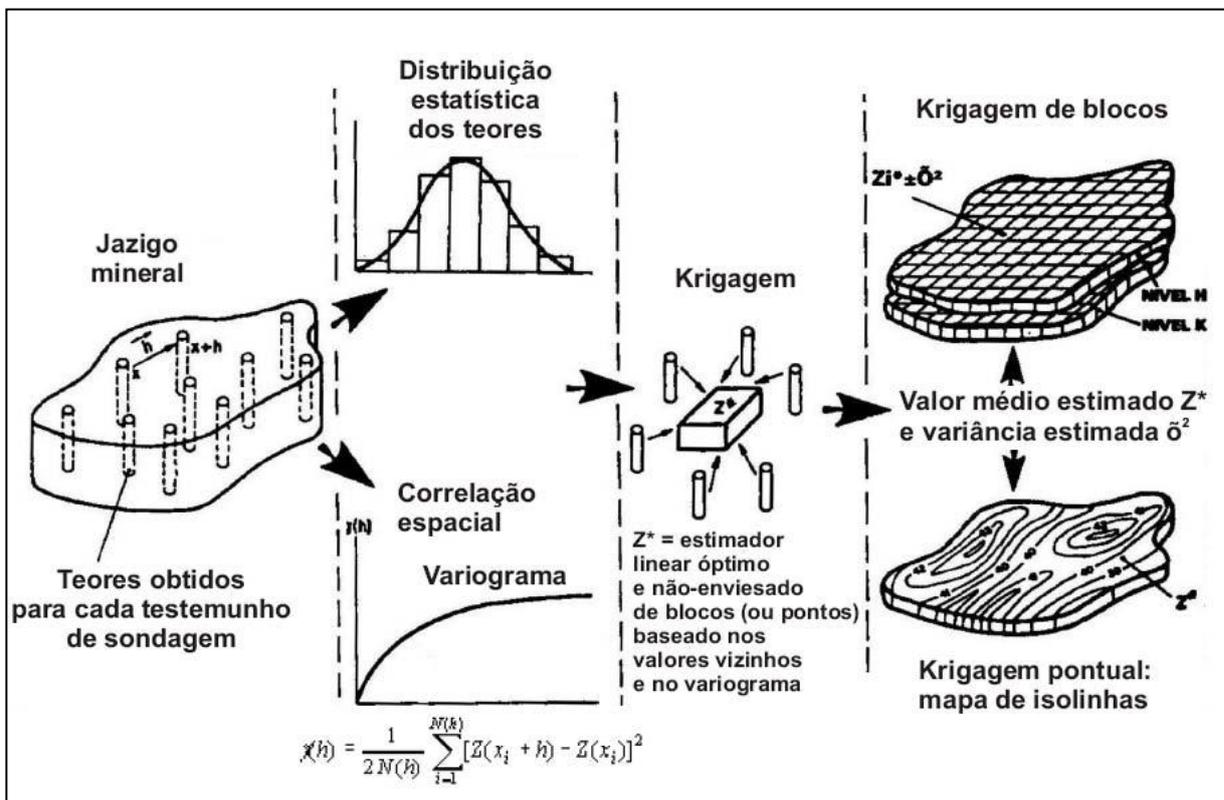
Os blocos de cubagem podem ser avaliados se atenderem os seguintes requisitos:

- Estiverem no domínio do depósito;
- Apresentarem amostras de furos vizinhos, segundo um critério de seleção;
- Forem passíveis de avaliação com um mínimo de informação, verificada a distância máxima das amostras.

As técnicas computacionais possuem uma base teórica destinada a conferir maior fiabilidade às interpolações, através da definição do melhor estimador linear não-enviesado, que atribui teores aos blocos não amostrados de uma jazida mineral. Através do método conhecido por krigagem, o estimador pode calcular valores que, em média, são iguais ao valor real da jazida, baseando-se na hipótese de que o teor é uma variável regionalizada, ou seja, que pode apresentar correlação espacial entre os pontos amostrados. Este método permite estimar não só os valores mais prováveis dos blocos intermediários de minério, mas também, os erros cometidos em tais avaliações (variância da distribuição), podendo desse modo assinalar os locais onde mais dados devem ser colhidos para se obter maior fiabilidade (Gama, 1986, a).

Abaixo é apresentada uma figura ilustrativa da ideia básica da aplicação dos métodos computacionais utilizando-se da geoestatística para avaliação de uma jazida mineral.

Figura 8 - Principais aplicações da geoestatística para a avaliação de uma jazida mineral



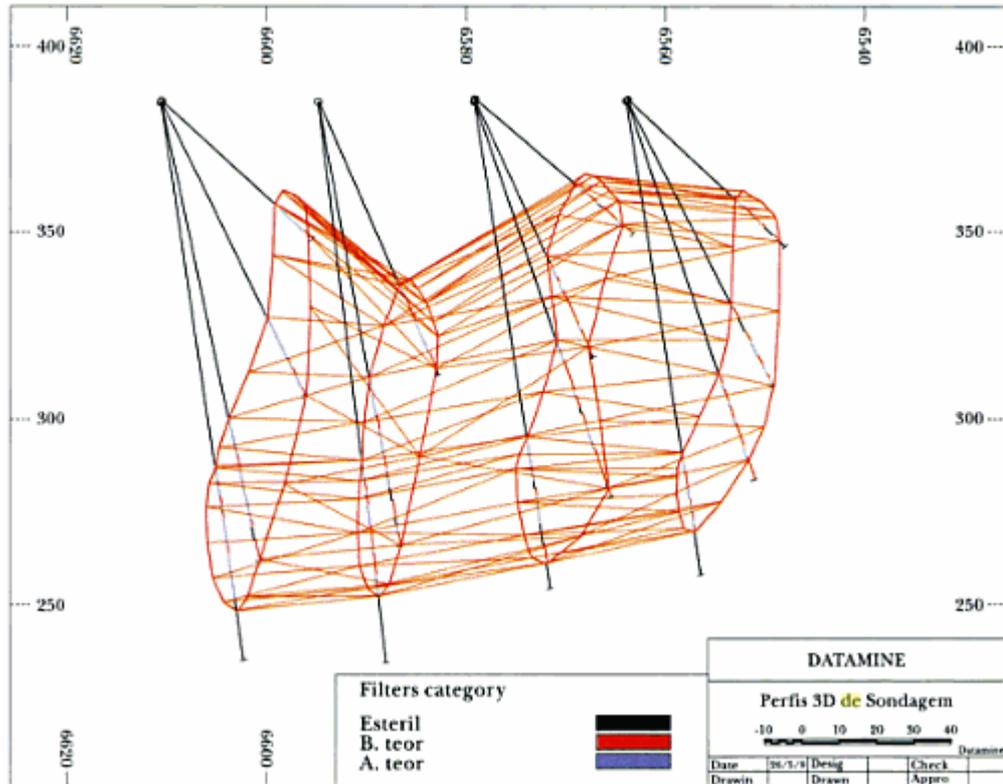
Fonte: adaptado de Jimeno,(1997).

A quantificação de reservas minerais, em termos de teores e tonelagens, deve ser acompanhada de uma medida do grau de confiabilidade associado às mesmas. Este grau de confiabilidade é inerente aos métodos de pesquisa utilizados, métodos analíticos, precisão da localização dos pontos de amostragem e, sobretudo, à variabilidade apresentada pelo corpo de minério. Há que se ressaltar que materiais geológicos podem apresentar variações na geometria do corpo de minério, nas características físicas do minério e, conseqüentemente, na distribuição de teores no mesmo, como resultado da interação dos processos geológicos responsáveis pela sua gênese. As classificações de reservas permitem expressar quantidades de minério, de acordo com o grau de precisão e conhecimento associado às mesmas. (Yamamoto, 1996).

A metodologia da modelagem geológica e geotécnica é uma modificação da metodologia de Houlding (1994), e esta dividida em modelagem geométrica e modelagem numérica. Segundo Hack (2006), recomenda-se um processo ou conjunto de critérios que avaliem toda a informação em unidades geológicas-geotecnicas homogêneas.

A superfície envolvente de um corpo mineral pode ser modelada como uma malha triangulada de pontos similar àquela utilizada para modelar superfícies por modelos tipo DTM. O termo técnico em inglês para definir este tipo de modelo é *wireframe* (Yamamoto, 2001).

Figura 9 – Modelo Sólido triangulado tipo *wireframe*



Fonte: adaptado de Yamamoto, (2001)

A construção de um *wireframe* pode ser exemplificada a partir da análise dos dados apresentados na figura acima. As quatro poligonais fechadas, representando seções transversais do corpo mineral, podem ser ligadas através de um algoritmo de triangulação automática de poligonais. Existem diversos tipos de algoritmos para esse fim em DATAMINE , e seu objetivo é produzir uma forma cilíndrica irregular cuja superfície é constituída por uma malha de triângulos. As extremidades do “cilindro” são fechadas também por uma malha triangulada. Uma vez criado o modelo *wireframe*, o volume definido pelo seu contorno pode ser calculado de modo preciso e eficiente (Yamamoto, 2001).

2.3. Avaliação do volume de sólidos

Toda a estimativa de volumes, massas e teores de um depósito, segundo Vallée & Cote (1992), deve ser baseada em observações sistemáticas e interpretações da geologia (litologia e estrutura) e da mineralização (mineralogia, controles, distribuição e continuidades).

A intenção final ao se construir um sólido é sempre verificar o volume que esse sólido envolve. Se a geometria dos corpos geológicos fosse uma geometria simples e regular, facilmente poderíamos obter esses volumes por geometria espacial, porém como a natureza não funciona dessa maneira, fazemos uso desses artifícios de modelagem simplesmente para que tenhamos:

- ✓ A representação espacial da geologia;
- ✓ O volume e conseqüentemente a massa de rocha que o sólido engloba;
- ✓ Os teores do material inserido dentro de um domínio de interesse.

2.4. Dimensionamento de cava final

O conhecimento dos recursos disponíveis e das reservas que estão associadas a diferentes geometrias de escavação a céu aberto e o estabelecimento dos limites finais dessas mesmas escavações pressupõe a elaboração prévia de um inventário mineral o qual é composto por um conjunto de blocos tridimensionais, cada um deles caracterizado por um determinado volume, por um teor em substância útil e por um certo valor econômico. Como não é difícil estabelecer o custo de extração relativo a cada bloco, obtém-se, subtraindo esse custo ao valor do bloco, o lucro associado à exploração de cada um dos blocos constituintes do modelo tridimensional que reproduz o jazigo (Gama, 1974).

Os limites finais de uma exploração mineira a céu aberto definem o tamanho e a forma da mesma no final da sua vida útil, garantindo a maximização da riqueza

futura. Estes contornos finais definem a extensão da reserva economicamente explorável e a quantidade de material estéril a ser removido. Normalmente, marcam a fronteira limite além da qual a exploração não será considerada economicamente rentável (Carmo, 2006).

Até à década de 70 a otimização dos “pits” finais das minas a céu aberto era feita manualmente, por tentativas. Através desse método, procurava-se chegar a um “pit” que fosse economicamente rentável e, caso houvesse estéril além do admissível, dentro do mesmo, este deveria ser redesenhado para se obter, se possível, mais minério e menos estéril. Dentro desta lógica, a mineração deveria ser ampliada por tentativas sucessivas, até se alcançar um “pit” final satisfatório (Carmo, 2006).

O surgimento e o avanço da informática, levou à generalização do seu uso em questões fundamentais como as que aqui se abordam. Segundo Khalokakaie, et al (2000), foi assim que se desenvolveram vários algoritmos para determinar o “pit” ótimo, tais como:

- 1) teoria dos grafos (Lerchs & Grossman, 1965);
- 2) técnicas de fluxo máximo (Johnson & Barnes, 1988, Yegulap & Arias, 1992);
- 3) técnica dos cones flutuantes (Lemieux, 1979);
- 4) algoritmo de Korobov (Korobov, 1974);
- 5) algoritmo de Korobov corrigido (Dowd & Onur, 1993);
- 6) programação dinâmica (Wilke & Wright, 1984, Yamaturi et al, 1995) e
- 7) técnicas de parameterização (Matheron, 1975, Bongarçon & Guibal, 1982).

De todos estes, o único que pode ser rigorosamente comprovado, em termos da definição do verdadeiro “pit” ótimo, é o de Lerchs & Grossman (1965), pelo que este tem sido aceite como o algoritmo padrão em relação com outros algoritmos equivalentes (Carmo, 2006).

2.4.1. Etapas fundamentais para dimensionamento da cava final

Durante o processo para determinação da reserva mineral economicamente explorável devem ser tidos em conta os seguintes aspectos fundamentais (Revuelta & Jimeno, 1997):

1 – Quantificação de cada bloco (teor, tonelagem, etc.).

Através de qualquer um dos métodos existentes para calcular as reservas geológicas de uma mina estabelece-se a quantidade total de minério. Deste modo, podem ser alocados a cada sub-bloco os valores em substância útil.

2 – Definição do valor económico de cada bloco.

Conhecidos os valores de cada bloco, em termos de quantidade/proporção em substância útil, calcula-se o valor econômico para cada um deles, a partir do qual se estabelece a otimização da exploração. Portanto, o problema que fica por resolver é o de encontrar o conjunto de blocos que permite obter o máximo valor possível (lucro ou quantidade de minério), conjunto esse, que estará inevitavelmente sujeito às restrições mineiras que sempre existem.

Do ponto de vista econômico, cada bloco pode ser caracterizado pelos seguintes parâmetros:

- i. Valor da substância útil presente no bloco (VSU);
- ii. Custos diretos, que se podem atribuir diretamente a cada bloco (CD): sondagens, arranque, transporte, tratamento, etc.;
- iii. Custos indiretos, que se devem estimar para a mina e atribuir a cada bloco (CI), e que são também função do tempo: salários, amortizações do valor dos equipamentos, etc.

Portanto, o valor econômico do bloco (VEB) é dado por (Revuelta & Jimeno, 1997):

$$\text{VEB} = \text{VSU} - \text{CD} \quad (8)$$

O VEB não é o mesmo que benefício (ou perdas), que se podem traduzir em (Revuelta & Jimeno, 1997):

$$\text{Benefício (ou perdas)} = \Sigma(\text{VEB}) - \text{CI} \quad (9)$$

O objetivo da definição do “pit” ótimo de uma exploração a céu aberto é maximizar o valor de $\Sigma(\text{VEB})$. Porém, existem outros critérios de otimização, tais como:

- Maximização do valor total da exploração;
- Maximização do valor por tonelada de produto vendável;
- Maximização da vida útil da mina;
- Maximização do conteúdo em metal dentro da exploração.

O primeiro critério, a maximização do valor total da exploração (maximização de $\Sigma(\text{VEB})$), é de longe, o mais usado na otimização econômica de explorações a céu aberto.

3 – Algoritmos para otimização do “pit”

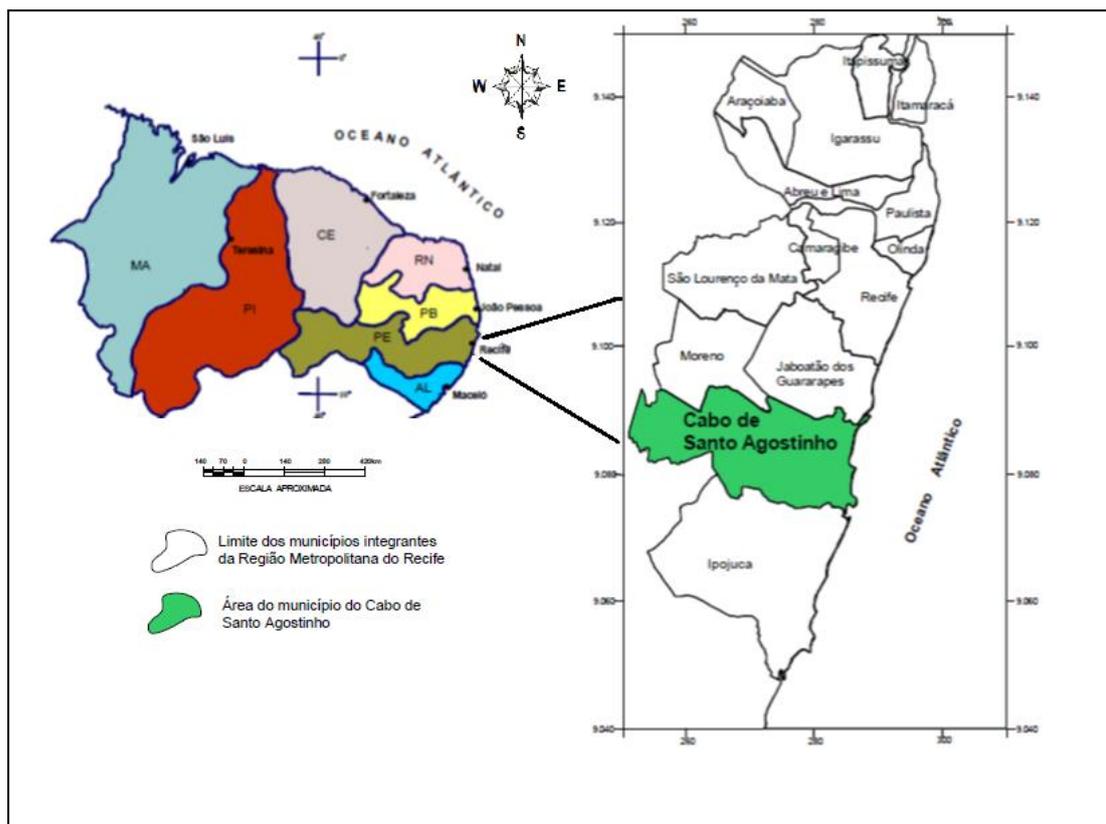
Os diferentes algoritmos existentes para levar a cabo a otimização agrupam-se em duas categorias:

- Heurísticos: ainda que não possam ser demonstrados matematicamente, a experiência mostra que funcionam satisfatoriamente. É o caso do método dos cones flutuantes (ou móveis);
- Rigorosos: aqueles cuja otimização tem uma completa demonstração matemática, como é o caso do método de Lerchs & Grossman (otimização combinatória).

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área estudada neste presente trabalho está localizada no distrito de Jussaral, localizado a sudoeste do município do Cabo de Santo Agostinho.

Figura 10 - Mapa de Localização da Área



Fonte: CPRM, (1999)

O município do Cabo de Santo Agostinho, onde encontra-se a área de interesse, situa-se na porção sul da Região Metropolitana do Recife (RMR), distando 41km da capital. Inclui-se, em parte, na microrregião do Complexo Suape, no Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil e abrange uma área de 448,4km², correspondente a 16,28% da RMR e 0,45% do território estadual (Figura 10).

Limita-se ao Norte com os municípios de Vitória de Santo Antão, Moreno e Jaboatão dos Guararapes, a Sul com os municípios de Escada e Ipojuca, a Leste com o Oceano Atlântico e a Oeste com os municípios de Escada e Vitória de Santo Antão.

A divisão territorial está compreendida por quatro distritos: Cabo (sede), Jussaral, Ponte dos Carvalhos e Santo Agostinho. A sede apresenta as seguintes coordenadas geográficas: 8° 17' 15" de latitude Sul e 35° 02' 00" de longitude Oeste, e uma altitude de 30 m.

3.1. Domínios Morfoestruturais

O município do Cabo de Santo Agostinho apresenta a sua porção Leste inserida geotectonicamente em uma bacia sedimentar do tipo rifte, denominada Sub-Bacia Cabo, no conceito de Mabesoone & Alheiros (1988), e sua porção Oeste, no substrato desta bacia, formado pelo embasamento cristalino.

A evolução tectônica da bacia está associada segundo Oliveira (1994), a uma intensa dinâmica extensional, devido a atuação de falhas lístricas de grandes rejeitos, na direção SSWNNE. Estas falhas geraram grandes abatimentos de blocos e deslocamentos profundos, o que assinala a presença de falhas, altos e baixos estruturais no embasamento, o qual atinge profundidades de 40m, no limite Oeste da bacia, alcançando até 500m à medida que se distancia da falha de borda. Rand, através de estudos geofísicos realizados em 1976, menciona a presença de falhas menores, transversalmente a estes blocos, gerando sub-blocos profundos, confirmados, posteriormente, pelo furo executado pela PETROBRÁS S.A. em 1982 na praia do Cupe, litoral norte do município, onde o embasamento não foi atingido até a profundidade de aproximadamente 3.000m.

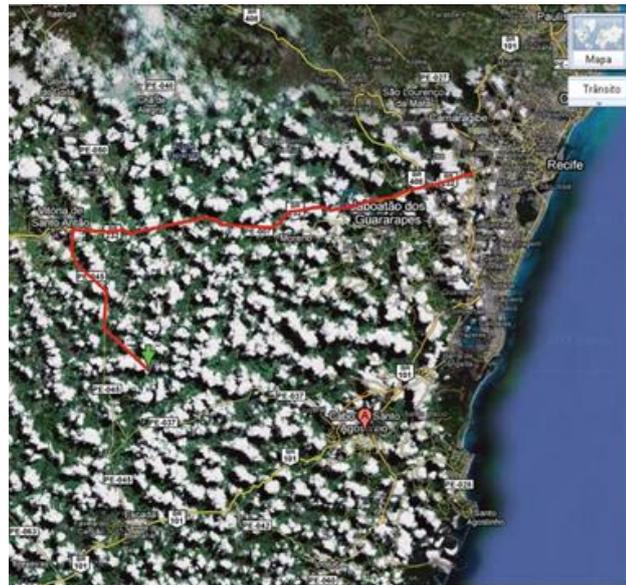
A partir desta compartimentação tectônica, pode-se individualizar dois domínios morfoestruturais: o domínio do embasamento e o domínio do rifte, tendo por base o conceito de análise morfoestrutural como aquela em que se realiza o estudo da relação entre a topografia e a estrutura geológica (Ollier, 1988).

O embasamento cristalino é constituído por rochas de idade pré-cambriana que formam os terrenos gnáissicos-migmatíticos, estruturalmente orientados na direção SW-NE e com estruturas mais recentes no sentido NW-SE (Polônia, 1997), nas quais se encaixam as principais drenagens. Dentro deste embasamento, corpos graníticos intrusivos de idade brasileira (600 milhões de anos, aproximadamente) destacam-se sob a forma de batólitos com formatos circulares ou ovalados.

3.2. Localização e acesso da área de estudo

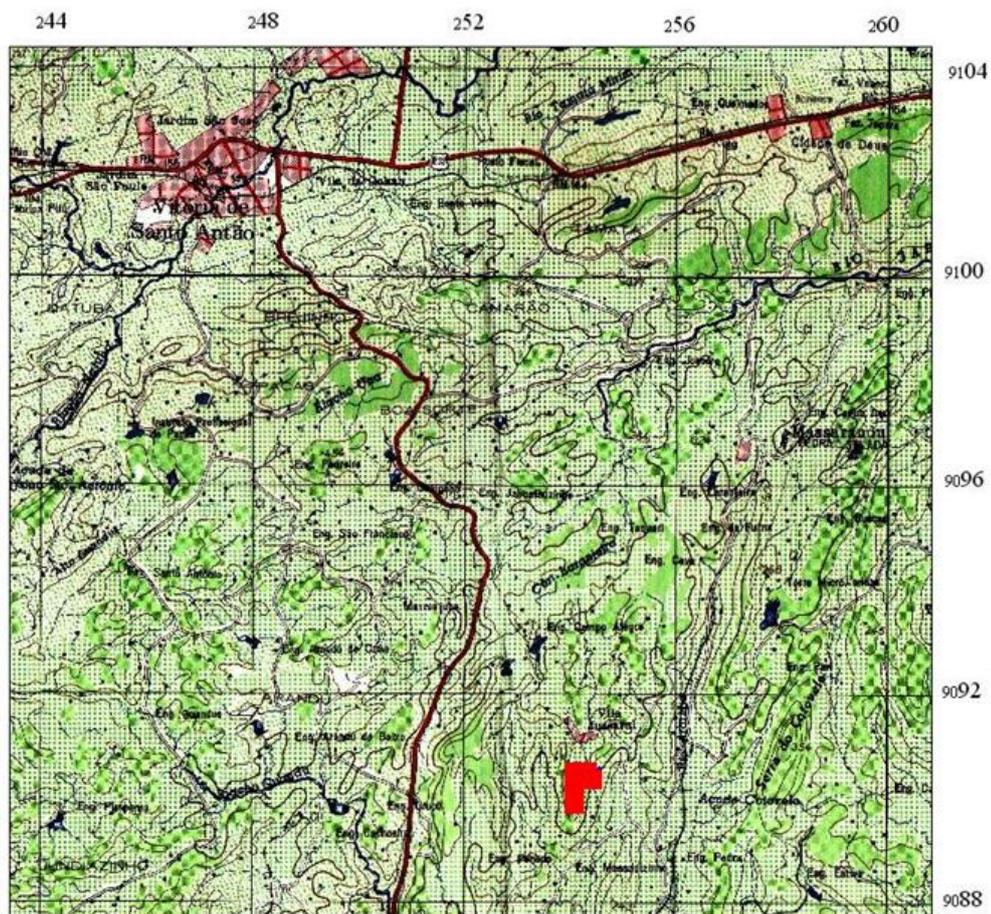
O acesso à área, partindo de Recife, é feito através da BR 232 por cerca de 36 km até chegar-se ao município de Vitória de Santo Antão. A partir daí toma-se a PE 45 rumo sul em direção ao município de Escada, percorrendo-se cerca de 8 km até o acesso à Vila de Jussaral. Do entroncamento da PE 45 toma-se estrada secundária carroçável rumo leste e percorre-se cerca de 5 km até chegar-se à localidade do distrito de Jussaral.

Figura 11 – Mapa de acesso à área do maciço rochoso estudado.



Fonte: Google Earth (2013).

Figura 12 – Localização do maciço rochoso destacado em vermelho.



Fonte: FOLHA SC-25-V-AII MI-1371

Nesta área encontrasse o afloramento de um maciço rochoso conhecido como “Pedra da Pimenta”. Este afloramento serviu de modelo para o desenvolvimento das técnicas computacionais para o qual esse trabalho se destina.

A parte do maciço aflorante, de acordo com os mapas do FIDEM, seu ponto cuja cota é máxima se encontra a 424 metros de altitude, informação esta constatada in loco com o auxílio de um receptor GPS.

3.3. Aspectos Fisiográficos e Geomorfológicos

A região em estudo faz parte da Zona Fisiográfica da Mata Úmida Meridional - Microrregião Vitória de Santo Antão-Cabo de Santo Agostinho, onde predomina um clima BSh's, segundo a classificação de Koppen, tipo transição Tropical Úmido, com estação chuvosa outono-inverno durante 06 meses ao ano e temperatura média anual de 25°C.

A vegetação dominante é a que caracteriza a Mata Atlântica com arvores de grande porte e a arbustiva que, neste caso, devido às proximidades com regiões de maior pluviosidade, é conhecida particularmente de mata úmida. Em virtude da intensa atividade agroindustrial causado pelo plantio da cana de açúcar, a vegetação primitiva foi em grande parte retirada cedendo lugar para as grandes plantações de cana de açúcar. Atualmente a antiga Mata Atlântica constitui espécies de ilhas de vegetação residual.

As bacias hidrográficas estabelecidas na região são as do Rio Capibaribe, Tapacurá e Rio Tracunháem. A Bacia do Rio Capibaribe, que constitui a principal drenagem do estado comanda grande parte desta drenagem, desde a área de Pesqueira, passando por Toritama e Carpina, seguindo para leste em direção ao Recife até desaguar no Oceano Atlântico. O rio Tapacurá nasce próximo a denomina Zona da Mata e constitui um dos mais importantes afluentes do Rio Capibaribe. O rio Tracunháem corre em uma das áreas mais povoadas do interior de Pernambuco, dominando a drenagem de uma importante faixa territorial do Estado, onde se

situam as cidades de Toritama, Bom Jardim e João Alfredo. Sua nascente encontra-se na porção do último município, por onde desce no sentido leste cortando rochas granítico-migmatíticas em vale profundo, retilíneo, condicionado pelo falhamento transcorrente de direção nordeste e rejeito sinistral que corta a região.

O relevo encontrado na região estudada é por vezes monótono, aplainado ou, em outros locais, semeado por morros e serrotes, decorrentes principalmente de variações litológicas. O Rio Capibaribe nesta região atinge cota de 400m, esculpindo uma superfície já bastante aplainada, que desce gradativamente a cotas mais baixas (200m), onde os gradientes se tornam abruptos, passando-se para outra superfície mais antiga (em torno de 300m) notavelmente retrabalhada em fase ativa de pediplanação.

Uma feição marcante na morfologia da área é a região divisora entre as bacias hidrográficas do Rio Capibaribe por um lado e Rio Tracunhaém por outro. Ali ocorrem eventualmente vestígios de uma superfície hoje na cota dos 300 a 500m correlacionada a Superfície Pós-Gondwana de King (1956) ou Pd3 de Bigarella & Ab'Saber (1964). Outra feição marcante no relevo da área é o Pd1 representado pelas serra em torno da Vila de Jussaral, assentada por amplo corpo granítico de amplitude regional formando cotas que variam de 220 a 440m.

Outra superfície geomorfológica a destacar é a Sul-Americana de King (op.cit.) que constitui a área pediplanizada denominada de Pd2 por Bigarella & Ab'Saber. É uma superfície bem mais conservada que a anterior, podendo ser encontrada na região cristalina das cabeceiras dos formadores do Rio Capibaribe, como também a partir do eixo Pesqueira-Carpina passando por Toritama, em direção no sentido de Limoeiro.

Atualmente todas as superfícies estão sendo retrabalhadas pelo Ciclo Polifásico Paraguaçu (King, op. cit.), que irá constituir a chamada superfície dos Terraços, visível no litoral, fora dos limites da região estudada.

3.4. Aspectos Geológicos

3.4.1. Geologia Regional

A região estudada está localizada no nordeste do Brasil em uma região que compõe a denominada Província da Borborema (PB), termo usado por Almeida *et al.* (1977) para englobar o conjunto de unidades geológicas estabilizadas ao final da orogênese brasileira, consoante sistemas orogênicos ramificados, separados por altos do embasamento (sobretudo das tramas do Paleoproterozóico), que constituíram o suporte fundamental da colagem Brasileiro-Pan Africana. Trata-se de uma província estrutural da plataforma Sul Americana caracterizada, de há muito, pela riqueza e diversidade do magmatismo granítico, o qual perfaz, em termos gerais, cerca de 30% de todo o conjunto territorial.

Duas características marcantes da Província Borborema são o expressivo magmatismo brasileiro e o notável sistema de zonas de cisalhamento, constituindo o último episódio de deformação dúctil regional. Do ponto de vista tectônico, pertence ao Terreno Rio Capibaribe, o qual apresenta uma história geológica, que se estende do Paleoproterozóico incluindo eventos datados do Meso e Neoproterozóico ao Recente.

A área situa-se no interior do denominado Subdomínio Zona Transversal da Província Borborema, limitado a sul e a norte pelos lineamentos Pernambuco e Patos respectivamente. O Domínio da Zona Transversal é uma megaestrutura de direção geral E-W limitada a norte e a sul pelos lineamentos Patos e Pernambuco, respectivamente. Abriga na área porções meridionais dos fragmentos paleoproterozóicos Ouricuri (Complexo Metaplutônico) e Icaçara (complexos Parnamirim e Barro), e dos terrenos meso e neoproterozóicos Piancó-Alto Brígida (grupos Cachoeirinha e Salgueiro e Complexo Riacho Gravatá), Alto Pajeú (complexos Riacho da Barreira e São Caetano) e Alto Moxotó (Complexo Lagoa das Contendas).

Os tipos graníticos discriminados na área da Borborema, segundo Almeida (1977), foram : os granitos sinorogênicos tipo Conceição (granodioritos e tonalitos) e Itaporanga (granitos ricos em fenocristais de microclina); granitos tardiorogênicos tipo Itapetim (granitos de granulação fina tardiorogênicos, de dimensões modestas e diques) e Catingueira (granitos peralcalinos, quartzo sienitos e sienitos); granitos pósorogênicos (granito a biotita da Serra da Meruoca); granito anorogênico (cretácico) do Cabo de Santo Agostinho.

Estruturalmente o domínio da Zona Transversal apresenta diversas unidades tectonoestratigráficas. Estes domínios encontram-se, via de regra, afetados pelo cisalhamento transcorrente do Lineamento Pernambuco e das estruturas correlatas a ele coalescentes. Tal sistema determina o formato em cunha dos terrenos/complexos, com tendência ao paralelismo com a megaestrutura brasileira e intensa deformação/transposição de seus componentes litológicos.

4.3.2 Geologia Local

Localmente aflora extenso corpo granitóide pertencente à suíte Itaporanga, aflorante sob a forma de extensos maciços e grandes matacões, os quais se destacam na topografia local. Constitui um tipo de composição calcioalcalina, de alto potássio e composição variando de granítica a granodiorítica, com fácies monso graníticos e seiníticos, incluindo termos dioríticos.

O granito em tela ocorre próximo à Vila Jussaral e se estende pelos engenhos Massaulzinho, Laranjeiras e Morro Pelado. Aflora sob a forma de grande maciço rochoso, com comprimento superior em certos pontos a 400 m e que, individualmente chegam a possuir mais de 5.000.000 m³ de volume. Dispõem-se também no terreno como maciço elevado, constituindo morros que se destacam na topografia (sendo comum elevações com altura superior a 100 m), ao longo dos quais o granitóide está exposto ou acha-se coberto por fina capa de solo residual. Como os maciços são de grandes dimensões e apresentam bons destaques topográficos, a lavra neste setor não deverá apresentar maiores dificuldades. Salienta-se no local da ocorrência, a homogeneidade do litotipo aflorante, destituído de foliações, fraturamento e deformações cisalhantes, o que facilitará as futuras operações de desmonte do material.

Em termos macroscópicos o granito possui textura porfirítica, granulação grosseira, sendo constituído por fenocristais de feldspato com até 1,0 cm de comprimento, orientados em uma matriz escura formada por biotita, anfibólio, quartzo, titanita e uma massa com pequenos grãos de plagioclásio. Apresenta coloração cinza-escura, com manchas róseas a creme. As manchas de tonalidade rósea são formadas por fenocristais de microclina e as de dor creme por cristais grosseiros de plagioclásio.

No geral trata-se de uma rocha porfiróide, de composição granodiorítica, isotrópica, feldspática, holocristalina, de matriz formada por grãos xenomórficos de feldspato, com presença de quartzo e biotita nos espaços intersticiais. Os cristais de biotita, são lamelares, mostram-se bem desenvolvidos e possuem distribuição dispersa pela matriz, ou às vezes formando pequenos focos. Convém salientar, a presença de maclas Carlsbad em muitos feldspatos. Subordinadamente ocorrem minerais opacos (traços de magnetita e ilmenita) indicando baixo potencial de ocorrência de reação álcali-agregado na aplicação em concretos.

Observações mesoscópicas indicam ausência de fissuramentos e de foliação magmática, tratando-se de um litotipo não deformado, possivelmente associado à fase tardi a pós tectônica ao Ciclo Brasileiro o qual de forma tão marcante afetou e remodelou o embasamento cristalino brasileiro, particularmente na sua região nordeste.

Em lâmina petrográfica constata-se que os cristais de feldspato euhedrais, razoavelmente freqüentes, são do tipo microclina, e possuem aspecto alterado e bordos irregulares. A presença de feldspatos do tipo oligoclásio é esporádica. Os fissuramentos internos são pouco observáveis, sendo de pequena monta visualizados no interior do corpo dos cristais de feldspato, a maior parte com alterações internas ou com preenchimento secundários. O quartzo mostra-se relativamente abundante, apresenta-se com bordos irregulares, porém não corroídos. Os cristais são límpidos, sem extinção ondulante. Ocasionalmente ocorrem microfissuramentos discretos, que podem ser resultados do efeito supergênico da alteração. A biotita que constitui o máfico dominante, apresenta-se como cristais difusos, lamelares a ripiformes, ou em focos. Exibe superfícies características, algo límpidas, com lamelas pouco encurvadas ou esgarçadas. Do ponto de vista composicional está rocha é do tipo intrusivo e de natureza granodiorítica.. Dentre os acessórios se destacam opacos metálicos (magnetita ou ilmenita) com pontuações muito esparçadas.

As observações macroscópicas e a análise petrográfica permitem classificar a rocha como um granodiorito porfírico perfeitamente aplicável para a produção de brita, e com base na sua composição mineralógica pode-se prever, que a sua possibilidade de sofrer reações de álcali-agregados é bastante reduzida, constituindo-se, portanto em um litotipo perfeitamente utilizável como agregado na indústria da construção civil.

Tabela I – Composição Mineralógica Modal Média

Minerais	Percentual
Microclina- subordinadamente oligoclásio	55
Quartzo	40
Biotita	5
Minerais opacos	traços

Na porção norte da área estudada, ocorre inclusos nos granodioritos de amplitude regional, pequeno stock de leucogranito, com textura equigranular de coloração cinza a cinza-clara, e com granulação variando de fina a média. Compõe-se essencialmente de quartzo, plagioclásio e microclima, tendo a biotita como máfico principal. Assemelha-se aos granitos tipo Conceição definidos por Almeida (1977). Afloram constituindo amplos maciços rochosos de amplitude razoável e por vezes algumas praças de matacões. No geral apresentam-se pouco fraturados, contendo xenólitos dos plutonitos da Suíte Itaporanga, e de fragmentos de rochas máficas de composição quartzo-diorítica. Mostram-se cortados por veios pegmatíticos de coloração cinza – esbranquiçada e dimensões variáveis.

Constitui um tipo homogêneo, não foliado, destituído de foliação magmática e de deformações no estado sólido. Trata-se de um plutonito não deformado relacionado provavelmente a fase pós-tectônica ao Evento Brasileiro que afetou intensamente a região em epigrafe. O fraturamento observado apresenta direções N 45° E e 35° NW, além de cisalhamentos tensionais nas direções 360° Az e 270° Az respectivamente.

Em termos estruturais a área apresenta-se pouco deformada, com ausência de tectônica tangencial, observando-se apenas deformações de natureza rúptil, associadas ao fraturamento de natureza Tardi a pós-tectônica que afetou a região. Localmente verifica-se a presença de fraturas de cisalhamento com direções para 50° NE e 40° NW. Os fraturamentos de direção 270° Az e 360° Az constituem fraturas associadas à fase de tensão a que foi submetido o corpo ora em estudo. Localmente verifica-se a presença de fraturas de alívio dispostas paralelas ao relevo, cujo espaçamento entre si aumenta com a profundidade do corpo.

No que tange a estruturas foliadas, no centro do corpo não se verifica a presença de deformação em estado sólido havendo apenas foliação magmática, caracterizada por um certo alinhamento dos cristais feldspatos. Entretanto nas bordas do corpo, em contato com as suas encaixantes, notadamente em locais afetados por falhas transcorrentes de direção nordeste, tem-se uma tênue presença de foliação tectônica.

Análise da atuação desta tectônica de natureza rúptil, representada pelos sistemas de fraturas de 50° NE e 40° NW, os quais constituem as fraturas de cisalhamento que cortam os gnaisses, seguidas das fraturas de tensão dispostas nas direções 90° Az e 360° Az. Tais fraturas constituem um par conjugado, cuja bissetriz do seu ângulo de interseção, indica a direção do esforço compressivo regional na direção de 360° (N_S), responsável pelo tectonismo que afetou a área. A análise do elipsóide de deformação (figuras 3 e 4) mostra a existência de uma direção de compressão N-S, responsável pela geração das fraturas de cisalhamentos representadas pelo par conjugado NE e NW. Tal interpretação

evidência que a melhor direção de abertura da pedreira, de forma a evitar o aparecimento de fraturas de alívio e a direção W-E.

Salienta-se que o aproveitamento desta direção, para a condução dos futuros trabalhos de exploração propiciará um aumento na taxa de recuperação da futura frente de lavra, contribuindo assim para o aumento da lucratividade do empreendimento, além de minimizar os impactos ambientais a serem gerados devido ao menor índice de rejeitos produzidos.

Figura 13 - Mostra a sistema de cisalhamentos atuantes na área em estudo, incluindo o seu par conjugado e as direções das fraturas de tensão atuante sobre o corpo.

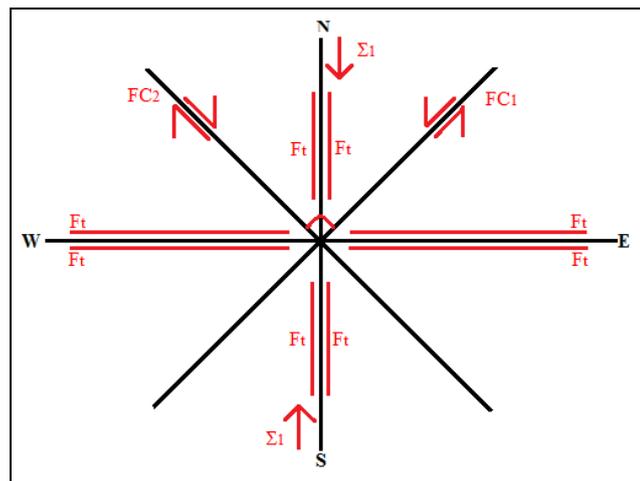


Figura 14 – Campo de tensões atuante sobre área em questão incluindo o eixo σ_3 , que constitui a direção ideal para a abertura da pedreira.

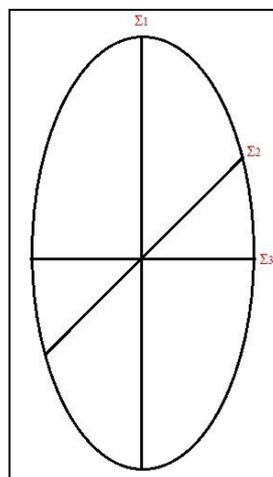


Tabela II - Composição mineralógica dos tipos estudados

Minerais	Amostra 1	Amostra 2
Plagioclásio	20%	21%
Quartzo	25%	24%
Microclina pertítica	10%	12%
Biotita	15%	14%
Hornblenda actinolítica	28%	26%
Pertita	0,1%	0,2
Antipertita	0,5%	0,6
Mimerquita	0,3%	0,4
Acessórios	1,2%	2,3

Conforme o anteriormente descrito, são encontrados corpos tabulares de rocha granítica gnaissificada inseridos nos ortognaisses cinza-escuro a anfibólio e apresentando-se ricos em quartzo, microclina, e plagioclásio. Este litotipo se sobressai no conjunto dos gnaisses, em razão de sua tonalidade de cor cinza-clara. Ocorrem sob a forma de sheets de dimensões métricas a decimétricas, não representáveis na escala 1 : 10.000. Apresentam textura equigranular, média e apresentam foliação metamórfica coincidente com a estruturação regional.

Tabela III - Composição mineralógica dos leucogranitos a biotita

Minerais	Amostra 3
Plagioclásio	27%
Biotita	10%
Hornblenda	4%
Acessórios	3,0%
Quartzo	35%
microclina	21%

Após a constatação, que os estudos petrográficos executados em amostras representativas do maciço rochoso do litótipo de interesse, evidenciaram uma notável homogeneidade em relação à mineralógica básica, estrutura e textura, procurou-se avaliar as possibilidades tecnológicas da rocha, no que concerne ao emprego como material ornamental.

Os resultados dos ensaios físicos e mecânicos, do ortognaisse aflorante na Vila Jussaral, apresentados na tabela disposta abaixo, acrescidos das características petrográficas, as quais conferem a esta rocha qualidades satisfatórias para uma utilização segura como material de cantaria (revestimentos de pisos, laterais, etc.). Os valores encontrados enquadram-se dentro dos limites definidos para utilização em cantaria, estabelecidos por entidades normativas como a ABNT; sendo também similares, quantitativa e qualitativamente, aos valores apresentados pelos demais granitos brasileiros, empregados com sucesso na construção civil.

Os testes de resistência a flexão, dilatação térmica linear e desgaste Amsler efetuados em amostras dessas rochas forneceram resultados bastante satisfatórios. O aspecto estético e decorativo, obtido após o corte do material foi dos melhores, destacando-se o caráter homogêneo da rocha em tela do ponto de vista do exame visual. Convém frisar, que a semelhança deste litotipo com outros gnaises aflorantes na região Agreste Setentrional de Pernambuco, tanto em termos de composição químico-mineralógica, quanto pelo aspecto lito-estrutural ampliam bastante as reservas deste litotipo.

Tomando-se por base os resultados de análises petrográficas disponíveis e correlacionando-os com os valores dos ensaios de caracterização tecnológica efetuados na presente pesquisa, conclui-se que o ortognaisse em questão apresenta condições técnicas condizentes com o seu emprego como rocha natural na condição de revestimentos de piso e de paredes laterais.

Na tabela IV têm-se os parâmetros obtidos pelos ensaios de caracterização tecnológica obtidos na presente pesquisa.

Tabela IV - Dados Tecnológicos do ortognaisse aflorante na Vila Jussara

Propriedades Tecnológicas	Valores médios
Densidade	$2,85 \pm 0,007\text{g/m}^3$
Absorção d' água	0, 249%
Resistência a compressão	94,13Mpa
Porosidade aparente	0, 706%
Dureza	6,0 a 6,5
Resistência a flexão	$27,82 \pm 1,22$ Mpa
Ensaio de gelo e degelo	$106,93 \pm 6,28$ Mpa
Desgaste amsler	$0,280 \pm 0,063$ a 500m

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram utilizados na elaboração do estudo de caso softwares comerciais para a elaboração e determinação dos volumes dos sólidos correspondentes ao corpo mineral e quantificação de reservas minerais. Foram eles: SKETCHUP PRO 8.0, SURFER 9.0, AUTOCAD 2010, AUTOCAD CIVIL 3D 2014 e o DATAMINE STUDIO 3.0.

O primeiro passo em qualquer estudo espacial é a definição do delineamento experimental, que envolve, entre outros procedimentos, a escolha da técnica de coleta de amostras e também da malha de amostragem.

A malha de amostragem pode ser do tipo: aleatória, quando a distribuição dos pontos de coleta é casual; agregada ou agrupada, quando ocorrem grupos (cluster) de pontos mais próximos entre si; e regular, quando os pontos estão regularmente espaçados. Aplicou-se uma coleta de amostragem por meio de GPS em uma distribuição regular.

Além dos métodos computacionais, utilizou-se para fins de comparação dos resultados obtidos através dos dados de digitalização manual em AUTOCAD dos mapas topográficos disponíveis da região e também dados de campo obtidos com GPS. Neste estudo, os mapas utilizados foram da Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife – FIDEM. Para a confecção de um mapa-base, foram necessárias 04 (quatro) dessas projeções ortogonais chamadas de Ortofotocarta disponíveis em escala de 1 : 10.000.

Para o levantamento planialtimétrico, utilizou-se um aparelho GPS modelo Garmin 76s. O levantamento realizado teve como objetivo comprovar as cotas registradas no mapa-base, fornecer as coordenadas UTM e altitudes do maciço rochoso para em seguida exportá-las por meio de planilhas confeccionadas em Excel 2010 para o software SURFER 9.0.

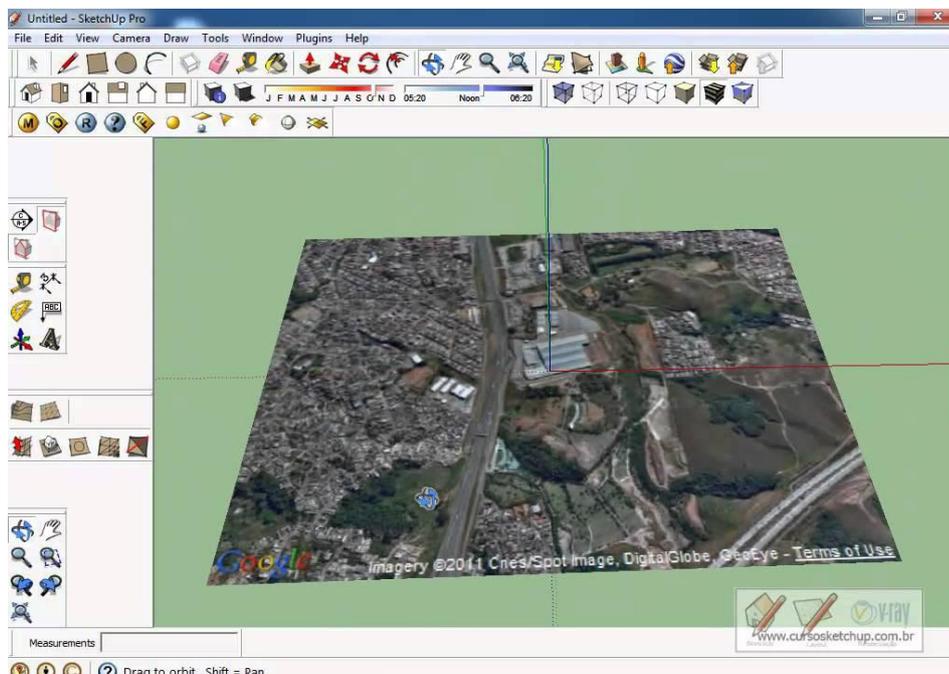
4.1. SKETCHUP PRO 8.0

O SKETCHUP é um software proprietário para a criação de modelos em 3D no computador. Foi originalmente desenvolvido pela *At Last Software (@last software)*. O SKETCHUP está disponível em duas versões: a versão profissional, PRO, e a versão gratuita, Make, (para uso privado, não comercial).

Trata-se, portanto, de uma ferramenta para a apresentação de modelos tridimensionais. Uma vez desenhado o modelo, é possível exportá-lo através da versão PRO para outros formatos (2D e 3D), como DWG, DXF, 3DS, OBJ, XSI ou VRML para dar continuidade ao projeto do desenho preliminar.

Foram desenvolvidos vários plug-ins destinados a várias funções, onde se pode destacar a importação e exportação de dados para o software SKETCHUP. O plug-in utilizado para desenvolver o modelo digital do terreno e a partir daí gerar as curvas de níveis foi o Google Earth.

Figura 15 – Imagem ilustrativa da interface do software SKETCHUP PRO 8.0

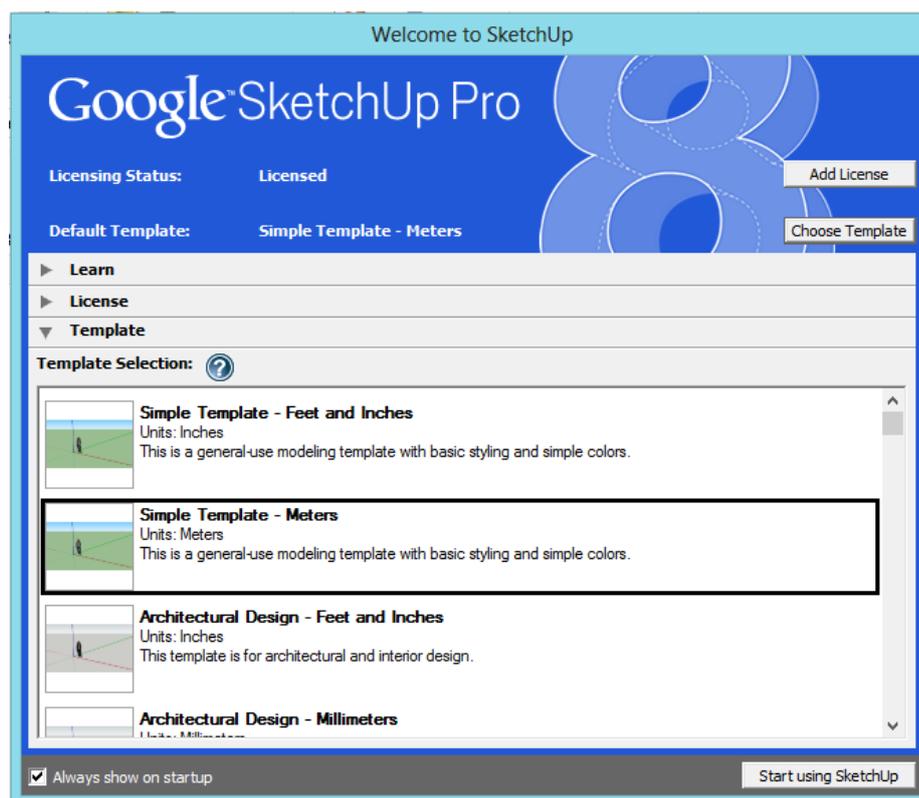


Fonte: SketchUp Pro 8.0

O plug-in para o Google Earth, que já foi incorporado ao programa na versão 7.0, permite a criação de modelos em 3D em SKETCHUP para implantação posterior numa localização à escolha no Google Earth. Torna-se assim possível visualizar a topografia local criada em SKETCHUP diretamente no seu meio ambiente (no software Google Earth). Os modelos podem ser gravados num ficheiro no formato KMZ ou KML, o que facilita o seu manuseio.

Adotamos o SKETCHUP por ser uma ferramenta gratuita e de uso acessível. Essa ferramenta permite a elaboração da topografia em 3D e com ela foi possível a obtenção das curvas de nível do terreno localizado na área de Jussaral, objeto do estudo de caso da presente dissertação.

Figura 16 – Interface inicial do SketchUp Pro 8

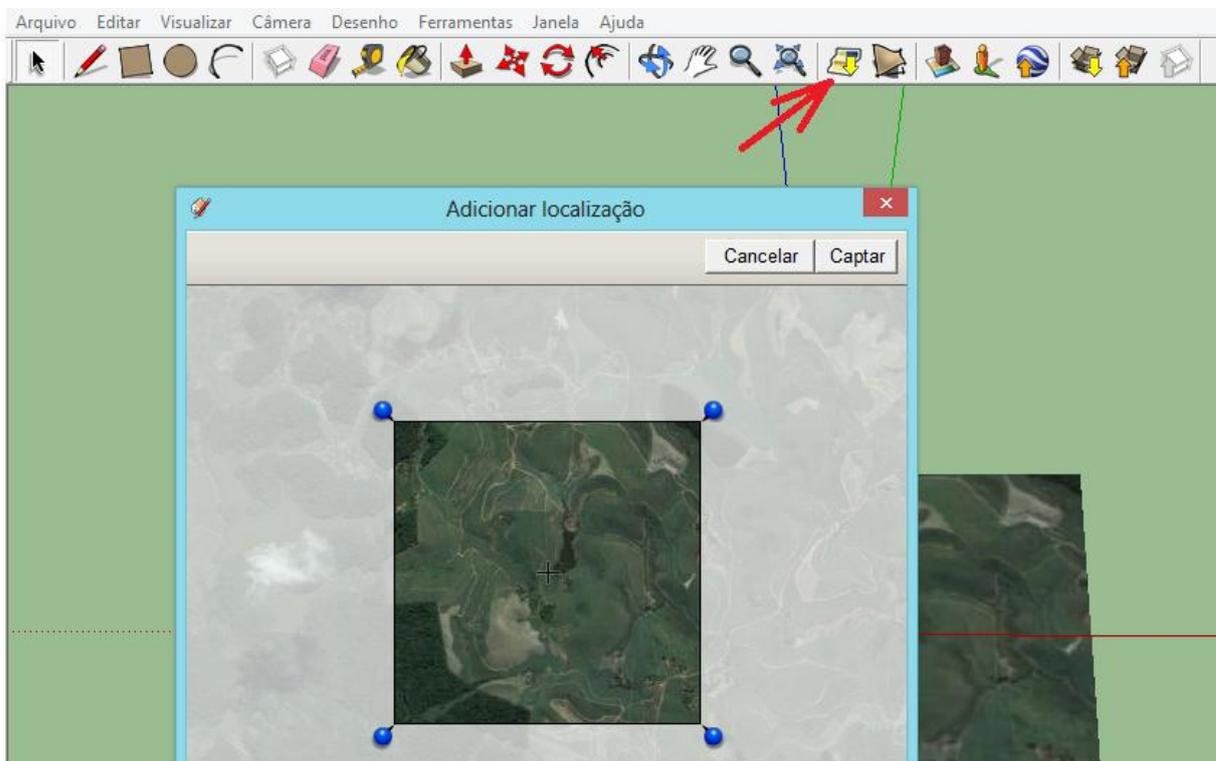


Fonte: SketchUp Pro 8

4.1.1. Metodologia do uso do software SKETCHUP

O primeiro passo para construção do modelo tridimensional do terreno com suas respectivas curvas de níveis é importar a imagem correspondente da área no Google Earth a partir da ferramenta “adicionar mais imagens” no SKETCHUP PRO 8.0.

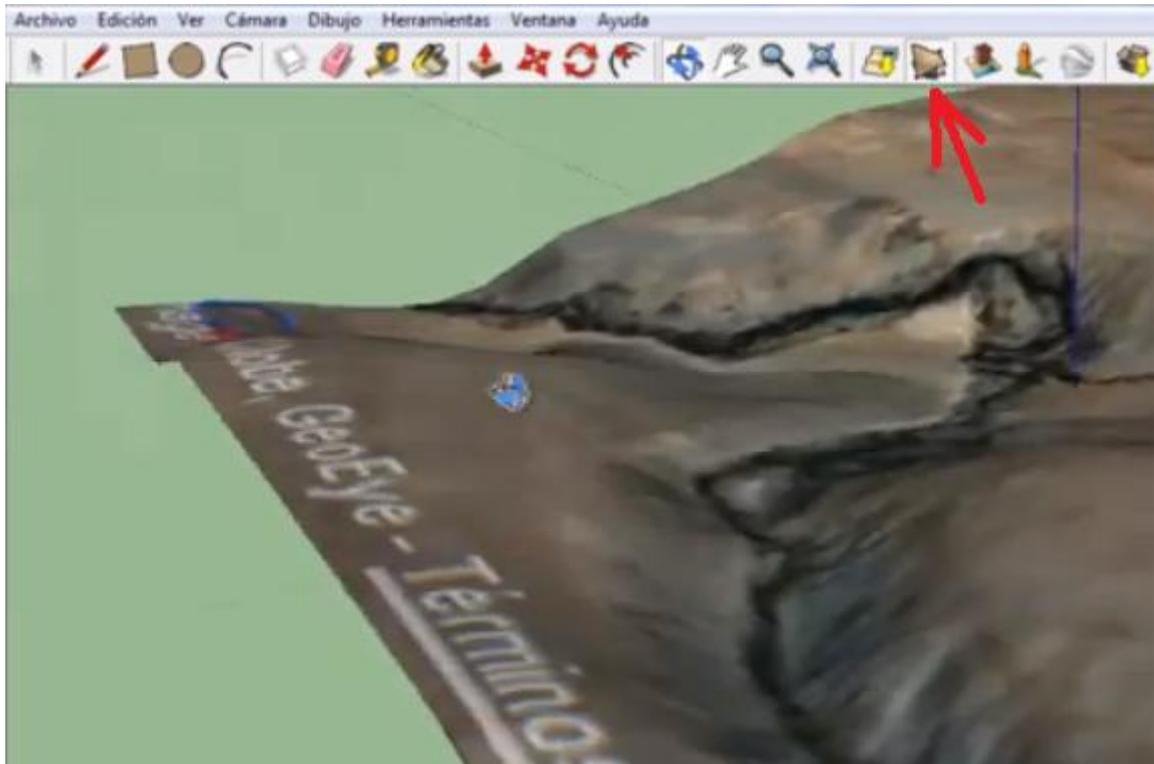
Figura 17 – Captação da imagem do terreno a partir do Google Earth



Fonte: SketchUp Pro 8.0

A seguir a imagem 2D é convertida em uma imagem 3D usando a ferramenta “ativar o terreno”. Essa ferramenta tornará a imagem capturada em 2D a partir do Google Earth em uma imagem 3D com as curvas do terreno.

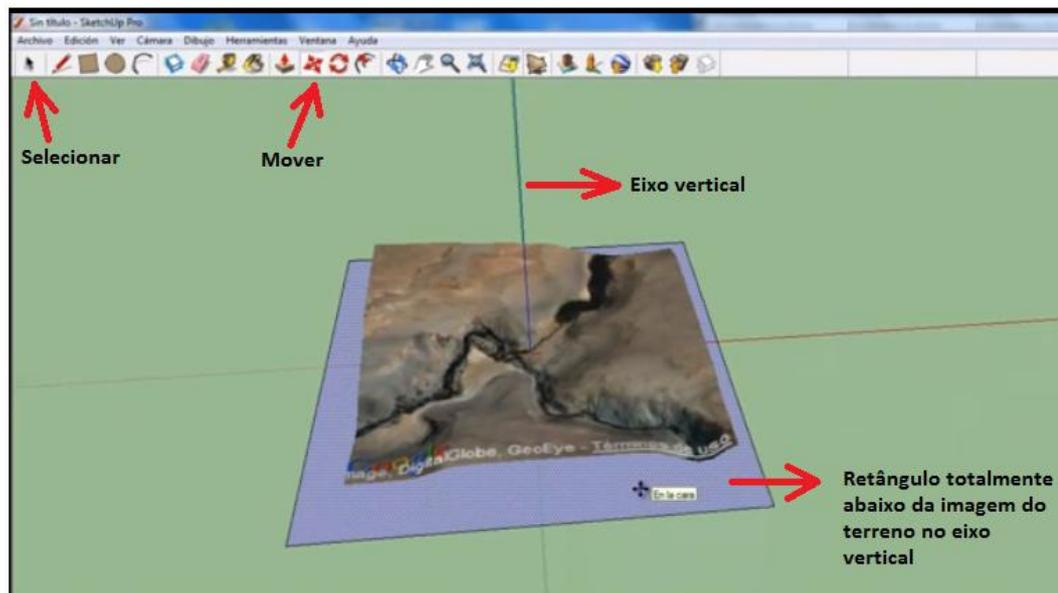
Figura 18 – Terreno em 3D utilizando a ferramenta “ativar o terreno”



Fonte: SketchUp Pro 8.0

Para dar prosseguimento ao processo desenha-se um plano com dimensões que cubram toda a área usando a ferramenta “retângulo”. A partir desse plano criam-se diversos outros planos ao longo do eixo vertical, empilhados um acima do outro com intervalo entre eles pré-definido. Este intervalo indicará a distância entre as curvas de nível do terreno estudado (exemplo: 1 em 1 metro, 5 em 5 metros, etc.).

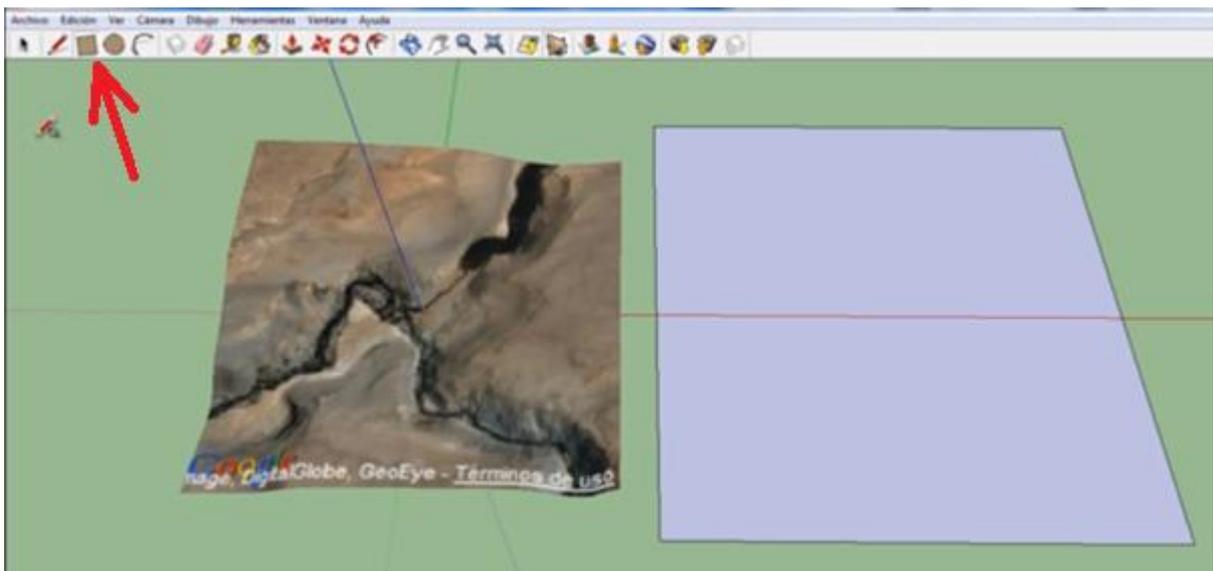
Figura 19 – Ferramenta “retângulo”



Fonte: SketchUp Pro 8.0

Deve-se mover o retângulo de forma que ele se posicione na cota mais baixa ou mais alta da região selecionada. Para tanto se usa duas ferramentas, a ferramenta “selecionar” para escolher o plano inicial e a ferramenta “mover” para transladar esse plano paralelamente ao longo do eixo vertical.

Figura 20 – Utilização das ferramentas “selecionar” e mover

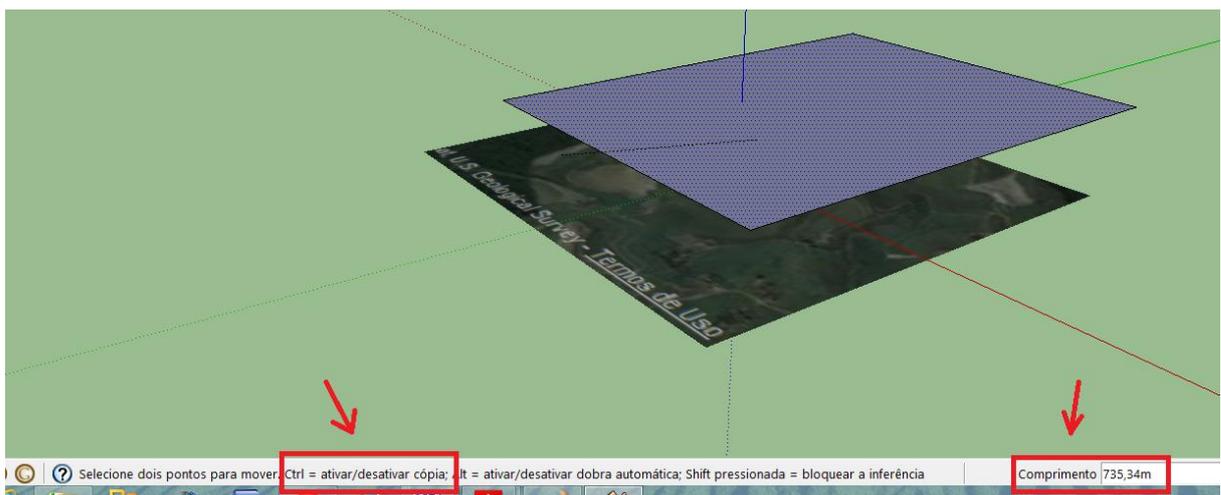


Fonte: SketchUp Pro 8.0

Após seleccionar e posicionar o plano de forma a englobar toda a área desejada deve-se criar várias cópias paralelas do mesmo e distribuí-las uma acima da outra ao longo do eixo vertical. Para isso, utiliza-se a ferramenta “Mover” e clica-se em “Ctrl”, aparecendo então um “+” para criar uma cópia do plano.

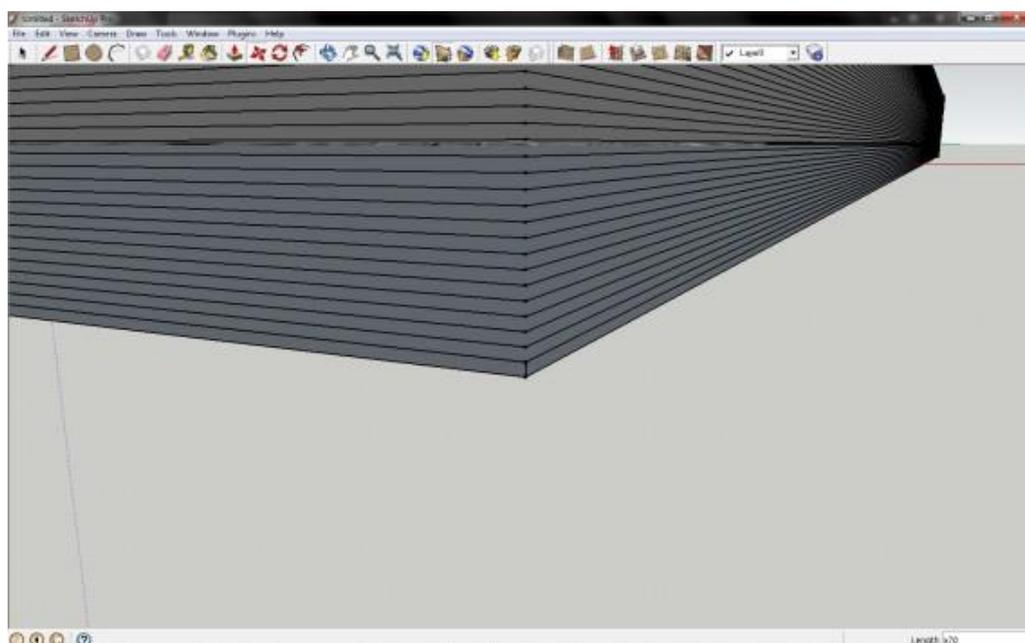
Selecciona-se então o plano criado no início do processo e arrasta-se, para cima ou para baixo, de acordo com a posição altimétrica do plano inicial, a uma altura correspondente a separação entre as curvas de nível desejada, após ter sido copiado basta escrever nos “comprimentos”, por exemplo, “x50” e criará mais 50 planos todos equidistantes, ou seja, a 5m de distancia cada um.

Figura 21 – Campo “comprimento”



Fonte: SketchUp Pro 8.0

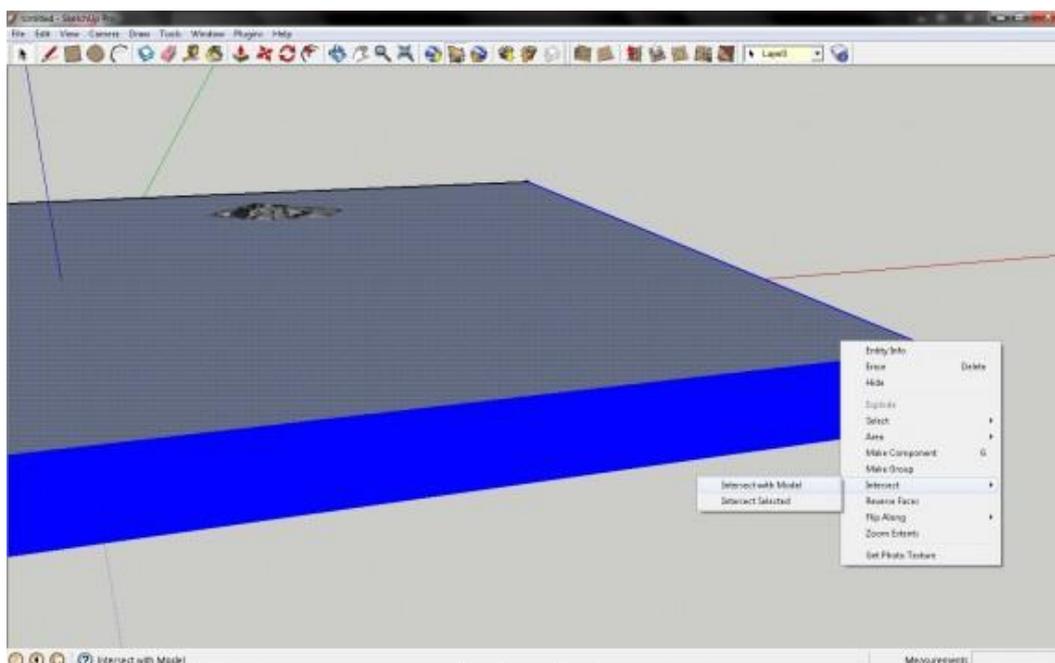
Figura 22 – Planos equidistantes



Fonte: SketchUp Pro 8.0

Agora selecionamos todos os planos, e clicando no botão direito do mouse, encontraremos a opção “Interceptar com o modelo”, para criar as curvas.

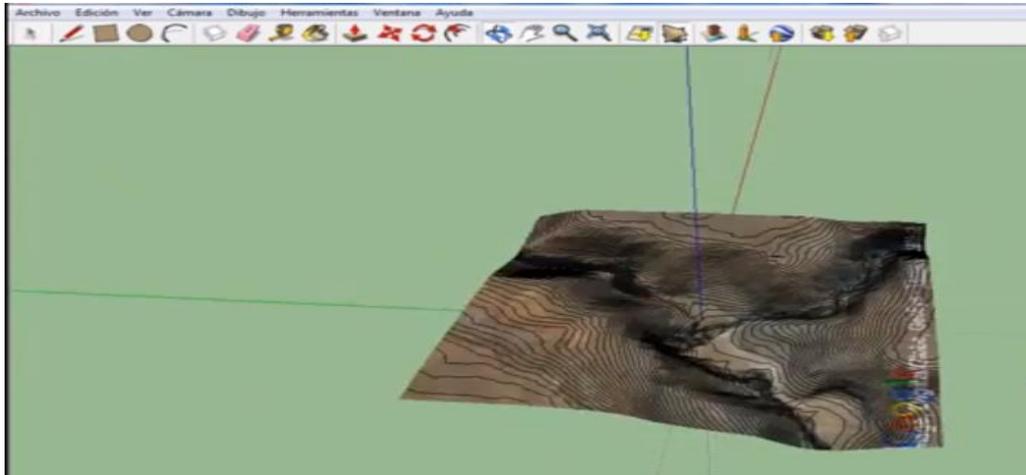
Figura 23 – Intercepção do modelo de bloco com o terreno



Fonte: SketchUp Pro 8.0

Depois de apagar os planos criados para obtenção das curvas de nível pode-se ver o resultado final apresentado na figura 21.

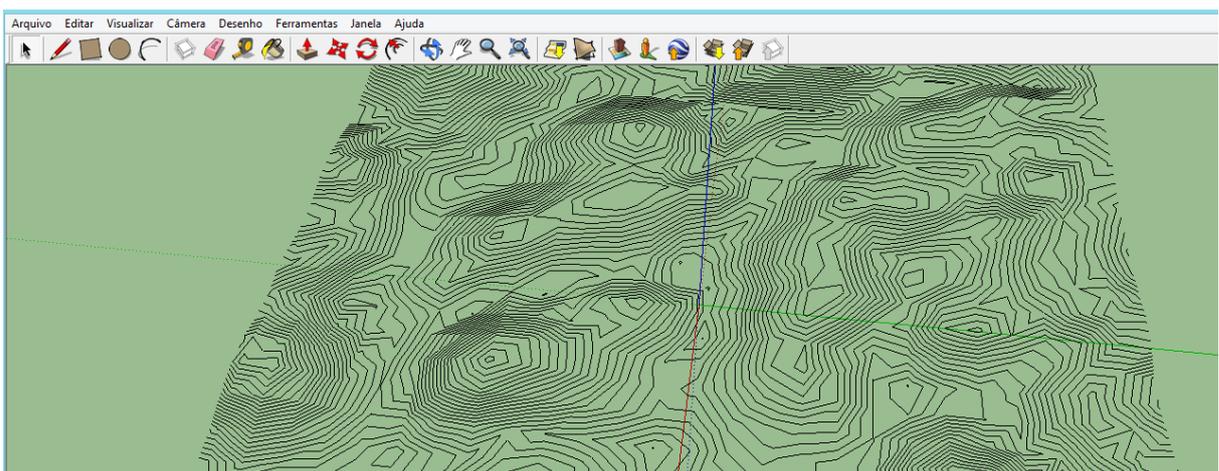
Figura 24 – Curvas de nível



Fonte: SketchUp Pro 8.0

Com o desenho concluído, e caso seja necessário, podem exportar para .dwg ou utilizar as ferramentas de Sandbox do SKETCHUP para recriar o terreno sem a imagem do Google Earth.

Figura 25 – Curvas de nível sem a imagem do Google Earth



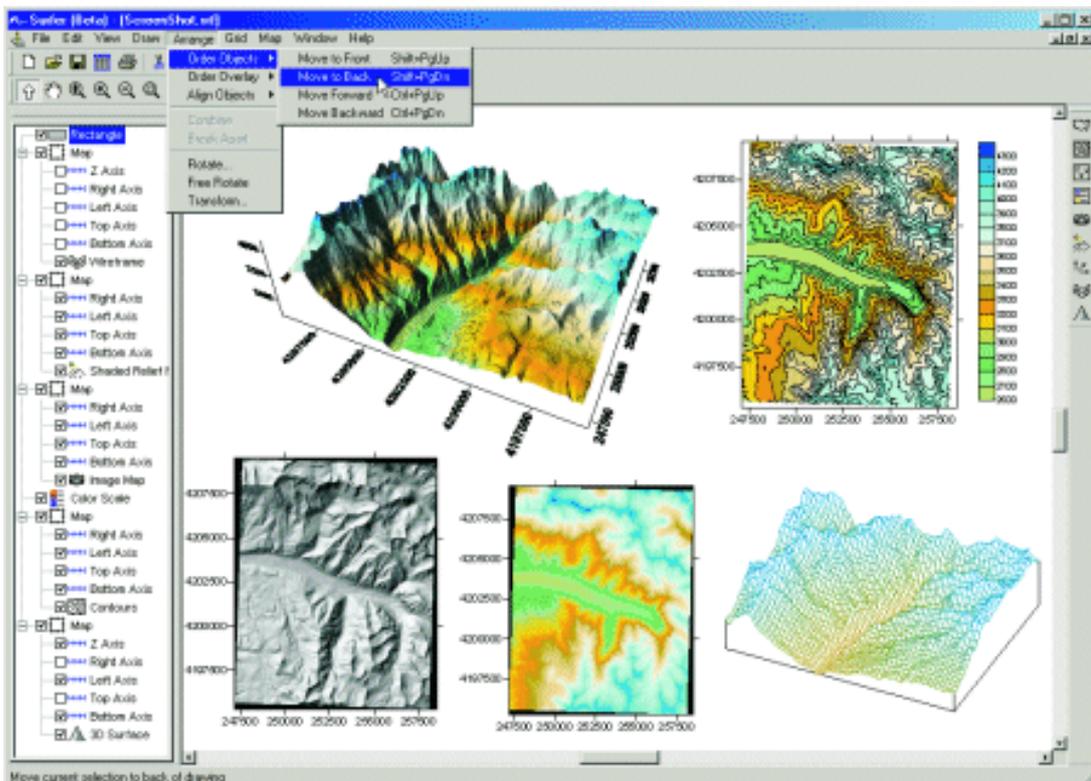
Fonte: SketchUp Pro 8.0

Depois de concluído o desenho das curvas de nível perceberá que as mesmas não são geradas suavizadas e não georeferenciadas. Para tanto, importa-se o desenho para o AUTOCAD a fim de suavizar as curvas e georeferencia-las.

4.2. SURFER 9.0

O SURFER® é um pacote de programas gráficos comercial desenvolvido pela Golden Software Inc. que pode ser utilizado para o cálculo e a confecção de mapas de variáveis a partir de dados regularmente distribuídos. É uma importante ferramenta computacional, que facilita o desenvolvimento do trabalho, evitando traçar mapas com régua, transferidores e outros instrumentos, reduzindo o tempo desse processo e sendo menos subjetivo, pois usa algoritmos matemáticos para gerar suas curvas, otimizando o trabalho. Inicialmente desenvolvido em plataforma DOS, a partir da versão 6 passou a ser executado na plataforma WINDOWS.

Figura 26 – Interface software Surfer 9.0



Fonte: Surfer 9.0

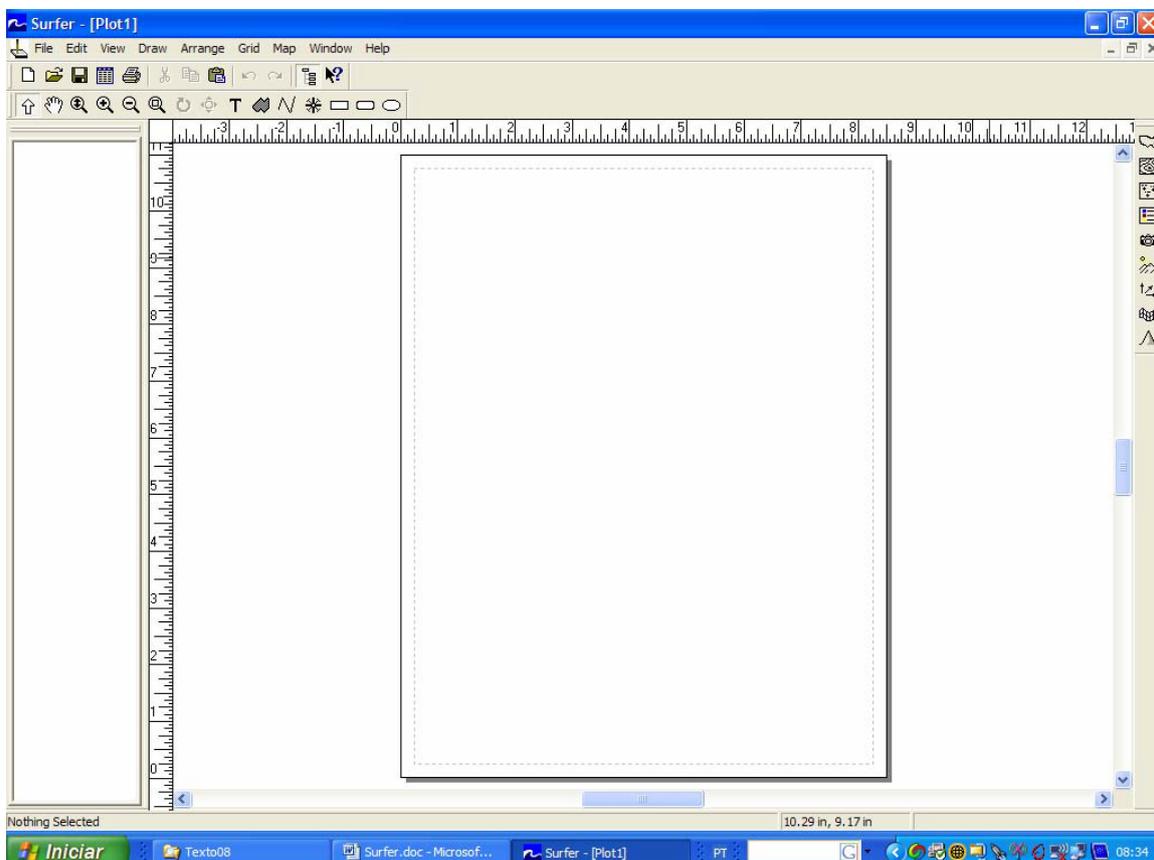
4.2.1. Metodologia do uso do software Surfer 9.0

No emprego do software SURFER 9.0 é necessário que os dados, do tipo XYZ, estejam dispostos numa malha regular. Isto significa que após a coleta de dados no campo, ocasionalmente numa malha irregular, ou mesmo com dados agrupados, os mesmos deverão ser regularizados segundo os diversos algoritmos que constam dos programas a serem utilizados.

Independentemente da técnica aplicada na amostragem, há sempre necessidade de se conhecer a posição das amostras no espaço, ou seja, o seu georreferenciamento.

Ao iniciar o programa é visualizada a seguinte tela:

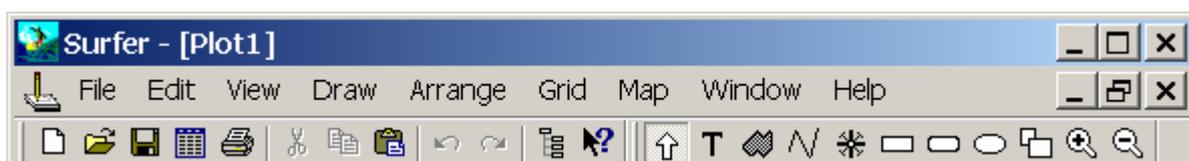
Figura 27 – Interface inicial do software Surfer



Fonte: Surfer 9.0

Na área em branco são plotados os mapas gerados e o menu, no topo, permite selecionar os procedimentos para entrada de dados, geração, visualização e edição dos mapas.

Figura 28 – Itens do menu do Software Surfer



Fonte: Surfer 9.0

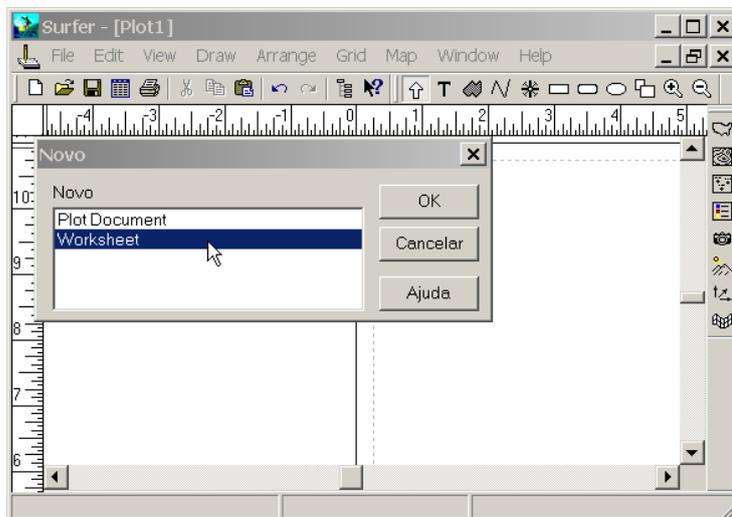
Um mapa é construído a partir das posições espaciais de pontos colhidos no campo e são representados pelos valores X, Y e Z. As coordenadas são os valores X, posição do ponto no eixo da ordenada leste-oeste, e Y, posição na abscissa norte-sul, e Z é o valor observado da variável nesse ponto. As coordenadas foram colhidas em UTM.

O SURFER 9.0 possui uma planilha de entrada de dados, que permite importar planilhas de diversos aplicativos, como Excel®.

Aberta a planilha, basta completar as células com os dados, podendo colocar rótulos na primeira linha das colunas com o nome das variáveis. O usual é que a primeira coluna contenha os valores de X, a segunda os valores de Y e na terceira os valores da variável Z.

Para acessar a planilha de dados basta selecionar *FILE* | *NEW* | *WORKSHEET*, como na figura seguinte:

Figura 29 – Acesso a planilha de dados no Software Surfer 9.0



Fonte: Surfer 9.0

A partir das coordenadas do ponto e dos valores assumidos pela variável nesses pontos coletados através do GPS em campo, confeccionou-se uma planilha no Excel.

Figura 30 - Planilha com as coordenadas UTM do maciço rochoso

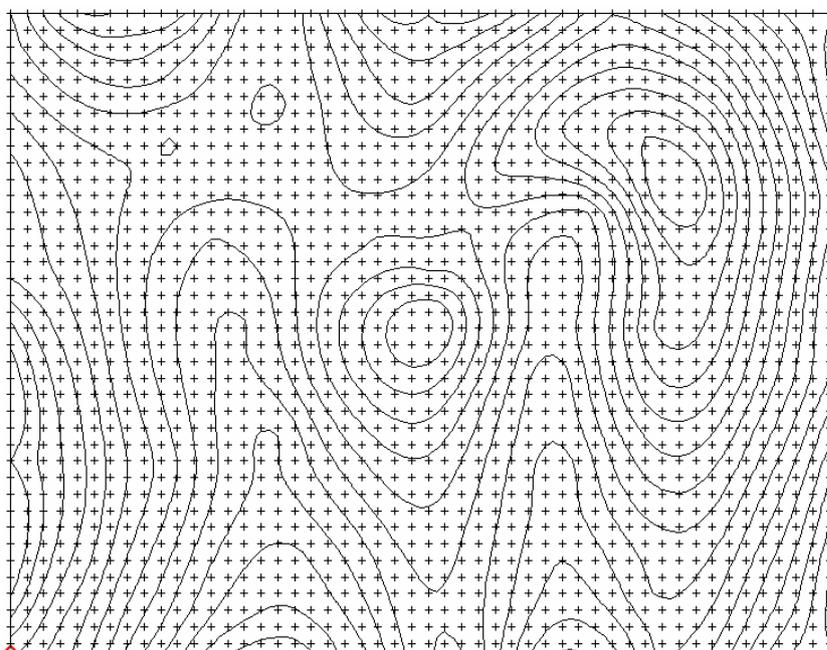
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y
2	254177	9090652	426	254159	9090580	423	254249	9090524	408	254154	9090500	414	254113	9090166	422	254241	9090830	401	254203	9090106
3	254176	9090648	426	254155	9090578	422	254249	9090524	407	254157	9090448	414	254112	9090144	422	254241	9090844	398	254202	9090112
4	254181	9090646	426	254155	9090572	423	254253	9090534	409	254142	9090418	413	254128	9090086	423	254242	9090854	396	254204	9090078
5	254198	9090660	426	254151	9090574	422	254264	9090546	411	254151	9090406	411	254160	9090094	422	254240	9090860	394	254212	9090048
6	254189	9090638	421	254147	9090580	421	254267	9090552	410	254156	9090404	410	254203	9090106	410	254235	9090868	393	254196	9090034
7	254190	9090640	421	254141	9090588	419	254282	9090558	408	254117	9090386	412	254202	9090112	407	254232	9090878	389	254188	9090040
8	254180	9090628	421	254139	9090592	417	254289	9090566	408	254120	9090358	416	254204	9090078	408	254227	9090888	387	254175	9090036
9	254175	9090626	421	254146	9090590	418	254297	9090582	405	254095	9090326	413	254212	9090048	397	254219	9090902	384	254177	9090038
10	254168	9090628	420	254151	9090586	419	254304	9090600	404	254076	9090318	407	254196	9090034	399	254208	9090916	382	254151	9090074
11	254166	9090624	420	254152	9090574	418	254303	9090602	404	254089	9090304	415	254188	9090040	404	254200	9090936	379	254123	9090052
12	254162	9090626	420	254172	9090556	420	254290	9090604	405	254079	9090304	409	254175	9090036	402	254193	9090956	377	254127	9090044
13	254161	9090628	420	254168	9090544	421	254281	9090604	408	254104	9090282	415	254177	9090038	403	254203	9090974	375	254121	9090052
14	254161	9090634	420	254176	9090536	417	254287	9090618	411	254095	9090238	419	254151	9090074	413	254213	9091002	371	254115	9090090
15	254161	9090644	419	254183	9090526	417	254293	9090624	407	254078	9090246	412	254123	9090052	419	254230	9091028	365	254165	9090532
16	254165	9090650	421	254191	9090518	418	254295	9090638	409	254098	9090228	418	254127	9090044	417	254254	9091066	357	254311	9090554
17	254166	9090660	420	254206	9090522	419	254303	9090642	407	254127	9090218	420	254121	9090052	417	254282	9091144	352	254310	9090536
18	254165	9090670	419	254213	9090524	423	254302	9090654	407	254108	9090200	419	254115	9090090	421	254273	9091172	346	254312	9090520
19	254161	9090666	418	254223	9090530	421	254305	9090656	403	254113	9090166	422	254165	9090532	421	254326	9091092	338	254317	9090512
20	254176	9090660	423	254229	9090526	419	254315	9090658	400	254112	9090144	422	254311	9090554	394	254533	9090724	346	254321	9090494
21	254176	9090616	426	254228	9090514	417	254308	9090666	395	254128	9090086	423	254310	9090536	392	254532	9090682	342	254317	9090476
22	254174	9090608	425	254231	9090510	412	254324	9090664	387	254160	9090094	422	254312	9090520	391	254535	9090660	338	254306	9090464
23	254170	9090602	424	254234	9090514	411	254337	9090646	386	254203	9090106	410	254321	9090512	390	254544	9090630	333	254288	9090438
24	254163	9090600	424	254244	9090516	406	254348	9090658	384	254202	9090112	407	254321	9090494	385	254545	9090594	327	254294	9090436
25	254161	9090586	424	254243	9090520	407	254344	9090646	384	254204	9090078	408	254317	9090476	381	254551	9090568	324	254308	9090436

Fonte: Excel 2010

A parte mais importante na geração desses mapas é a escolha do método de interpolação, pois métodos diferentes geram resultados diferentes, podendo conduzir a conclusões diversas. Utilizou-se para confecção dos mapas planialtimétricos a o método da Krigagem Ordinária.

Ao definir o método e opções, gera-se um arquivo da malha de amostragem com os dados dispostos regularmente, com a extensão .GRD.

Figura 31 – Exemplo de malha gerada a partir do uso do software 9.0



Fonte: Surfer 9.0

4.3. AutoCad 2010

AutoCAD é um software do tipo CAD — computer aided design ou desenho auxiliado por computador - criado e comercializado pela Autodesk, Inc. desde 1982. É utilizado principalmente para a elaboração de peças de desenho técnico em duas dimensões (2D) e para criação de modelos tridimensionais (3D). Além dos desenhos técnicos, o software vem disponibilizando, em suas versões mais recentes, vários recursos para visualização em diversos formatos.

É amplamente utilizado em arquitetura, design de interiores, engenharia civil, engenharia mecânica, engenharia geográfica, engenharia elétrica e em vários outros ramos da indústria.

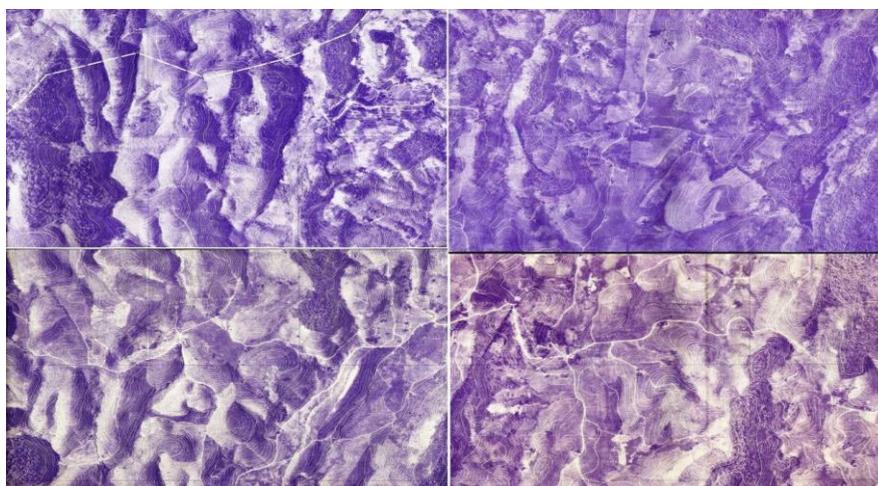
No presente trabalho, essa ferramenta computacional foi utilizada afim de suavizar e georeferenciar as curvas de níveis geradas a partir do SKETCHUP 8 Pro e também para gerar as curvas a partir dos mapas base (Ortofotocarta).

4.3.1. Metodologia do uso do software AutoCad 2010

Utilizamos a ferramenta AutoCad 2010 em conjunto tanto com o SKETCHUP PRO 8.0 como também para confeccionar as curvas de níveis a partir das imagens digitalizadas dos mapas bases da FIDEM.

Inicialmente fez-se as digitalizações dos mapas físicos disponibilizados pela Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife – FIDEM. Para a confecção de um mapa-base é necessárias 04 (quatro) dessas projeções ortogonais chamadas de Ortofotocarta, numa escala de 1: 10000, depois dispostas de forma lógica como pode ser constatada na figura 32, a seguir:

Figura 32 – Resultado da digitalização das ortofotocartas da região de Jussara.



Fonte: FIDEM - Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife, (1974).

Figura 33 – Legenda dos mapas utilizados da FIDEM

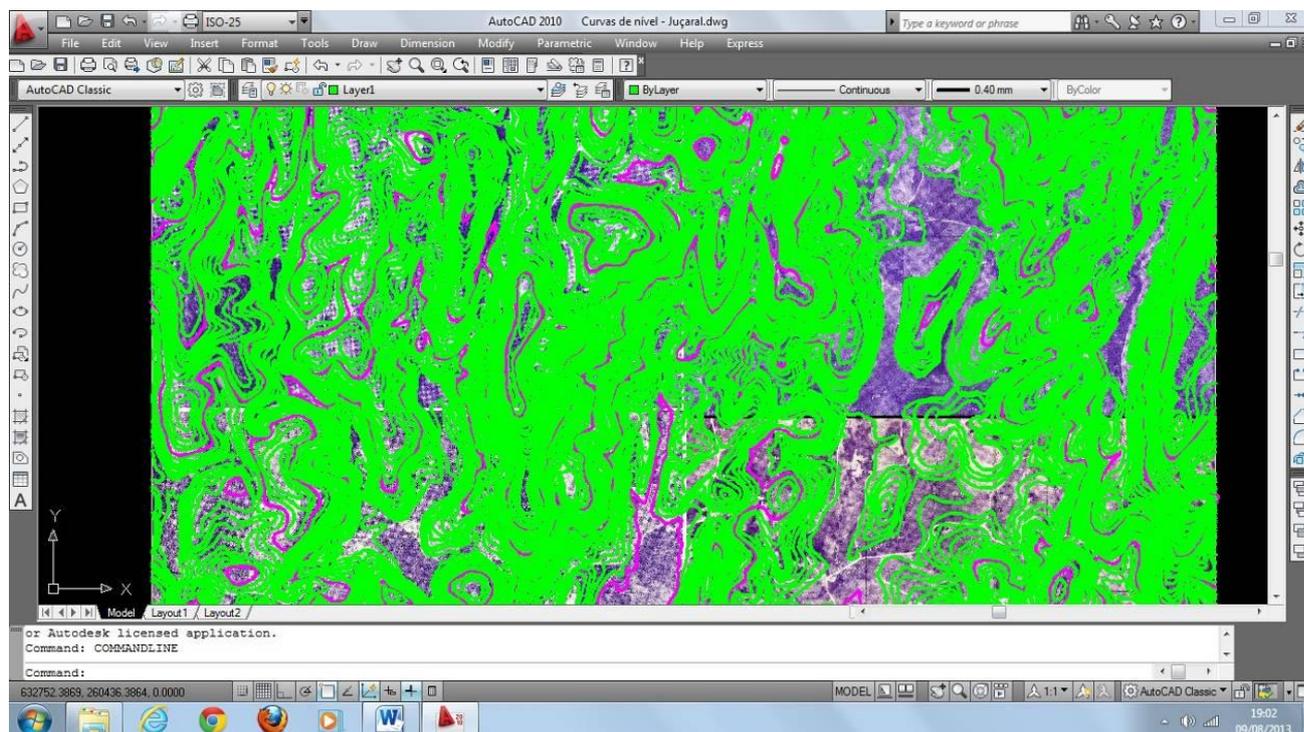


Fonte: FIDEM - Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife, (1974).

Nesta etapa foi importada a imagem gerada a partir da digitalização dos mapas bases para o AUTOCAD 2010, e iniciou-se o processo de confecção das curvas de nível digitando-se polilinhas sobre a imagem até completarmos toda a região de interesse.

Após esse processo, devemos, de acordo com as cotas das curvas de nível do mapa, incluir tais valores nas curvas desenhadas no AUTOCAD 2010. Como resultado, tivemos o seguinte resultado:

Figura 34 – Construção das curvas de nível no AUTOCAD 2010 a partir dos mapas da FIDEM



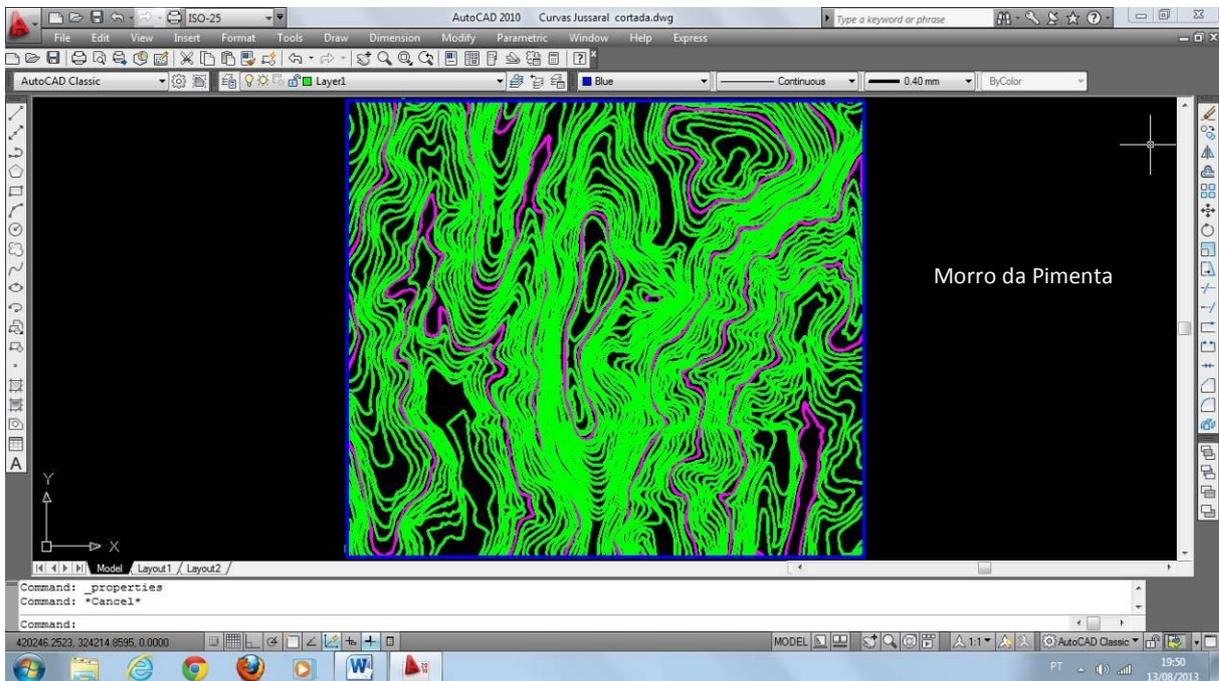
Fonte : AUTOCAD 2010

A princípio, para fornecer um resultado satisfatório dentro do objetivo inicial do trabalho, cobriu-se uma área relativamente grande em torno do maciço rochoso de interesse (Pedra da Pimenta), gerando-se um mapa de curvas de nível georeferenciadas conforme mostrado na figura 34.

Esse mapa tornou-se o mapa-base para comparação dos resultados obtidos nas outras metodologias utilizadas pois possui uma precisão considerada razoável dentro da etapa preliminar de avaliação de maciços.

Dessa forma fez-se as comparações dos volumes calculados com as outras metodologias com esse mapa-base definindo-se as variações em relação aos volumes determinados a partir das diferentes DTM's, considerando-se melhor o resultado que mais se aproxima do volume calculado por esse mapa-base.

Figura 35 – Curvas de nível geradas a partir da digitalização dos mapas da FIDEM

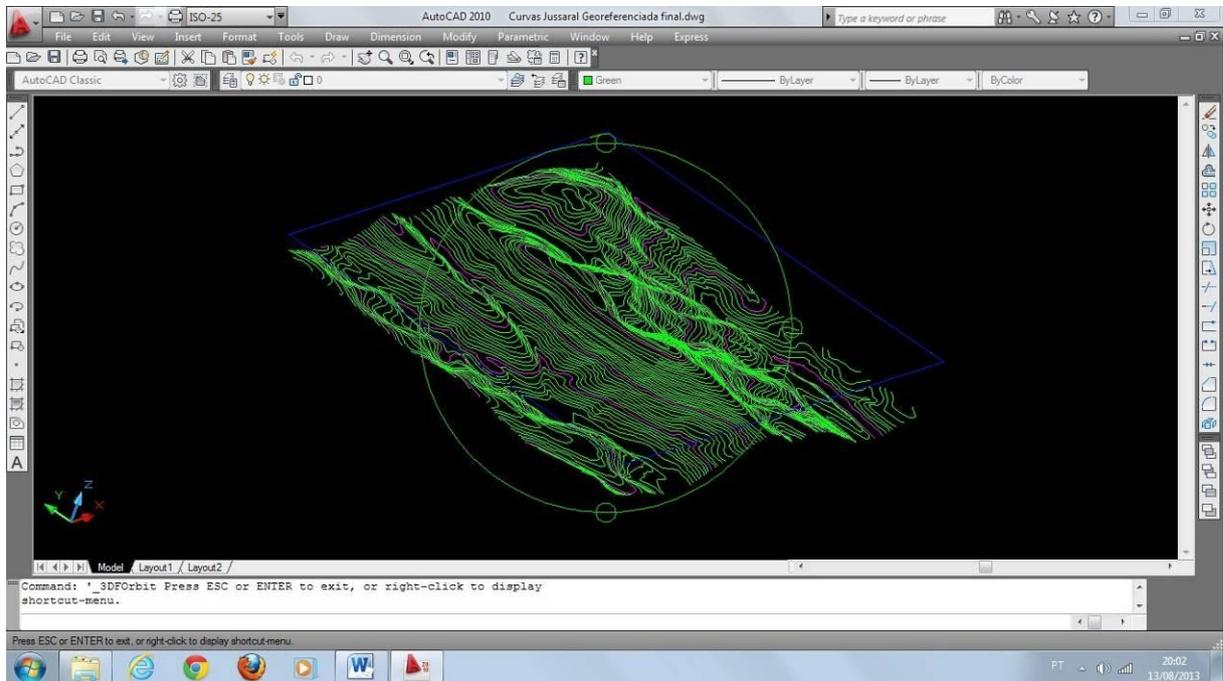


Fonte: AUTOCAD 2010

Para facilitar as próximas etapas de processamento computacional e comparação de resultados, restringiu-se a modelagem às curvas de nível referentes ao maciço rochoso e a uma região com cerca de 25 ha localizada junto ao denominado morro da Pimenta. Logo após a escolha da área para a modelagem, cada curva de nível restante foi cotada, recebendo o valor da altitude correspondente.

A partir deste ponto, a modelagem computacional já dá uma pequena amostra do resultado desejado. Ainda utilizando as ferramentas do AUTOCAD 2010, é possível visualizar em 3D, as curvas de nível cotadas em uma imagem espacial na figura 35.

Figura 36 – Área do maciço rochoso para a modelagem computacional



Fonte: AUTOCAD 2010

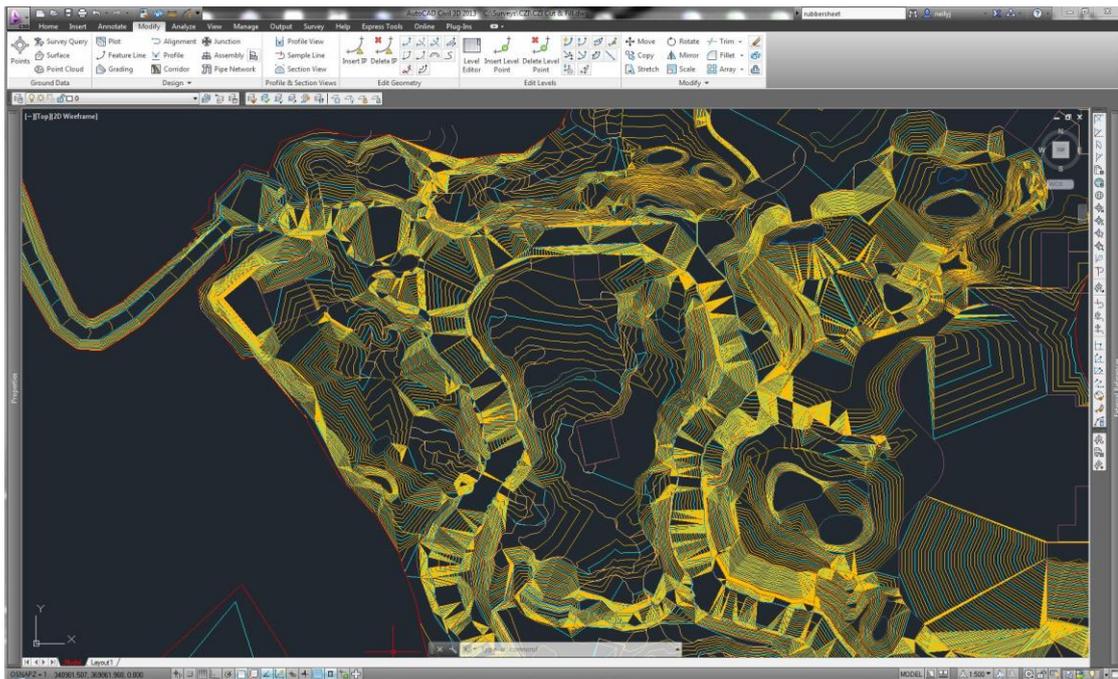
4.4. AUTOCAD CIVIL 3D 2014

O AutoCAD® Civil 3D® é um software desenvolvido pela Autodesk, Inc. O AutoCAD® Civil 3D® é uma poderosa plataforma e ferramenta técnica que foi desenvolvida na plataforma do AutoCAD Map 3D que, por sua vez, foi desenvolvido na plataforma do AutoCAD. Sendo assim, o AutoCAD Civil 3D possui todas as funcionalidades do software CAD, gera arquivos no formato DWG e também conta com as funcionalidades de geoprocessamento do AutoCAD Map 3D.

O software AutoCAD® Civil 3D® pode ser utilizado para a realização de projetos de diversas disciplinas de projeto, como por exemplo: geometria viária, drenagem, paisagismo, redes de esgoto, terraplanagem, projetos geométricos de rodovias, terraplanagem, loteamentos, redes de tubulações e topografia entre outras.

No presente trabalho utilizou-se esta ferramenta computacional para ajuste e suavização das curvas de nível importadas do software SketchUp Pro 8, para em seguida utilizá-las para confecção das *wireframes* no software DATAMINE STUDIO 3.0.

Figura 37 – Figura ilustrativa da interface do Software AutoCAD® Civil 3D®

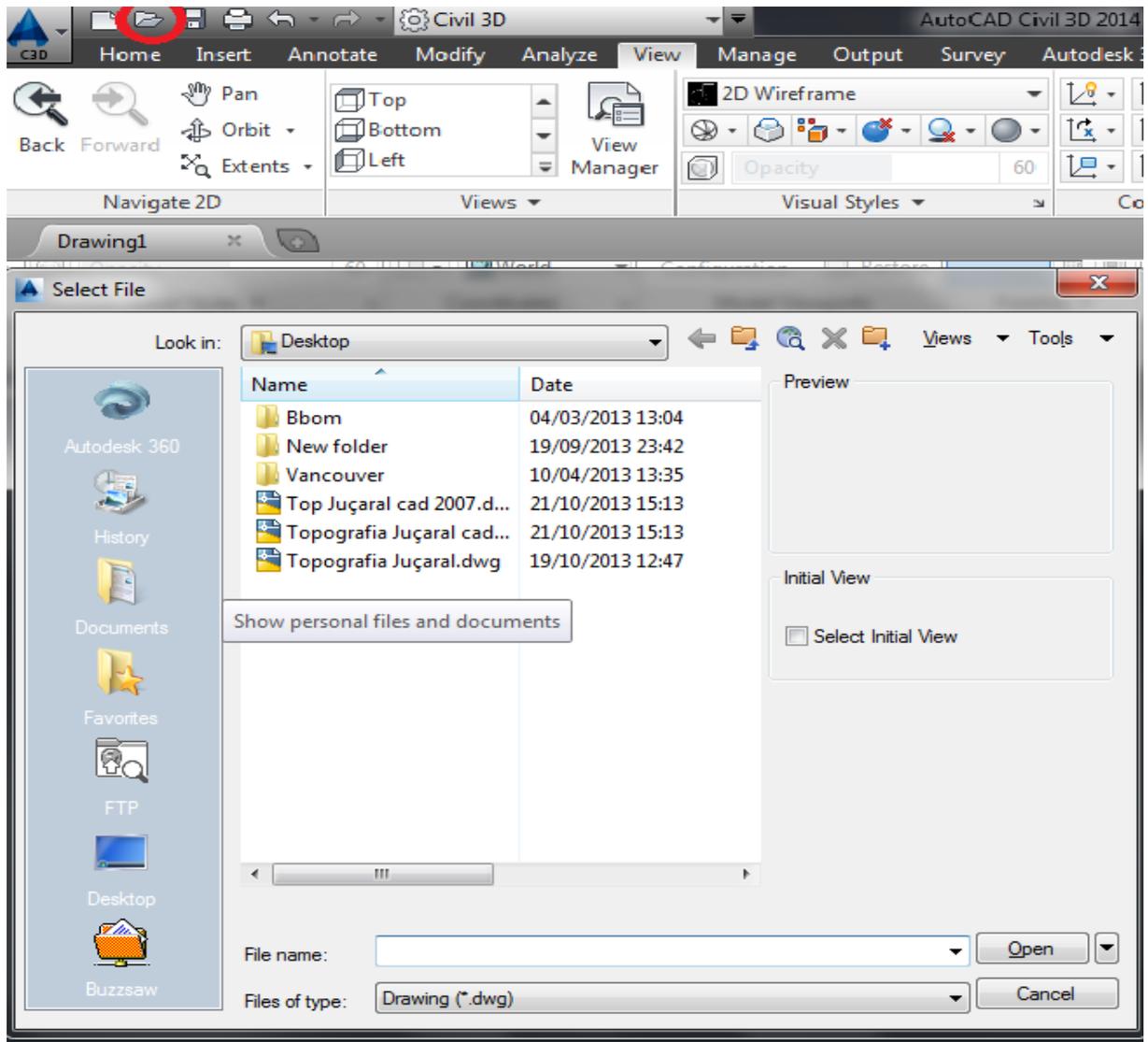


Fonte: AutoCAD® Civil 3D®

4.4.1. Metodologia do uso do software AUTOCAD CIVIL 3D 2014

A primeira etapa da utilização do AutoCad Civil 3D é a exportação das curvas geradas no software SketchUp Pro 8 no formato “.dwg”. Para tanto, utiliza-se o comando “Open” e seleciona-se o arquivo desejado.

Figura 38 – Ferramenta “Open” e janela “Select File” na interface do AutoCad Civil 3D

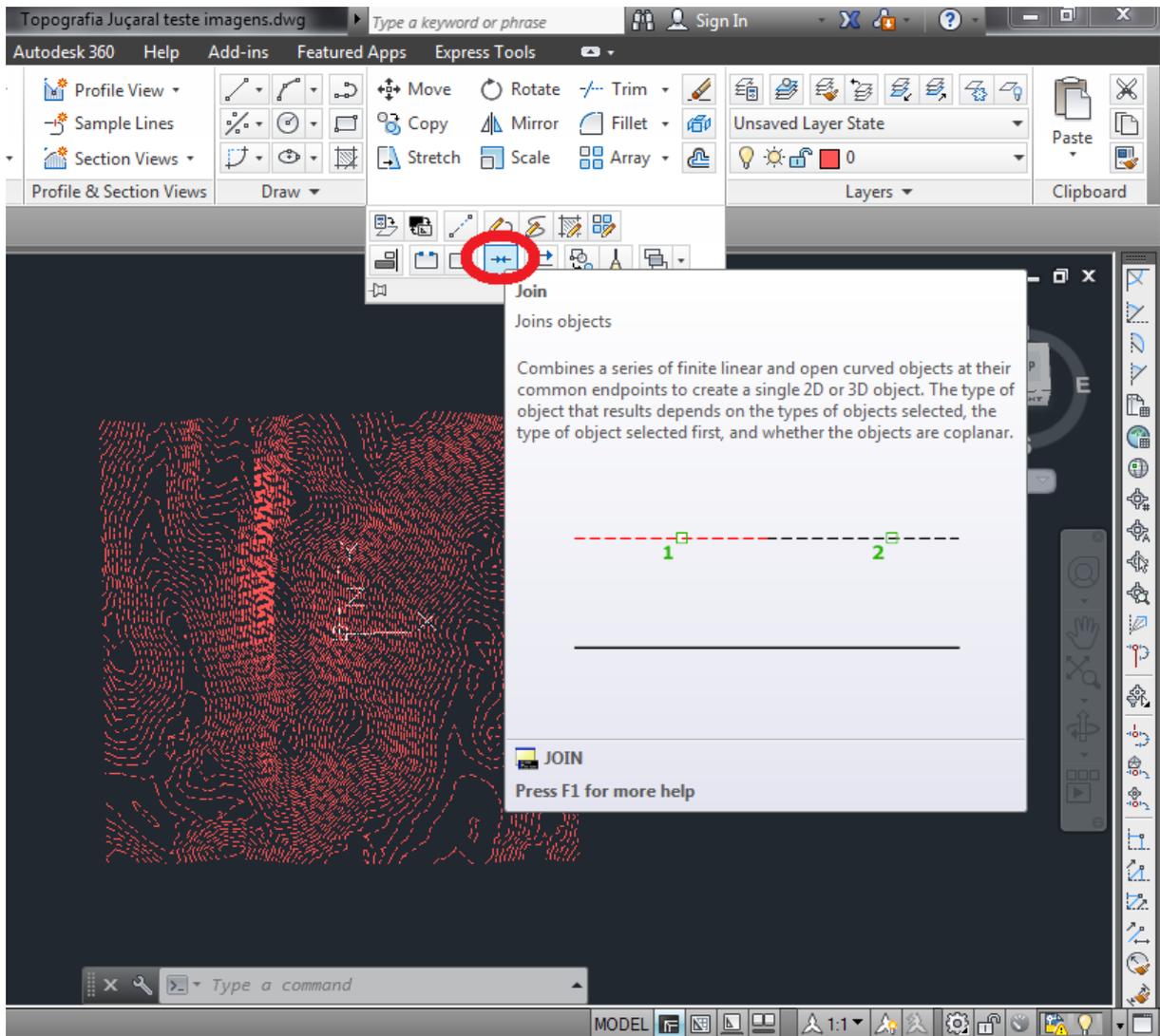


Fonte: AutoCad Civil 3D 2014

Após abrir o arquivo no AutoCad Civil 3D, observa-se que as curvas de nível estão “partidas” em diversos “pedaços”. Para uni-las utiliza-se a ferramenta “Join” para então suaviza-las como “Polylines”.

O primeiro passo dessa etapa é selecionar todas as curvas de nível para então clicar no item “Join”.

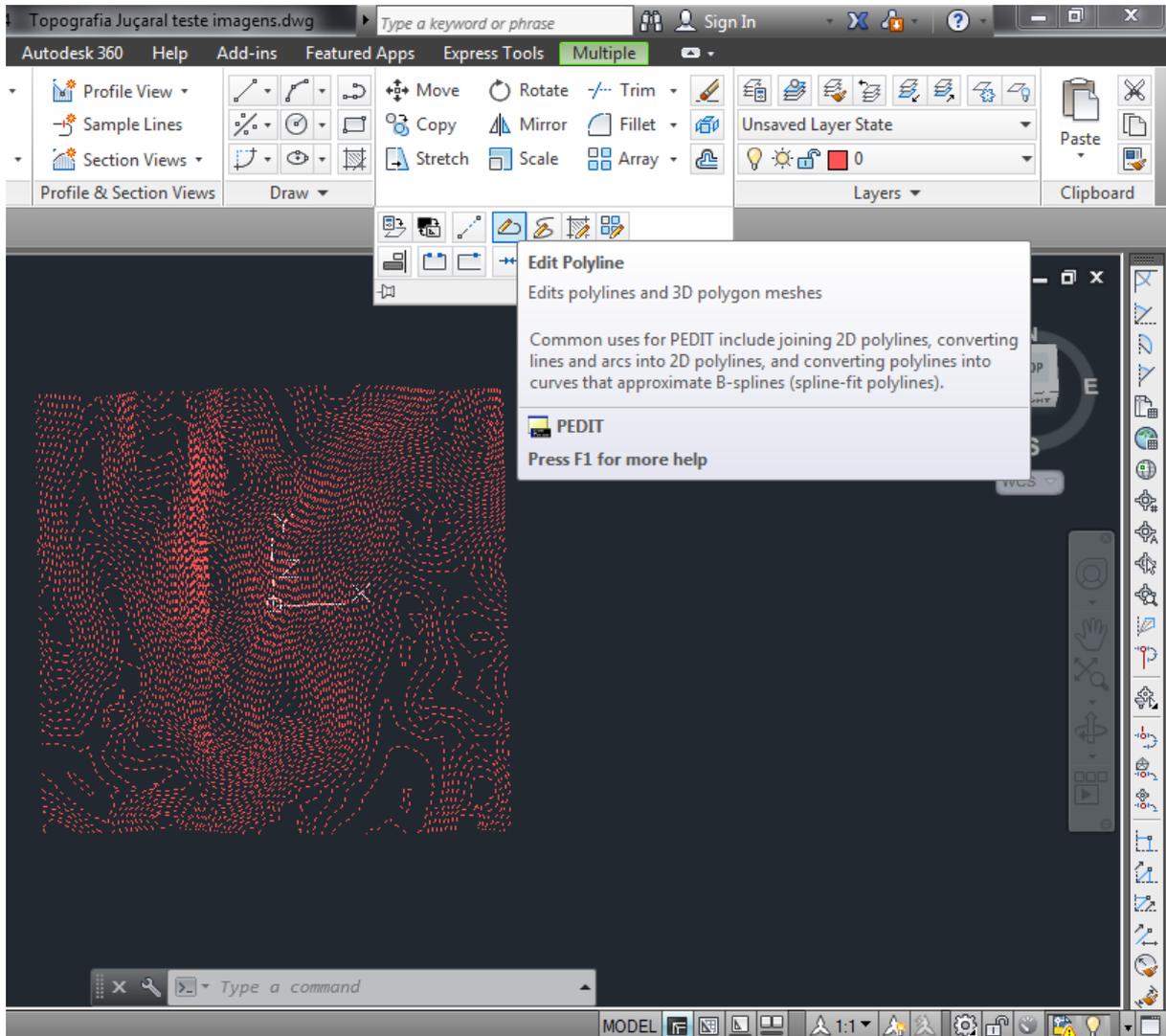
Figura 39 – Ferramenta “Join” na interface do AutoCad Civil 3D



Fonte: AutoCad Civil 3D 2014

Depois de realizado o procedimento para unir e tornar as diversas curvas de nível em “Polylines” executa-se a suavização das curvas através do comando “Edit Polyline”.

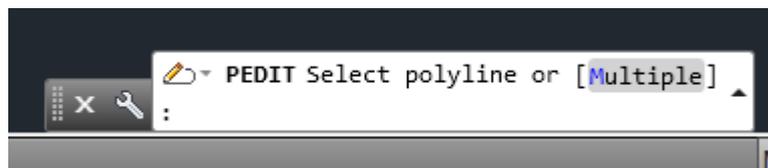
Figura 40 – Ferramenta “Edit Polyline” na interface do AutoCad Civil 3D



Fonte: AutoCad Civil 3D 2014

Em seguida o software oferece a opção para selecionar uma única *polyline* ou múltiplas *polylines*. Digita-se “M” para selecionar todas as *polylines* referentes as curvas de níveis.

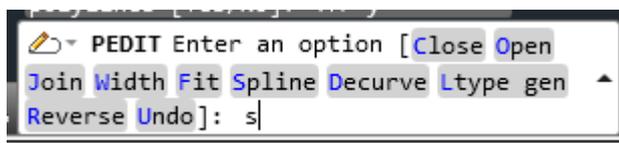
Figura 41 – Utilização da ferramenta “Edit Polyline” para seleção de múltiplas *polylines*.



Fonte: AutoCad Civil 3D 2014

Depois de selecionar as múltiplas *polylines* o software nos oferecerá algumas opções como: *close*, *open*, *join*, etc. Utiliza-se a opção *Spline* digitando “S” no prompt de comando.

Figura 42 – Utilização da ferramenta “Spline” para suavizar as curvas de níveis



Fonte: AutoCad Civil 3D 2014

Feito isso, as curvas de níveis estão prontas para serem exportadas para o software DATAMINE STUDIO 3.0 para fins de construção das devidas *wireframes*.

Figura 43 – Antes e depois da suavização através da utilização das ferramentas do AutoCad Civil 3D



Fonte: AutoCad Civil 3D

4.5. DATAMINE STUDIO 3.0

O grupo DATAMINE é uma empresa globalizada dedicada exclusivamente ao desenvolvimento, distribuição e suporte à aplicação de *software* de mineração. A *holding* do grupo é a Mineral Industries Computing Ltd., com sede em Londres, fundada em 1981.

O DATAMINE proporciona um conjunto de comandos para entrada e manipulação de dados associados há um amplo nível de capacidades estatísticas, gráficas e de processamento, especialmente projetados para dados geológicos e de mineração, desde o manuseio de dados iniciais até a programação de produção, planejamento e acompanhamento da lavra.

A principal área de atuação da DATAMINE é o Ciclo de Planejamento de Mina, e nessa área tem provido soluções para modelagem geométricas das jazidas minerais.

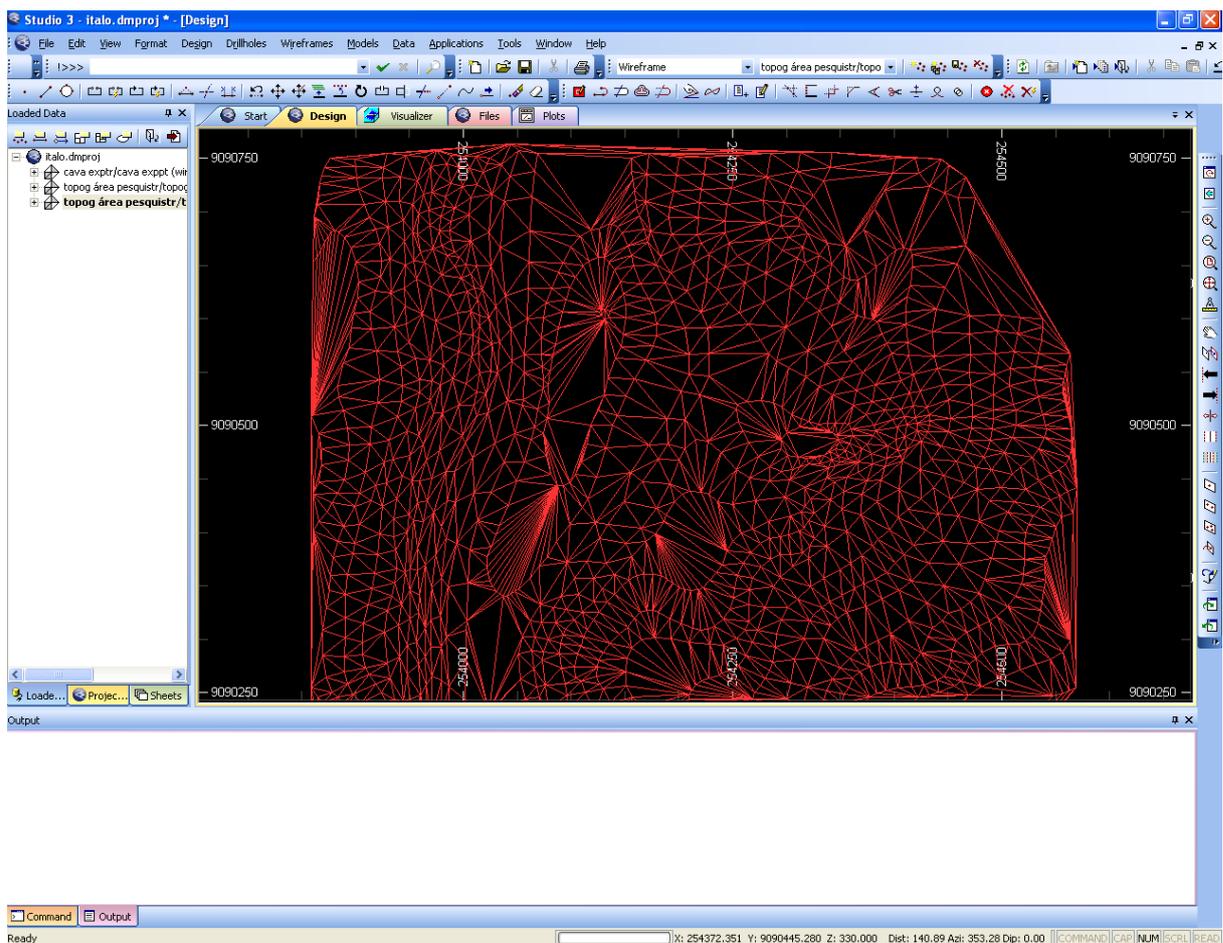
Algumas das principais aplicações do *software* são:

- Estatística de Exploração Geológica
- Geoestatística aperfeiçoada
- Simulação Condicional
- Transformação de corpos de minério dobrados
- Visão *Stereonet* e *Analyzer*
- Modelagem de Superfície *Wireframe*
- Modelagem de Blocos do corpo de minério
- Desenho de Cava de Céu Aberto
- Desenho de Mina Subterrânea
- Desenho de *Blast Ring*
- *Mineable Reserves Optimizer*
- Planejamento de Curto Prazo de Mina incluindo *Blasthole Layout*

4.5.1. Metodologia do uso do software DATAMINE STUDIO 3.0

O primeiro passo do uso do *software* é a exportação dos arquivos das curvas de níveis geradas a partir do Surfer 9.0 e do SketchUp Pro 8. Esse arquivos são importados no formato “dwg.”. A partir daí é iniciada a modelagem das superfícies. Normalmente, essa modelagem é feita através de Modelos Digitais de Terreno (DTM). As superfícies foram modeladas como DTMs por uma malha de triângulos, criada a partir de pontos tridimensionais coletados através da superfície das curvas de níveis exportadas.

Figura 44 - Malha de triângulos modelada a partir do DATAMINE STUDIO 3.0

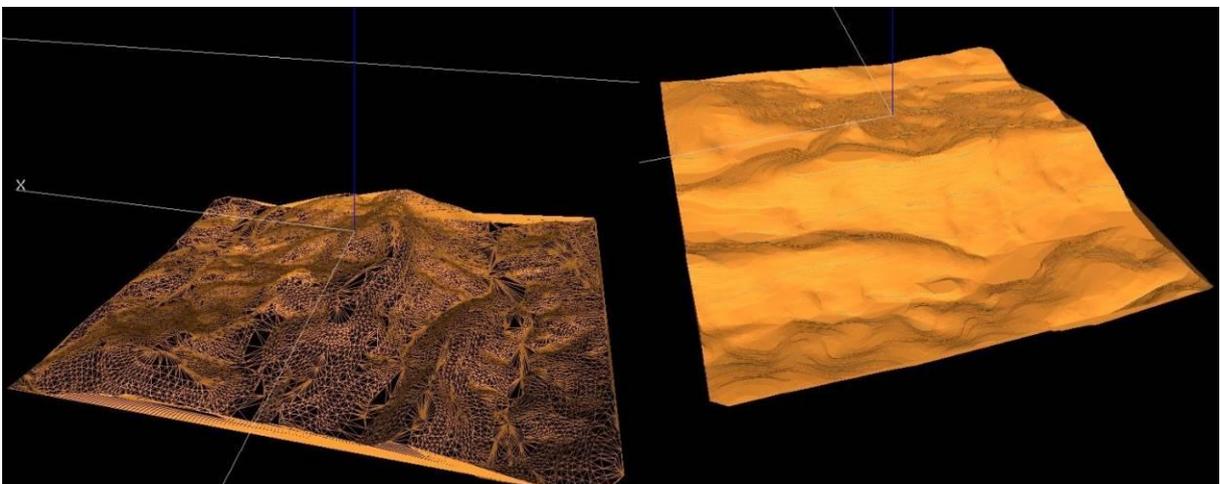


Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

Em seguida inicia-se o processo de modelagem geométrica da jazida partindo da malha triangulada gerada. O termo técnico para definir este tipo de modelo é *wireframe*. A partir da *wireframe*, o volume definido pelo contorno pode ser calculado com precisão. O modelo de *wireframe* representa a forma geométrica dos corpos e também permite a criação de modelo de blocos.

Os modelos do tipo *wireframe* representam apenas a superfície de objetos (ou corpos minerais).

Figura 45 – Superfície gerada a partir de uma wireframe



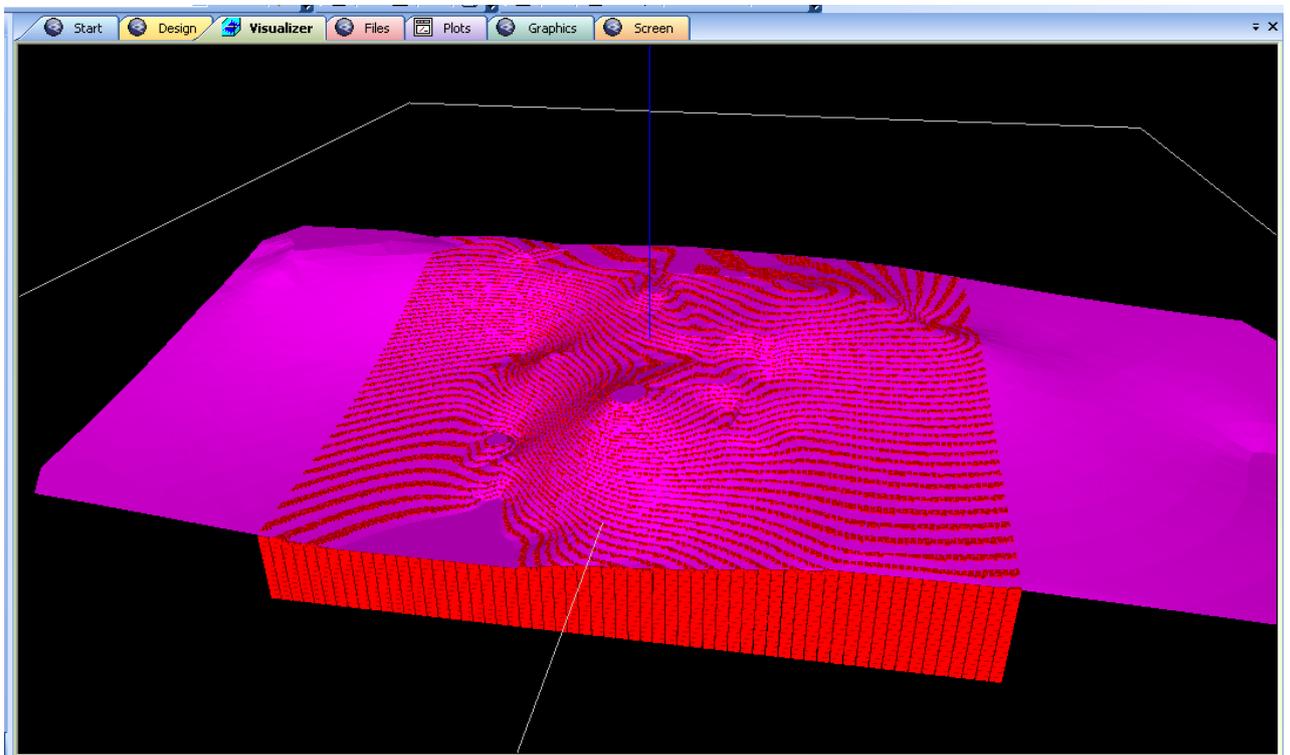
Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

Uma vez modeladas as estruturas, o DATAMINE pode converter as *wireframes* em um modelo de bloco. As dimensões ótimas dos blocos individuais dependem de uma série de fatores (Yamamoto, 2001). Um modelo de blocos com dimensões regulares, que pode ser subdividido em blocos menores nos limites do corpo mineral, foi inicialmente proposto por Henley & Stokes (1998). O sistema DATAMINE utiliza este tipo de modelo em conjunto com avançados sistemas de controle de subdivisão e otimização das dimensões dos blocos e sub-blocos, gerando uma modelagem detalhada da jazida.

Resumidamente, o *software* "preenche" o modelo *wireframe* com blocos e sub-blocos, de modo a garantir que o modelo de blocos final seja representativo em relação a *wireframe* e permita a modelagem das variáveis dentro do modelo.

Após gradear o modelo de blocos podemos então estimar o volume do maciço rochoso através da quantidade de blocos de volume conhecido que estão incluídos no espaço correspondente à jazida mineral ou que estão posicionados dentro da cava projetada.

Figura 46 – Modelo de blocos em contato com a superfície topográfica



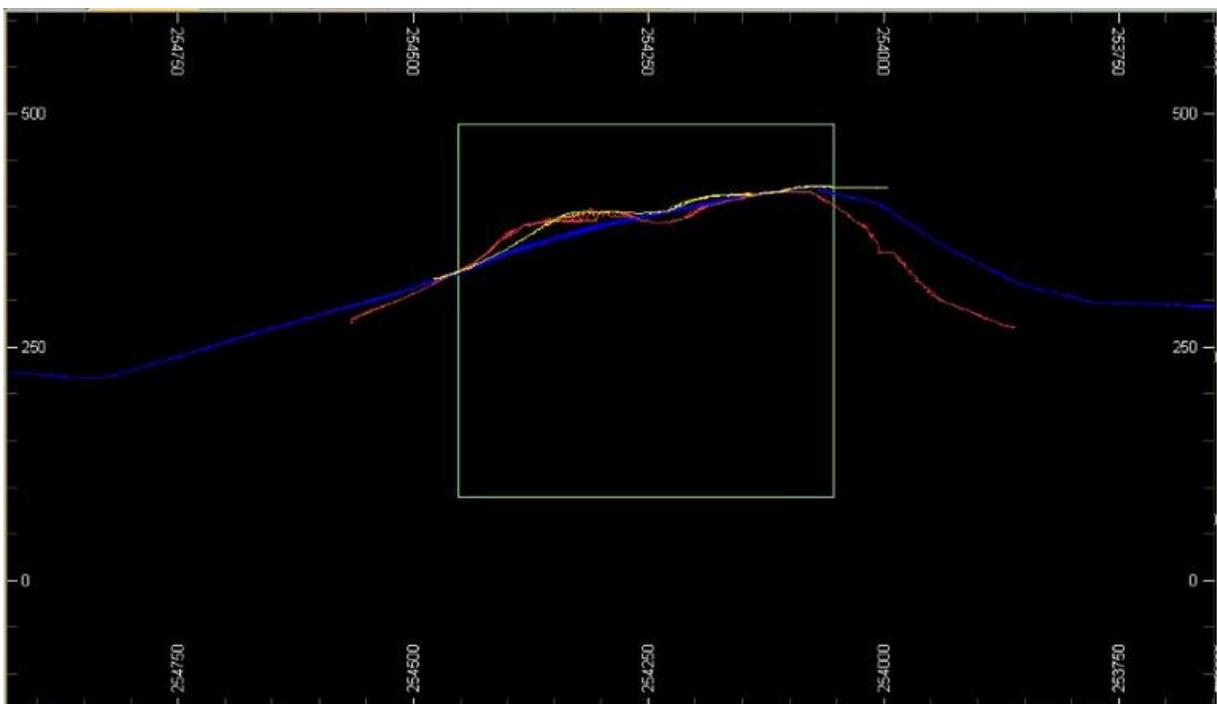
Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

4.6. Definição da área base

Para fins de comparação dos volumes calculados através dos diferentes modelos criados delimitamos uma área hipotética a qual foi denominada área base. Esta área base foi desenhada aleatoriamente de forma a englobar um local onde exista informação da topografia das 3 metodologias utilizadas para geração do modelo digital do terreno (DTM).

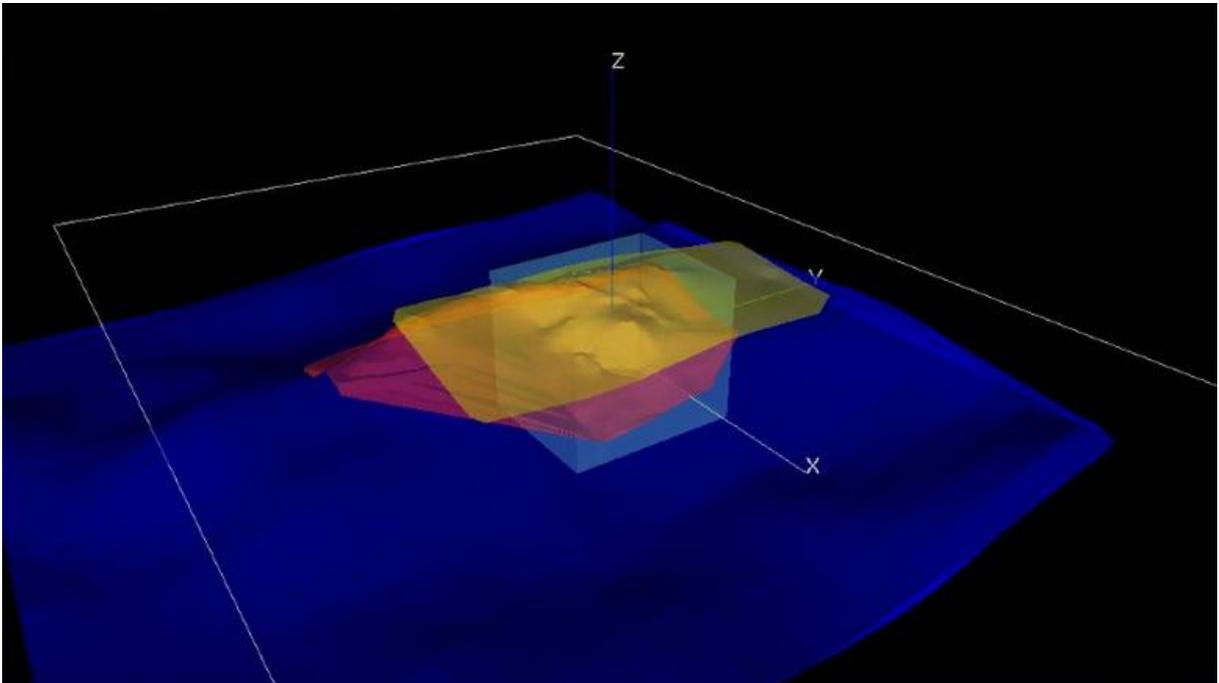
As figuras 47 e 48 ilustram a área base em contato com as DTMs geradas nas 3 metodologias desenvolvidas na dissertação em seção vertical norte-sul e em perspectiva espacial. Após definição da área base o volume de maciço rochoso foi determinado a partir de um DATUM estabelecido na cota altimétrica de 250 m.

Figura 47 – Área base interceptando as DTMs referentes a topografia do terreno gerada pelas diferentes metodologias aplicas



Fonte: Datamine Studio 3.0

Figura 48 – Área base interceptando as DTMs referentes a topografia do terreno gerada pelas diferentes metodologias aplicadas



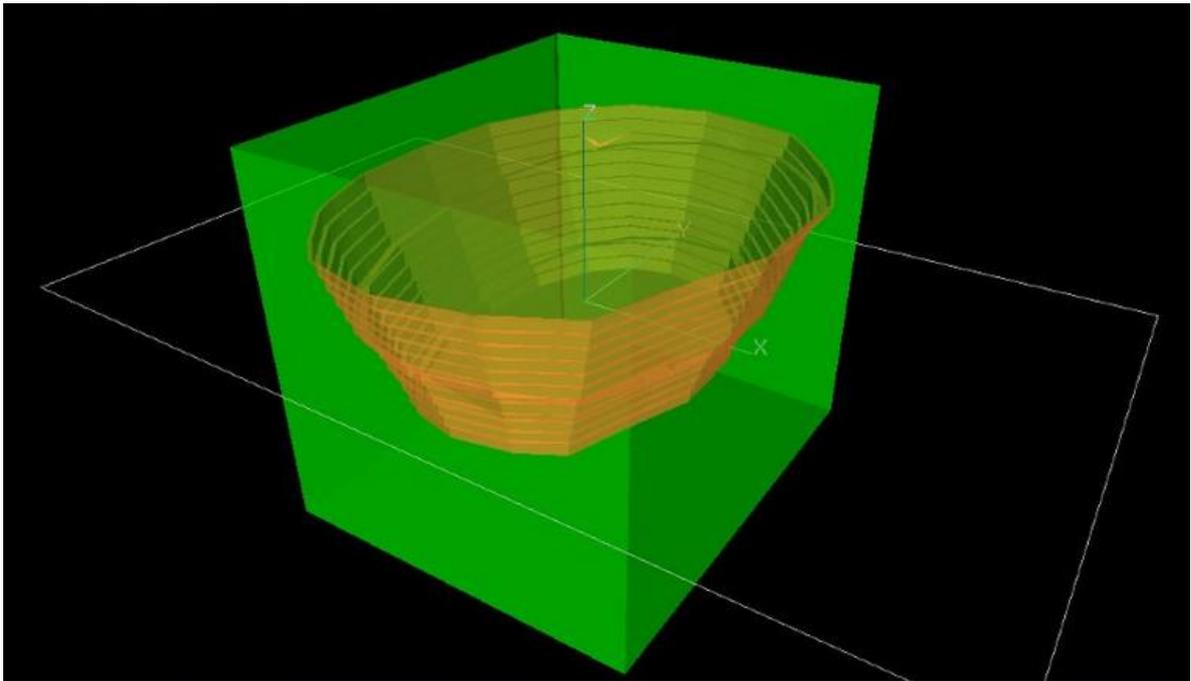
Fonte: Datamine Studio 3.0

4.7. Definição da cava experimental

A cava experimental foi gerada a partir da utilização de ferramentas de *Pit Design* do Datamine Studio 3.0 utilizando os comando para construção de cavas no menu *Applications*.

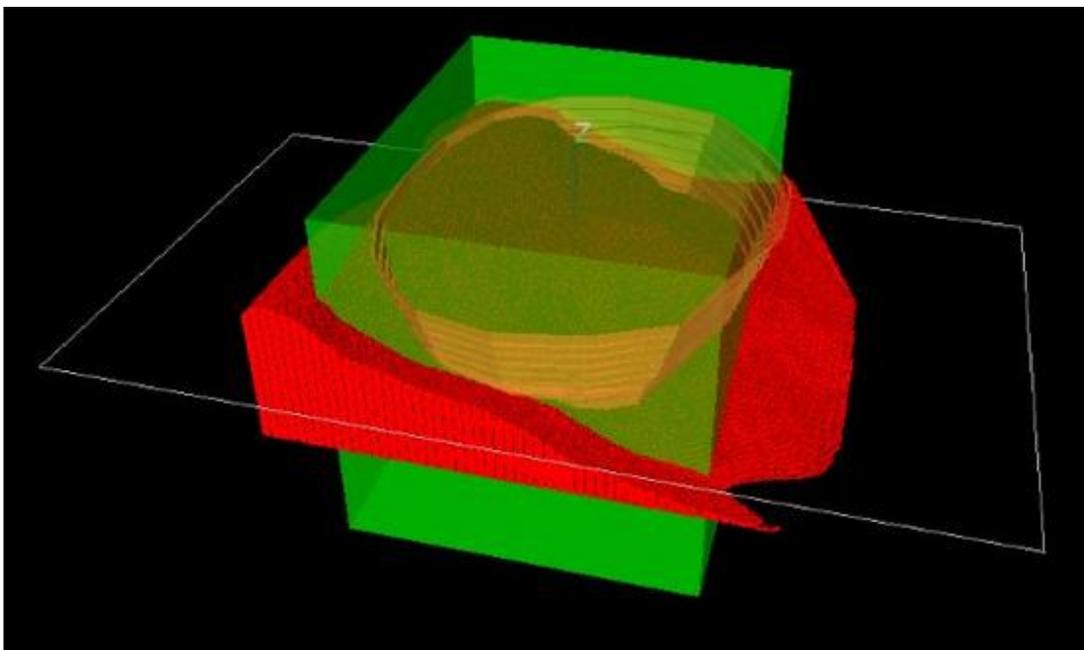
A cava foi projetada para estar locada dentro da área base objetivando simular o volume do maciço rochoso passível de ser lavrado. As figuras 45 e 46 ilustram a cava gerada no DATAMINE STUDIO 3.0 e sua posição espacial em relação à área base e modelo de blocos do maciço rochoso.

Figura 49 – Cava experimental dentro da área base



Fonte : Datamine Studio 3.0

Figura 50 – Cava experimental dentro do modelo de blocos limitada pela área base



Fonte : Datamine Studio 3.0

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo abordaremos os resultados obtidos através dos métodos aplicados e descritos no capítulo anterior referente à descrição da metodologia utilizada. A partir destes métodos foram criados três modelos digitais de terreno (DTM's) distintos de *wireframes* da topografia do terreno referente ao nosso estudo de caso.

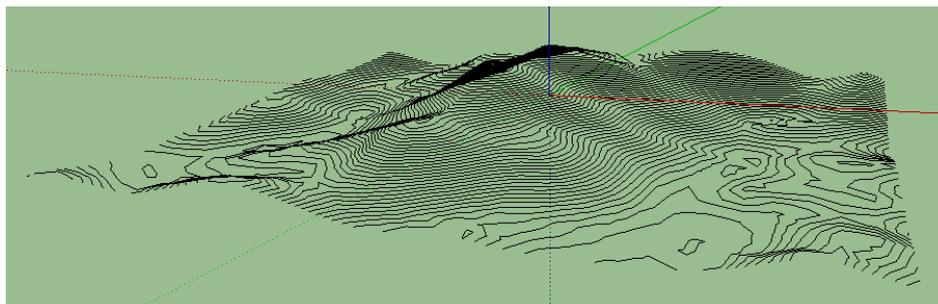
Tomou-se como referência o modelo gerado a partir da digitalização das ortofotocartas pelo fato dos dados serem mais consistentes.

Os resultados obtidos foram gerados dentro de uma área limitada, que se definiu como área base, para fim da comparação entre as diferentes metodologias aplicadas para o devido cálculo dos diversos volumes gerados a partir das respectivas modelagens de blocos.

5.1. Modelo 1 – SketchUp Pro 8

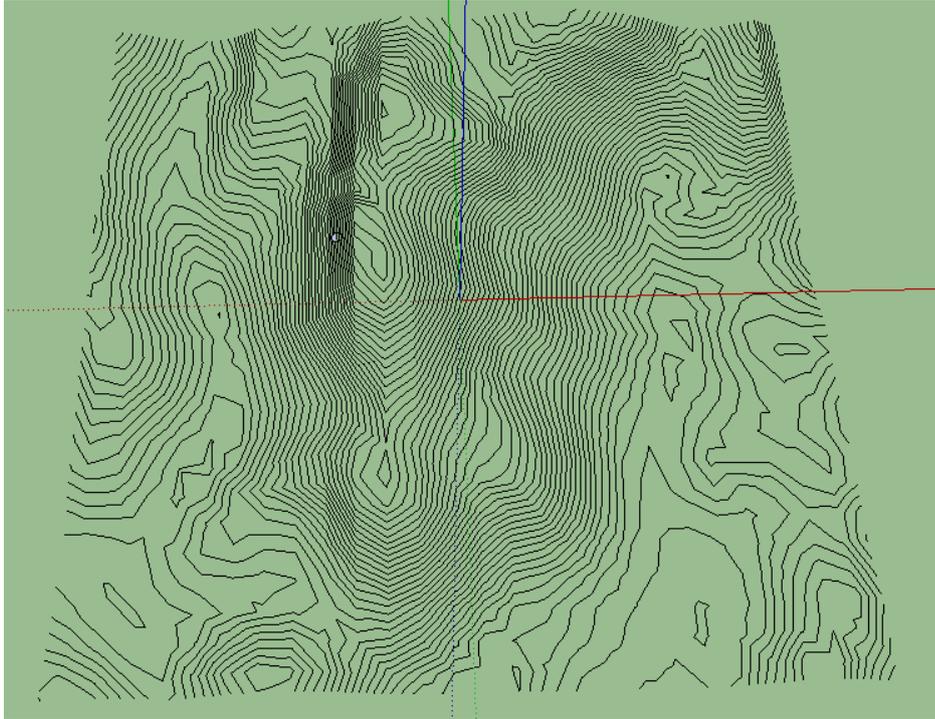
As curvas de nível geradas através da utilização do *software* SketchUp Pro 8 apresentam uma confiabilidade relativamente boa. As curvas geradas foram espaçadas de 5 em 5 metros e o resultado obtido está nas figuras 51 e 52.

Figura 51 – Superfície topográfica gerada a partir do SketchUp Pro 8



Fonte: SketchUp Pro 8

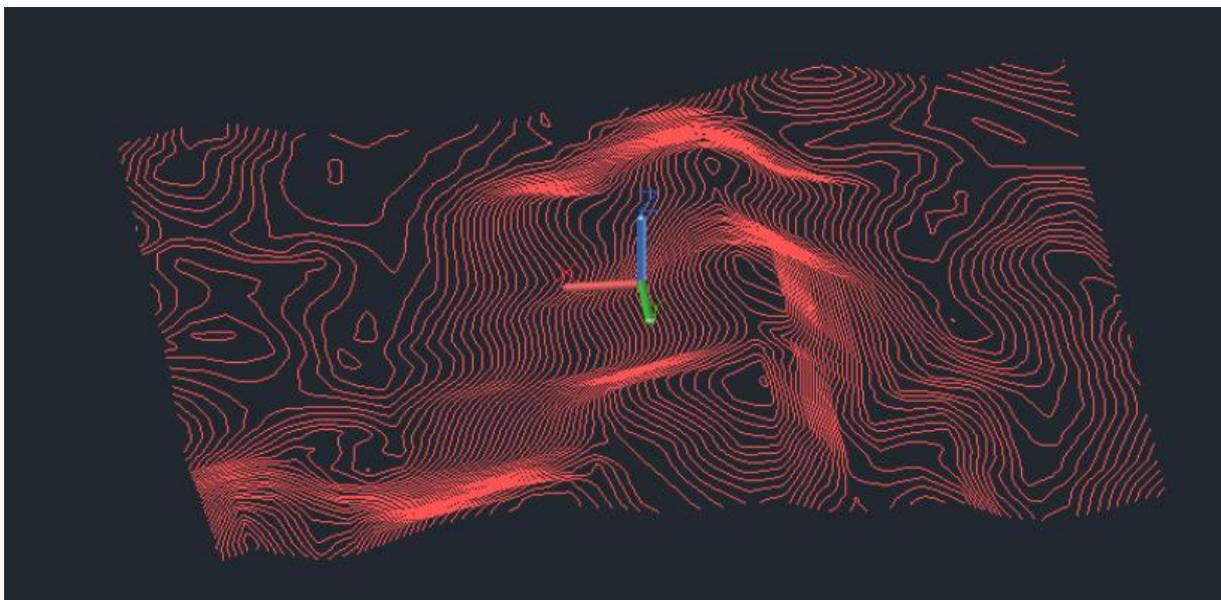
Figura 52 – Superfície topográfica gerada a partir do SketchUp Pro 8



Fonte: SketchUp Pro 8

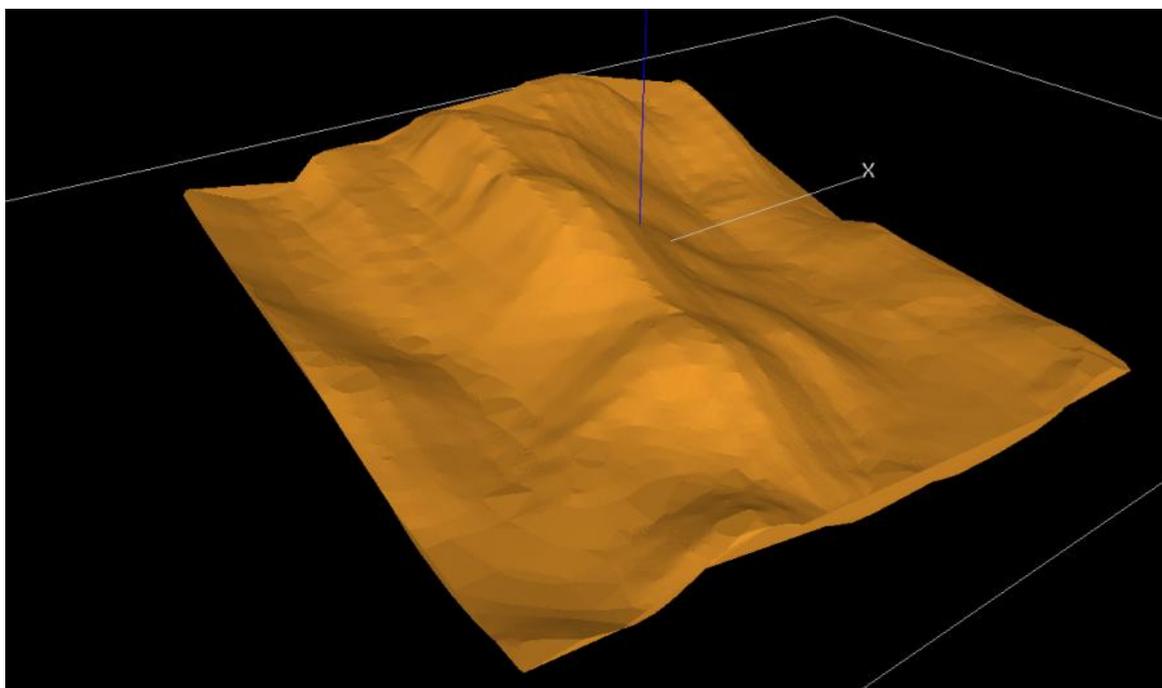
A partir desse modelo topográfico em 3D foi feita a importação das curvas de nível para o AutoCad Civil 3D com o objetivo de ajustar e suavizá-las (figura 53) a fim de então exportá-las para o DATAMINE STUDIO onde foi desenvolvido o Modelo Digital de Terreno (DTM) correspondente a topografia da área (figura 54).

Figura 53 – Superfície topográfica com as curvas de nível suavizadas a partir do uso do AutoCad Civil 3D



Fonte: AutoCad Civil 3D

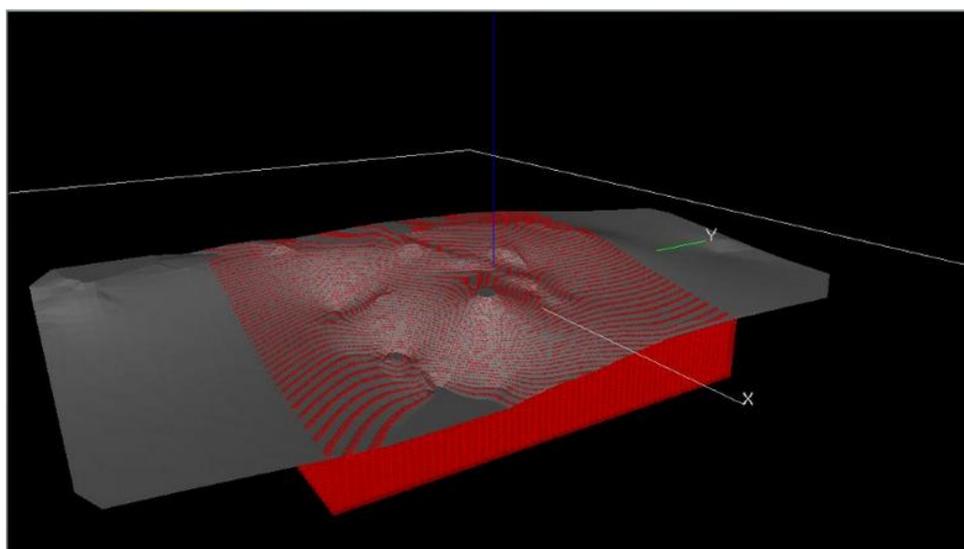
Figura 54 – DTM correspondente a topografia do terreno da área gerada a partir do DATAMINE



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

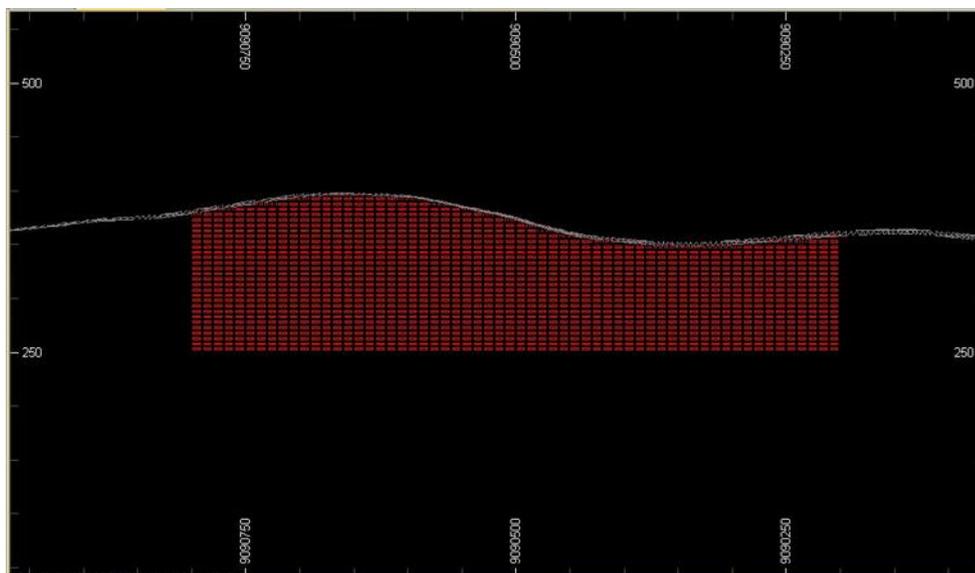
A partir da DTM correspondente a topografia do terreno da área de interesse, gerou-se o modelo de blocos dentro da área base e da cava experimental descritas no capítulo anterior a partir do DATUM correspondente à cota altimétrica 250 m para então calcular-se o volume do maciço rochoso. As figuras 55 e 56 a seguir mostram os modelos de blocos resultantes da metodologia aplicada.

Figura 55 – Modelo de blocos gerado para dados do SketchUp Pro 8.0



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

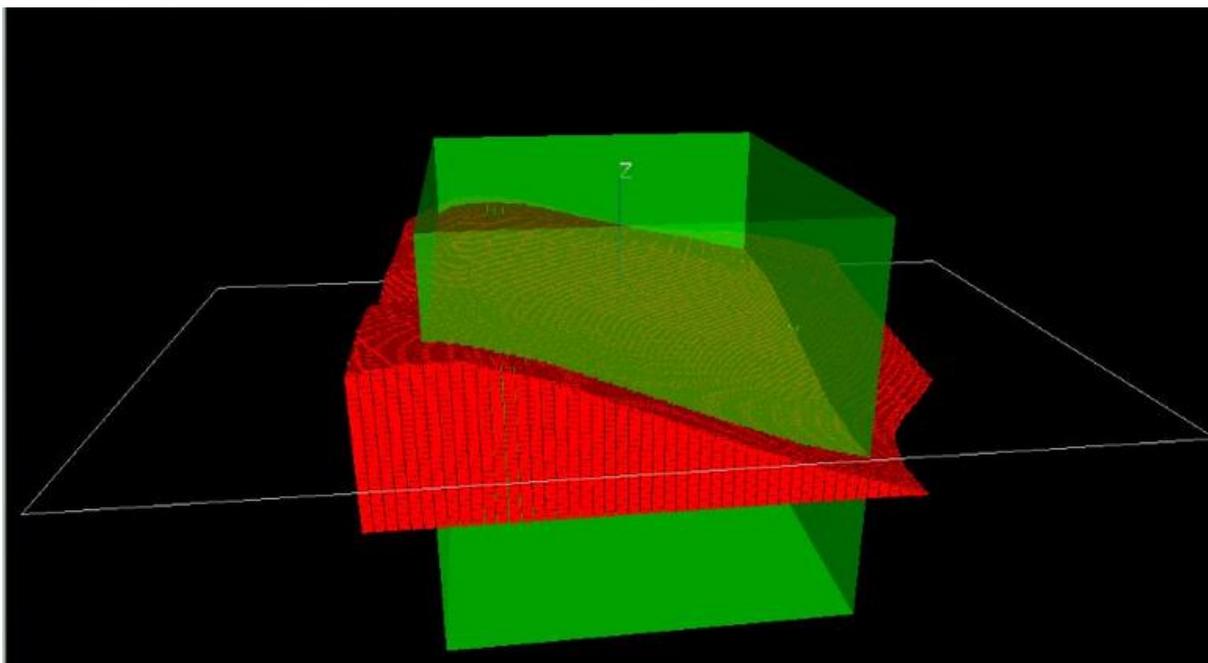
Figura 56 – Vista em perfil de um plano Norte-Sul do modelo de blocos e topografia



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

Esse modelo de blocos foi associado à área base para fins de calcular-se o volume de blocos dentro da área base e conseqüentemente o volume de maciço rochoso disponível a partir da cota altimétrica de 250 m (DATUM escolhido). A figura 57 mostra essa operação realizada no DATAMINE STUDIO 3.0.

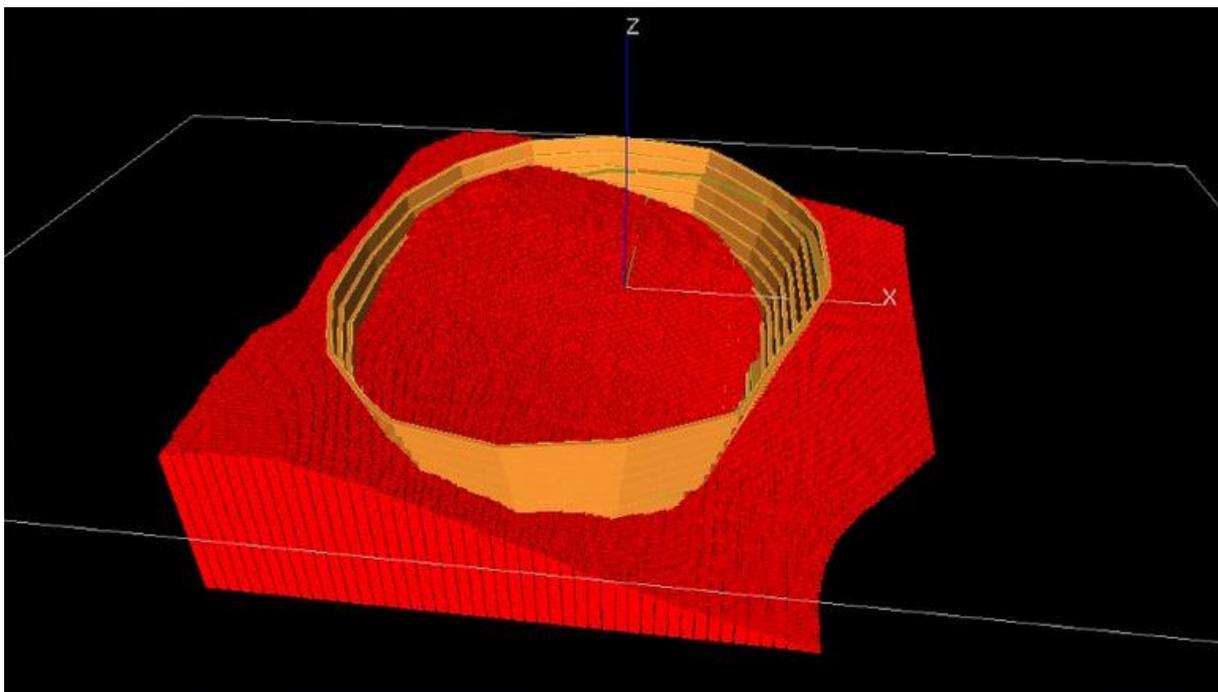
Figura 57 – Modelo de blocos em contato com a área base



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

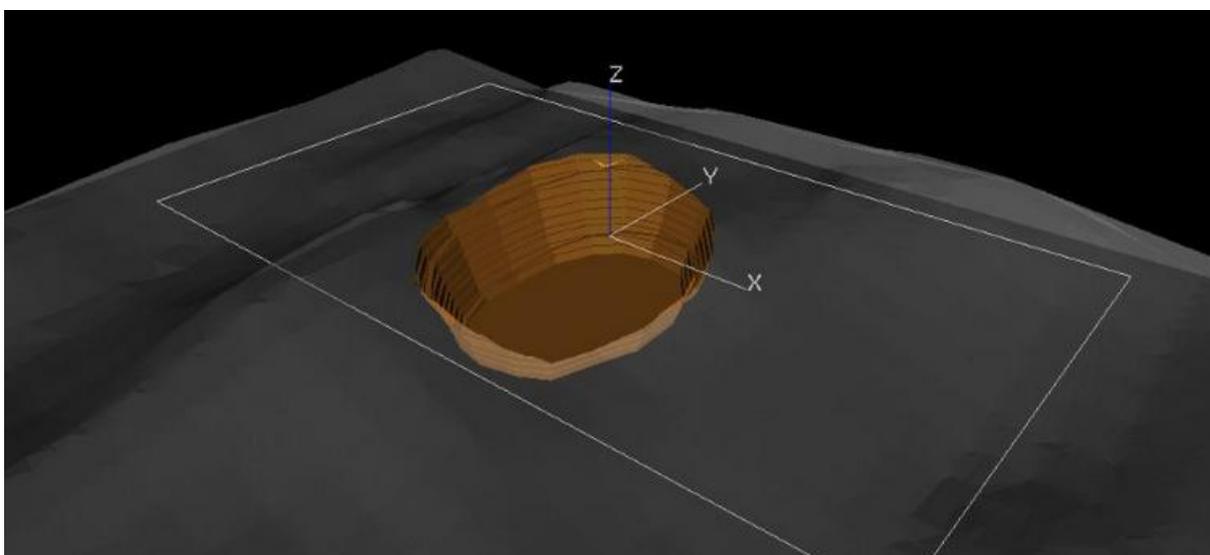
Utilizando-se também o DATAMINE STUDIO 3.0 o mesmo modelo de blocos foi associado à DTM da cava experimental com intuito de possibilitar o cálculo do volume de blocos acima da DTM da cava experimental o que permite a definição das reservas mineráveis na cava experimental, conforme é mostrado nas figuras 58 e 59.

Figura 58 – Modelo de blocos em contato com cava experimental



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

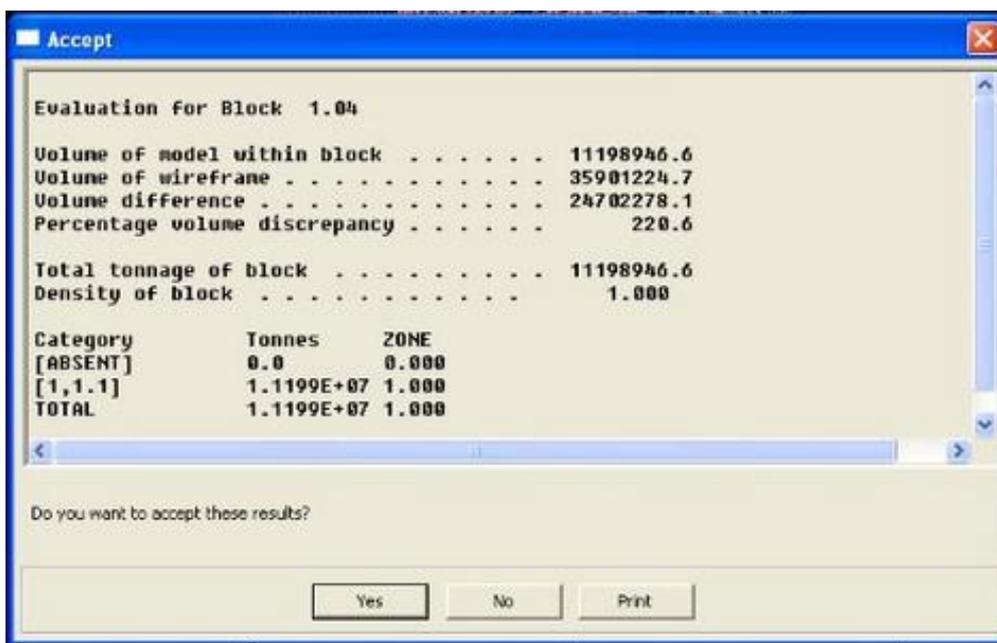
Figura 59 – Cava experimental e topografia local



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

O volume total calculado que poderá ser minerado a partir da cava experimental gerada é de cerca de 11.198.946,6 de m³. A figura 60 ilustra os resultados obtidos para cálculo do volume de maciço rochoso incluso na área base através do DATAMINE STUDIO 3.0.

Figura 60 – Resultado do volume da cava experimental

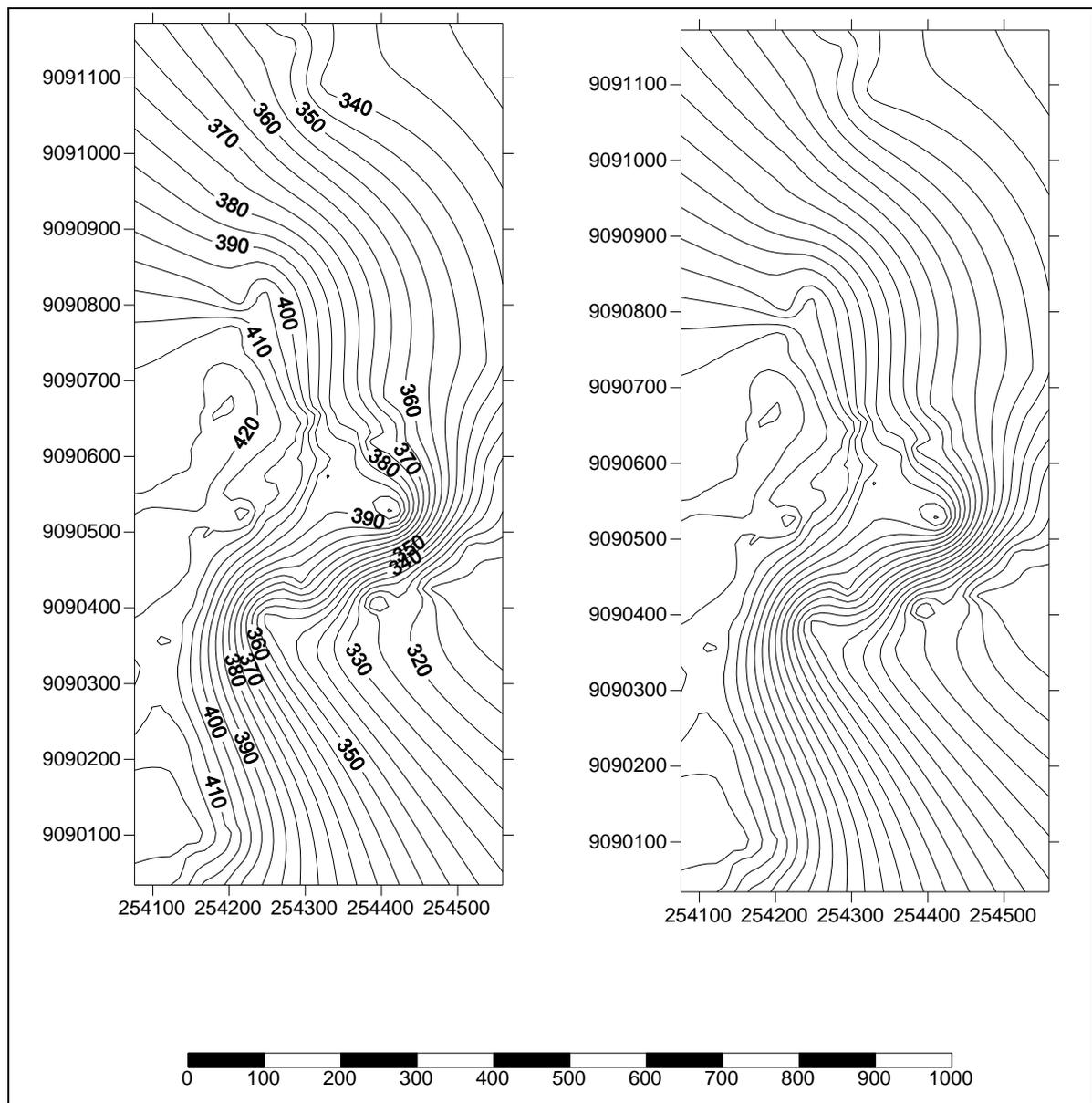


Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

5.2. Modelo 2 – Dados colhidos em campo com o uso de GPS

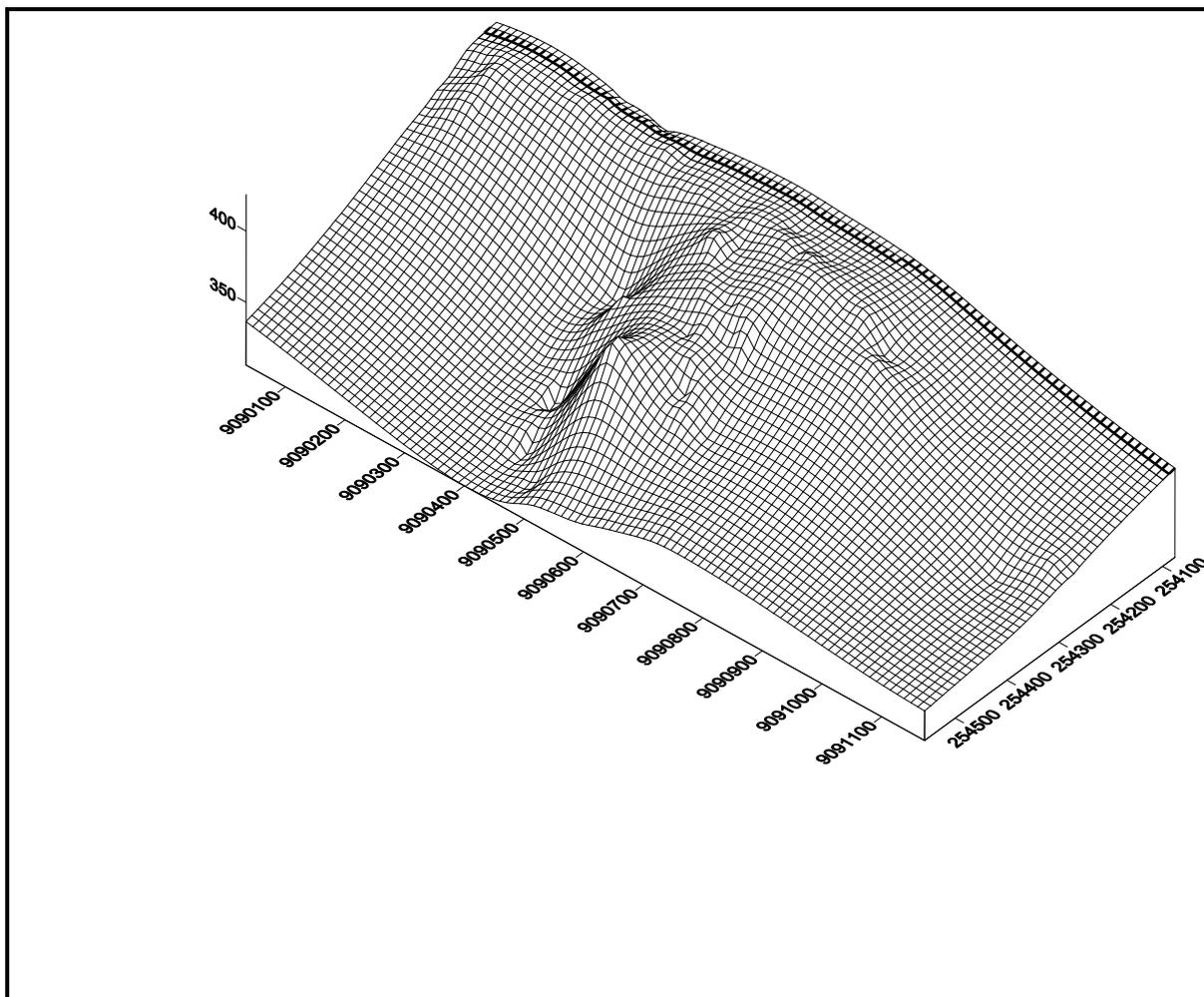
As figuras 61 e 62 a seguir mostram os resultados da modelagem das curvas de nível e do modelo digital de terreno representativo da superfície topográfica do terreno elaboradas com o uso do *software* Surfer 9.0.

Figura 61 – Curvas de nível geradas a partir do Surfer 9.0



Fonte : Surfer 9.0

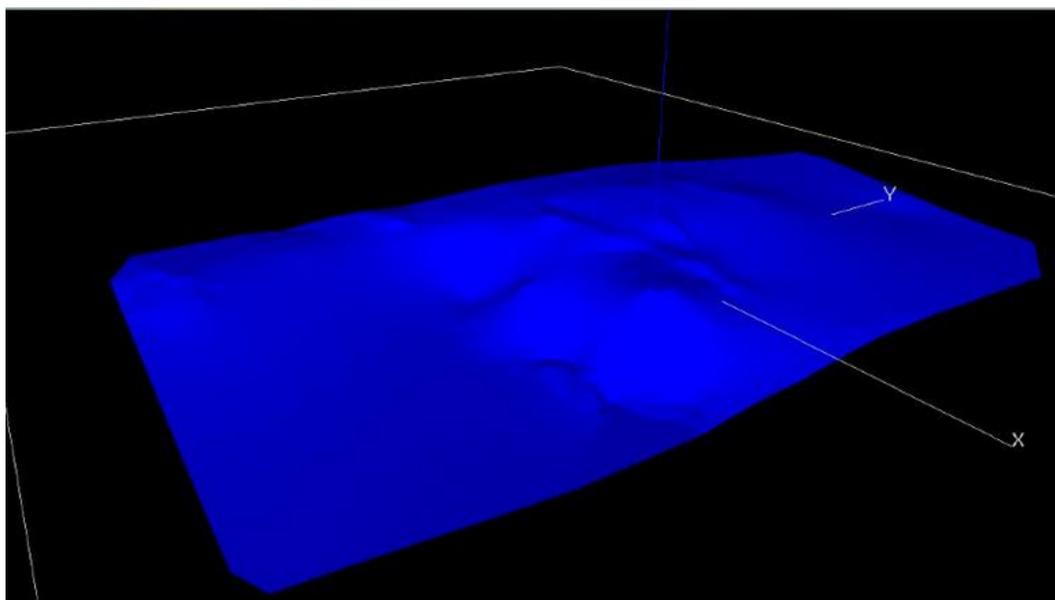
Figura 62 – Modelo digital do terreno representativo da superfície topográfica da área



Fonte: Surfer 9.0

Com as curvas de nível calculadas no Surfer 9.0 foi possível realizar-se a importação dos dados para o DATAMINE e posteriormente a elaboração do modelo digital do terreno referente a DTM da topografia através dos comandos *wireframe* conforme apresentado na figura 63.

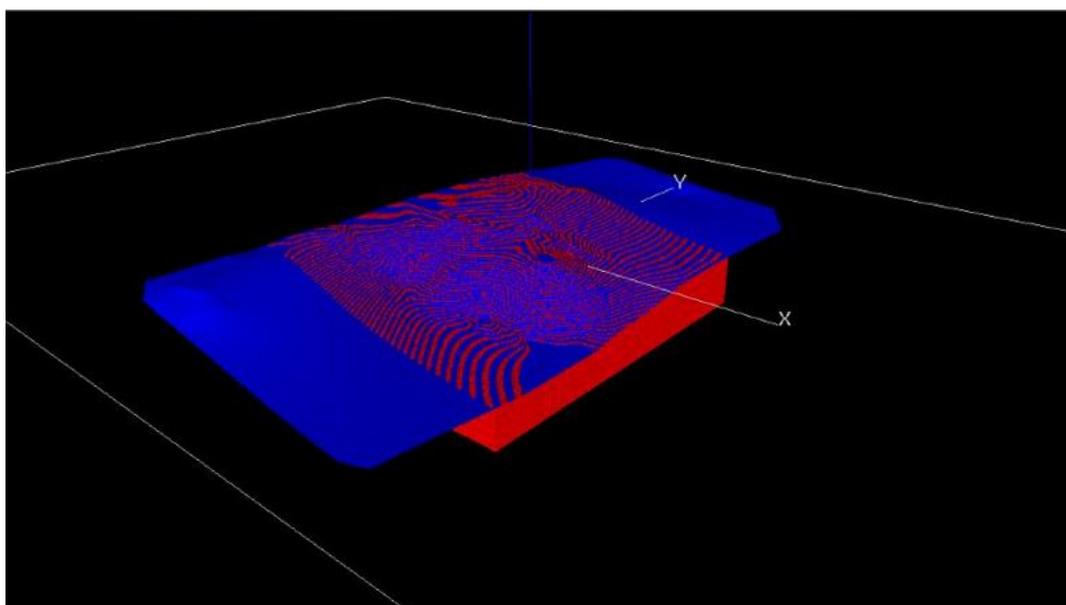
Figura 63 – Superfície topográfica do terreno confeccionada no DATAMINE STUDIO 3.0



Fonte: Surfer 9.0

A partir da DTM correspondente a topografia do terreno da área de interesse, gerou-se o modelo de blocos dentro da área base e da cava experimental a partir do DATUM 250 para então calcular-se o volume passível de extração. A figura 64 mostra o modelo de bloco resultante do uso dessa metodologia.

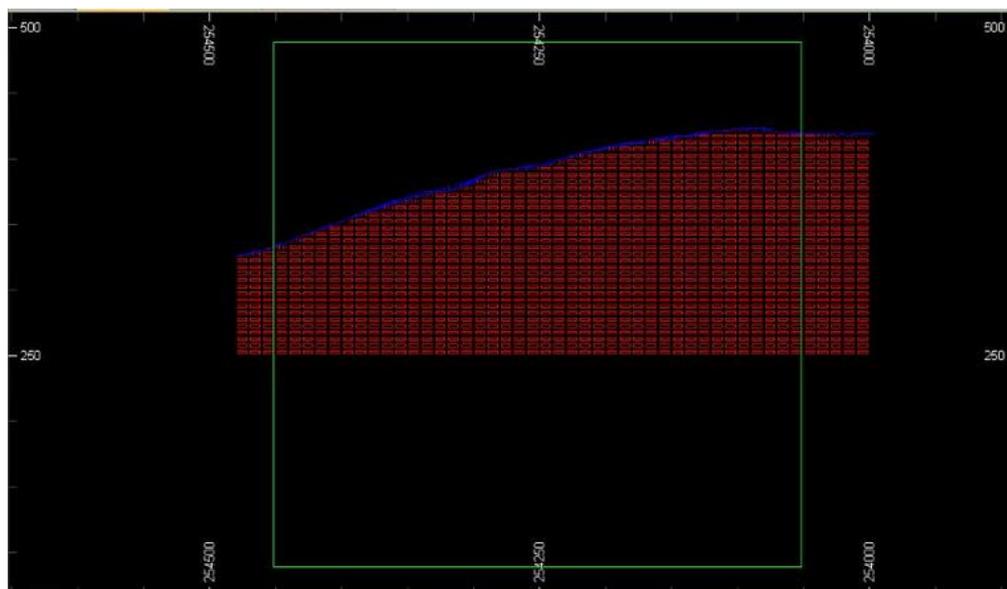
Figura 64 – Modelo de blocos GPS



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

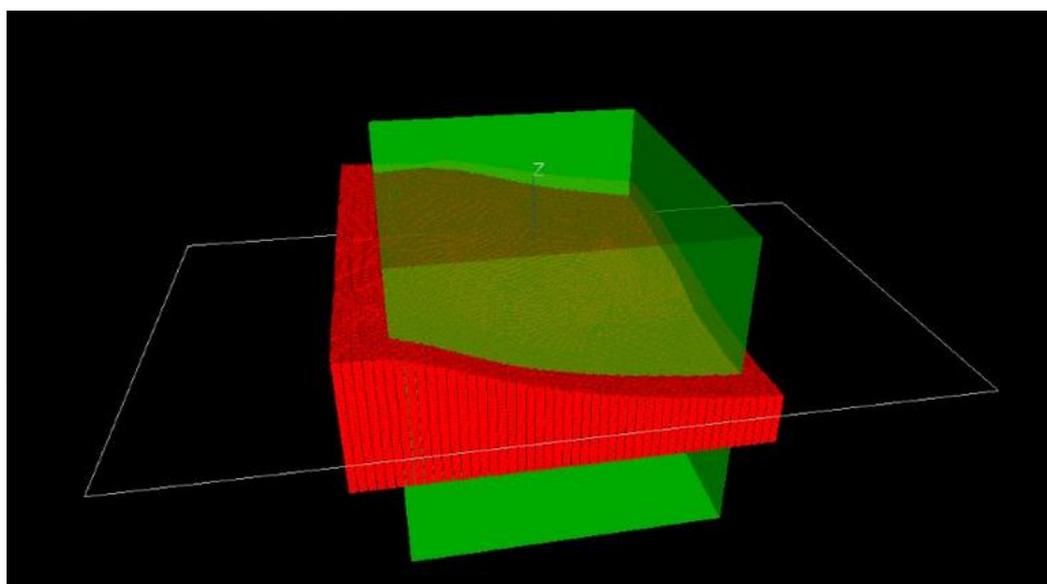
As figuras 65 e 66 a seguir ilustram a posição espacial da área base (em verde) indicando a posição espacial em relação ao modelo de blocos onde foi feito o cálculo do volume, tomando-se a cota altimétrica de 250 m como DATUM.

Figura 65 – Vista em perfil de um plano leste-oeste do modelo de blocos em contato com a área base



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

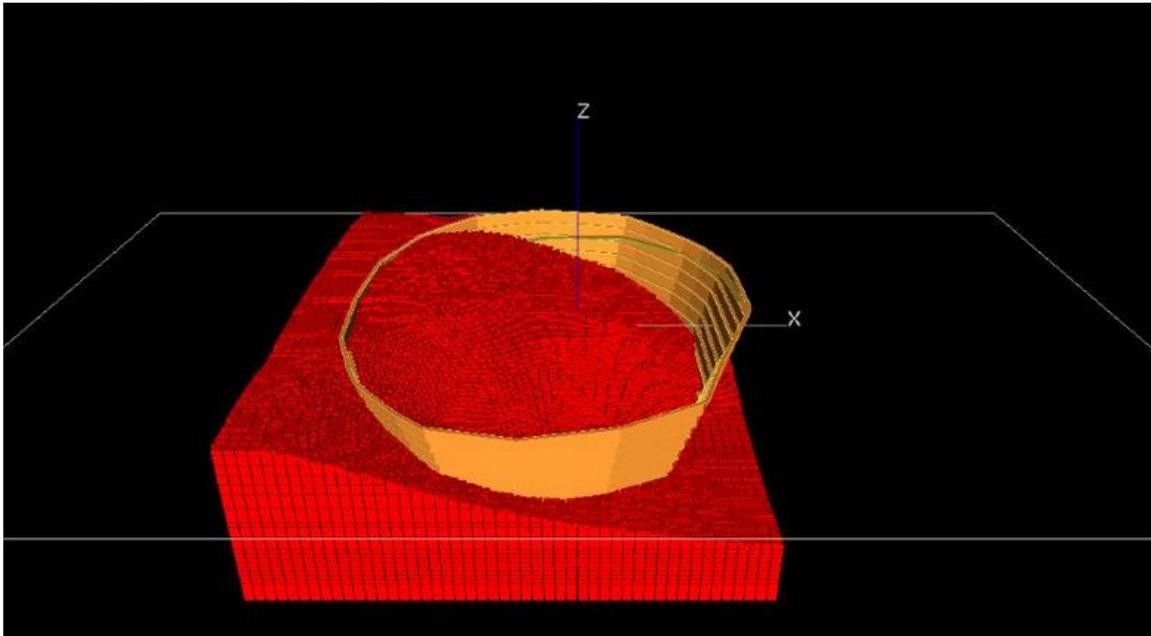
Figura 66 – Modelo de blocos em contato com a área base



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

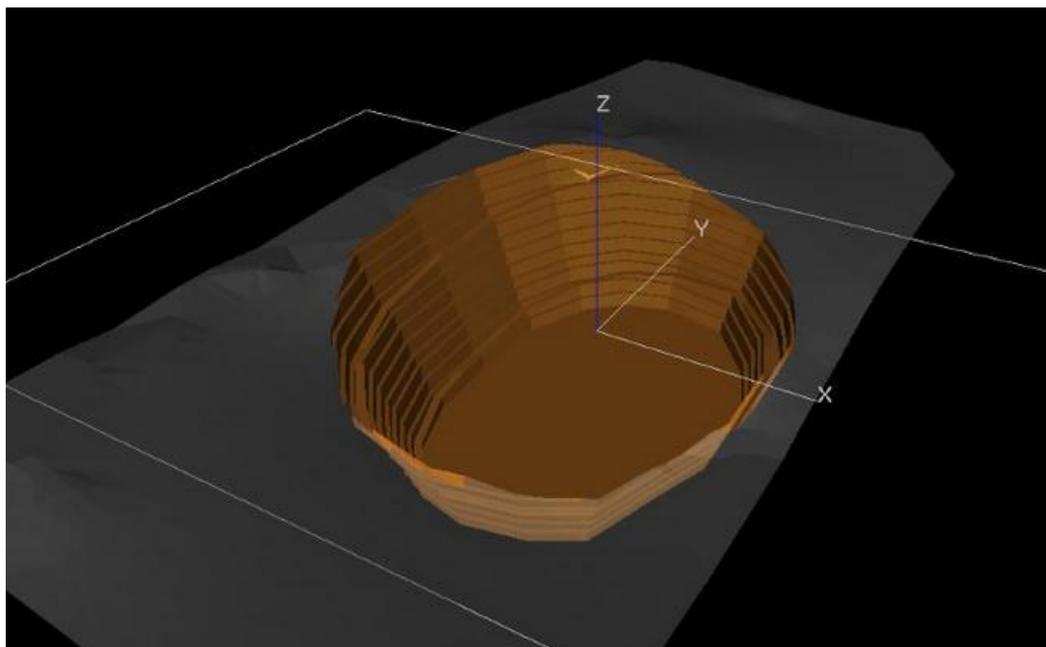
De forma semelhante as figuras 67 e 68 mostram a posição espacial da cava experimental em relação ao modelo de blocos e DTM utilizada para definição da topografia local.

Figura 67 – Modelo de blocos em contato com a cava experimental



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

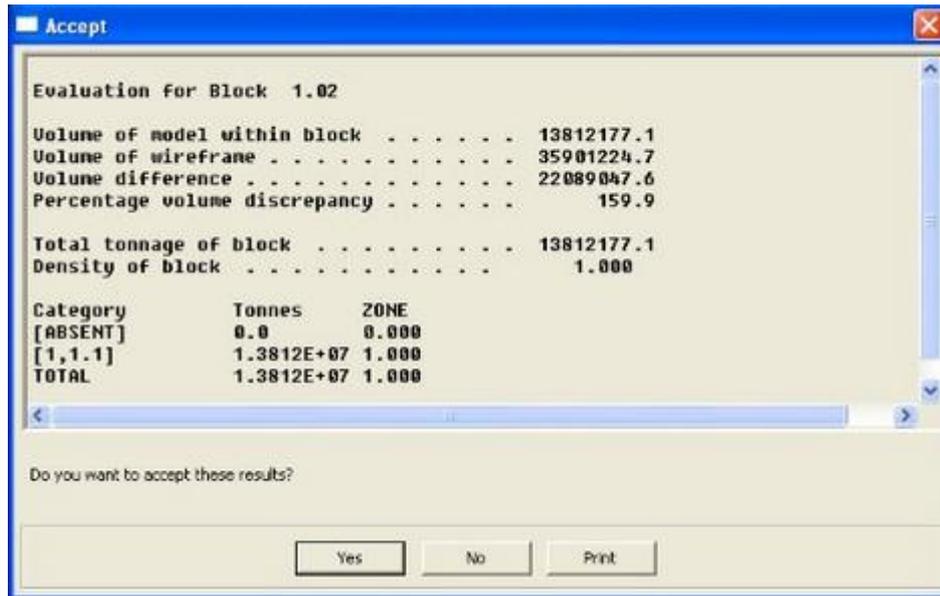
Figura 68 – Topografia em contato com a cava experimental



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

O volume total de maciço rochoso que poderá ser minerado a partir da cava experimental gerada é de cerca de 13.812.177,1 de m³. A figura 69 mostra os resultados obtidos a partir do cálculo de blocos acima da cava experimental realizado no *software* DATAMINE STUDIO 3.0.

Figura 69 – Resultado do volume da cava experimental



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

5.3. Modelo 3 – Ortofotocartas

As curvas de nível correspondentes à topografia do maciço rochoso obtidas através da digitalização no *software* AutoCad 2010 das ortofotocartas da Fundação de Desenvolvimento da Região Metropolitana do Recife – FIDEM estão ilustradas na figura 70.

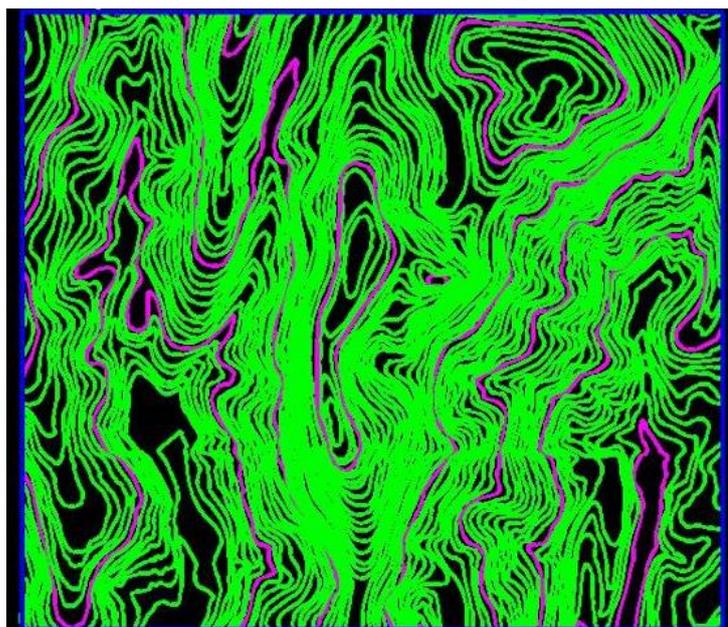
Figura 70 – Curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas



Fonte: AutoCad 2010

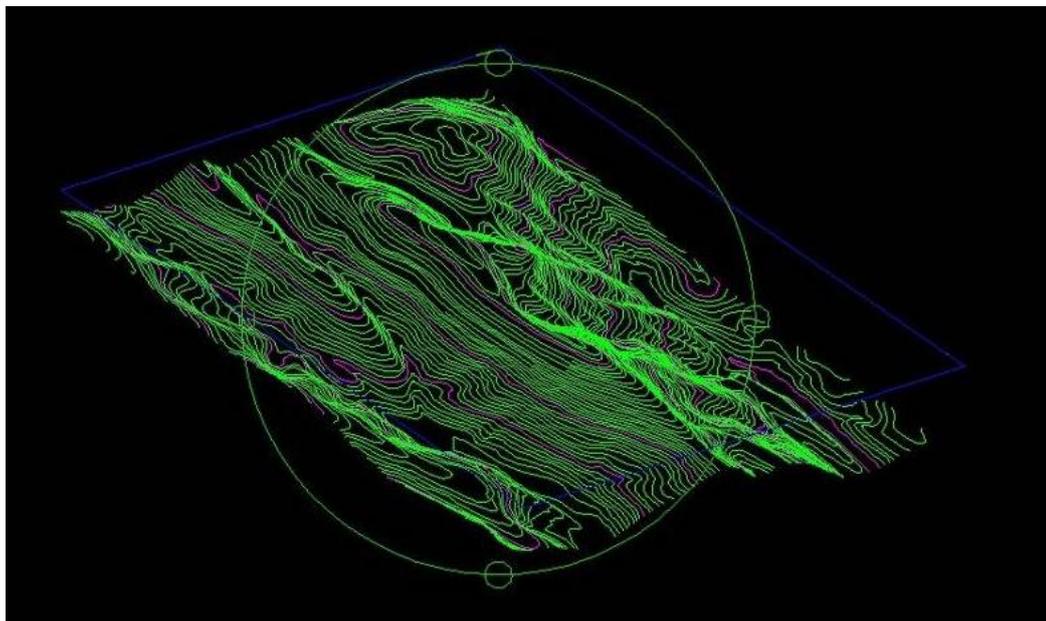
Essas curvas de nível foram digitalizadas diretamente sobre as ortofotocartas e após foram cotadas tendo-se então uma representação espacial da topografia do maciço rochoso conforme pode ser observado nas figuras 71 e 72 a seguir.

Figura 71 – Curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas



Fonte: AutoCad 2010

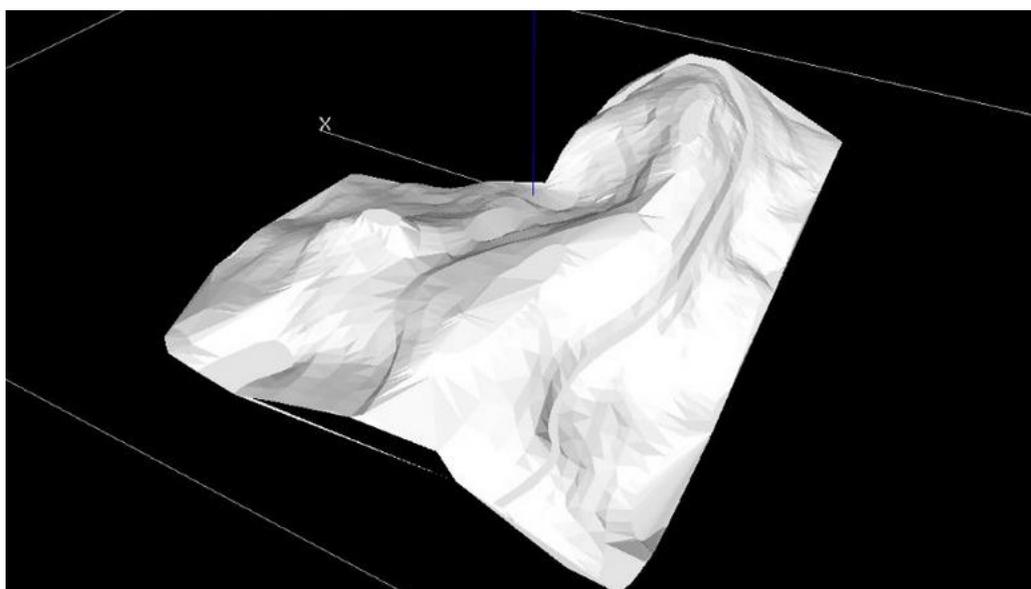
Figura 72 – Visão espacial das curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas



Fonte: AutoCad 2010

Após obtenção das curvas de nível obtidas na digitalização das ortofotocartas e dos ajustes realizados no AutoCad 2010, exportou-se as mesmas para o *software* DATAMINE STUDIO 3.0 e elaborou-se o modelo digital do terreno através dos comandos de *wireframing* conforme ilustrado na figura 73.

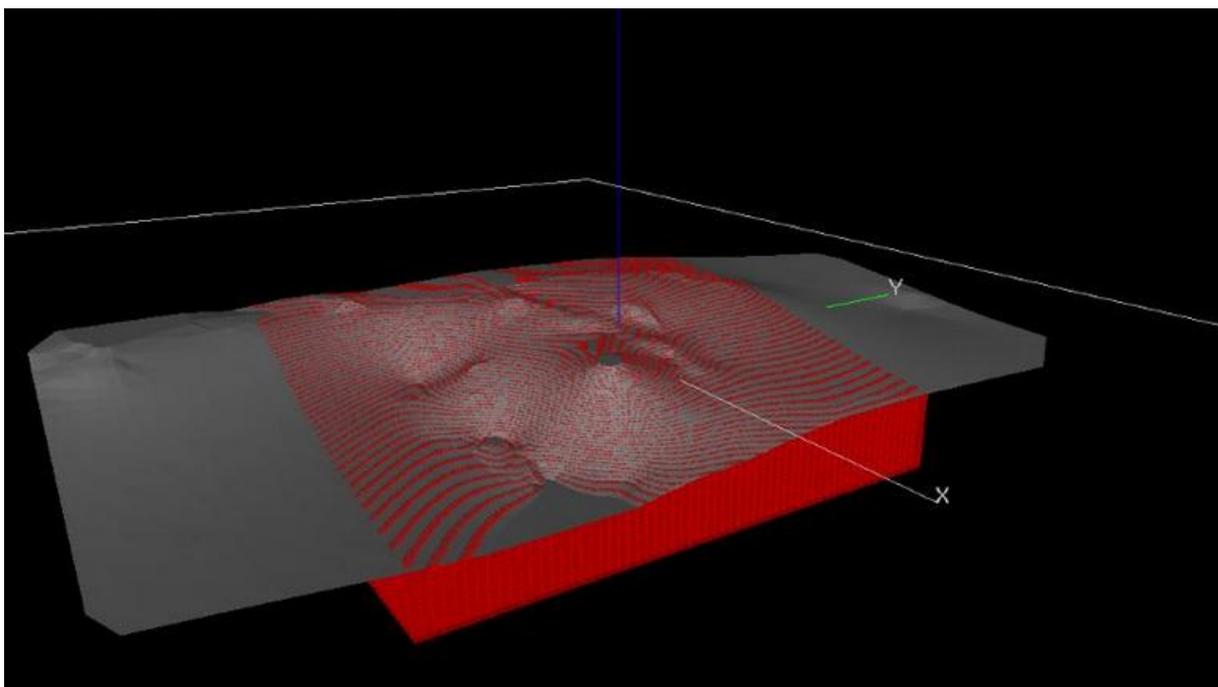
Figura 73 – Curvas de nível geradas a partir da digitalização das ortofotocartas



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

A partir da DTM correspondente a topografia do maciço rochoso na área de interesse, gerou-se o modelo de blocos dentro da área base e da cava experimental a partir do DATUM 250 para então calcular-se o volume passível de extração. As figuras 74 e 75 a seguir mostram os modelos de blocos resultantes da metodologia aplicada.

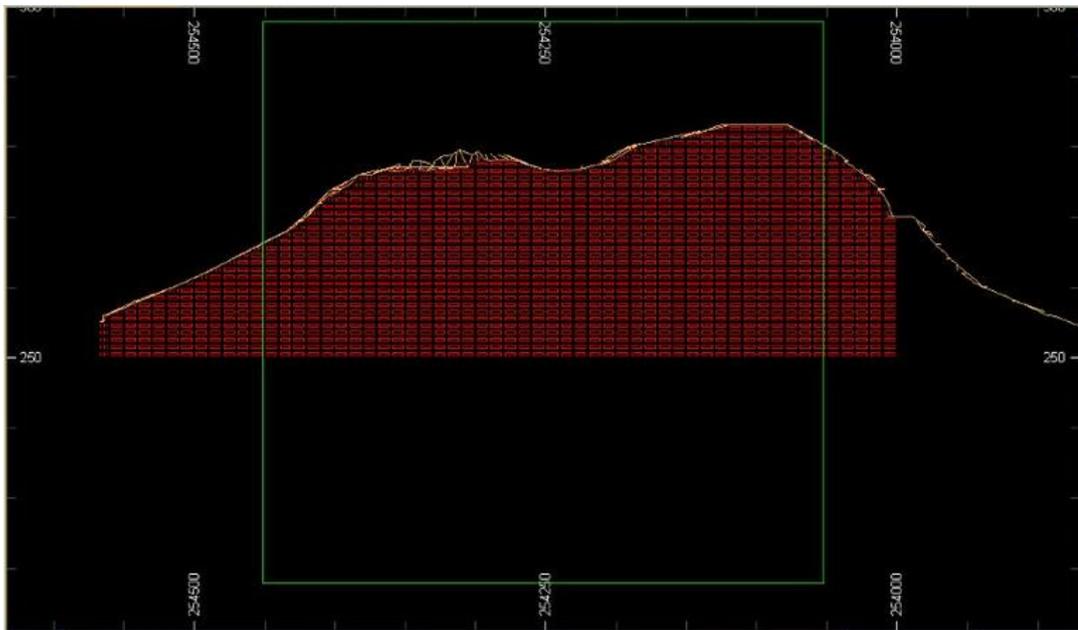
Figura 74 – Modelo de blocos dos dados obtidos com digitalização das ortofotocartas



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

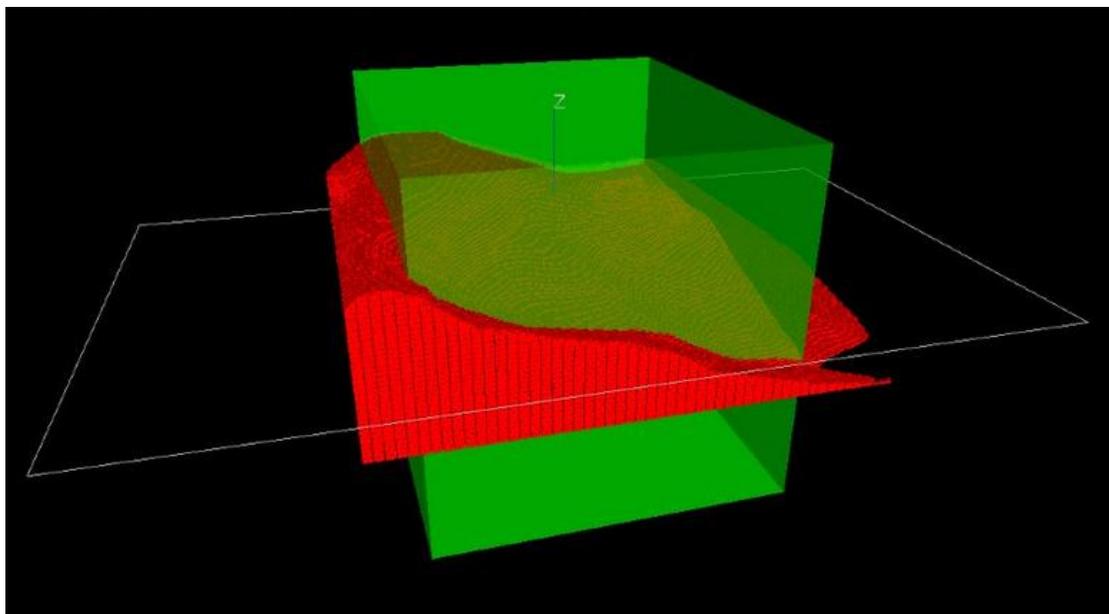
As figuras 75 e 76 mostram uma seção vertical leste-oeste onde se pode identificar o perfil da área base, a topografia e o modelo de blocos utilizado para cálculo do volume de maciço rochoso a partir do DATUM 250 m e a projeção espacial da área base e modelo de blocos.

Figura 75 – Vista em perfil de um plano leste-oeste do modelo de blocos em contato com a área base



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

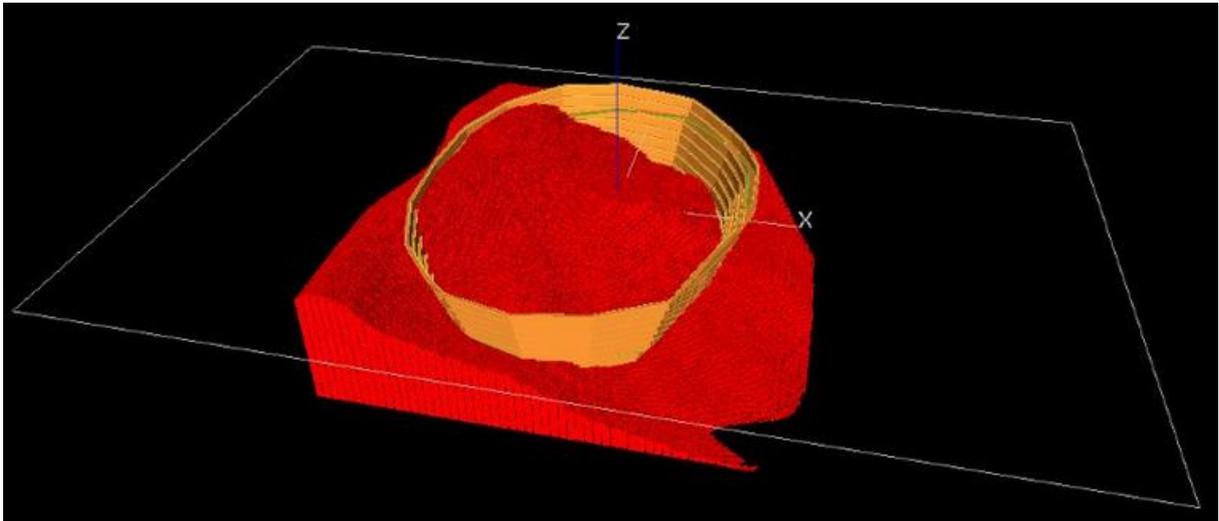
Figura 76 – Modelo de blocos em contato com a área base



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

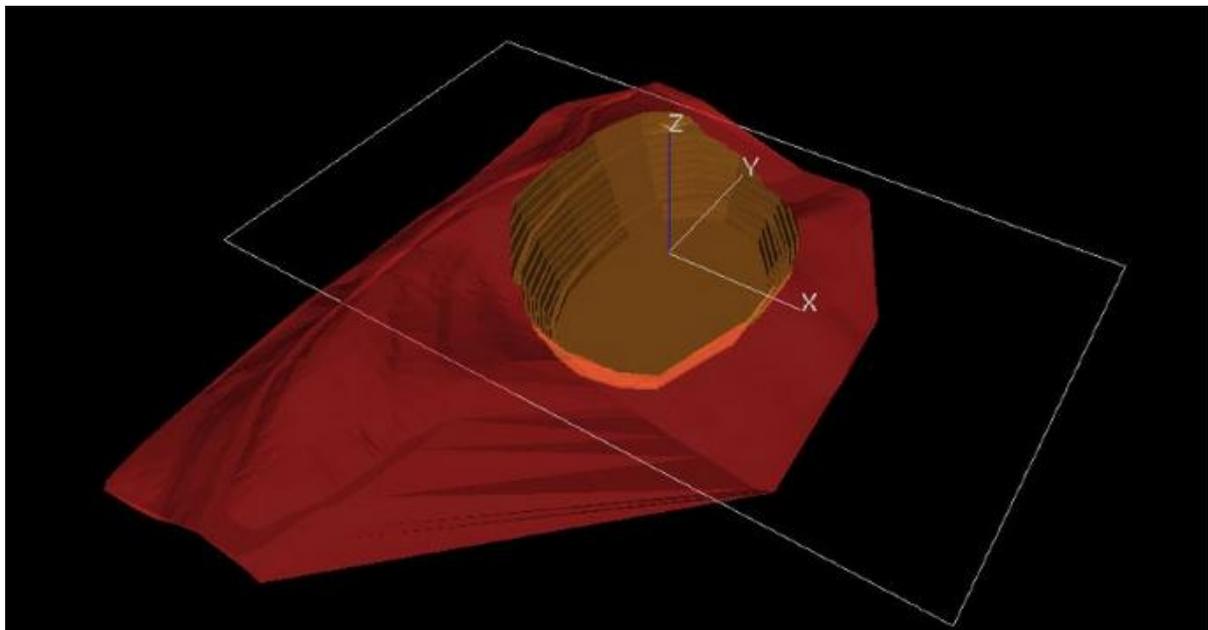
De forma semelhante as figuras 77 e 78 mostram a posição espacial da cava experimental em relação ao modelo de blocos e DTM utilizada para definição da topografia local.

Figura 77 – Modelo de blocos em contato com a cava experimental



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

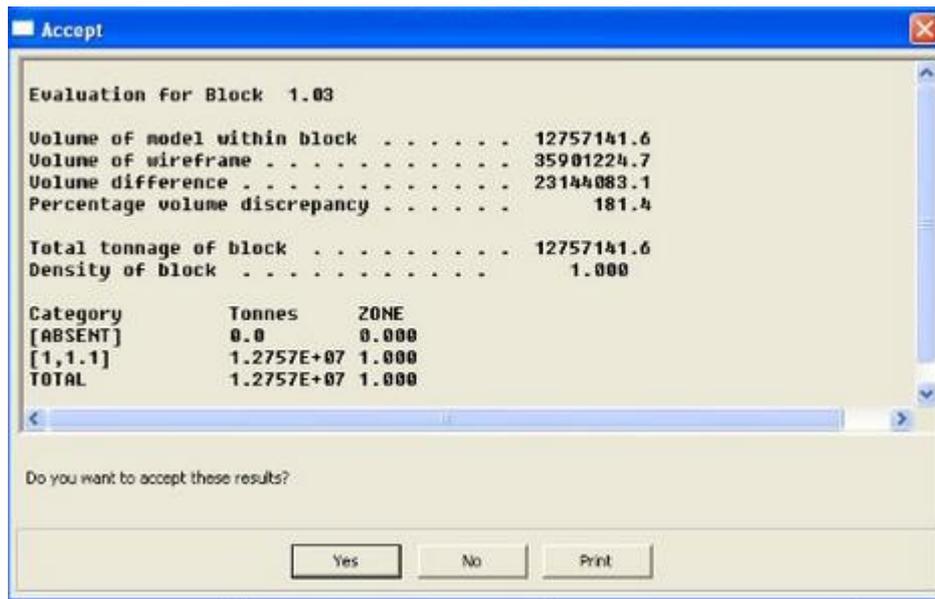
Figura 78 – Topografia em contato com a cava experimental



Fonte: Datamine Studio 3.0

O volume total calculado que poderá ser minerado a partir da cava experimental gerada é de cerca de 12.757.141,6 de m³. A figura 79 mostra os resultados obtidos a partir do cálculo de blocos acima da cava experimental realizado no *software* DATAMINE STUDIO 3.0.

Figura 79 – Resultado do volume da cava experimental



Fonte: DATAMINE STUDIO 3.0

5.4. Comparação entre os modelos elaborados

Pelo fato do modelo gerado por intermédio das ortofotocartas da FIDEM ser considerado o mais preciso, tomou-se o mesmo como referência para comparar os outros modelos obtidos com os dados adivindos da coleta em campo com GPS Garmin 76 e dos dados obtidos do Google Earth com o *software* SketchUp Pro 8.

Abaixo apresentamos a tabela V com os volumes de maciço rochoso presente na área base calculados através das três metodologias utilizadas na presente dissertação.

Tabela V – Volumes calculados através das três metodologias

Método	Volume (m³)
Ortofotocartas	21.860.301,00
GPS	23.841.411,10
SketchUp Pro 8	20.224.975,00

A tabela VI mostra a diferença em termos absolutos e percentuais entre os volumes calculados pelas 2 metodologias em relação ao volume calculado através das ortofotocartas da FIDEM.

Tabela VI – Percentual entre as diferenças de volumes

Método	Volume (m³)	Percentual (%)
Ortofotocartas - GPS	1.981.110,10	9,06
Ortofotocartas - SketchUp Pro 8	1.635.326,00	7,48

Abaixo apresentamos a tabela VII com os volumes de maciço rochoso possível de ser minerado na cava experimental calculados através das três metodologias utilizadas na presente dissertação.

Tabela VII – Volumes calculados através das três metodologias

Método	Volume (m³)
Ortofotocartas	12.757.141,60
GPS	13.812.177,10
SketchUp Pro 8	11.198.946,60

A tabela VIII mostra a diferença em termos absolutos e percentuais entre os volumes calculados pelas 2 metodologias em relação ao volume calculado através das ortofotocartas da FIDEM.

Tabela VIII – Percentual entre as diferenças de volumes

Método	Volume (m³)	Percentual (%)
Ortofotocartas - GPS	1.055.035,50	8,27
Ortofotocartas - SketchUp Pro 8	1.558.195,00	12,21

Observa-se que as diferenças entre os 3 modelos aplicados tanto na avaliação de volume na área base e na cava experimental podem ser consideradas irrelevantes levando em consideração as incertezas existentes em relação aos dados coletados junto ao Google Earth.

Considerando que os dados coletados em campo com GPS tem uma precisão razoável pode-se afirmar que as metodologias empregadas na presente dissertação são satisfatórias para a avaliação preliminar de volumes de maciços rochosos dentro da precisão desejada para a fase de investigação preliminar de maciços rochosos.

6. CONCLUSÕES

Pelos resultados obtidos nas três metodologias desenvolvidas no presente trabalho conclui-se que é possível realizar-se a modelagem geométrica de maciços rochosos utilizando-se ferramentas computacionais de baixo custo tais como os *softwares* SketchUp Pro 8.0, Surfer e AutoCad com dados obtidos no Google Earth

Os dados obtidos junto a plataforma Google Earth através do *software* SketchUp Pro 8.0 mostraram-se compatíveis com os resultados obtidos de fontes confiáveis como as ortofotocartas e levantamento de campo com GPS.

As diferenças entre os resultados da modelagem e cálculo de volume nas diversas metodologias foram inferior a 15% indicando uma boa aderência entre as diferentes formas de obtenção de dados das superfícies planialtimétricas através das metodologias aplicadas para elaboração de modelos digitais de terrenos – DTM's.

A ferramenta DATAMINE STUDIO mostrou-se extremamente favorável para modelagem geométrica de maciços rochosos através da geração de modelos de blocos e cálculo dos respectivos volumes.

Através do uso de ferramentas computacionais pode-se desenvolver metodologias de baixo custo e fácil implantação agilizando o processo de avaliação preliminar de maciços rochosos com precisão compatível para uma etapa inicial de prospecção mineral conforme foi demonstrado ao longo do desenvolvimento da dissertação.

O principal ponto desfavorável na implantação da presente metodologia refere-se a necessidade de utilização do *software* DATAMINE STUDIO que possui um custo de aquisição alto principalmente para pequenas e médias mineradoras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F. F. M.; Leonardos Jr., O. H.; Valença, J. (1967) Granitic rocks of Northeast South America. In: INTERNATIONAL UNION OF GEOLOGICAL SCIENCES, Recife, 1967. Recife, IUGS/UNESCO. 37 p.
- Almeida, N. C.; Guimarães, I. P.; Silva Filho, A. F.(2002) A-type post-collisional granites in the Borborema Province – NE Brazil – the queimadas pluton. *Gondwana Research*, v. 5, n. 3, p. 667-681.
- Almeida, N. C.; Guimarães, I. P.; Silva Filho, A. F.; Beurlen, H. (1997) Sm-Nd isotope geochemistry and U/Pb geochronological data of the Campina Grande Complex, Paraíba State, NE Brazil. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 17., Fortaleza. *Resumos Expandidos*. Fortaleza, SBG-NO. Boletim n. 15, p. 3-6.
- Annels, A.E. 1991. Mineral Deposit Evaluation -A practical approach.
- Barnes, M.P. 1980. Computer-Assisted Mineral Appraisal and Feasibility. New York, Soe. Min. Eng. 167p.
- Barnes, R.P. & Johnson, T.B. 1984. Positive kriging. In: Verly et al.(eds) Geostatistics for natural resources characterization. Reidel. Part I,p.231-244.
- Bernardo, P.A.M. (1992) – Cálculo da “cava” ótima com base no método computacional dos cones positivos móveis. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 24p.
- Carmo F.A.R.; Curi A. & Sousa W.T. (2006) – Otimização Econômica de Explorações a Céu Aberto. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Demin/Escola de Minas/Universidade Federal de Ouro Preto, Julho/Setembro, Brasil. 317 – 321 pp.
- Chapman & Hall - London. 436 p.

- Diatchkov, S.A. 1994. Principles of classification of reserves and resources in the CIS countries. *Min. Eng.*, 46(3):214-217.
- Gama, C.A.J.V.D (1974) – Modelo computacional de uma exploração mineira. IV Simpósio Brasileiro de Mineração, *Revista “Geologia e Metalurgia”*, nº 35, São Paulo. 289 – 324 pp.
- Gama, C.A.J.V.D. (1986,a) – Evolução dos métodos de cálculo de reservas minerais. *Brasil Mineral*, nº 28, 36-42 pp.
- Gama, C.A.J.V.D., et al (1986,b) – Programas para microcomputadores utilizáveis em pequenas e médias empresas do sector mineral. Programa de Desenvolvimento de Recursos Minerais – Pró Minério. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia do Estado de São Paulo – Sicct. São Paulo. 73-77 pp.
- Guerra, P.A.G. (1988) – Geoestatística operacional. Brasília, DNPM. 138p.
- Hustrulid W. & Kutcha M. (2006) – Open Pit Mine Planning & Design. Volume I – Fundamentals, 2nd Edition. Taylor & Francis/Balkema. 735p.
- Lizotte Y. (1988) – Mine Planning and Equipment Selection: Economic and Technical Relations Between Open-Pit Design and Equipment Selection. Singhal (ed.), Balkema, Rotterdam.
- Mabesoone, J. M. & Alheiros, M. M. 1988. Origem da bacia sedimentar costeira Pernambuco-Paraíba. *Rev. Bras. Geoc.* São Paulo. 18(4):476-482.
- Maranhão, R.J.L. (1985) – Introdução à Pesquisa Mineral. 3ª edição, BNB. ETENE. Fortaleza, Brasil. 752p.
- McFarlane, A.S. (2000) – Maximising shareholder wealth in mineral projects through Mineral Resource Management – the key to optimal resource utilisation and computer based mining planning – tools, techniques and the way forward.
- Oliveira, R.G. 1994. Levantamento gravimétrico da área sedimentar da região metropolitana do Recife. Projeto SINGRE - Série Cartografia Temática, 2: 38p.

- Ollier, C. D. Glossary of morphotectonics. Australia: University of New England, 1988. "Não paginado".
- Philip, G.M. & WATSON, F. 1987. How ore deposits can be overestimated through computational methods. In: RESOURCES AND RESERVES SYMPOSIUM, Sydney, 1987. Proceedings...Sydney, THE AUSTRALASIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY, p. 49-58.
- Polônia, J. A. L. Geometria e cinemática do Rift do Cabo, litoral sul do Estado de Pernambuco. Rio de Janeiro, 1997, 139p. Instituto de Geociências - UERJ. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.
- Popoff C.C. 1966. Computing reserves of mineral deposits: principles and conventional methods. Washington, Bureau of Mines. 113p. (I.C. 8283).
- Revuelta M.B. & Jimeno C.L. (1997) – Manual de Evaluación y Diseño de Explotaciones Mineras. Entorno Gráfico, S.L., Madrid, 705 p.
- Sinclair, A. J., and Blackwell, G. H., 2002, Applied mineral inventory estimation: Cambridge University Press, Cambridge, 381 p. m
- Wetherelt, A., Wielen, K. P. Van Der. In P. DARLING (Ed.), SME – Mining Engineering Handbook. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc., 2011, SME - Cap. 10.1. Terceira edição, p. 857–876.
- Yamamoto J. K. 1991. Comparação de métodos computacionais para avaliação de reservas: um estudo de caso na Jazida de Cobre de Chapada, GO. Universidade de São Paulo. 175p. (Tese de doutoramento)
- Yamamoto J.K. & Rocha M.M. 1996. Revisão e recomendações para o cálculo e classificação de reservas minerais. Rev. Bros. Geoc., 26:243-254.
- Yamamoto, J. K. (2001). Avaliação e Classificação de Reservas Minerais. Editora da Universidade de São Paulo, São Paulo. 227p.