



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE MINERAÇÃO E GEOLOGIA – UAMG

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE RECUPERAÇÃO DE
LAVRA EM ROCHAS ORNAMENTAIS, BASEADA NA
MODELAGEM DE DESCONTINUIDADES ESTRUTURAIS**

ALANA LOPES SILVA

Campina Grande -PB

2007

ALANA LOPES SILVA

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE RECUPERAÇÃO DE LAVRA EM
ROCHAS ORNAMENTAIS, BASEADA NA MODELAGEM DE
DESCONTINUIDADES ESTRUTURAIS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

Orientador: Prof. Dr.Aarão de Andrade Lima (UFCG).

Co-Orientador: Prof. Dr.Giorgio De Tomi (USP).

Campina Grande -PB

2007



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFPG

S586m Silva, Alana Lopes.

2007 Metodologia para estimativa de recuperação de lavra em rochas ornamentais, baseada na modelagem de descontinuidades estruturais / Alana Lopes Silva. — Campina Grande, 2007.
72f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof. Dr. Arão de Andrade Lima, Prof. Dr. Giorgio De Tomi.

1. Rochas Ornamentais. 2. Descontinuidades em Rocha. 3. Recuperação de Reservas. I. Título.

CDU- 622.35(043)

ALANA LOPES SILVA

**METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DE RECUPERAÇÃO DE LAVRA EM
ROCHAS ORNAMENTAIS BASEADA NA MODELAGEM DE
DESCONTINUIDADES ESTRUTURAIS**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre.

Área de Concentração: Lavra de Minas.

Aprovada em: 28 de Setembro de 2007.

BANCA EXAMINADORA

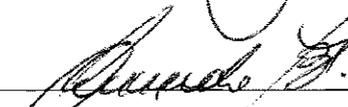


Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima - Orientador (UFCG).

Prof. Dr. Giorgio de Tomi - Co-Orientador (USP).



Prof. Msc. João Lucena Ramos Neto (UFCG).



Prof. Dr. Arlindo José Bazante (UFCG).

Aos meus pais, e irmãs por todo
o amor, dedicação, empenho e conselhos que me
dispensaram, para que eu progredisse pessoal,
intelectual e profissionalmente, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

À Deus pela saúde e força para a conclusão de mais uma etapa;

Aos meus pais Domicia Lopes Silva e Antonio Paulino da Silva, pelo carinho e dedicação durante minha formação, meu reconhecimento maior;

As minhas irmãs Andréa Lopes Silva e Daiana Lopes Silva, por todo amor, incentivo, carinho e dedicação ao longo deste trabalho e de toda minha vida;

Aos meus Orientadores Aarão de Andrade Lima (UFCG) e Giorgio De Tomi (USP), por inestimável ajuda, dedicada e paciente;

À coordenação do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, em nome do Professor Elbert Valdiviezo Viera.

A todos os Professores e funcionários da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia da UFCG;

Aos meus amigos, pelo incentivo para conclusão do trabalho;

Aos colegas de curso, pelo aprendizado compartilhado;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de Mestrado e pelo apoio financeiro concedido ao longo deste trabalho;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Entidade Governamental Brasileira Promotora do Desenvolvimento Científico e Tecnológico, no Programa de “Aplicação de Tecnologia para Aproveitamento Racional de Rochas Ornamentais na Paraíba via Projeto Cooperativo envolvendo Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), edital (MCT/CNPq/PADCT/2003), processo (620146/04.4), pelo apoio financeiro proporcionado.

A toda equipe da GAPSF (Gerência de Planejamento de Longo Prazo Sul/Sudeste) da Companhia Vale do Rio Doce (CVRD), pelo companheirismo e ajuda na conclusão de mais um sonho.

RESUMO

Numerosas jazidas são abandonadas, após a fase de pesquisa, devido a fatores geotécnicos adversos. Esses empreendimentos mal sucedidos resultam em perdas financeiras para as empresas e danos ambientais que podem ser evitados por estudos prévios. Na extração de rochas ornamentais a preservação da integridade da rocha é fator fundamental para que se tenha um maior aproveitamento da jazida, maximizando as reservas e aumentando a qualidade e o valor comercial dos blocos extraídos. Por essa razão, é necessária uma maior precisão na fase de pesquisa para a lavra dessas áreas, tendo em vista seu perfil de risco, onde o conhecimento insuficiente das características geológicas e geotécnicas das regiões estudadas pode comprometer a lavra. A modelagem das incertezas geológicas e geotécnicas passou a ser uma técnica de grande utilidade no setor de rochas ornamentais, já que sua aplicabilidade resulta em um conhecimento mais detalhado dos riscos que afetam o depósito. Com base em características como falhas, juntas, fraturas e alterações mineralógicas, foi desenvolvida uma metodologia aplicável a jazidas de rochas ornamentais visando à representação gráfica tridimensional de descontinuidades, e o cálculo da recuperação provável da lavra. A aplicação da metodologia num estudo de caso real possibilitou um planejamento de lavra mais versátil, proporcionando a criação de cenários com os parâmetros de planejamento, e permitindo dessa forma maior rapidez e precisão nas análises e no controle de qualidade da lavra. O estudo de caso foi desenvolvido em uma área situada no Estado da Paraíba, no Município do Picuí. Trata-se de um depósito de granito para fins ornamentais, constituídos por matacões de forma oval, de grandes dimensões, além de afloramentos de maciço rochoso. O depósito apresentou fraturas de diversos tipos e com atitudes diferentes. Sendo assim, um excelente local de estudo para contribuição no desenvolvimento de uma metodologia capaz de ajudar empresários do setor de rochas ornamentais, a decidir o quanto investir em pesquisa para lavrar áreas que se encaixam nesse perfil de risco, aumentando a qualidade e lucratividade dos empreendimentos. A metodologia se mostrou eficiente, permitindo um maior controle nos riscos econômicos, pois, além do isolamento das áreas com fraturamento, permitiu também avaliar a recuperação teórica das áreas aproveitáveis. Sendo de grande valia, para futuros trabalhos no ramo de rochas ornamentais.

Palavras-Chave: Rochas Ornamentais; Descontinuidades em rocha; Recuperação de reservas.

ABSTRACT

Many mineral deposits are abandoned, after the exploration step, due to adverse geotechnical factors. These unsuccessful entrepreneurships end up representing financial losses to companies and environmental damages which may be avoided, if a previous research is conducted. In the extraction of ornamental rocks, preserving the entirety of the rock is a fundamental factor to completely exploit a deposit, maximizing the reserves and increasing quality and commercial value of extracted blocks. For this reason, as it is a risky activity, it is necessary to be more precise in the prospective phase of the research for the quarry of those areas, in which low knowledge of geological and geotechnical aspects of the studied regions may compromise the exploitation. The modeling of the geologic and geotechnical uncertainties started to be one technique of great utility in the sector of ornamental rocks, since its applicability results in a detailed knowledge of the risks which affect the deposit. With base in characteristics as faults, joints, fractures and mineralogical alterations, it was developed a methodology applicable to deposits of ornamental rocks which is able to represent discontinuities in three-dimensional graphics and calculation of the probable recovering of the quarry. The application of the methodology in a study of case real made possible a planning of more versatile plowing, providing the creation of sceneries with the planning parameters, and allowing of that form larger speed and precision in the analyses and in the control of quality of the quarry. The application of this methodology to a real study case allowed the elaboration of more versatile exploitation plans of deposit, making it possible to create settings with planning parameters, decreasing the time required to analyse and increasing the certainty of the analysis in the exploitation quality control of the deposit. The study case was conducted in an area located in the State of Paraíba, in Picuí County. It is an ornamental granite deposit, consisting of large-oval-shaped rocks, as well as rock mass outcrops. The deposit presented breakings of different types and height. Therefore, it was an excellent place to conduct a study to contribute to the development of a methodology able to help entrepreneurs of the sector of ornamental rocks to decide how much to invest in researches to exploit areas with similar risk profiles, increasing the quality and profitability of the entrepreneurships. The methodology was proved efficient, permitting a higher control of economical risks, thus, beyond the isolation of the areas in which there were breakings, it also permitted the assessment of the theoretical recovery of the usable areas, being worthwhile to future works in the sector of ornamental rocks.

Keywords: Ornamental rocks, dimension stones, discontinuities, reserves recovery.

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	12
INTRODUÇÃO	12
1.1 JUSTIFICATIVA	12
1.2 OBJETIVO.....	13
CAPITULO II	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 CONCEITOS ESSENCIAIS	15
CAPITULO III	18
3. METODOLOGIA	18
CAPITULO IV.....	20
4.CARACTERÍSTICAS DA ÁREA ESTUDADA	20
4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO	20
4.2 DESCRIÇÃO DA JAZIDA	21
4.3 GEOLOGIA GERAL	26
4.4 GEOLOGIA LOCAL	29
CAPITULO V	31
5. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS	31
5.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO DE CAMPO	31
CAPITULO VI	42
6. INCORPORAÇÃO DAS FRATURAS NO MODELO DE BLOCOS	42
CAPITULO VII	59
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
GLOSSÁRIO	63
ANEXOS	65

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS SEQUENCIAIS DO SOFTWARE.....	19
FIGURA 2 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA	21
FIGURA 3 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DA JAZIDA	22
FIGURA 4 - VISÃO DO SETOR DO LEVANTAMENTO.....	23
FIGURA 5 - VISTA EM DETALHE DO AFLORAMENTO	24
FIGURA 6 - FRATURA EXISTENTE NA ÁREA PREENCHIDA COM PEGMATITO	25
FIGURA 7 - FRATURA EXISTENTE NA ÁREA PREENCHIDA COM VEIO DE QUARTZO.....	25
FIGURA 8 - FRATURA EXISTENTE NA ÁREA SEM PREENCHIMENTO	26
FIGURA 9 - PERÍODO DE CARACTERIZAÇÃO LITO-ESTRATIGRÁFICA NO BRASIL.....	27
FIGURA 10 - COMPARTIMENTAÇÃO TECTONO-ESTRATIGRÁFICA DA PARAÍBA	28
FIGURA 11 - MAPA GEOLÓGICO DA REGIÃO ESTUDADA	29
FIGURA 12 - MAPA GEOLÓGICO DE DETALHE DA REGIÃO ESTUDADA	30
FIGURA 13- LOCALIZAÇÃO DO CORPO GRANITÓIDE	31
FIGURA 14 - OS TRÊS AFLORAMENTOS ENCONTRADAS NA ÁREA ESTUDADA	33
FIGURA 15 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS DE NÍVEL DA JAZIDA NO AUTO CAD	34
FIGURA 16 - POLIGONAIS DAS CURVAS DE NÍVEL NO PROGRAMA DATAMINE	35
FIGURA 17 - VISTA EM PLANTA DA TRIANGULAÇÃO - (2D)	36
FIGURA 18 - SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA COM POLIGONAIS - (3D)	36
FIGURA 19 - SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA SEM POLÍGONAIS - (3D)	37
FIGURA 20 - SÓLIDO GERADO ATRAVÉS DAS WIREFRAME -(3D)	37
FIGURA 21 - ANÁLISE ESTATÍSTICA (COMPUTE STATISTICAL).....	39
FIGURA 22 - MODELO DE BLOCO DA ÁREA TOTAL ESTUDADA – VISTA NO PLANO.....	40
FIGURA 23 - MODELO DE BLOCOS DA ÁREA – CORTE NA DIREÇÃO NORTE-SUL	40
FIGURA 24 - MODELO DE BLOCOS DA ÁREA – CORTE NA DIREÇÃO LESTE- OESTE	41
FIGURA 25 - MODELO DE BLOCOS DA ÁREA – VISTA LATERAL (3D)	41
FIGURA 26 - MODELO DE BLOCOS ÁREA – VISTA FRONTAL (3D)	42
FIGURA 27 - VISÃO GERAL DA ÁREA COM AS LINHAS BASE TRAÇADAS	43
FIGURA 28 - FRATURAS ENCONTRADAS NA REGIÃO ESTUDADA – VISTA(3D)	44
FIGURA 29 - FRATURAS ENCONTRADAS JUNTO COM A TOPOGRAFIA DA REGIÃO	45
FIGURA 30 - MODELO DE BLOCOS COM INCORPORAÇÃO DAS DESCONTINUIDADES	46
FIGURA 31 - VISTA FRONTAL DO MODELO DE BLOCOS COM AS FRATURAS (3D).	46
FIGURA 32 - VISTA INFERIOR DO MODELO DE BLOCOS AS FRATURAS (3D).	47

FIGURA 33 - VISTA INFERIOR DO MODELO DE BLOCOS COM AS FRATURAS (3D).....	47
FIGURA 34 - MODELO DE BLOCOS COM AS FRATURAS NO PLANO XY-(2D).....	48
FIGURA 35 - MODELO DE BLOCOS COM AS FRATURAS (1,5M) NO PLANO XY- (3D).	49
FIGURA 36 - MODELO COM AS FRATURAS (1,5 M) – VISÃO INFERIOR – 3D.....	49
FIGURA 37 - MODELO COM AS FRATURAS (1,5M) – VISÃO FRONTAL – 3D.	50
FIGURA 38 - CUBAGEM DE RECURSOS TOTAIS (ROCHA SÃ /ESTÉRIL)	51
FIGURA 39 – FRATURAS CONSIDERANDO 1,5 M DE ÁREA DE INFLUÊNCIA.....	52
FIGURA 40 – VISTA SUPERIOR SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA- (FRATURAS 1,5 M)	52
FIGURA 41- COMANDO COPY (ABA RETRIEVAL)	53
FIGURA 42- FILTRAGEM DAS FRATURAS COM BLOCOS : X> 2.99, Y>1.49 E Z>1.79.	54
FIGURA 43 – FRATURAS CONSIDERANDO 1 M DE ÁREA DE TOLERÂNCIA.....	55
FIGURA 44 – VISTA SUPERIOR DA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA- (FRATURAS 1 M).....	55
FIGURA 45 - FILTRAGEM DAS FRATURAS COM BLOCOS: X> 2.0 , Y>0.5 E Z>0.8.	56
FIGURA 46 – FRATURAS CONSIDERANDO 0.5M DE ÁREA DE TOLERÂNCIA.....	57
FIGURA 47 – VISTA SUPERIOR DA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA – (FRATURAS 0.5 M)	57
FIGURA 48 - FILTRAGEM DAS FRATURAS COM BLOCOS: X> 2.5 , Y> 1.0 E Z> 1.3.	58

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COORDENADAS UTILIZADAS NA CRIAÇÃO DO MODELO.	39
TABELA 2 - QUADRO COMPARATIVO DOS VOLUMES ENCONTRADO.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
CDRM	Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba.
CTRN	Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia.
PADCT	Programa de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico.
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande.
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
USP	Universidade Federal de São Paulo.
UAMG	Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia.

CAPITULO I

1. INTRODUÇÃO

O principal problema enfrentado pelo setor de rochas ornamentais é a transformação dos recursos em reservas de uma forma segura, econômica e minimizando os impactos ambientais, pois nesse ramo a qualidade visual do material lavrado irá refletir diretamente no seu preço, tornando indispensável uma análise prévia das condições em que se encontra o maciço rochoso a ser lavrado, através de um planejamento focado nas características geotécnicas e geológicas, para a obtenção de um material de aspecto visual bom, com boa recuperação e de forma segura.

1.1 JUSTIFICATIVA

A lavra de rochas ornamentais depende de um amplo conhecimento das características da área pesquisada, pois os riscos de se iniciar uma lavra em um depósito que não seja economicamente viável aumentam quanto menos for as informações da caracterização do depósito. Por essa razão se faz necessário um investimento na etapa de pesquisa para uma correta avaliação dos recursos existentes na área, pois uma decisão errada nessa etapa, faz com que as empresas apostem num depósito sem medir os riscos, e provavelmente essa área será abandonada. Outra vantagem da análise prévia está relacionada a uma característica fundamental que é a preservação da integridade da rocha e para isso se faz necessário um conhecimento prévio das condições geotécnicas e geológicas do maciço.

1.2 OBJETIVO

O objetivo principal da dissertação é definir uma metodologia de tomada de decisão em planejamento de lavra de rochas ornamentais utilizando informações das condições geotécnicas e geológicas. Na maioria dos casos essas informações são insuficientes para quantificar os riscos de um depósito não ser viável para determinadas condições operacionais. Essa metodologia foi testada em uma área piloto, sobre a qual são derivadas as conclusões e recomendações para orientar as empresas do setor de rochas ornamentais a utilizar a metodologia proposta de forma a reduzir os riscos do negócio, através da análise mais detalhada das informações de pesquisa mineral, para que se tenha uma maior lucratividade do empreendimento.

CAPITULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Inúmeros estudos retratam o avanço tecnológico no planejamento da lavra de rochas ornamentais. As pesquisas relacionadas ao desenvolvimento destas técnicas de planejamento, que visa melhorar o aproveitamento das rochas ornamentais em atividades como lavra, beneficiamento e comercialização, utilizam técnicas baseadas no planejamento de curto, médio e longo prazo. No longo prazo geralmente não ocorre o detalhamento das feições texturais e estruturais das rochas, tendo um enfoque maior no médio e curto prazo, pois se faz necessário à modelagem detalhada das jazidas baseando-se nas análises de falhas, fraturas estruturais e textura das rochas, visando não só o efeito estético como também aumentar a recuperação na lavra dos blocos.

Segundo Silva (1989) e Moura (2000), o valor comercial da rocha é consequência direta das características técnicas da rocha ornamental, bem como das características estéticas. A utilização mais adequada para uma dada rocha deve ser aquela que apresente o valor técnico, estético e comercial mais elevado.

E para a determinação destas características são necessários estudos dos principais parâmetros de descontinuidade como, persistência, qualidade volumétrica das juntas, orientação espacial, sua forma e preenchimento entre outras, esta análise facilita a caracterização do maciço para fins ornamentais. Se o fraturamento condiciona o seu comportamento, será necessária a localização e descrição das descontinuidades desse maciço á escala da obra projetada ou apenas do local. Onde após um levantamento detalhado da composição estrutural do maciço, os dados são informatizados, com a utilização de ferramentas especializadas em modelagem geológica e em planejamento de lavra.

2.1 CONCEITOS ESSENCIAIS

Segundo Vidal (2001), o conhecimento prévio das características de uma formação rochosa representa condição indispensável para uma correta escolha da metodologia e tecnologia de lavra. Estudos realizados confirmam a relação existente entre os resultados produtivos de lavra (rendimento, dimensões e forma dos blocos) e as características mínero-petrográficas (tipo e distribuição das fraturas e imperfeições dos blocos). Confirmando assim a necessidade de embasar a etapa de lavra sobre um conhecimento suficientemente aprofundado dos condicionantes geológicos e tecnológicos da jazida.

Segundo Oliveira e Brito (1998), o estudo das descontinuidades mostra-se de importância fundamental, pois estas estruturas condicionam, de maneira muito forte, o comportamento dos maciços rochosos, especialmente em relação à deformabilidade, resistência e permeabilidade, podendo controlar toda a estabilidade do meio rochoso. Sob a designação de descontinuidade engloba-se qualquer entidade geológica que interrompa a continuidade física de um dado meio rochoso, a exemplo de diaclases, falhas, superfícies de estratificação, superfícies de xistosidade, superfícies de contato entre formações, etc. Em termos práticos pode-se designar por descontinuidade qualquer superfície natural em que a resistência à tração é nula ou muito baixa. Para um melhor conhecimento a respeito do tema proposto, descreveremos alguns conceitos essenciais utilizados sobre rochas ornamentais e os tipos de descontinuidades e sua atuação no maciço rochoso.

As rochas ornamentais também designadas pedras naturais e/ou rochas dimensionadas, abrangem diversos tipos litológicos que podem ser extraídos em blocos e beneficiados em formas variadas, onde seus principais campos de aplicação incluem, principalmente, lapides e arte funerária em geral e edificações, destacando-se, nesse caso revestimento interno e externo de paredes, pisos, colunas, entre outras. Em geral, as rochas ornamentais, são divididas comercialmente em dois grandes grupos: “mármore e granitos”. Utilizando o termo mármore são comercializadas todas as rochas carbonatadas e, com o termo granito as rochas silicatadas. (VIDAL, 2001).

Segundo Oliveira e Brito (1998), os tipos de descontinuidades mais freqüentes observadas na natureza são:

a) Falha (Fault) – Fratura em que houve um deslocamento de grandeza significativa ao longo da superfície de separação das partes, esta usualmente designada por superfícies ou planos de falhas. As Falhas raramente são unidades planas singulares já que ocorrem normalmente com conjuntos de descontinuidades paralelas ou subparalelas, constituindo famílias, ao longo das quais se registrou movimento numa maior ou menor extensão.

b) Superfície de Estratificação (Bedding) - Descontinuidade paralela á superfície de deposição dos sedimentos, a qual pode ou não ter uma expressão física.

c) Foliação (Foliation) - Descontinuidade determinada pela orientação paralela dos minerais lamelares ou bandas minerais nas rochas metamórficas.

d) Diaclases (Joint) – Fratura em que não houve significativo deslocamento ao longo da superfície de estratificação, de clivagem e de xistosidade.

e) Clivagem de fraturas (Cleavage) – Fraturas paralelas em camadas rochosas de baixa resistência, ditas incompetentes, intercaladas em camadas com graus de resistência superior (competentes) são descontinuidades conhecidas por clivagens de fratura.

f) Xistosidade (Schistosity) – é a foliação no xisto ou em outra rocha cristalina de grão grosseiro resultante da disposição em planos paralelos dos minerais do tipo lamelar e/ou prismáticos.

As designações geológicas por si só raramente fornecem informações detalhadas das propriedades das descontinuidades de um projeto. Por essa razão, descrições geológicas são correntes para a compreensão das condições locais, mas estudos geotécnicos mais específicos serão quase sempre necessários antes da execução do projeto. (OLIVEIRA e BRITO, 1998).

Aliado ao levantamento geotécnico e visando um maior aproveitamento do recurso e maximizar o volume dos blocos extraídos são utilizadas as ferramentas informatizadas e integradas do software de mineração. O planejamento de lavra informatizado das rochas

ornamentais possibilita maior precisão e eficácia através da análise minuciosa das características do maciço rochoso, pois são através das interpretações desses dados que são feitas às escolhas do melhor método de lavra, da técnica de corte que melhor se adequar ao afloramento granítico, o dimensionamento dos equipamentos, a seqüência das atividades e a análise dos custos e impactos ambientais da área estudada.

Segundo Kalvelage, (2001), a escolha do método é função da morfologia dos afloramentos, do volume da reserva mineral, das características estruturais da jazida, inclusive seu estado de fraturamento, da localização geográfica da área e das características intrínsecas do material objeto da lavra. Depende ainda de uma análise econômico-financeira da jazida, considerando também a capacidade de investimento da empresa.

O investimento do planejamento em tecnologia tem como objetivo reduzir os custos uma vez que as técnicas utilizadas são viáveis e apresentam resultados significantes logo que implantadas. No ramo de rochas ornamentais, o retorno do capital investido é esperado quase que imediatamente, estes conhecimentos prévios ajudam a viabilizar o aproveitamento racional da lavra e aumentar os lucros.

Tendo em vista esses aspectos a tendência no setor será, o desenvolvimento cada vez maior das novas tecnologias, aumentando a produtividade e reduzindo os custos de investimento, como também o direcionamento dos trabalhos de exploração exclusivamente em maciços rochosos, uma vez que em estado como a Paraíba, a maioria das explorações são realizadas em matacões.

A mudança de mentalidade aliada com as novas técnicas e um mercado promissor torna o ramo de rochas ornamentais um excelente investimento, mas suas exigências referentes ao padrão estético, fazem com que os estudos prévios das características (geológica, litológicas, estruturais, mecânicas e petrográficas) possam determinar o tipo de mercado que o material pode atender.

Capítulo III

3. METODOLOGIA

O desenvolvimento do estudo compreendeu as seguintes etapas: revisão bibliográfica, reconhecimento da área, coleta dos dados, análise, modelagem e interpretação dos resultados.

Na fase da revisão bibliográfica foi feita a descrição dos avanços tecnológicos na área de planejamento das rochas ornamentais e a importância do conhecimento prévio das características geológicas e geotécnicas das áreas estudadas. Como também as pesquisas anteriores referentes à modelagem de depósitos de rochas ornamentais, com a utilização do aplicativo datamine.

A coleta de dados foi feita levando em consideração a delimitação da topografia da jazida e as informações geológicas e geotécnicas da área.

A análise dos dados foi realizada a partir do setor que apresentava as maiores descontinuidades da jazida, para melhor compreensão da influência de tal parâmetro na lavra das rochas ornamentais.

Foi feita a modelagem dos dados da topografia da área estudada através de aplicativos especializados representado no fluxograma da figura 1, resultando na definição dos recursos geológicos da jazida em blocos com dimensões comerciais.

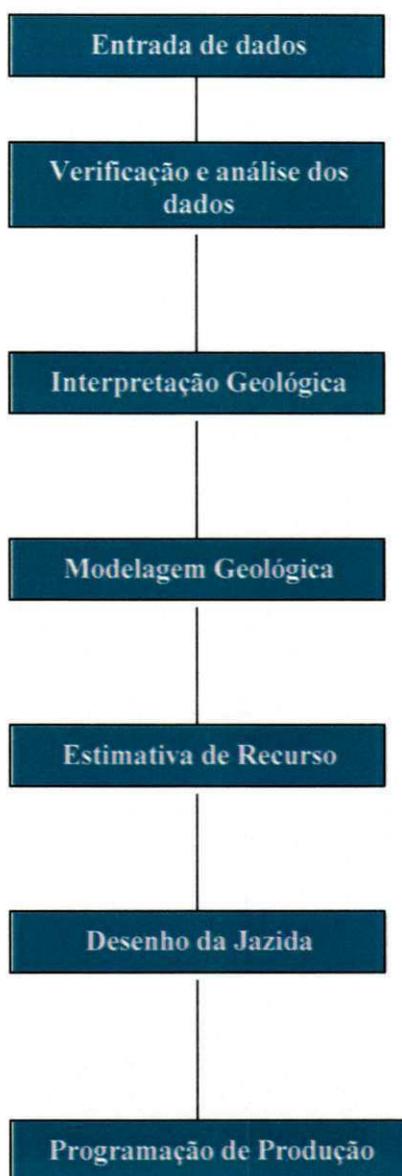


Figura 1 – Fluxograma das etapas seqüenciais de utilização do software. Fonte: Caranassios, De Tomi e Senhorinho (1999).

Em seguida, os recursos identificados foram avaliados conforme dois critérios: (1) considerando os recursos totais da área em estudo; e (2) incorporando as fraturas existentes na área e seu efeito na recuperação de lavra. Nessa etapa, foram utilizadas ferramentas de visualização para avaliar diferentes cenários de recuperação conforme a área de influência das fraturas.

Capítulo IV

4. CARACTERÍSTICAS DA ÁREA ESTUDADA

4.1 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

A área estudada está localizada na faixa norte do Estado da Paraíba, na região Nordeste do Brasil, e mais precisamente no Sítio Pedreira, localizado entre os municípios de Picuí e Baraúnas - PB. A área é cortada pela rodovia Estadual PB-053, e tem como principais cidades de referência, Campina Grande e Cabedelo (cidade onde está localizado o porto para escoamento do material), distantes respectivamente 110 Km e 266 Km. O município de Picuí localiza-se à 6°30'38" de latitude Sul e à 36°20'49" de longitude oeste, possuindo uma área de 734,1 mil m², a uma altitude de 439m.

O acesso ao corpo estudado pode ser feito pela BR 230, partindo da cidade de Campina Grande em direção a cidade de Soledade, onde se segue pela PB 177 até Picuí. O acesso ao afloramento a partir da cidade de Picuí é feito em direção à cidade de Baraúnas, percorrendo cerca de 9 km até o entroncamento à direita, dando acesso ao corpo. Após esse entroncamento, ainda são percorridos 900 m por estrada carroçável até chegar na estrada que dá acesso ao afloramento estudado. O afloramento está situado a 6° 34' 18.08" de latitude e 36° 17' 19.53" de longitude, coordenadas geográficas obtidas através da utilização de GPS (Geographic Positioning System), para uma melhor visualização da área estudada podemos observar a figura 2.



Figura 2 – Localização da área estudada. Escala: 1:250.000. Fonte: Mapa geológico do Estado da Paraíba, 2002.

4.2 DESCRIÇÃO DA JAZIDA

Trata-se da jazida granito caramelo Picuí, formada por rochas granitóides que apresentam granulação grosseira e cor creme, numa área pertencente à Companhia de Desenvolvimento de Recursos Minerais da Paraíba (CDRM).

Segundo Lima (1997), a área é constituída de concentrações de matacões de forma ovalada, com eixos maiores na direção NNE-SSW, com até 500 m de largura e 700 m de extensão. A área foi mapeada pela CDRM/PB na escala 1:10.000 e apresentou três diferentes setores (S_0 , S_1 e S_2).

O granito caramelo Picuí apresenta as seguintes características: rocha de textura granular hipidiomorfa, de natureza ígnea, composta principalmente pelos seguintes minerais: Microclínio (35%), Plagioclásio (25% - 30%), Quartzo (20 - 25%), Biotita (10%), Outros (5%) – Alanita, Opacos, Apatita, Zircão, Óxidos de Ferro, sendo classificada como uma biotita granito (3b). As principais características levantadas durante a visita de

campo foram às características geológicas do afloramento em estudo (falhas fraturas e alterações mineralógicas). (BRANDÃO, 2007).

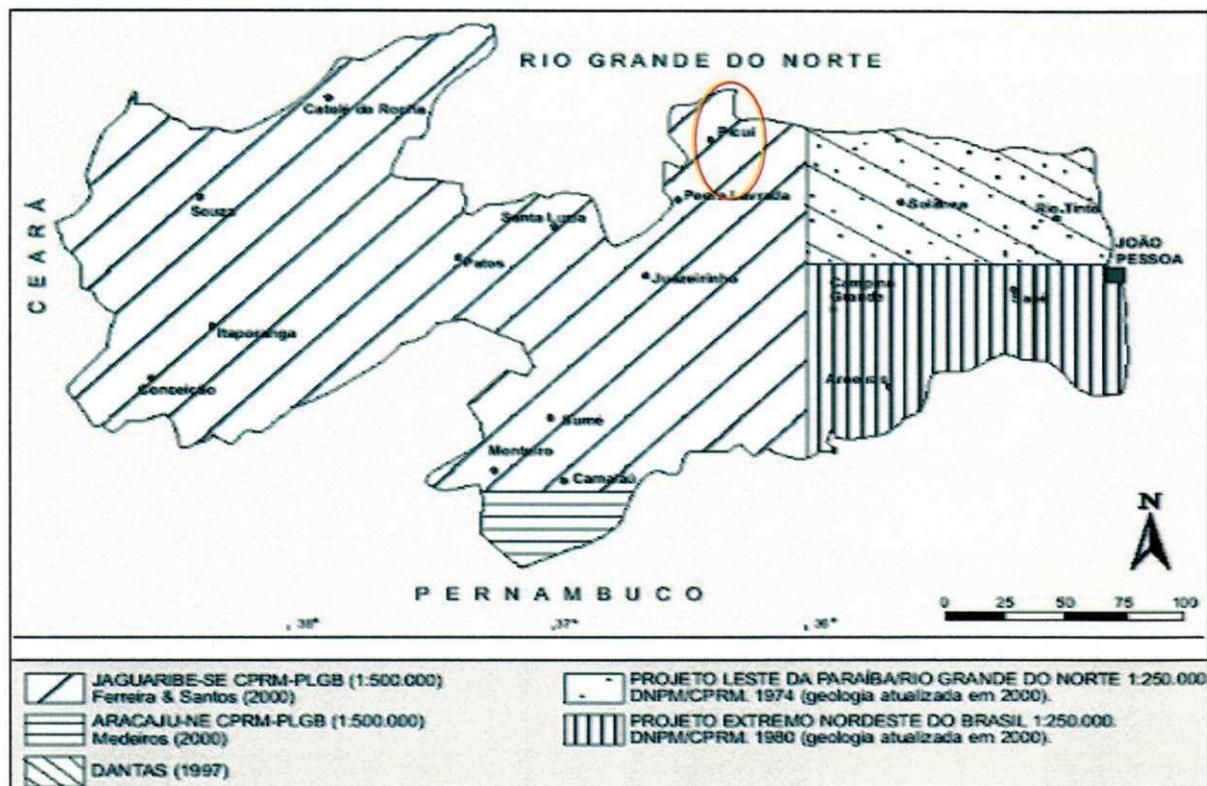


Figura 3 – Mapa de localização da área da jazida, destacando os principais levantamentos geológicos constatados na Paraíba. Escala: 1: 250.000, Fonte: Mapa geológico do Estado da Paraíba, 2002.

A análise geo-estrutural executada na área, possibilitou a descrição detalhada dos tipos de estruturas entre as fraturas e veios possibilitando uma distribuição das mesmas, descrevendo seus parâmetros geológicos e sua frequência.

Os trabalhos de mapeamento foram realizados através da obtenção de três linhas base B1, B2 e B3, que foram geo-referenciadas na maior extensão dos afloramentos do corpo granítico estudado, para servirem de referência na localização das discontinuidades existentes. Foram utilizadas três linhas base devido o maciço apresentar três pontos distintos de afloramentos.

Segundo Pires (1988), nos afloramentos, o maciço apresenta-se preferencialmente homogêneo quanto à textura e coloração. No que se refere às anomalias, verificam-se ocorrências de corpos gnáissicos, provavelmente não remobilizados, como também intrusões graníticas de coloração cinza e textura média. Macroscopicamente, em escala de afloramento, a rocha apresenta-se com uma textura granular hipidiomorfa, com uma granulação de média a grossa. Quanto à cor, no estado seco, o mesmo apresenta-se róseo-caramelo, fruto da conjugação dos feldspatos microclina e plagioclásio, além do quartzo leitoso xenomorfo.

No levantamento foram determinadas as direções das fraturas, com a utilização bússola e trena e com o uso do GPS (Geographic Positioning System), foram obtidas as coordenadas geográficas da área em estudo, apresentadas na tabela 1 em anexo. Todos os dados obtidos por afloramento estão detalhados nas tabelas 2, 3 e 4 em anexo.

A análise foi realizada apenas no setor 1, por ser a área que apresentou maior número de matacões. As figuras 4 e 5 retratam a visão geral da área estudada e a vista em detalhe do afloramento, respectivamente.

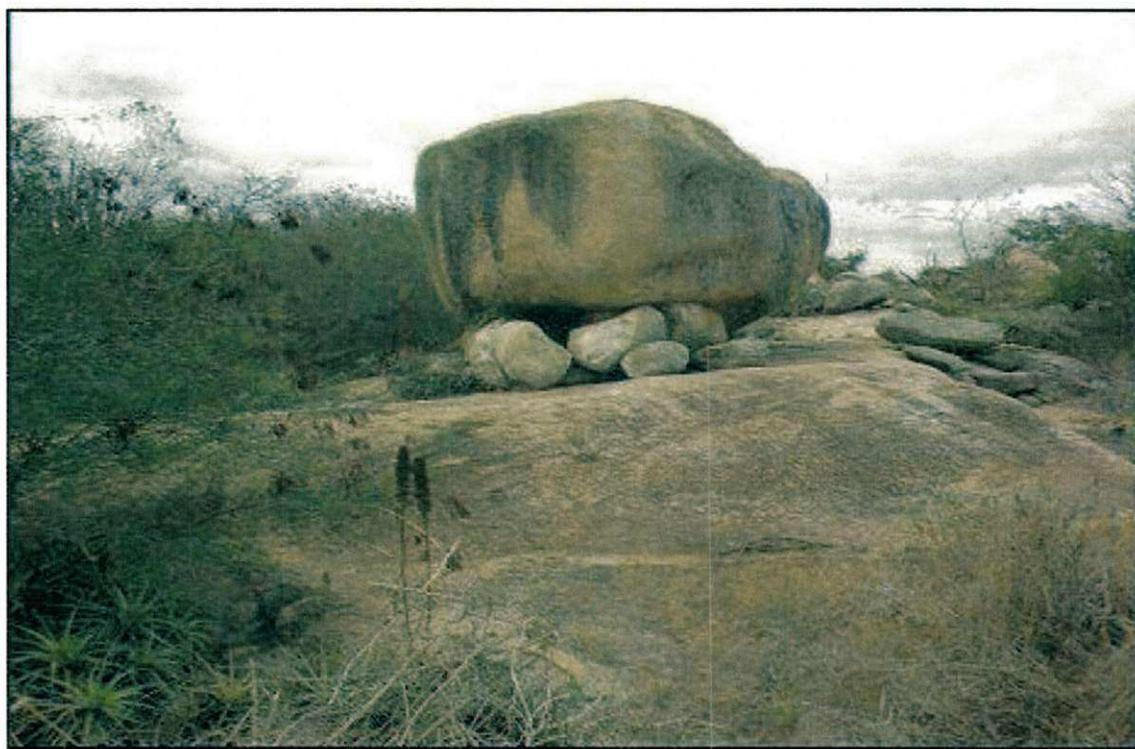


Figura 4 – Vista do setor onde foram feitos os levantamentos.



Figura 5 – Vista em detalhe de afloramentos no setor estudado.

Foram encontrados na área três afloramentos, sendo analisados independentemente e nomeados com afloramento 1,2 e 3. Onde a maior parte das fraturas observadas nos afloramentos era preenchida com pegmatito, existindo ainda algumas preenchidas com quartzo e outras sem preenchimento. Poderemos observar as principais fraturas existentes através das figuras 6, 7 e 8.



Figura 6 – Fratura existente na área preenchida com pegmatito.



Figura 7 – Fratura existente na área preenchida com veio de quartzo.



Figura 8 – Fratura existente na área sem preenchimento.

4.3 GEOLOGIA GERAL

A área estudada é formada por uma seqüência de rochas cristalofílicas pertencentes ao pré-cambriano. As características lito-estratigráfica estão relacionadas ao Cenozóico, Neoproterozóico e Paleoterozóico. As figuras 9,10 e 11 mostram as características lito-estratigráfica, a Compartimentação tecno-estratigráfica e o mapa geológico da região estudada na Paraíba, respectivamente.

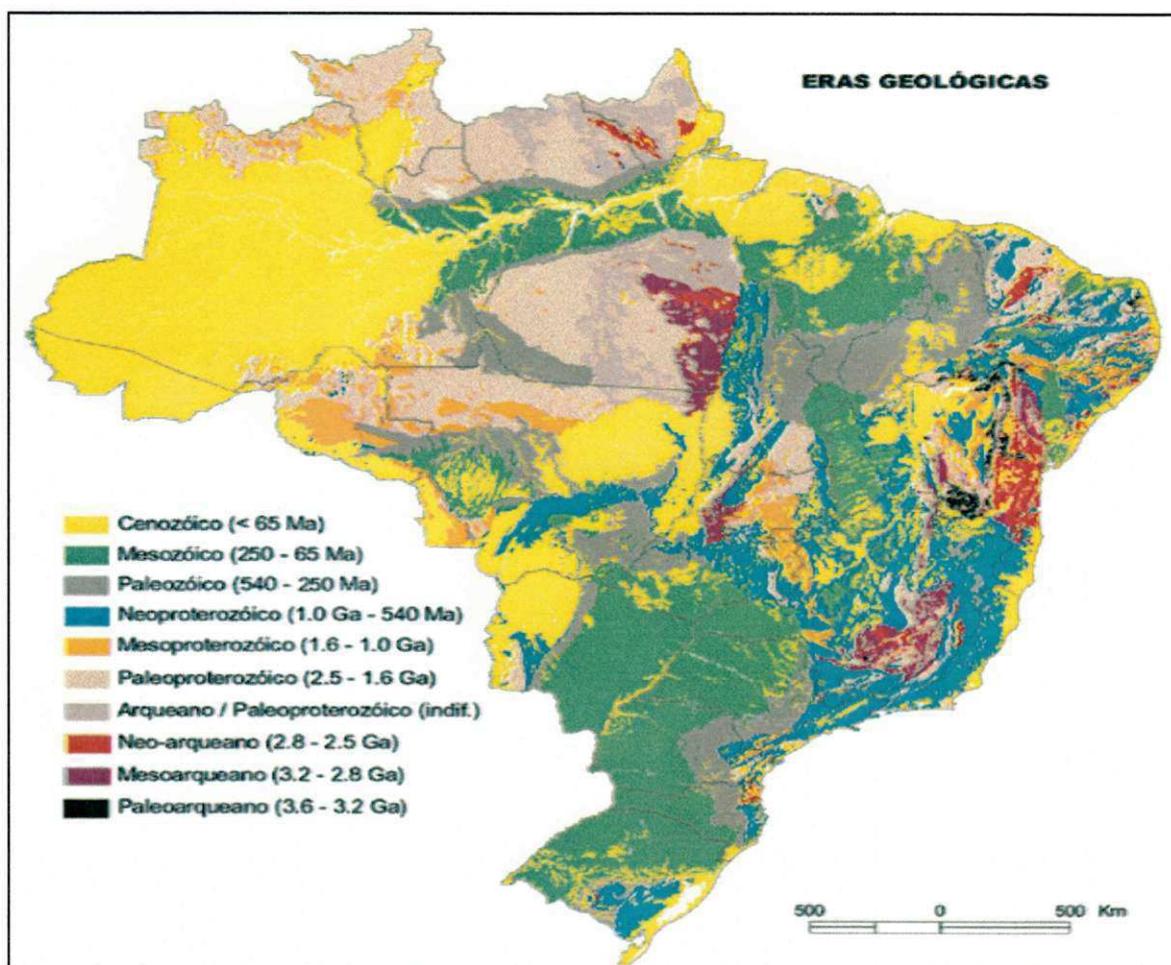


Figura 9 – Período de caracterização lito-estratigráfica no Brasil. Fonte:Relatório interno de avaliação de reservas da CVRD, 2006.

O substrato geológico paraibano é formado predominantemente por rochas pré-cambrianas, as quais ocupam mais de 80% de seu território, sendo complementada por bacias sedimentares, rochas vulcânicas, cretáceas, coberturas plataformais paleógenas/neógenas e formações superficiais quaternárias. A área pré-cambriana engloba traços da província da Borborema, um cinturão orogênico meso/neoproterozóico que se estende por grande parte do Nordeste, desde Sergipe até a parte oriental do Piauí. Os modelos de compartimentação tectônica foram elaborados por diversos autores reconhecendo uma complexidade estratigráfica, que levou a maioria a conceber uma história pré-cambriana. As rochas pré-cambrianas que

compõem a região estão agrupadas em três unidades distintas: Grupo Seridó, Rochas Filonianas e Complexo Gnáissico-Migmatítico, (CPRM, 2002).

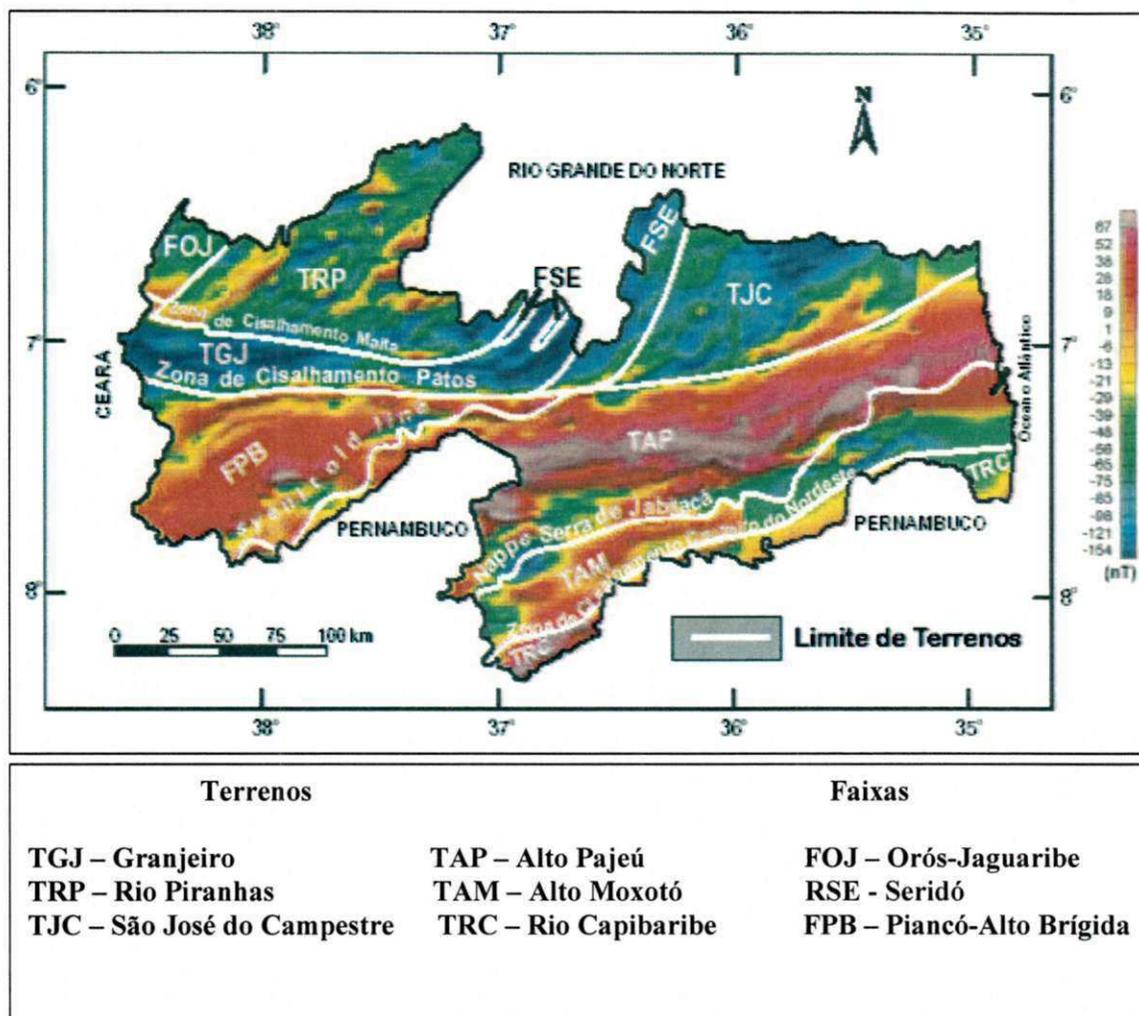


Figura 10 – Compartimentação tectono-estratigráfica da Paraíba. Fonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil.

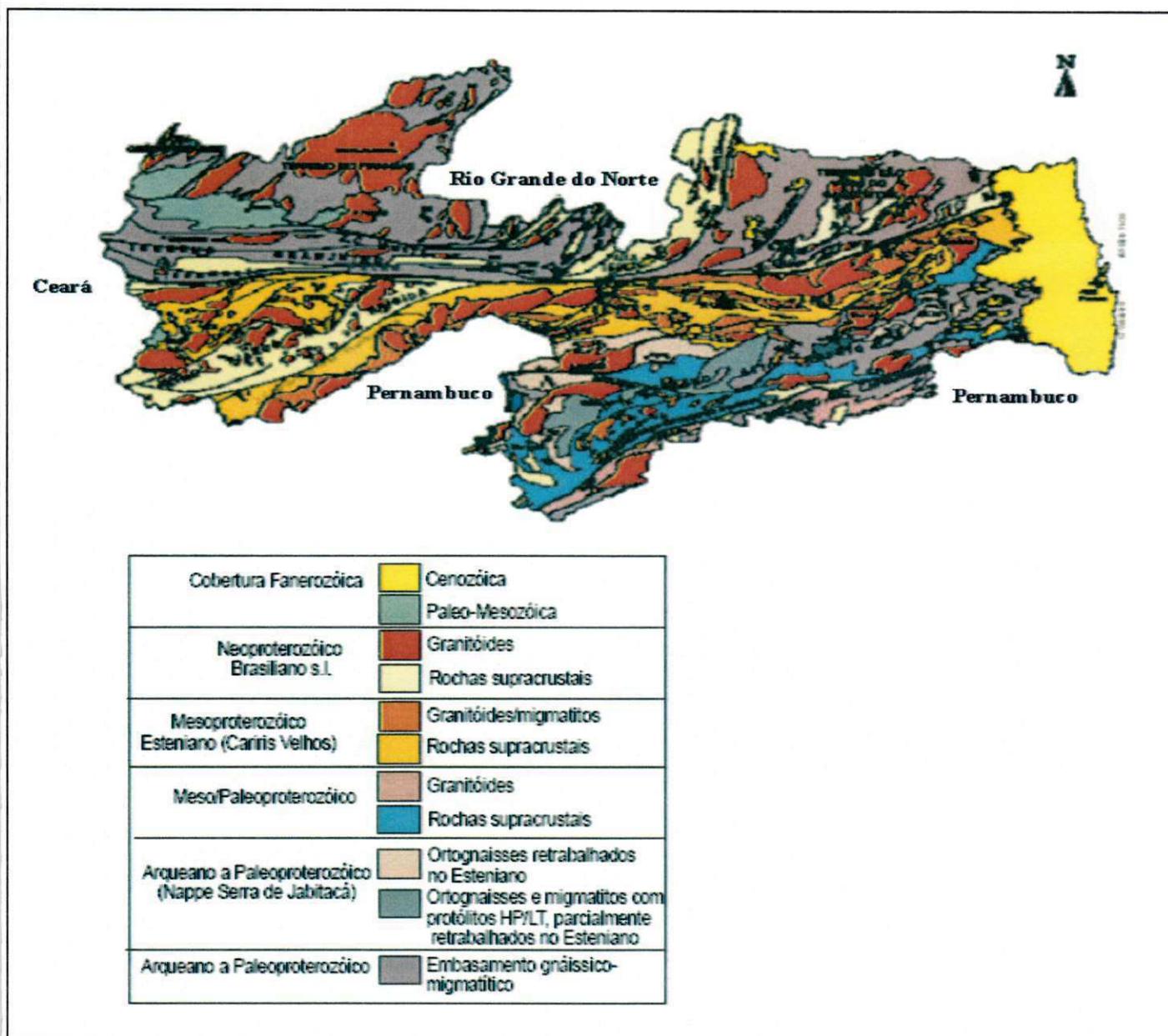


Figura 11 – Mapa Geológico da região estudada. Fonte: Mapa Geológico do Estado da Paraíba.

4.4 GEOLOGIA LOCAL

A área estudada apresenta como geologia local as características descritas na figura 12.

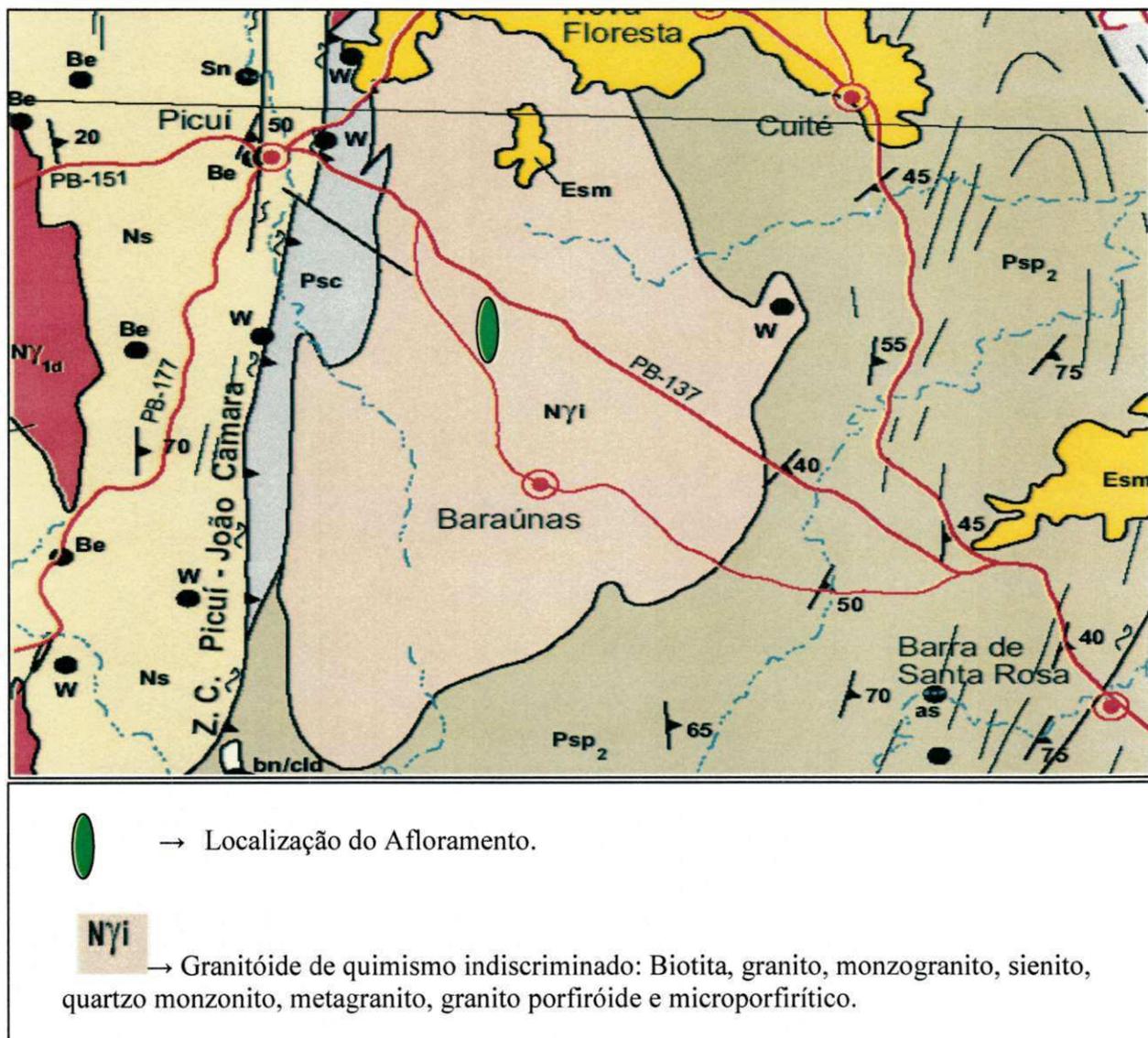


Figura 12 – Mapa Geológico de detalhe da região Estudada. Escala: 1:500.000. Fonte: Mapa Geológico do Estado da Paraíba.

Segundo Lima (1980), de uma maneira geral, a área do granito Baraúnas/Picuí constitui um corpo de formato irregular e alongado segundo a direção NNE, apresentando como encaixantes rochas do complexo gnáissico-migmatítico, com as delimitações ilustradas na figura 13.

- Na borda oeste: Faz contato com litologias do grupo seridó, através da zona de falha de Picuí;

- No extremo norte: Encontra-se parcialmente coberto por sedimentos terciários da formação Serra dos Martins;

Segundo Lima (1997), essa jazida apresenta alguns stocks com concentrações de matacões, geralmente distribuídos em subáreas denominadas setores, com morfologia relativamente plana, onde sobreposto a eles encontra-se o maciço rochoso e suas partes aflorantes.

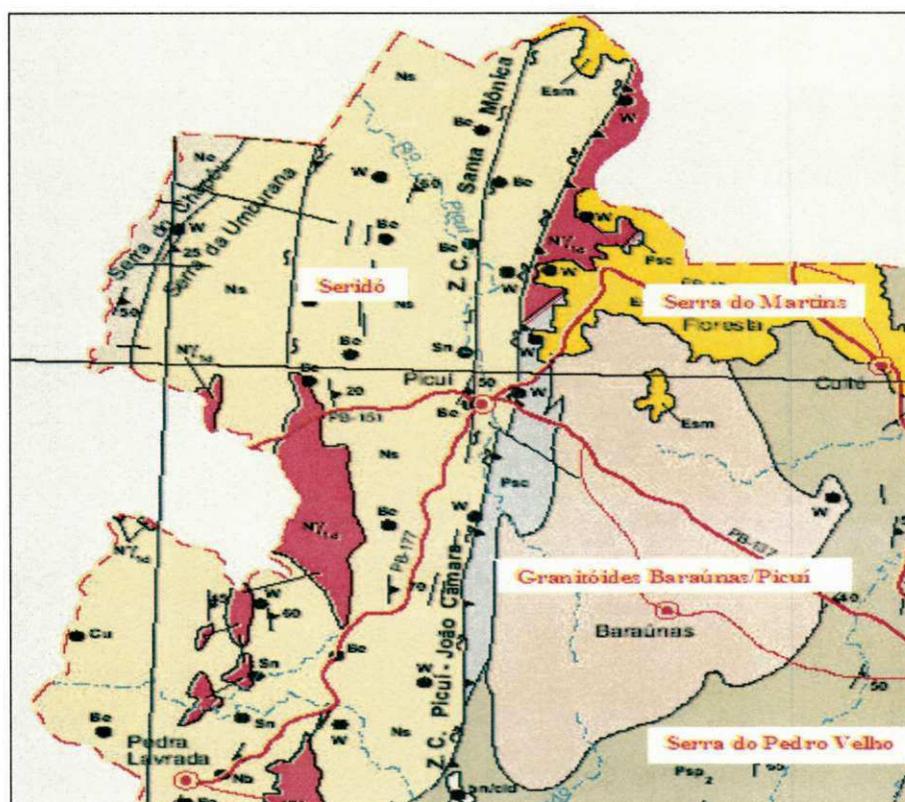


Figura 13 – Localização do corpo granitóide Baraúnas/ Picuí.

CAPITULO V

5. LEVANTAMENTO E ANÁLISE DOS DADOS

O estudo inicia-se com a coleta e análise dos dados geológicos para identificar os problemas e as características da jazida. Com isso, obtivemos dados representativos do maciço rochoso em quantidade e qualidade suficientes para desenvolver um modelo da jazida incorporando as feições relevantes para lavra, tais como foliação, juntas e falhas.

O trabalho visa incorporar as discontinuidades do maciço, classificando-o em diferentes zonas de qualidade, dependendo de fatores geológicos (alterações) e geotécnicos (estados de fraturamento), transformando-o em um modelo informatizado da jazida, para planejar a extração dos blocos, com o propósito de modelar as jazidas de rochas ornamentais de uma forma mais realista possível, respeitando sua viabilidade técnica e econômica e seus aspectos ambientais, considerando que os trabalhos prévios publicados não deram ênfase à incorporação das fraturas.

5.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO DE CAMPO

A visita à área em estudo para coleta de dados foi realizada em Agosto de 2006, onde os trabalhos de campo foram iniciados com a implantação de 3 linhas base (B1, B2 e B3), tais linhas foram geo-referenciadas na maior extensão dos afloramentos do corpo estudado, com a finalidade de servir como base na localização das discontinuidades existentes. Essas linhas foram utilizadas por causa da irregularidade do corpo e os três pontos escolhidos foram em locais onde o maciço rochoso apresentava três afloramentos distintos. A figura 14 ,apresenta os três pontos de afloramento.



Figura 14 – Os três blocos de matacões encontradas na área estudada.

Com os dados obtidos após o estudo do maciço rochoso na área do corpo granitóide Baraúnas/Picuí, foi feito um quadro comparativo com a descrição realizada por Lima (1997), onde destacavam como principais características geo-estruturais, um conjunto de fraturas sub-verticais que variam de 3 a 35 m de comprimento, conjunto esse que apresenta fraturas preenchidas com veios pegmatíticos com direção preferencial NNE-SSW, como também fraturas preenchidas com veios de quartzo, com direção preferencial NNE-SSW e fraturas não preenchidas, que ocorrem com maior frequência, na área que apresenta a direção preferencial NNW-SSE. Quanto aos planos de fraqueza (clivagem) o granito Picuí apresenta três direções preferenciais de corte: o primeiro plano de menor resistência encontra-se disposto horizontalmente, o segundo plano ortogonal ao primeiro e de resistência média com direção em torno de 22° NE e o terceiro plano, ortogonal ao primeiro e ao segundo de maior resistência, apresenta direção em torno de 68° NW.

As principais áreas aflorantes do maciço granito Picuí, foram divididas em três setores, por apresentarem importantes feições geo-estruturais: (S_0 , S_1 , S_2), mas apesar de serem analisados e mapeados os três setores, resolvemos tomar como base o setor S_1 , por conter melhores condições (topográficas, geológicas e estruturais), para que seja possível definir o método de lavra mais apropriado para o maciço estudado.

Uma vez confirmados todos esses parâmetros partimos para digitalização das curvas de nível da jazida no setor 1, com o auxílio do programa Auto CAD. Como apresentado na figura 15.

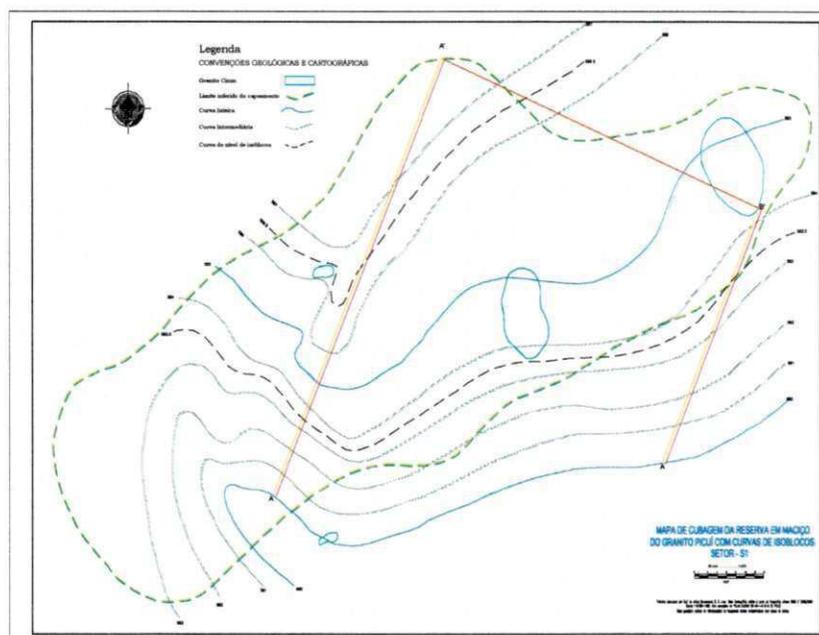


Figura 15 – Representação das curvas de níveis da jazida (setor 1) no programa Auto CAD.

Após a representação das curvas de nível no Auto CAD, foi feita a importação dos dados para o aplicativo Datamine, utilizando a função *Import*, construindo um arquivo de poligonais da área denominado no datamine de *strings (st)*, ao carregarmos o arquivo importado do auto CAD temos o seguinte design, mostrado pelas figuras abaixo.

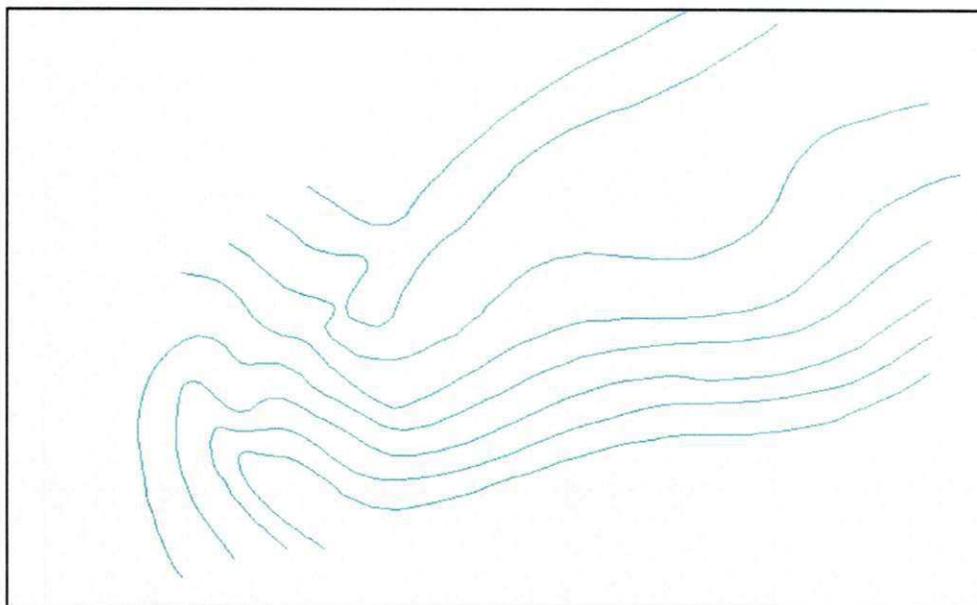


Figura 16 – Poligonais das curvas de nível representada no programa Datamine em forma de strings (linhas).

Após a construção do arquivo de *Strings (st)* no aplicativo Datamine, passamos para o desenvolvimento da DTM (Modelo Digital do Terreno), etapa necessária para a geração de modelo de blocos. A DTM é o modelo aproximado da superfície triangulada, sendo necessário os dados topográficos ou um conjunto de valores de (X, Y e Z), para sua criação. A superfície triangulada é chamada de *wireframe (tr)*. Para realização da triangulação é necessário criar uma poligonal de fechamento que circunda todas as poligonais das curvas de nível existentes. Cada poligonal é triangulada com a poligonal posterior e anterior. Nas figuras 17, 18 e 19 são apresentadas às triangulações dos pontos das poligonais.

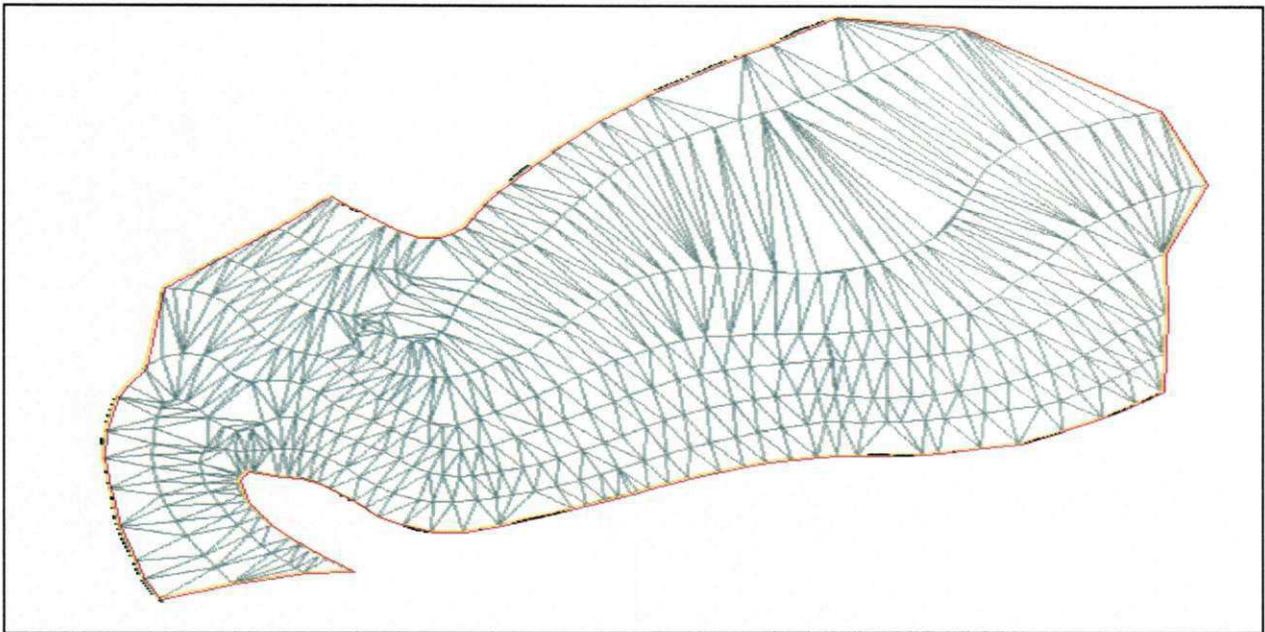


Figura 17 – Vista em planta da triangulação entre os pontos das poligonais representado no programa Datamine – (2D).

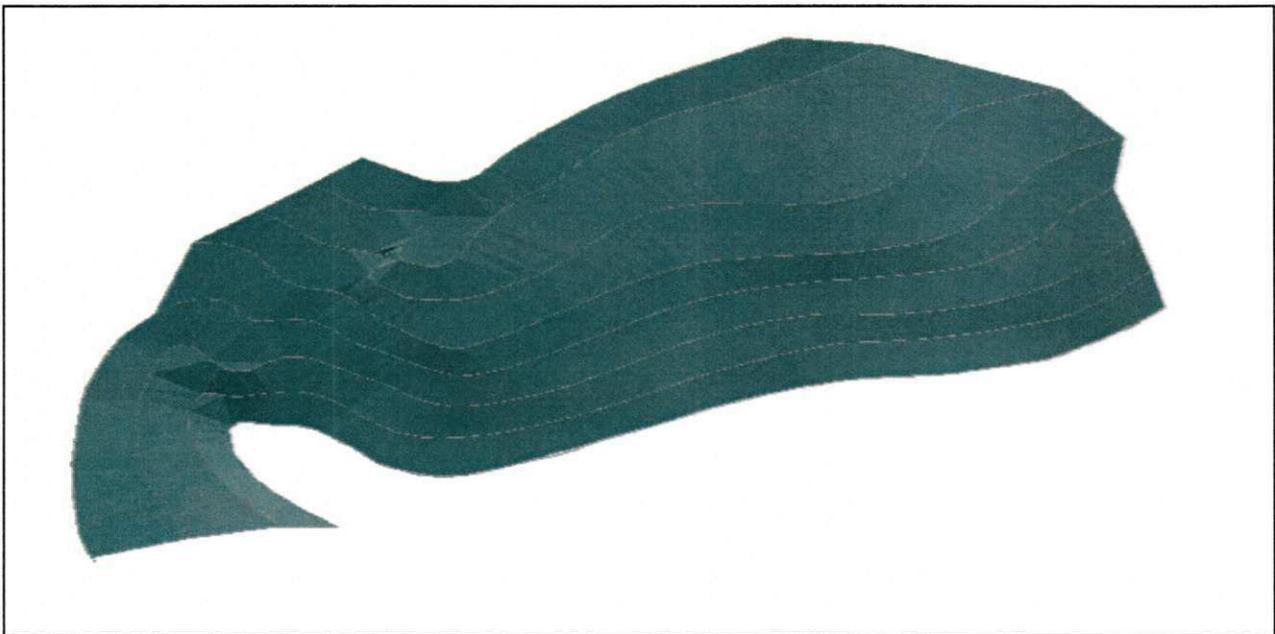


Figura 18 - Superfície topográfica representada no programa Datamine em forma de Wireframes (triângulos) com as poligonais - representação 3D.

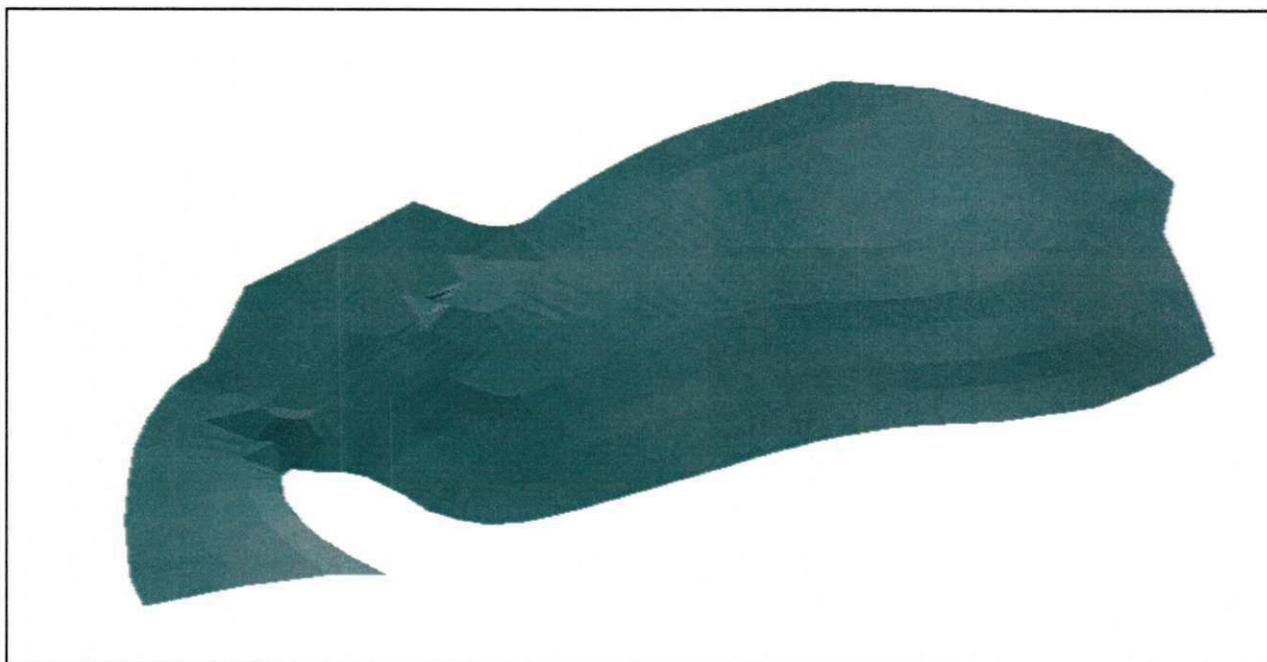


Figura 19 - Superfície topográfica representada no programa Datamine em forma de wireframes (triângulos) sem as poligonais - representação (3D).

Para geração do maciço que engloba um volume específico da jazida precisamos da cota mínima para definir o limite horizontal inferior do sólido a ser criado. No caso da jazida estudada o valor mínimo é a cota 580 m. A figura 20 apresenta o sólido criado.

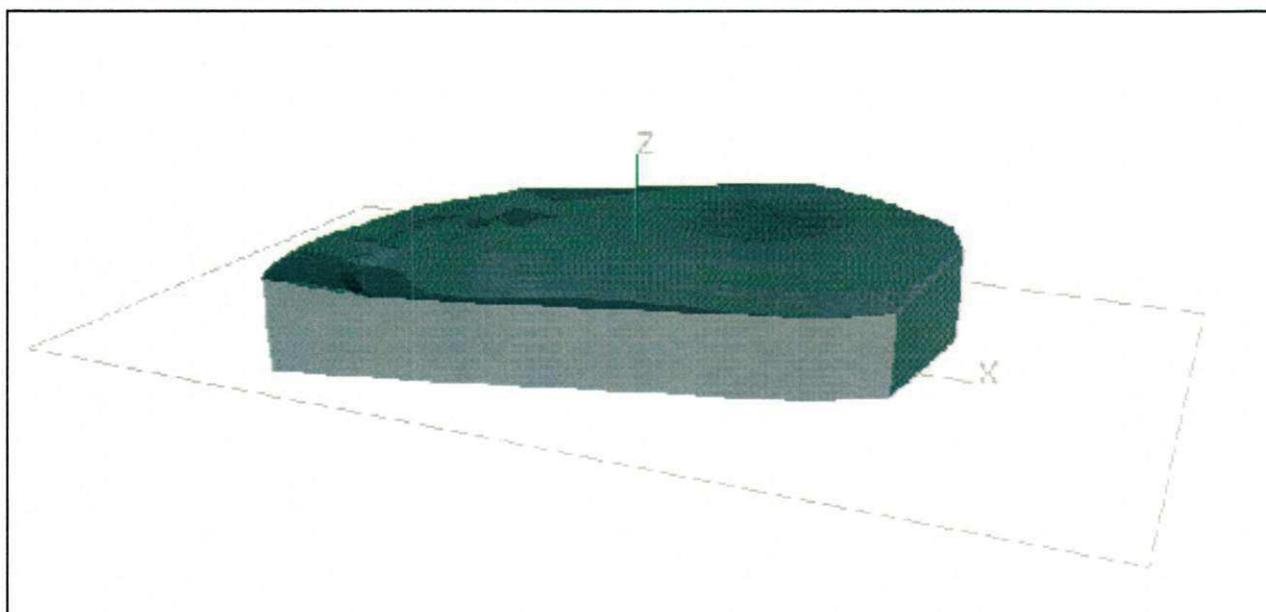


Figura 20 – Sólido gerado através das wireframe(3D) -Visão lateral da Superfície projetada no plano Z.

São necessárias as definições de alguns parâmetros antes da geração do modelo de blocos, pois as rochas ornamentais apresentam algumas particularidades, que diferenciam a definição de minério e estéril, por não possuírem teores são definidas como modelo de estéril, o fator que serve de parâmetro para diferenciar minério e estéril é o tamanho dos blocos, onde os blocos que atingirem o tamanho ideal são considerados lavráveis enquanto aqueles que não atingirem são considerados estéreis. Então o tamanho do bloco é fator limitante da modelagem de jazidas de rocha ornamental.

A lavra de rochas ornamentais tem o objetivo de extrair blocos retangulares, de dimensões variadas, devendo obedecer às capacidades produtivas dos equipamentos utilizados nas etapas de beneficiamento (teares ou talha-blocos), às dimensões ditadas pelo mercado, ou ainda às dimensões que privilegiem o melhor aproveitamento das reservas existentes. (KALVELAGE, 2001).

O tamanho do bloco utilizado no estudo de caso foi definido pelo padrão comercial e pelas etapas posteriores de beneficiamento. Foram considerados nesse trabalho os seguintes valores para o tamanho dos blocos: **Comprimento (X= 3,0 m), Altura (Y= 1,5m) e Largura (Z= 1,8m).**

Para geração do modelo de blocos, necessitamos do desenvolvimento de um protótipo, onde são definidos os valores máximos e mínimos das coordenadas X, Y e Z, para que o sólido se encaixe perfeitamente dentro dos seus limites, como também o tamanho das células que deve ter os blocos a fim de encontrar o número de células relativas a cada eixo. Para se obter as coordenadas máximas e mínimas foi realizada uma análise estatística utilizando a função application, como mostrado na figura 21.

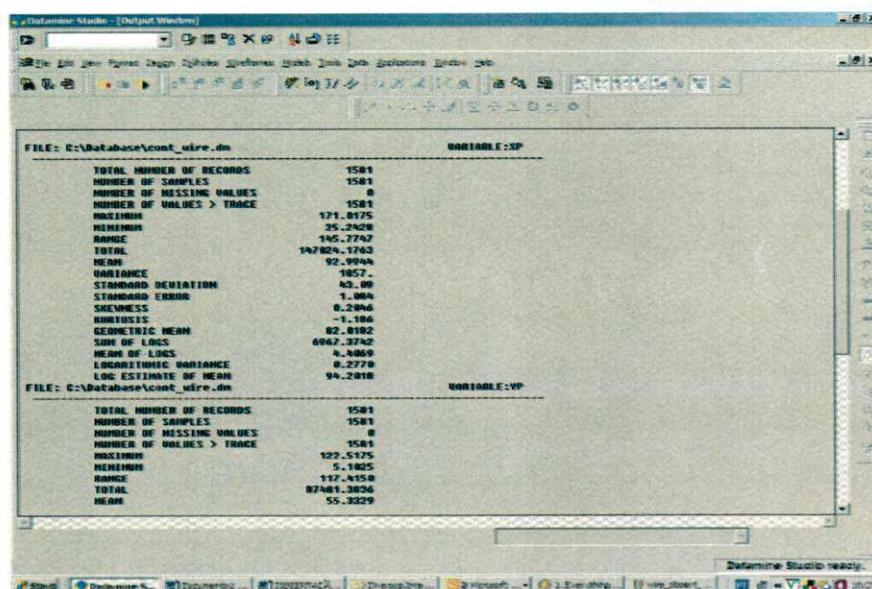


Figura 21 – Análise estatística (compute Statistical).

Dados utilizados para criação do modelo de blocos:

Tabela 1 – Coordenadas máximas e mínimas utilizadas para criação do modelo de blocos.

	Mínimo	Máximo	Range	Dimensão das Células	Número de Células
X	25,96	170,29	144,33	3,0	48,11
Y	5,68	121,93	116,25	1,5	77,5
Z	580	587	7	1,8	3,8

Inserimos os valores acima no aplicativo datamine e geramos o modelo de blocos dentro dos limites pré-estabelecidos, sendo criado com o máximo de blocos possíveis. Obtivemos um total de 9400 células. Onde os blocos que atenderem ao tamanho solicitado pela empresa são considerados blocos lavráveis e aqueles que não atingirem esse tamanho são considerados sub-blocos, podendo ou não ser comercializados, dependendo do preço de mercado na época. As figuras 22 , 23, 24 e 25 mostraram as diferentes vistas do modelo.

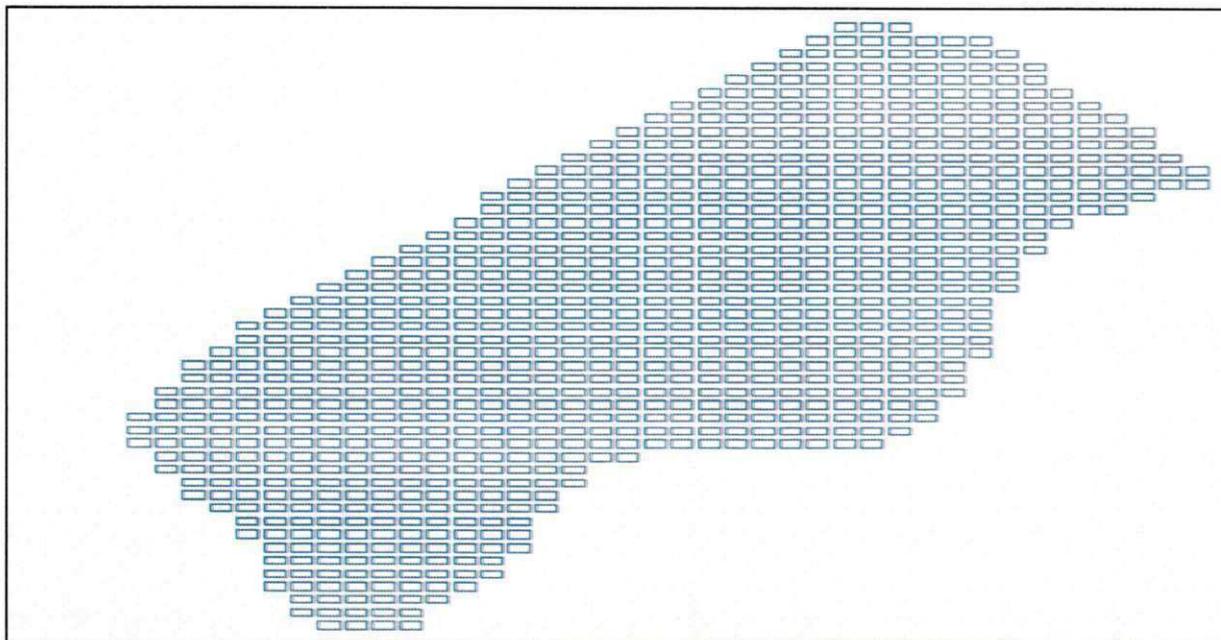


Figura 22 – Modelo de bloco da área do (setor S 1) estudado – Vista no plano.

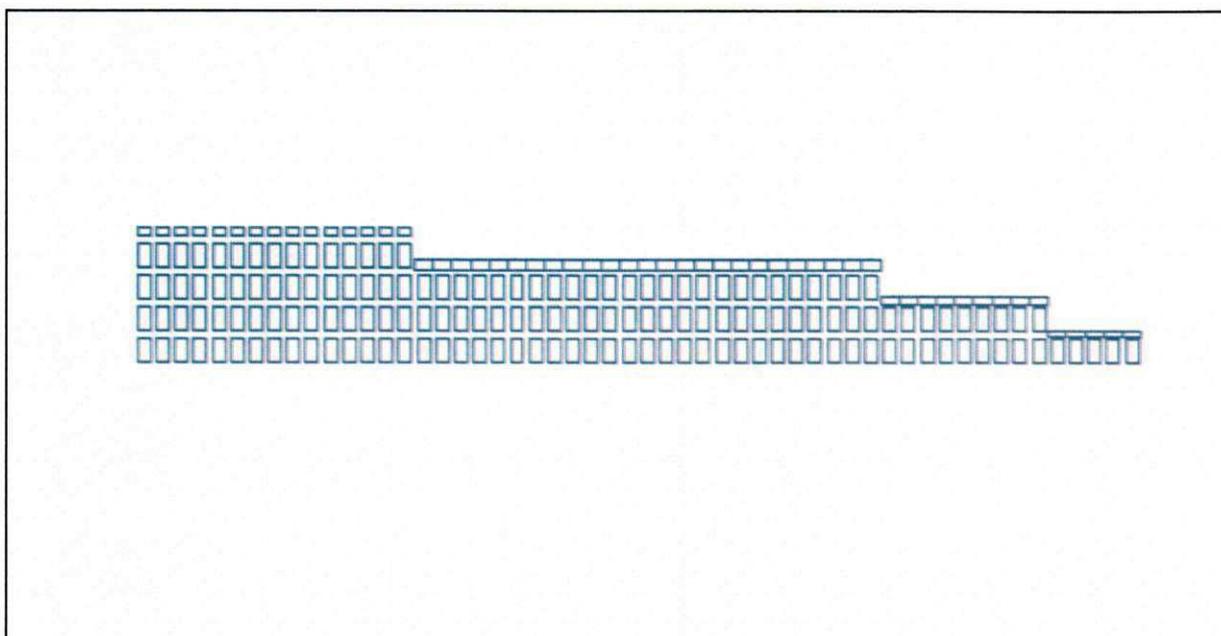


Figura 23 – Modelo de blocos da área do(setor S 1) estudado – corte na direção norte-sul.

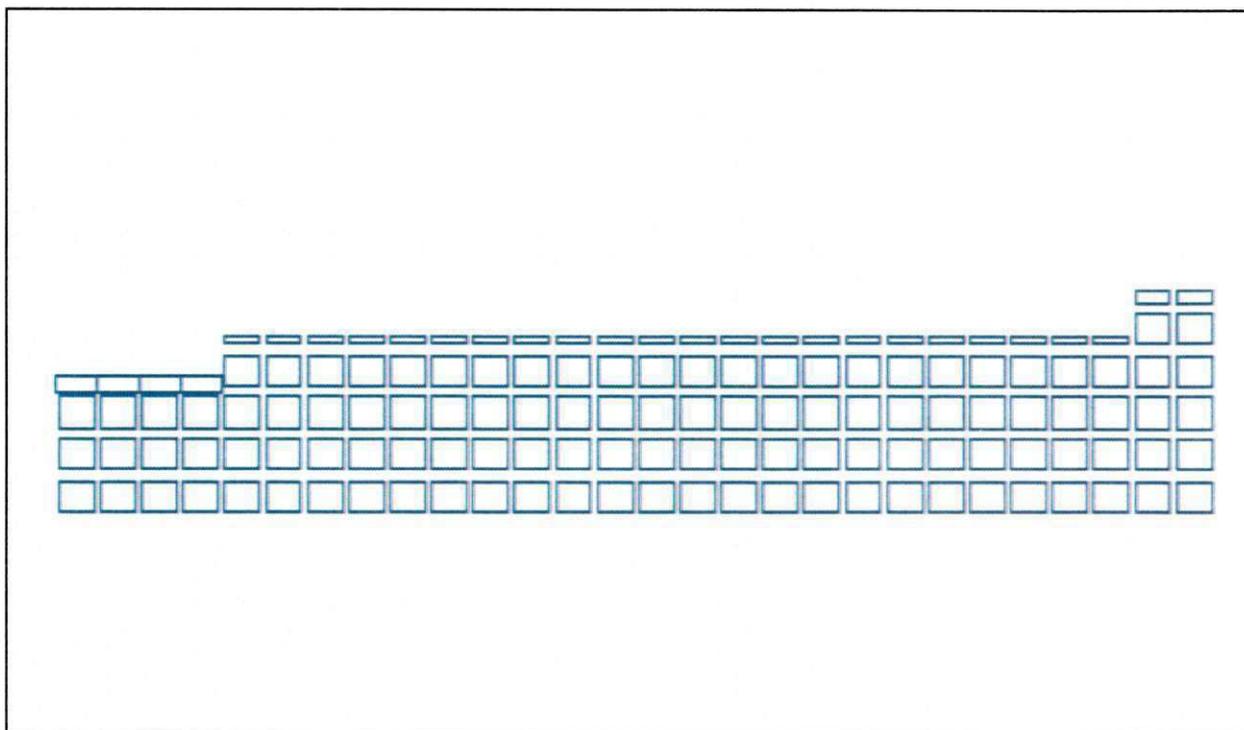


Figura24- Modelo de blocos da área do(setor S 1) estudado – Corte na direção leste- Oeste.

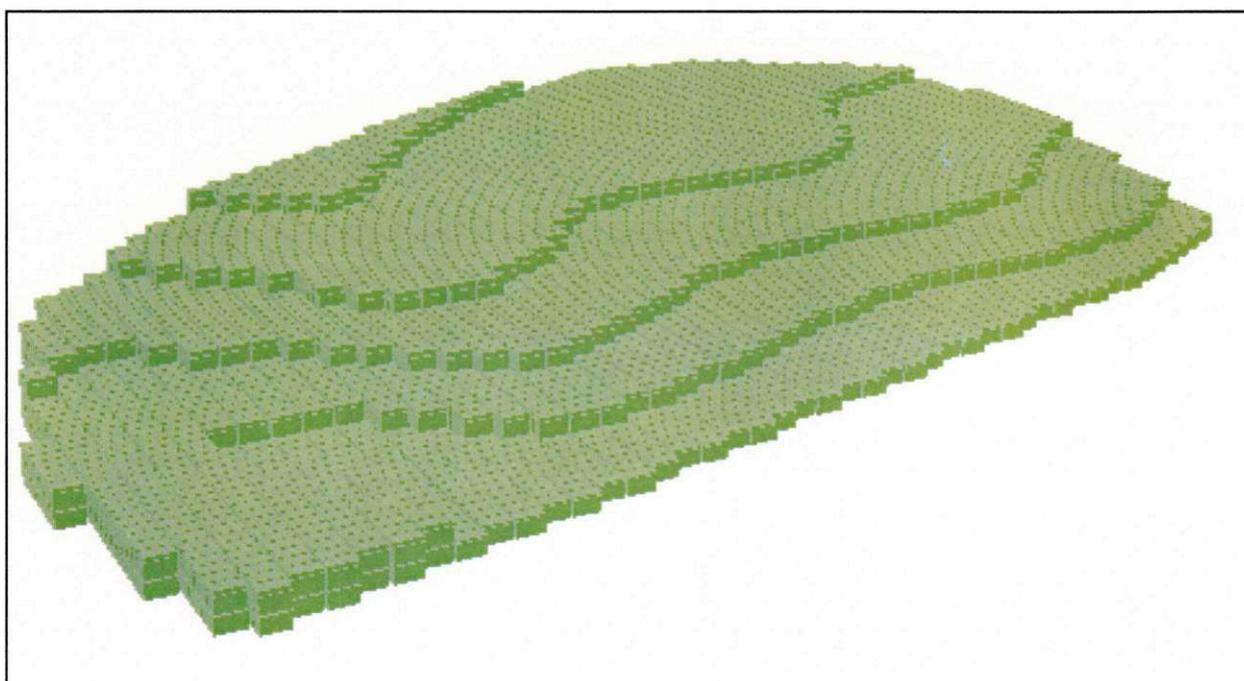


Figura 25 – Modelo de blocos da área do(setor S1) estudado sem fraturas – Vista lateral (3D).

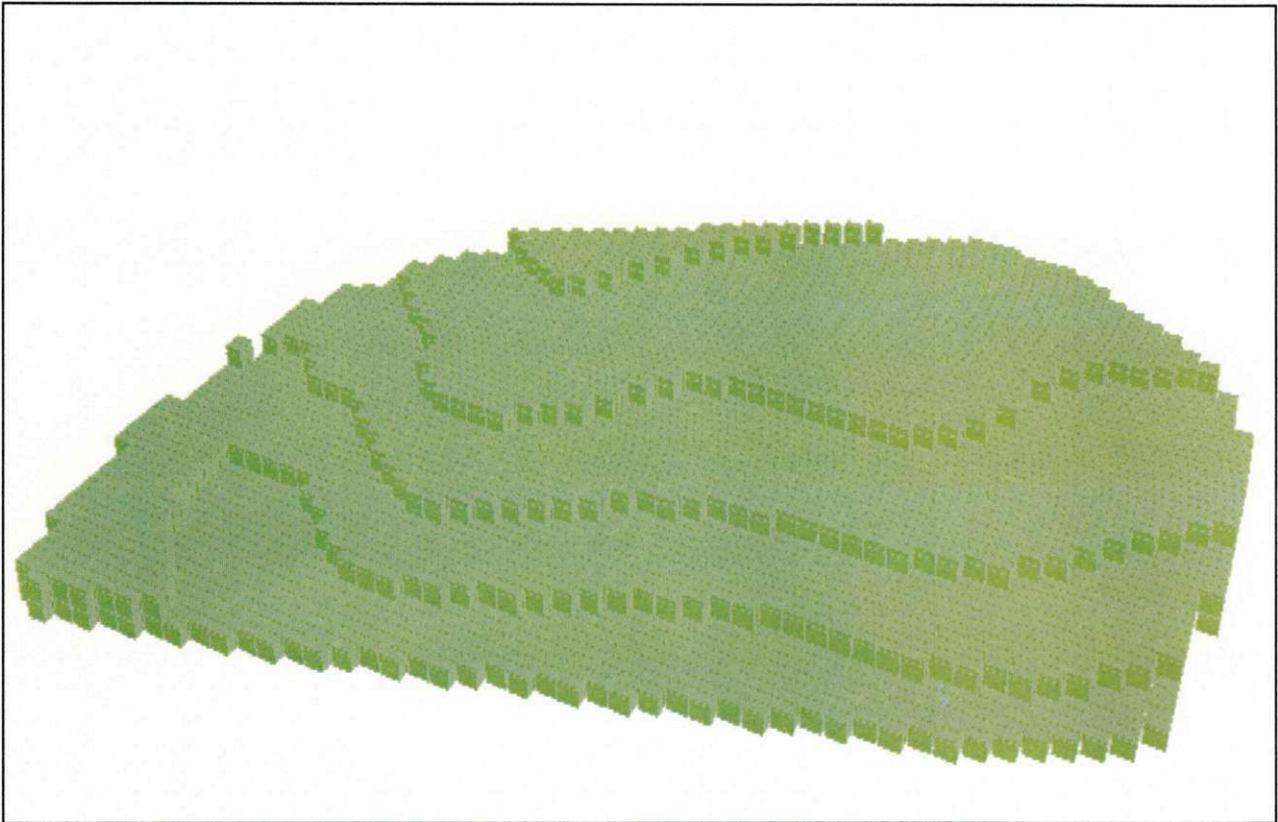


Figura 26 – Modelo de blocos da área do (setor S 1) estudado sem fraturas – Vista frontal (3D).

CAPITULO VI

6. INCORPORAÇÃO DAS FRATURAS NO MODELO DE BLOCOS

Após a criação do modelo de blocos e avaliação dos recursos totais, foi feita a incorporação das fraturas existentes na área estudada para uma maior precisão no cálculo dos recursos. As fraturas foram mapeadas através de uma visita de campo. A figura 27 mostra a marcação das linhas que serviram de base para o detalhamento das discontinuidades. E apesar da análise estrutural ter sido desenvolvida para os três setores aflorantes, foi fundamental a escolha do setor S1, para desenvolvimento do estudo da influência das discontinuidades na avaliação de recursos, por apresentar maior frequência no nível de fraturamento, como também melhores condições por se tratar de uma área aflorante com homogeneidade.



Figura 27 - Visão geral da área com as linhas base traçadas (linhas brancas) para marcação das discontinuidades.

A introdução das fraturas no modelo da jazida foi realizada seguindo os seguintes passos:

- 1- Inicialmente foram criados traços representativos do posicionamento das discontinuidades existentes no local. Essa atividade foi realizada numa vista em planta, assumindo que a atitude das fraturas era vertical;
- 2- Uma vez localizadas as discontinuidades, os traços representativos das discontinuidades no plano XY foram convertidos em poligonais abertas (“strings”). As figuras 28 e 29 apresentam as discontinuidades já convertidas em poligonais abertas.

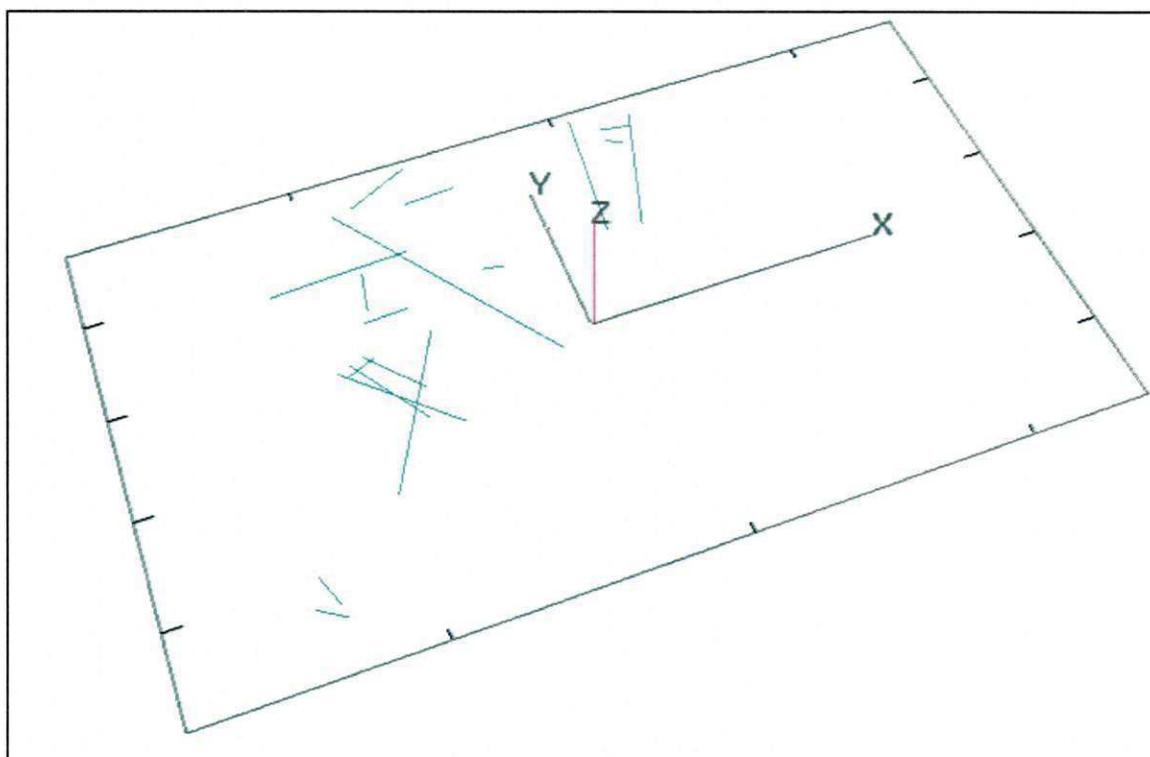


Figura 28 – Fraturas encontradas na região estudada (Setor S 1) – Vista (3D).

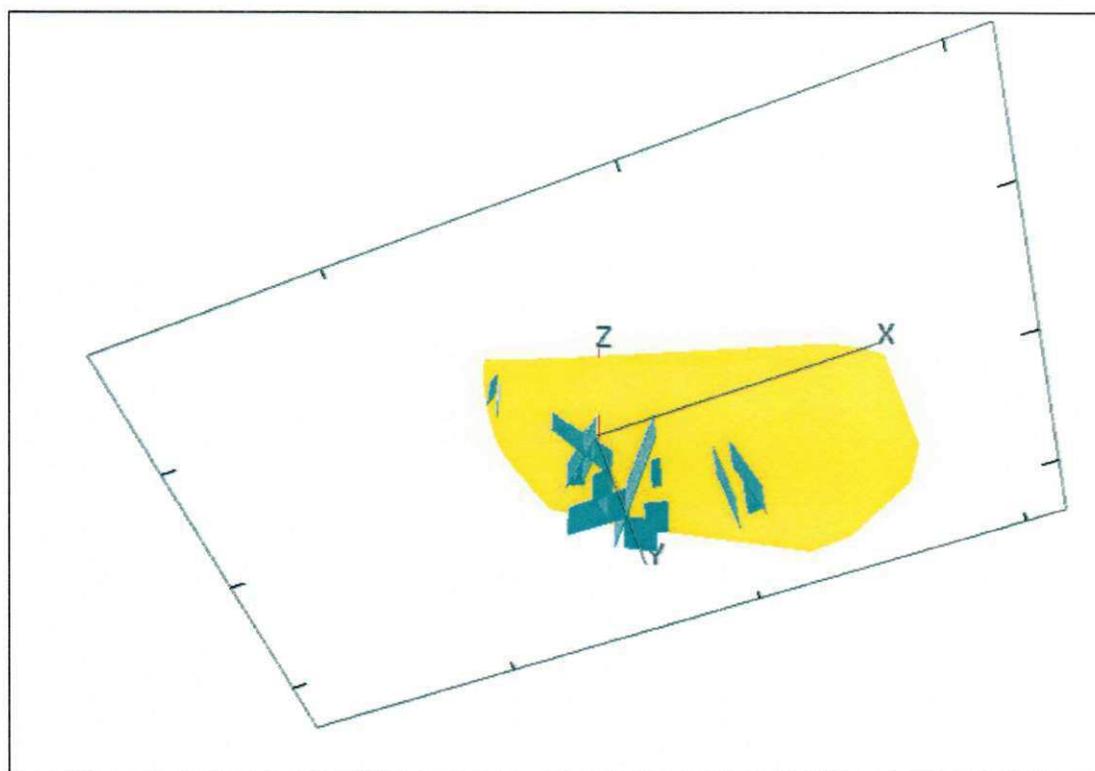


Figura 29 – Fraturas encontradas junto com a topografia da região estudada (Setor S 1) – Vista(3D).

Com a importação dos arquivos das fraturas, foi feita sua incorporação ao modelo de blocos já existente da jazida, com o intuito de avaliar o grau de interferência das discontinuidades na recuperação da lavra. As figuras 30, 31, 32 e 33 mostram em diferentes ângulos a disposição das fraturas no modelo.

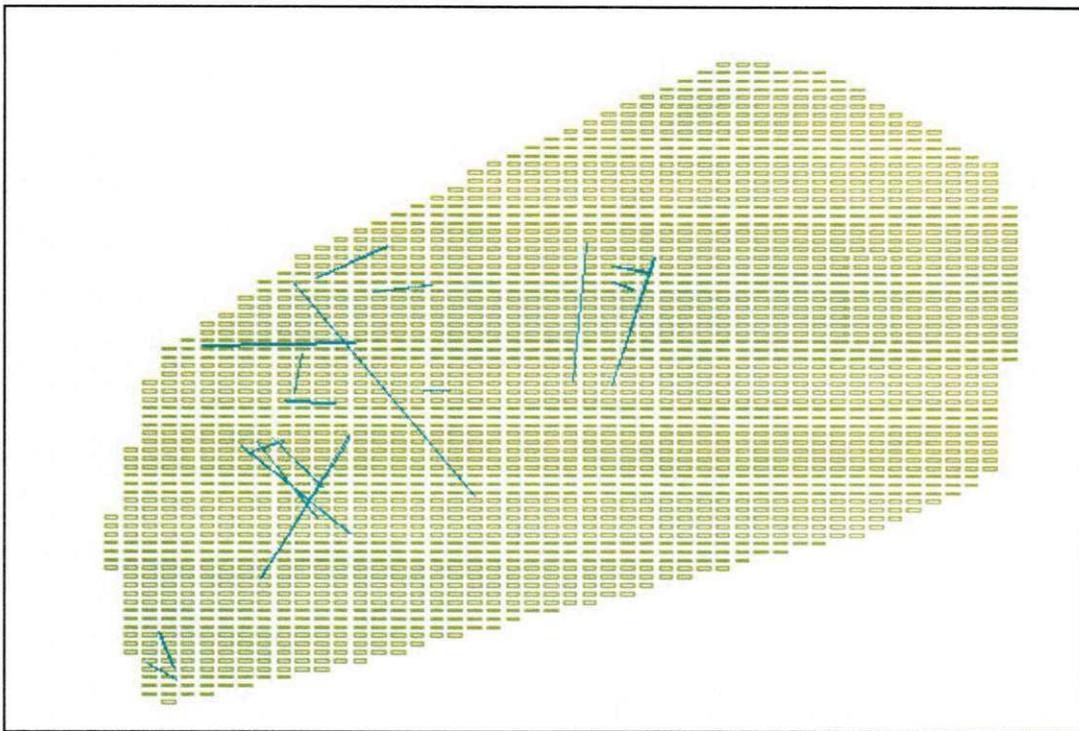


Figura 30 – Modelo de blocos (Setor S 1) com incorporação das descontinuidades.

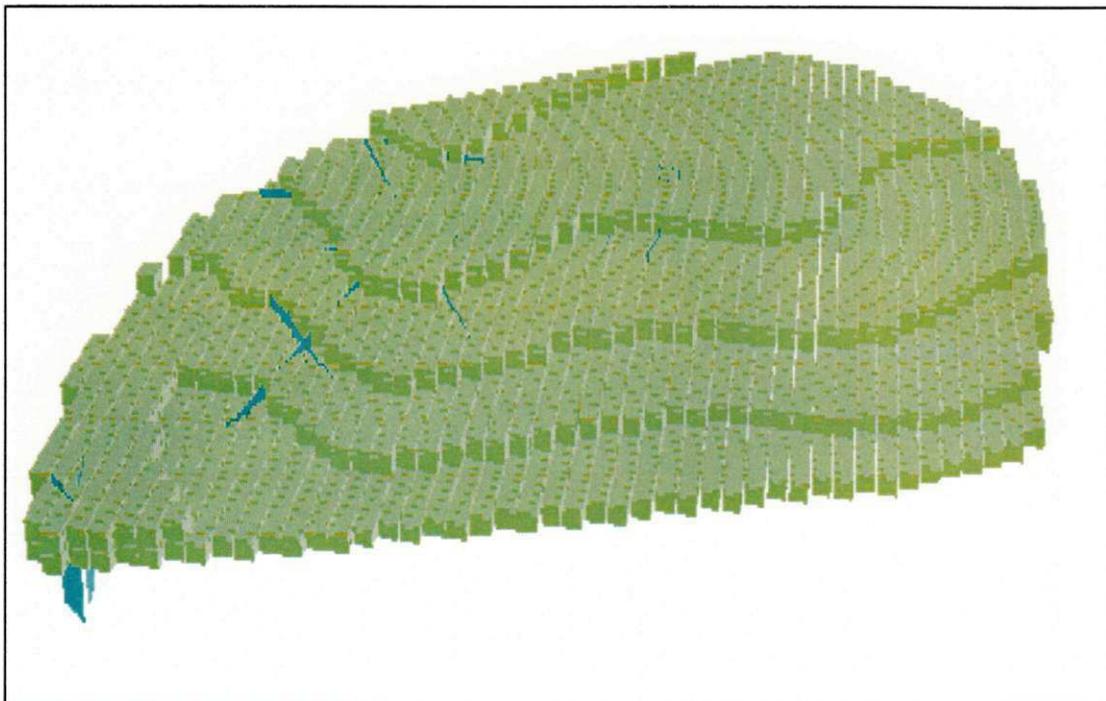


Figura 31 – Vista Frontal do modelo de blocos (Setor S 1) com a incorporação das fraturas (3D).

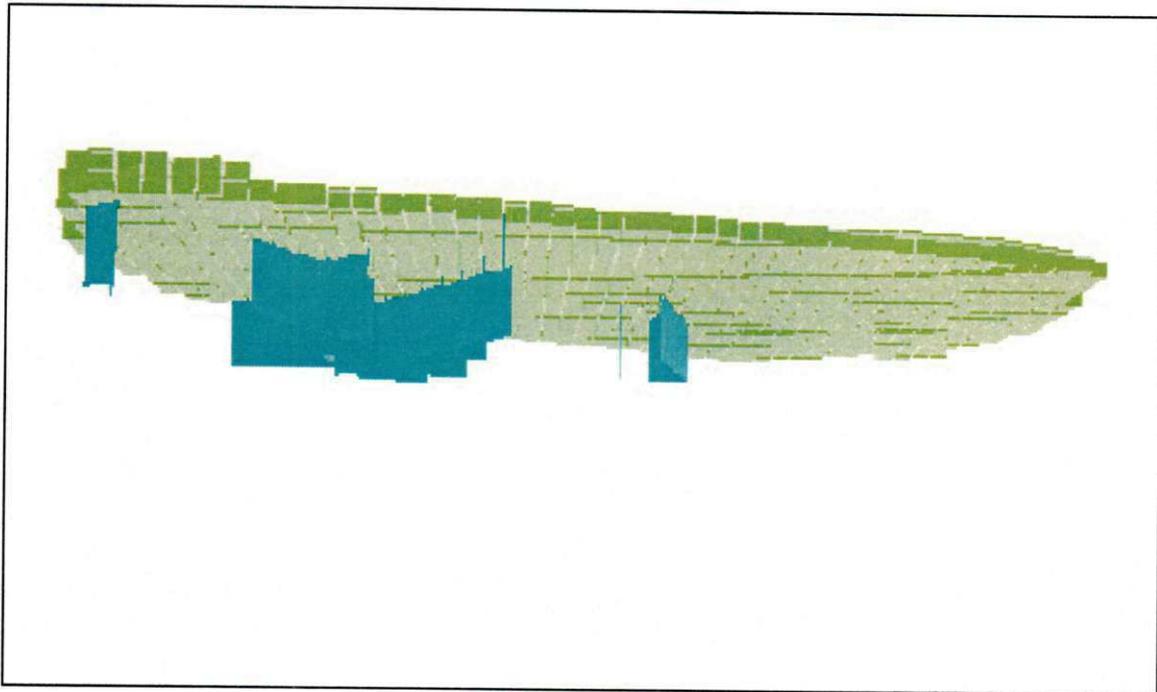


Figura 32 – Vista inferior do modelo de blocos (Setor S 1) com a incorporação das fraturas (3D).

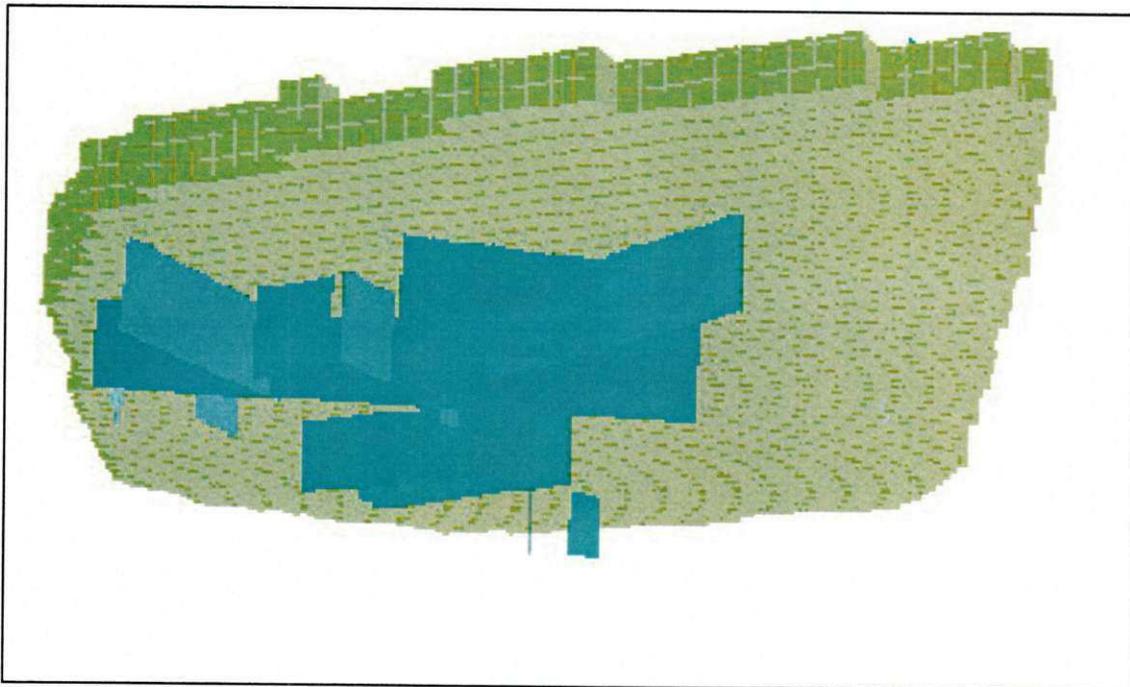


Figura 33 – Vista Inferior do modelo de blocos (Setor S 1) com a incorporação das fraturas (3D).

Em seguida foram criados sólidos para representar as fraturas na direção do eixo Z, com dimensões de +1.5m e - 1.5m a partir do plano da poligonal. Esses sólidos foram identificados como estéril, com área de influência das fraturas de 1.5 m (um metro e meio) para cada lado, e assim tornar mais preciso o cálculo dos recursos lavráveis após a incorporação da zona fraturada no modelo, conforme ilustrado nas figuras 34, 35, 36 e 37 abaixo.

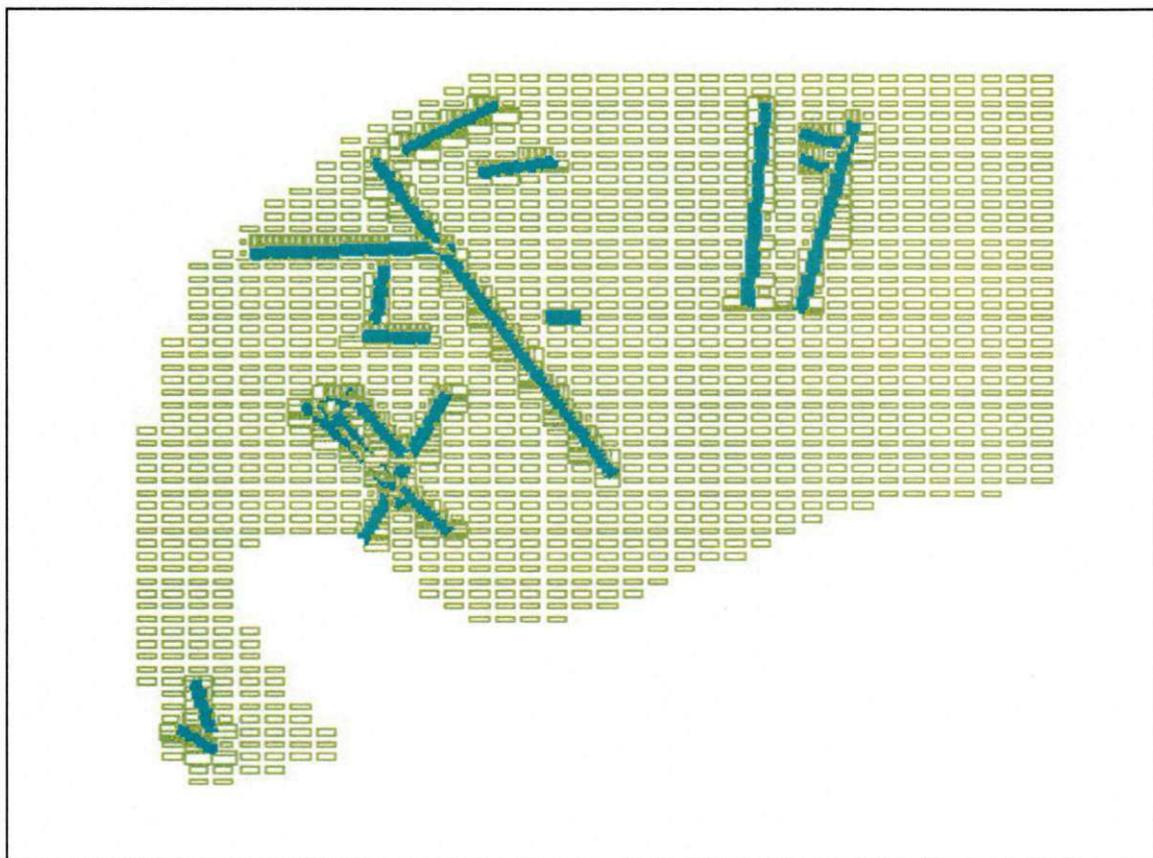


Figura 34 – Modelo de blocos (Setor S 1) com incorporação das fraturas no plano XY-(2D).

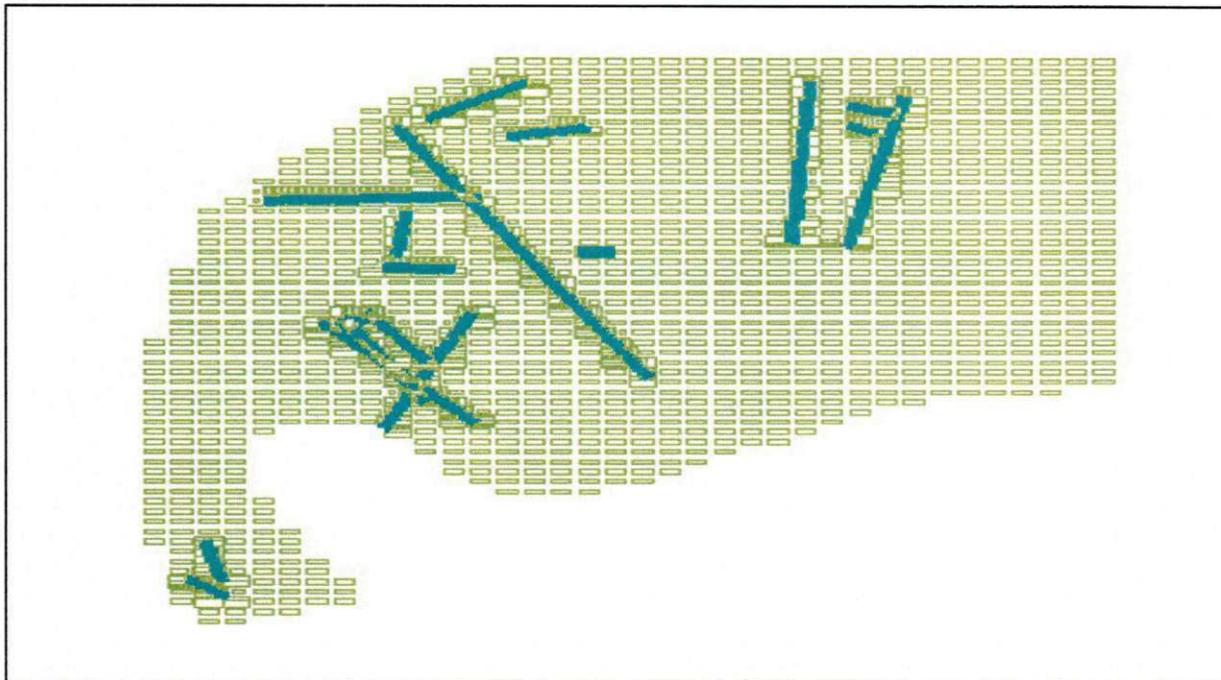


Figura 35 – Modelo de blocos (Setor S 1) com incorporação das fraturas (1,5m) no plano XY- (3D).

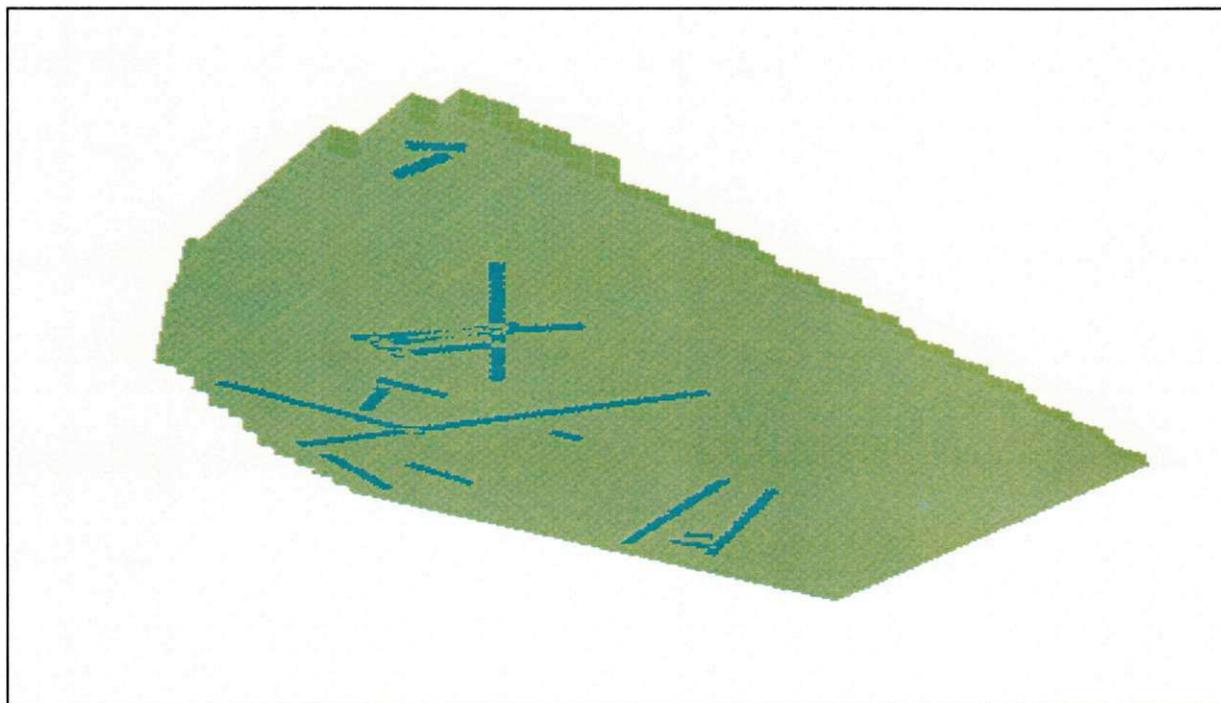


Figura 36 - Modelo (Setor S 1) com incorporação das fraturas (1,5 m) – Visão Inferior – 3D.

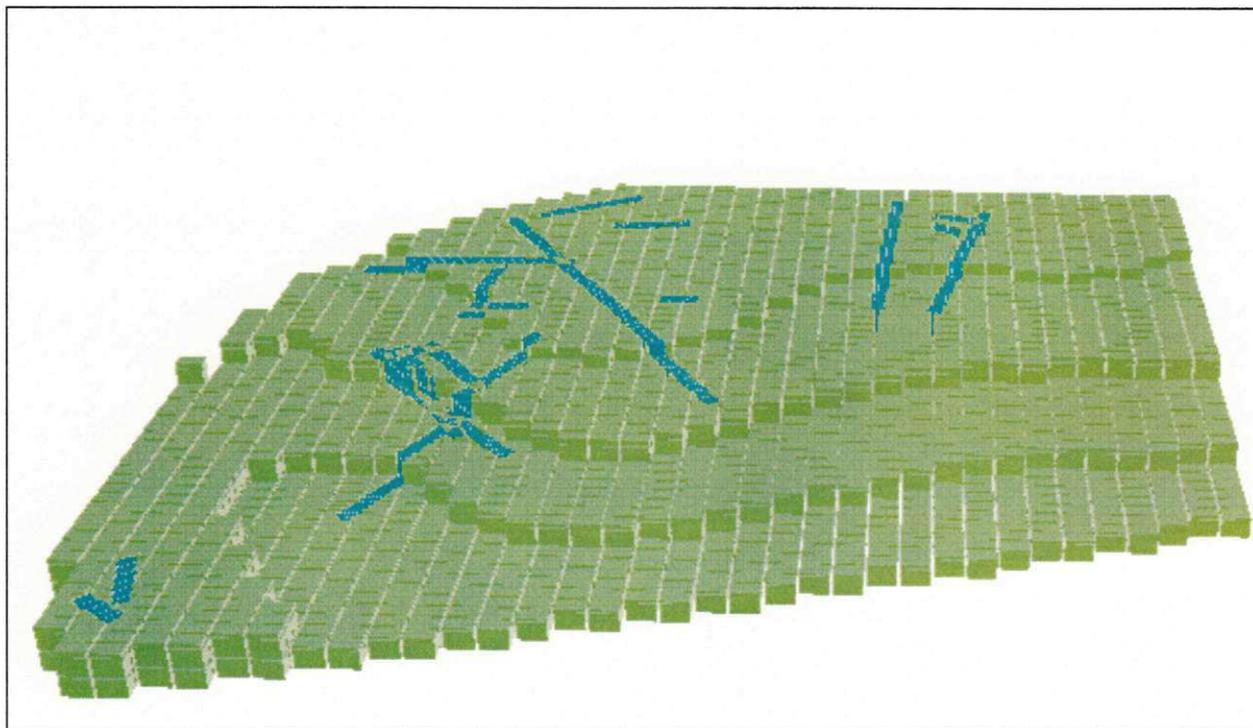


Figura 37 – Modelo (Setor S 1) com incorporação das fraturas (1,5m) – Visão Frontal – 3D.

A avaliação dos recursos no setor (S1), com a incorporação das fraturas utilizando (1.5 m) como área de influência resultando nos valores apresentados na figura 38.

Record	TYPE (A8)	PLANE (A8)	NUMBER (N)	SEQUENCE (N)	PERIMID (N)	DENSITY (N)	VOLUME (N)	TONNES (N)
1		LEVEL	4	0	0	1	13089.66	13089.66
2		LEVEL	3	0	0	1	11138.33	11138.33
3		LEVEL	2	0	0	1	8248.29	8248.29
4		LEVEL	1	0	0	1	5267.73	5267.73
5	BALANCE	LEVEL	0	0	0	-	86084.80	-

Figura 38– Cubagem de recursos totais (rocha sã /estéril) através do comando Calcute Reservesin Model.

A avaliação dos recursos totais do setor S1 considerando rocha sã (granito) e o estéril foi de 37.744 m³.

Após a avaliação dos recursos totais do Setor (S1), foi excluído o material considerado estéril e considerados apenas os blocos de valor econômico positivo. No caso de rochas ornamentais, o valor econômico está associado a parâmetros de tamanho dos blocos e propriedades físicas. Os fatores considerados para o cálculo da rocha sã foram às dimensões comerciais juntamente com a área de influência das fraturas existentes. As figuras 39 e 40 apresentam as fraturas com uma área de influência de 1.5 metros de cada lado.

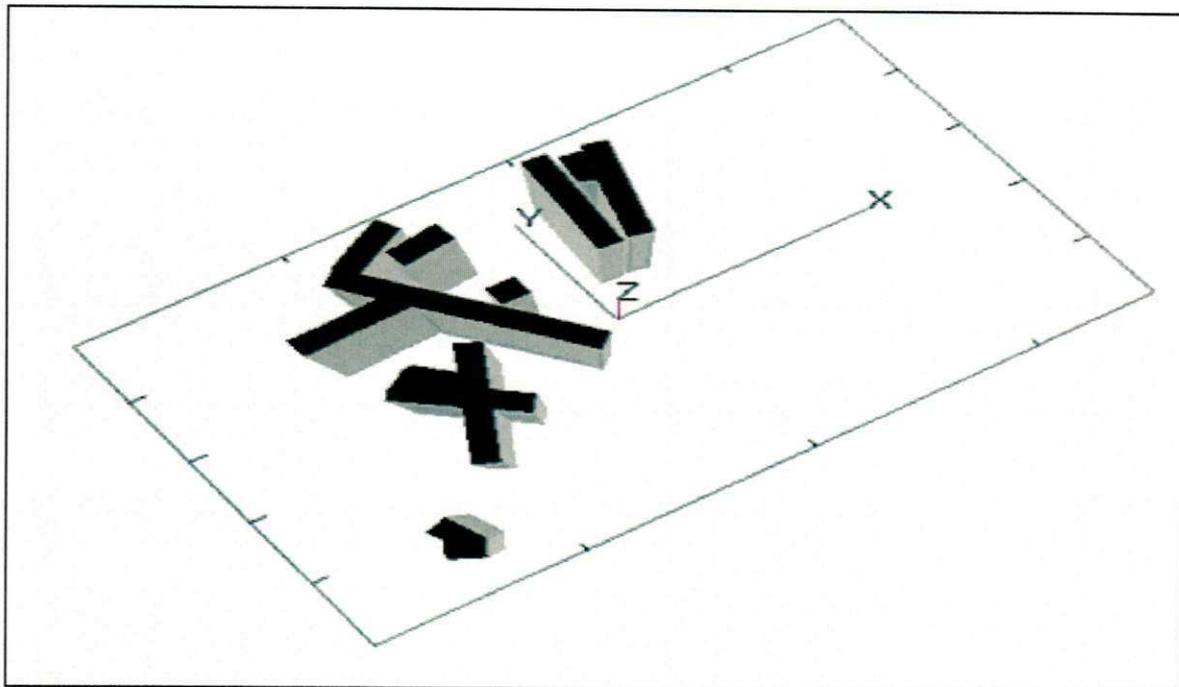


Figura 39 – Fraturas considerando 1,5 m de área de influência de cada lado.

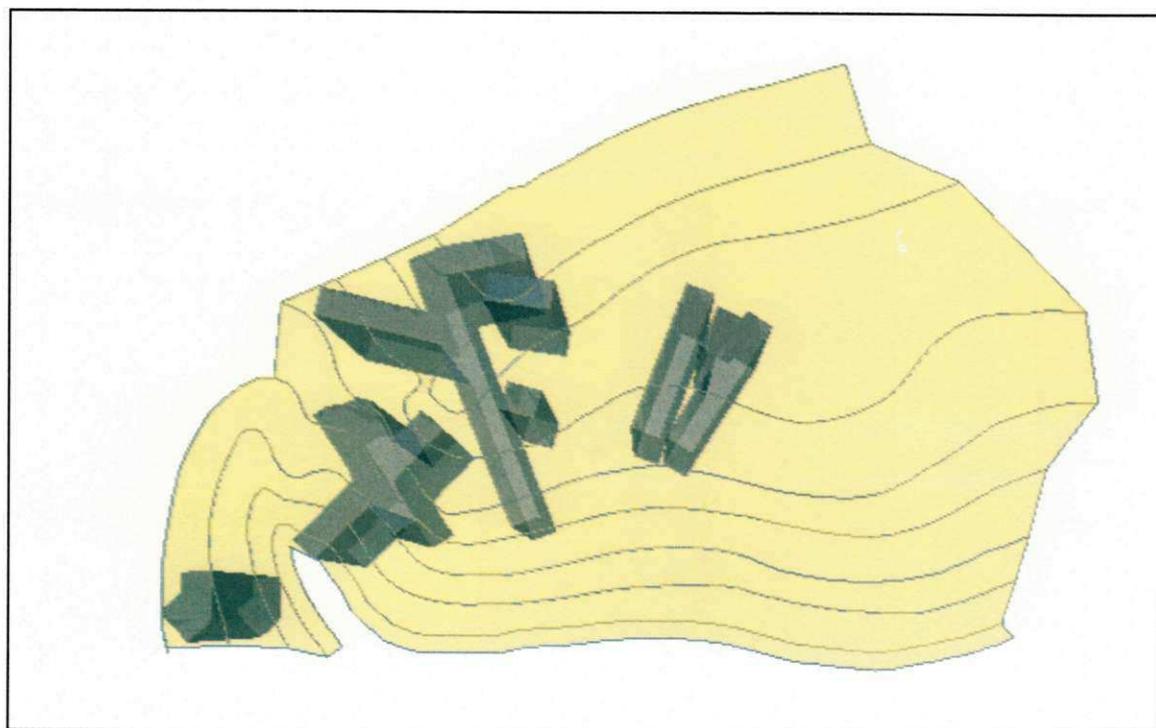


Figura 40 – Vista superior superfície topográfica- (fraturas 1,5 m).

Uma vez incorporadas às fraturas ao modelo, foi feita a filtragem das áreas fraturadas para avaliação dos recursos sem fraturamento, com blocos marcados com ZONE=1, usando como restrições as dimensões mínimas aproveitáveis na lavra, equivalentes a 3m na direção X, 1.5m na direção Y e 1.8m na direção Z.

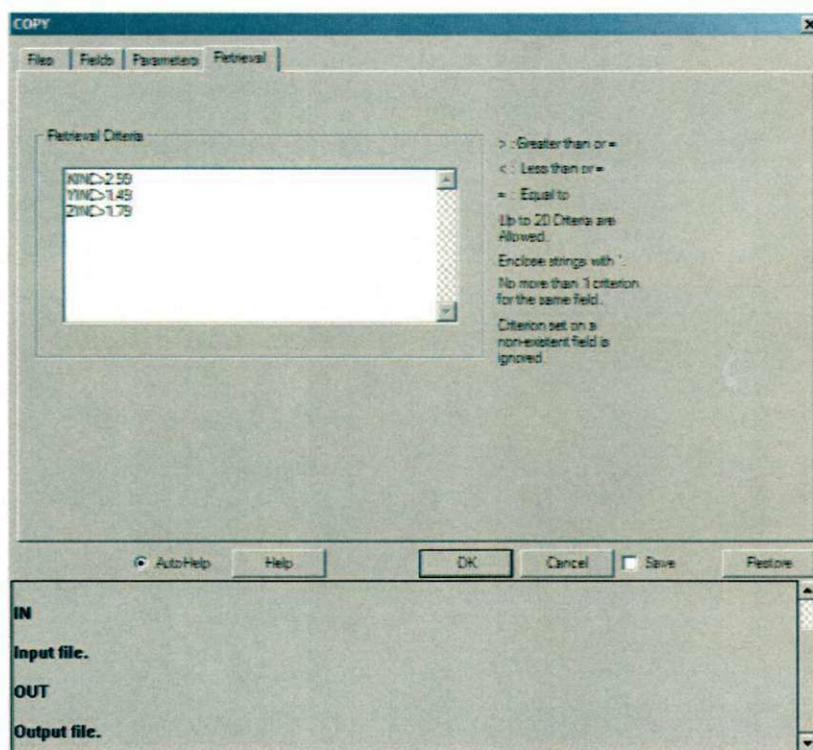


Figura 41- Comando COPY (aba Retrieval) – Descrição das dimensões dos blocos.

Concluída a filtragem, foi feita a avaliação dos blocos correspondentes aos recursos aproveitáveis, com os resultados apresentados na figura 42.



Figura 42- Filtragem das fraturas blocos com dimensões: $X > 2.99$, $Y > 1.49$ e $Z > 1.79$.

A avaliação de recursos aproveitáveis no setor (S1), com a filtragem das fraturas utilizando (1.5 m) como área de influência foi de 29.726 m^3 de rocha sã (granito).

Para tornar o estudo mais realístico foram filtrados os blocos fora dos padrões comerciais localizados próximos às zonas de descontinuidade, considerando mais duas classes de tolerância: (1.0 m e 0.5 m).

Considerando a tolerância de 1 m temos:

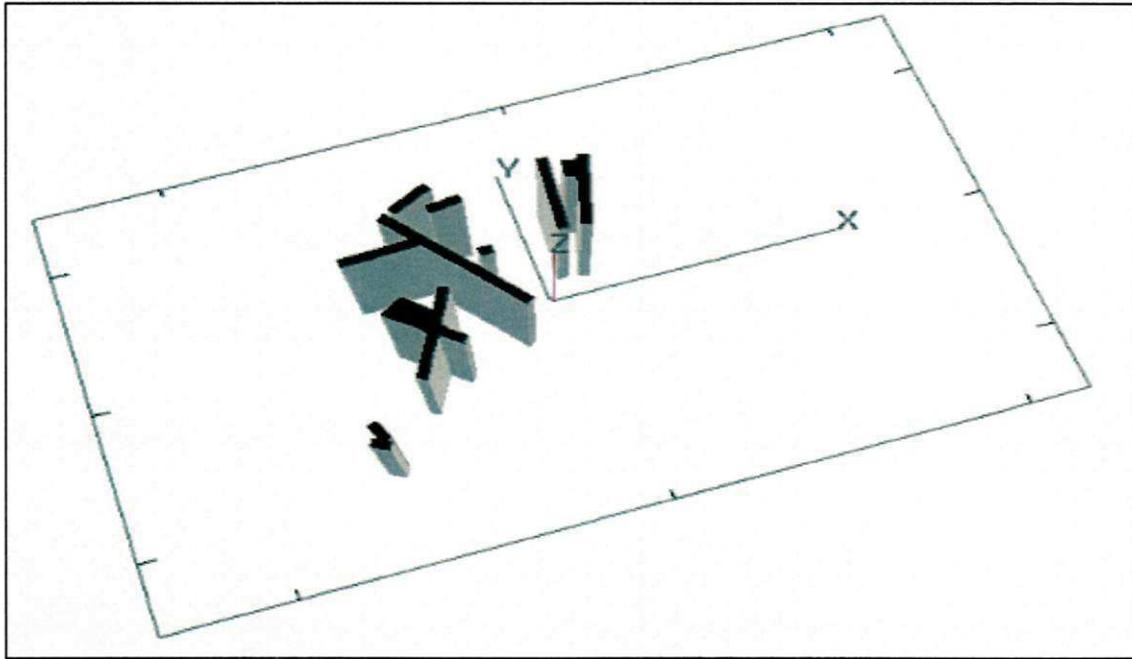


Figura 43 – Fraturas considerando 1 m de área de tolerância

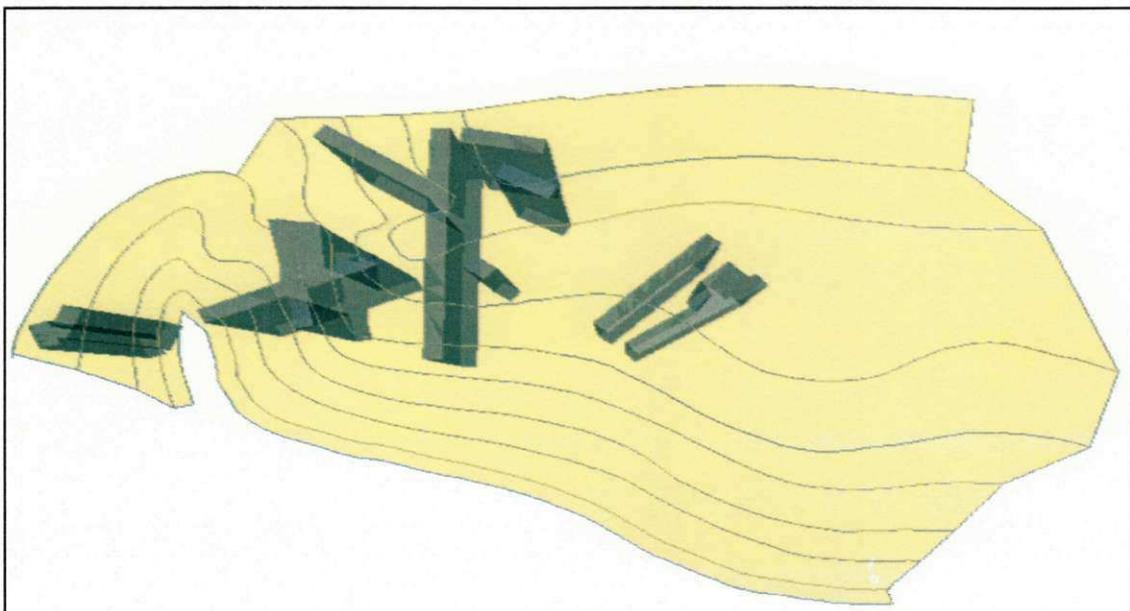


Figura 44 – Vista superior da superfície topográfica- (fraturas 1 m).

As dimensões dos blocos para tolerância igual a 1 são ($X > 2.0$, $Y > 0.5$ e $Z > 0.8$).

Após a filtragem dos blocos menores que o limite de tolerância, o modelo de blocos apresenta um volume igual a 31.049 m³ de rocha sã (granito), como demonstrado na a figura 45.

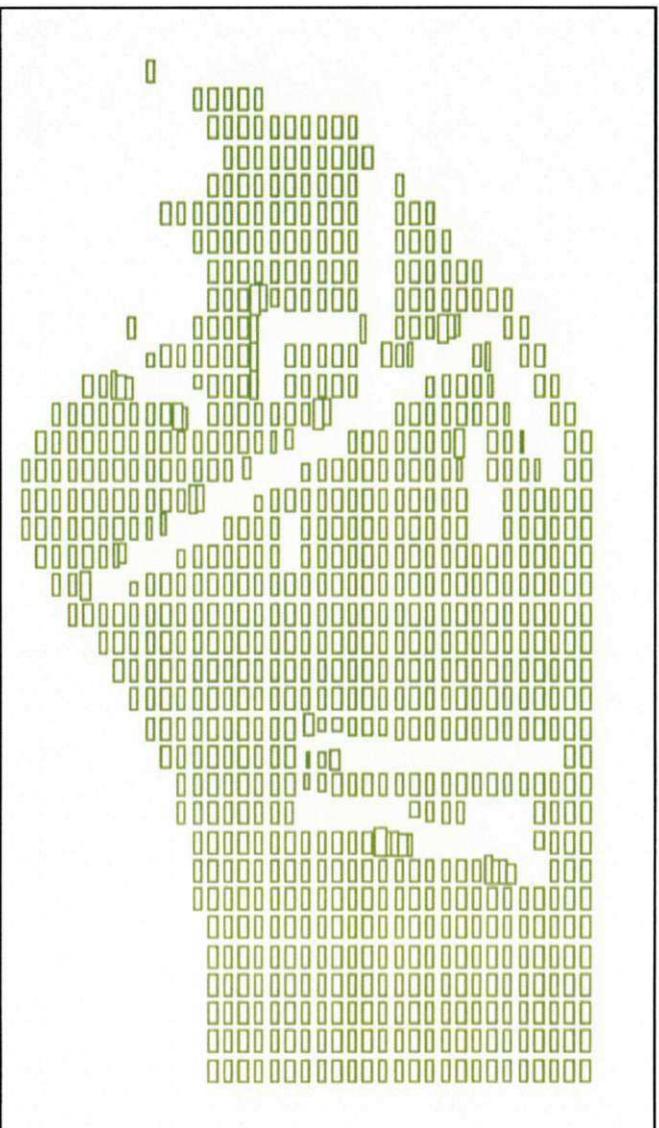


Figura 45 - Filtragem das fraturas blocos com dimensões $X > 2.0$, $Y > 0.5$ e $Z > 0.8$.

Considerando a tolerância de 0.5m temos:

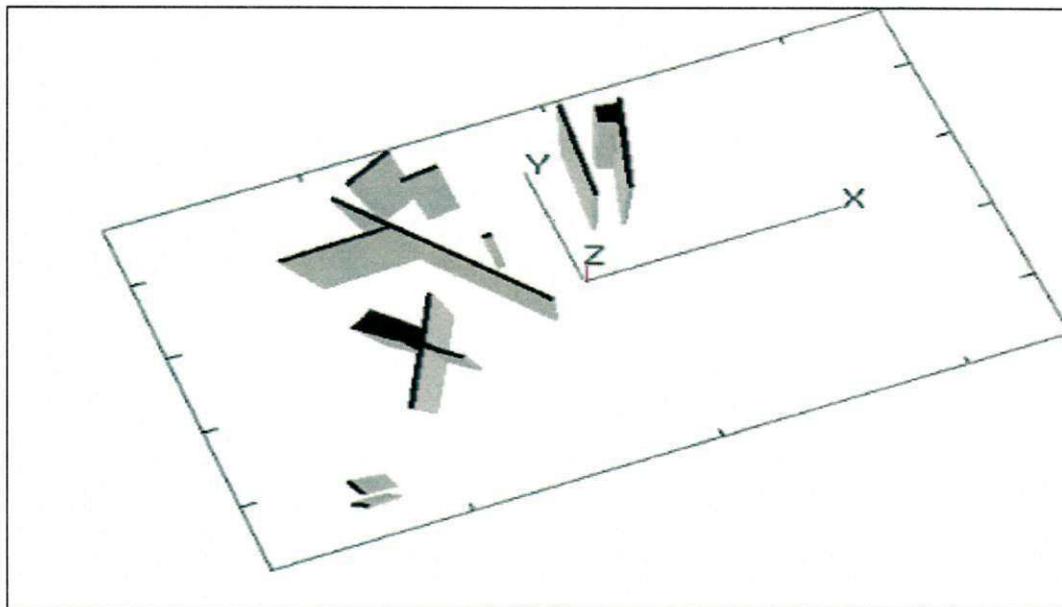


Figura 46 – Fraturas considerando 0.5m de área de tolerância.

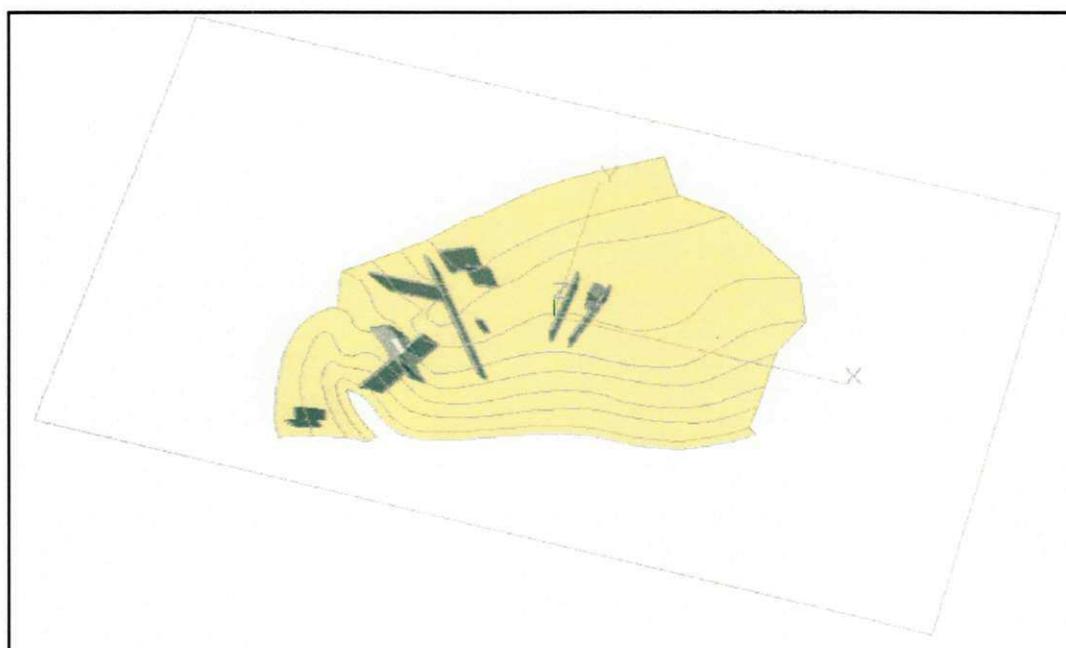


Figura 47 – Vista superior da superfície topográfica- (fraturas 0.5 m).

As dimensões dos blocos para tolerância igual a 0.5 m são ($X=2.5$, $Y=1.0$ e $Z=1.3$). Após a filtragem dos blocos menores que o limite de tolerância, o modelo de blocos apresenta um volume igual a 30.283 m³ de rocha sã (granito), como demonstrado na figura 48.

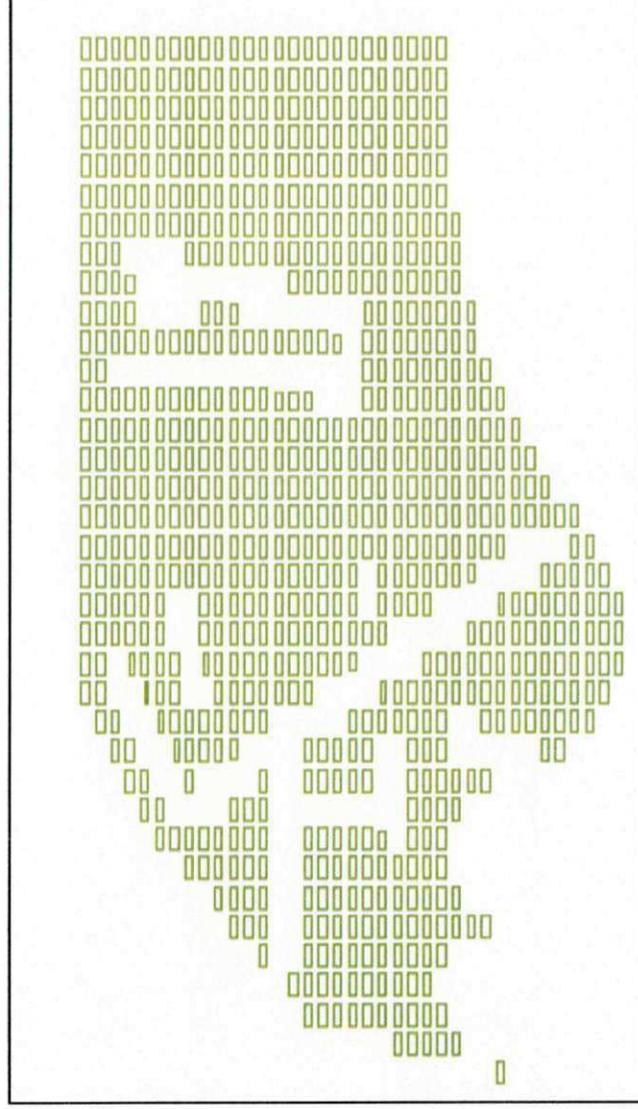


Figura 48 - Filtragem das fraturas blocos com dimensões $X > 2.5$, $Y > 1.0$ e $Z > 1.3$.

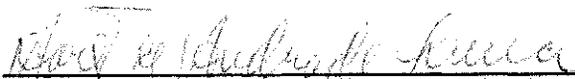
Com a criação do modelo de blocos no maciço fraturado e com a separação de estéril e rocha sã, avaliamos os recursos em três diferentes momentos:

1. Recursos totais (Estéril + Rocha Sã)
2. Recursos com remoção de Estéril;
3. Recursos com eliminação dos blocos menores para as três classes de tolerância (1.5 m, 1.0 m e 0.5m).

ALEXANDRE JOSÉ BURIL DE MACÊDO

**ANÁLISE EMPÍRICA DE MACIÇOS PARA ROCHAS COM FINS
ORNAMENTAIS**

Dissertação defendida e aprovada em 17 de Setembro de 1998



Prof. Dr. Aarão de Andrade Lima – Orientador
Universidade Federal da Paraíba



Prof. Dr. José Lins Rolim Filho
Universidade Federal de Pernambuco



Prof. Dr. Vishwambhar Nath Agrawal
Universidade Federal da Paraíba

À minha esposa, Elizabete Cristina e aos meus filhos Cristiano, Alessandra e Ricardo, que, além de acreditarem e me incentivarem, souberam, com paciência e perspicácia, compreender diversos momentos de silêncio eloqüente e de frases vazias.

AGRADECIMENTOS

Registre-se o apoio e dedicação de todos os professores que participaram de minha formação, notadamente de meu orientador acadêmico, Prof. Aarão de Andrade Lima.

Agradeço, em especial, ao apoio e dedicação de minha esposa, Elizabete, que sempre me incentivou a perseverar pelos meandros dos caminhos que se apresentaram.

Aos amigos Josenita Ramos de Araújo e Adalberto Monteiro Filho, sempre presentes, que me apoiaram em diversas oportunidades em que se fizeram necessárias.

Agradeço também aos meus Amigos Frederico Hrdlicka e Ademir Matheus, pelo encorajamento e compreensão, respectivamente, ao longo dos últimos três anos.

À Universidade Federal da Paraíba, notadamente ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, que me acolheu e permitiu a realização deste trabalho.

Às Secretárias Maria do Carmelo de M. Coutinho e Maria Eleonora M. Coutinho, que contribuíram em diversos procedimentos administrativos no decorrer do curso.

À CAPES pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
SUMÁRIO	vi
LISTA DE SIGLAS UTILIZADAS	xiii
LISTA DE SÍMBOLOS	xv
LISTA DE FIGURAS APRESENTADAS	xviii
LISTA DE FOTOS APRESENTADAS	xxiii
LISTA DE TABELAS APRESENTADAS	xxv
RESUMO	xxviii
ABSTRACT	xxix
CAPÍTULO 1	
ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS	
1.1- Introdução	1
1.2- Questões Motivacionais	3
1.3- Objetivos	4
1.4- Justificativa	4
1.5- Estrutura do Trabalho	5

CAPÍTULO 2

ASPECTOS GEOLOGICOS E GEOMORFOLOGICOS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

2.1-	Tipos de Rochas	7
	2.1.1- Rochas Ígneas	9
	2.1.1.1- Classificação de Rochas Ígneas	10
	2.1.1.2- Classificação Mineralógica	12
	2.1.2- Rochas Sedimentares	12
	2.1.2.1- Tipos de sedimentos	13
	2.1.2.2- Tamanho de partículas	13
	2.1.2.3- Forma de partícula	14
	2.1.2.4- Rochas sedimentares clásticas	16
	2.1.2.5- Estruturas sedimentares clásticas	16
	2.1.2.6- Rochas sedimentares químicas	17
	2.1.2.7- Rochas sedimentares orgânicas ou biogênicas	18
	2.1.2.8- Minerais em sedimentos	18
	2.1.3- Rochas Metamórficas	20
	2.1.3.1- Classificação de rochas metamórficas	20
2.2-	Geomorfologia Aplicada às Rochas para Fins Ornamentais	23
	2.2.1- Relevos Típicos de Rochas Cristalinas	24
	2.2.2- Relação Relevo e Clima	26
	2.2.3- Comportamento de Corpo Granítico Frente à Erosão	27
2.3-	Associações Geológicas e Regiões Brasileiras Prospectáveis em Rochas para Fins Ornamentais	29

CAPÍTULO 3

PESQUISA, EXPLOTAÇÃO E COMÉRCIO DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

3.1-	Rochas para Fins Ornamentais: Conceitos	38
3.2-	Produção e Aplicação	39
3.3-	Principais Parâmetros	41
3.4-	Aspectos Econômicos	45
3.5-	Rochas para Fins Ornamentais e o Nordeste	46
3.6-	Mercado Internacional	48
3.7-	Brasil e Comércio Exterior	50
3.8-	Aspectos Institucionais	53
3.9-	Fatores de Análise para uma Escavação	55
3.10-	Metodologias Atuais de Pesquisa de Rochas para Fins Ornamentais	60
3.11-	Metodologias de Lavra	68
3.12-	Tecnologias de Exploração	72
3.13-	Tecnologias de Exploração de Granitos e Mármoreos	74
	3.13.1-Exploração por Escorregamento	74
	3.13.2- Desmonte com Explosivo	75
	3.13.3- Perfuração Contínua	76
	3.13.4- Fraturamento com Aparelhagem Mecânica ou Hidráulica	77
	3.13.5- Corte com Fio Helicoidal	78
	3.13.6- Corte com Fio Diamantado	81
	3.13.7- Corte com Maçarico	84
	3.13.8- Jato D'água	85

3.13.9- Corte com Disco Diamantado	87
3.14- Aplicação de Tecnologia Mista	89

CAPÍTULO 4

TENSÕES NO MACIÇO: ESTIMATIVA E MEDIÇÕES *IN SITU*

4.1- Estimativa: Introdução	91
4.2- Variação de Tensões <i>In Situ</i> com a Profundidade	94
4.3- Modelo de Resistência de Rocha Intacta	96
4.4- Efeito das Estruturas da Rocha	100
4.4.1- Efeito da Anisotropia	101
4.4.2- Efeito de Estratificação	104
4.4.3- Efeito da Heterogeneidade e de Estruturas Geológicas	105
4.4.4- Efeito da Topografia	107
4.4.4.1- Vales e montanhas simétricas sujeitas apenas à gravidade	108
4.4.4.1.1- Comportamento de tensões em elevações	111
4.4.4.1.2- Comportamento de tensões em vales	112
4.4.4.1.3- Efeito do mergulho e grau de anisotropia	113
4.4.4.1.4- Efeitos da geometria e do relevo	114
4.4.5- Efeitos da Erosão	114
4.5- Tensões Tectônicas e Residuais	115
4.5.1- Tensões Tectônicas	115
4.5.2- Tensões Residuais	116
4.6- Estimativa de Existência de Tensões Elevadas	118

4.6.1-	Tensões Horizontais Elevadas-	118
4.6.2-	Estimativa de Orientação de Tensão	122
4.7-	Métodos de Medição de Tensões <i>In Situ</i>	123
4.7.1-	Medição de Tensões: Introdução	123
4.7.2-	Métodos de Alívio	125
4.7.2.1-	Métodos de Alívio de Superfície	126
4.7.2.2-	Métodos de Alívio de Furos de Sonda (Recorte)	127
4.7.2.3-	Método de Alívio de Maciço Rochoso	130
4.7.3-	Métodos do Macaco Hidráulico	130
4.7.4-	Métodos Hidráulicos	132
4.7.5-	Método de Recuperação de Deformação	132
4.7.6-	Método de Ruptura de Furos	133
4.7.7-	Outros Métodos	134
4.7.7.1-	Análise de Dados de Falha de Empurrão	134
4.7.7.2-	Mecanismos Focais de Terremotos	134
4.7.7.3-	Métodos Indiretos	135
4.7.8-	Efeito de Escala	135
4.7.9-	Incertezas Quanto ao Melhor Método	136

CAPÍTULO 5

O PROCESSO DE CLASSIFICAÇÃO

5.1-	Resistência, Deformabilidade e Classificação Geomecânica	138
5.2-	A Classificação de Maciços Rochosos	141
5.3-	Os Processos de Classificação	142

	5.3.1- Classificação de Terzaghi	144
	5.3.2- Classificação de Lauffer	144
	5.3.3- Classificação de Deere	145
	5.3.4- Classificação de Wickhan Et Al.	146
	5.3.5- Classificação de Bieniawski	146
	5.3.5.1- Classificação de Laubscher	155
	5.3.5.2- Classificação de Romana	156
	5.3.6- Classificação de Barton et al.	157
5.4-	Estimativa Conjunta de Classificação de Maciços Rochosos e seu Comportamento, Segundo Bieniawski, Laubscher, Romana e Barton	162
5.5-	Correlações e Aplicações do Critério de Ruptura de Hoek-Brown	164
5.6-	Estimativa das Equações do Maciço Rochoso	172

CAPÍTULO 6

OBSERVAÇÕES E PROCEDIMENTOS EM ÁREAS DE ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

6.1-	Introdução	175
6.2-	Serra da Meruoca - Ceará	176
6.3-	Lagoa D'Anta - Rio Grande do Norte	180
6.4-	Cacerengo - Paraíba	184
6.5-	Batólito de Pocinhos - Paraíba	185
6.6-	Migmatito de Santa Luzia - Paraíba	186
6.7-	Metasedimento de Pedra Branca - Ceará	187

6.8-	Granito da Serra da Barriga - Ceará	188
6.9-	Migmatito de Caracará - Ceará	189
CAPÍTULO 7		
	CONCLUSÕES E SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	190
	BIBLIOGRAFIA	193
	APÊNDICE - REGISTRO REGISTROS DE ALGUMAS OBSERVAÇÕES EM ÁREAS VISITADAS	207

LISTA DE SIGLAS UTILIZADAS

PB	Paraíba
M.I.A.	Departamento de Geologia Aplicada da Universidade de Istambul
ASTM	American Society for Testing of Materials
PND	Plano Nacional de Desenvolvimento
DNPM	Departamento Nacional da Produção Mineral
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
ISRM	International Society for Rock Mechanics
GPR	Ground-Penetrating Radar
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
DIN	Deutsche Industrie Normen
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
EE	Exploração por escorregamento
DE	Desmonte a explosivo
PC	Perfuração contínua
PS	Perfuração seqüenciada
PP	Perfuração coplanar e paralela
SP	Cunhas mecânicas ou manuais, sem perfuração
FH	Fio helicoidal
FD	Fio diamantado
SC	Serra a corrente
DD	Disco dentado
CM	Corte a maçarico
JA	Corte com água
AF	Corte com abrasivo ou fio com disco diamantado
URL	Underground Research Laboratories

HTPF	Hydraulic Test on Pre-existing Fracture
ASR	Anaelastic Strain Recovery
DSCA	Differential Strain Curve Analysis
NATM	New Australian Tunneling Method
TBM	Tunnel Boring Machine
RSR	Rock Stress Rating
RMR	Rock Mass Rating

LISTA DE SÍMBOLOS

$z_0, z, \Delta z$	Profundidade inicial, de um ponto e espessura de camada de rocha
σ_v	Tensão vertical
γ	Peso específico da rocha
ρ	Densidade da rocha
$\sigma_H, \sigma_h, \sigma_{\text{médio}}$	Tensão horizontal maior, menor e média
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Tensão principal máxima, média e mínima
$K, K_h, K_H,$ K_x, K_y, K_0	Taxa de tensão
ν, ν'	Relação de Poisson no plano e normal
S_0	Coesão interna; resistência ao cisalhamento
$\phi, \phi_r, \phi_i, \phi^*$	Ângulo de atrito interno, residual, instantâneo, instantâneo
C_0, C_0^*	Resistência compressiva; coesão
$(\sigma_1 - \sigma_3)_c$	Resistência diferencial máxima
σ_3'	Tensão de confinamento efetiva
σ_n	Tensão normal
τ	Tensão de cisalhamento; resistência ao cisalhamento
τ_m	Tensão média de cisalhamento
δ	Ângulo de orientação da junta
E, E'	Módulos de elasticidade no plano (Young) e normal
E'	Módulo de deformação
G'	Módulo de rigidez na normal ao plano
G^*, G	Módulo de rigidez do maciço rochoso e do material intacto
k_n	Módulo de rigidez normal
V_m	Fechamento máximo de uma junta
x, y, z	Sistema de coordenadas globais

n, s, t	Sistema de coordenadas de um plano
ψ	Ângulo de mergulho de um plano relativo às coordenadas globais
ϵ_x, ϵ_y	Deformações normais
ϵ_t	Deformação constante no tempo
γ_{xy}	Deformação de cisalhamento
h_i	Espessura da i-ésima camada
Φ_i	Relação de altura da i-ésima camada ou da amostra e sua dimensão
L	Dimensão da amostra; comprimento de fraturas
σ_i, σ_{av}	Tensão média
N	Número de elementos justapostos; densidade linear de fraturas
w_i	Largura do i-ésimo elemento
B	Altura de uma elevação
$ b $	Profundidade de um vale
β	Ângulo de direção
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz},$ σ_{xy}	Tensões induzidas
σ_{xx}^{∞}	Tensões tectônicas num espaço semi-infinito
η	Função tempo
T	Escala de tempo
σ_r, σ_z	Tensões radial e axial
k_1, k_2 e k_0	Constantes da rocha
S_t	Resistência à tração da rocha
S	Espaçamento de fraturas

α_i, α_j	Ângulos de mergulho do talude (ou da frente) e da junta
$F_i (i = 1, 4)$	Fatores de correção de Romana
RMR	Escore de classificação de Bieniawski
RQD	Índice de qualidade de Deere
J_n	Número de família de juntas
J_r	Índice de rugosidade de uma junta
J_a	Grau de alteração ou preenchimento de uma junta
J_w	Índice de presença de água
SRF	Condição de tensão
Q	Escore de classificação de Barton
J_v	Índice volumétrico de Palström
F	Frequência de fraturas
W	Grau de alteração da rocha
σ_c, σ_{cs}	Resistência à compressão simples e do espécime
r e R	Dureza de Schmidt
m	Parâmetro de fraturamento do maciço dos blocos no critério de Hoek-Brown
s	Parâmetro de engastamento dos blocos no critério de Hoek-Brown
σ_t	Resistência à tração uniaxial
I_s	Índice de carga pontual
σ_n	Tensão normal normalizada
τ_n	Tensão de cisalhamento normalizada
σ_{3trans}	Tensão de transição junta-fratura
σ	Tensão normal
T_0^*	Resistência à tração
C_0	Resistência coesiva; intercepção coesiva

LISTA DE FIGURAS APRESENTADAS

Figura 2.1	Ciclo das rochas	9
Figura 2.2	Formas de ocorrência de rochas ígneas	10
Figura 2.3	Classificação mineralógica de rochas ígneas	12
Figura 2.4	Formas de partículas de sedimentos	15
Figura 2.5	Modelo de esfericidade e arredondamento de partículas sedimentares	15
Figura 2.6	Representação de tipos de acamamento de sedimentos	17
Figura 2.7	Modelo de sedimentos inconsolidado e cimentado	19
Figura 2.8	Exemplificação de textura de rochas metamórficas, com destaque a um modelo de rocha com minerais fortemente orientados	21
Figura 2.9	Representação de relevos típicos, de acordo com a gênese das rochas de base	25
Figura 2.10	Comportamento do relevo de acordo com o clima	27
Figura 2.11	Representação de corpo aflorante de granito e suas irregularidades próximas à superfície propiciando processos de intemperismo	28
Figura 2.12	Áreas de atuação de ciclos termotectônicos sobre a plataforma brasileira	32
Figura 2.13	Áreas de exposição do embasamento cristalino brasileiro	33
Figura 2.14	Áreas de coberturas brasileiras	34
Figura 2.15	Áreas potenciais de mármore no Brasil	35
Figura 2.16	Áreas prospectivas para rochas graníticas do Brasil	37
Figura 3.1	Estrutura da cadeia de produção de rochas ornamentais	39
Figura 3.2	Modelo de análise de estabilidade de área	64
Figura 3.3	Interpretação de eventos observados em um perfil de Iragna	65

	Quarry.	
Figura 3.4	Imagem tridimensional, realçando os planos A, B e C	65
Figura 3.5	Interpretação das reflexões verticais e de fraturas sub-horizontais	66
Figura 3.6	Vista tridimensional da superfície do terreno e dos planos de fraturas sub-horizontais e semi-verticais	66
Figura 3.7	Esquema de bancada baixa, destacando-se diferentes direções de orientação das frentes	69
Figura 3.8	Esquema de orientação de bancada baixa, com uma direção de orientação	70
Figura 3.9	Esquema de exploração utilizando grandes bancadas	70
Figura 3.10	Esquema de exploração com bancadas altas	71
Figura 4.1	Representação de tensões verticais de acordo com a profundidade (à esquerda) e variação da taxa de tensão horizontal versus vertical (direita)	95
Figura 4.2	Esquema de falha normal.	98
Figura 4.3	Modelo de falha normal.	98
Figura 4.4	Representação de falha de rejeito direcional.	98
Figura 4.5	Modelo de identificação de falha de rejeito direcional.	99
Figura 4.6	Falha inversa ou de empurrão.	99
Figura 4.7	Modelo de apresentação de falha de empurrão	99
Figura 4.8	Maciço rochoso com fratura regular sujeito a um estado de tensão de eixo simétrico σ_1 e σ_3	100
Figura 4.9	Esquema de maciço anisotrópico com camadas inclinadas e paralelas ao plano P, submetido à gravidade	103
Figura 4.10	Representação de bloco de rocha granítica, para análise de deformações, Stephansson, Ljunggren e Jin.	106

	Deslocamentos de tensões atuantes num modelo de elementos distintos com três blocos, segundo Stephansson, Ljunggren e Jin	106
Figura 4.12	Perfil topográfico de um maciço de topografia complexa sujeito à gravidade (sem cargas superficiais) e com restrições e deslocamentos	107
Figura 4.13	Esquema de elevação simétrica de altura b	108
Figura 4.14	Representação de vale simétrico de profundidade $ b $	109
Figura 4.15	Trajetórias de contorno de tensão em uma elevação	110
Figura 4.16	Trajetórias de contorno de tensão num vale	110
Figura 4.17	Contorno de $\sigma_1 / \rho.g. b $	110
Figura 4.18	Contorno de $\sigma_2 / \rho.g. b $ numa elevação	111
Figura 4.19	Contorno de $\sigma_1 / \rho.g. b $ num vale	112
Figura 4.20	Contorno de $\sigma_2 / \rho.g. b $ num vale	112
Figura 4.21	Forças responsáveis por tensões tectônicas, Zoback et al.	116
Figura 4.22	Três tipos de testemunhos recuperados	119
Figura 4.23	Exemplos típicos de testemunhos recuperados em forma de discos com diâmetros de 115 mm (a); discos de 54 mm (b); e, anéis de 75 e 115 mm de diâmetro (c)	119
Figura 4.24	Comparação entre o estado de tensão medido em três furos de sonda e baseado no critério de Obert-Stephenson, onde a componente radial de tensão é calculada da relação $\sigma_r = (\sigma_x + \sigma_y) / 2$.	121
Figura 4.25	Comparação entre o estado de tensão medido em três furos de sonda e baseado no critério teórico de Sugawara et al., que é normalizado pela resistência à tração	121
Figura 4.26	Croquis representativo de uma seção de rocha e seus pontos de instrumentação (dimensões estão em metro)	127

Figura 4.27	Modelo de desenvolvimento do método de recorte	128
Figura 4.28	Padrão de procedimento de acordo com a análise de alívio de deformações	129
Figura 4.29	Modelo de macaco hidráulico utilizado por Merrill, 1964	131
Figura 4.30	Representação do desenvolvimento progressivo do processo de fechamento de um furo de sonda	133
Figura 4.31	Variação de módulo de elasticidade encontrada ao longo de 5 metros de uma sondagem em rocha granítica	136
Figura 4.32	Variações aleatórias de medidas de tensões principais ao longo de um furo de sonda de ± 22 m, feito em condições uniformes de um leptito	137
Figura 5.1	Diagrama de Mohr	140
Figura 5.2	Escore de rocha intacta, relativo à resistência do material	149
Figura 5.3	Índice de acordo com o espaçamento da principal família de fraturas	150
Figura 5.4	Definição do escore relativo ao RQD	152
Figura 5.5	Escore de espaçamentos, segundo Laubscher	155
Figura 5.6	Representação de índice de rugosidade, através de perfis de paredes de juntas	159
Figura 5.7	Aplicação do critério de Hoek-Brown, segundo Barton	164
Figura 5.8	Relação dos parâmetros m e s , relativos ao RMR correspondente	167
Figura 5.9	Parâmetros de resistência, calculados e medidos, de acordo com o escore do maciço	167
Figura 5.10	Diagrama de Mohr onde tem-se a representação gráfica das condições de tensão para a rocha intacta	169
Figura 5.11	Representação gráfica da relação entre as tensões principais associadas ao processo de ruptura da rocha	169

Figura 5.12	Representação das equações empíricas de deformação	172
Figura 5.13	Correlação entre módulos de deformação, baseados em escores RMR e Q	173
Figura 6.1	Mapa topográfico da Serra da Meruoca	177
Figura 6.2	Croquis esquemático do afloramento de Lagoa D'Anta	181
Figura 6.3	Perfis esquemáticos do corpo posicionando as lineações da rocha e o desenvolvimento das fraturas pré-existentes e induzida pelo alívio de tensões	181
Figura 6.4	Mapa geológico-estrutural da área de Lagoa D'Anta	182

LISTA DE FOTOS APRESENTADAS

Foto 3.1	Vista geral de lavras, em meia encosta, efetuadas em níveis múltiplos de extração	79
Foto 3.2	Detalhe de duas bancadas altas, onde, além do desmonte primário é destacado o serviço de desbaste de blocos	79
Foto 3.3	Vista de poço para instalação de desvio de fio helicoidal e (roldana fixa), tendo ao fundo água para resfriamento e distribuição da polpa de granalha	80
Foto 3.4	Praça de trabalho com conjugação de métodos de perfuração contínua com fio helicoidal	80
Foto 3.5	Execução de corte em maciço, destacando-se a alimentação de água para resfriamento do fio	82
Foto 3.6	Corte executado, destacando-se as superfícies dos planos vertical e horizontal cortados a fio diamantado	83
Foto 3.7	Conjugação de técnicas: fio diamantado + perfuração contínua	83
Foto 3.8	Uso de talha-blocos e cunha pneumática de desmonte, além de desbaste de bloco semi-acabado.	84
Apêndice A-1	Lavra do Granito Verde Meruoca	207
Apêndice A-2	Lavra de matacão – Granito Meruoca Clássico	208
Apêndice A-3	Lavra de campo de matacões (Verde Ventura)	208
Apêndice A-4	Registro do principal problema da lavra de matacões	209
Apêndice A-5	Propagação de fratura (Lagoa D'Anta)	210
Apêndice A-6	Parte de serviço de tentativa de horizontalizar as praças	210
Apêndice A-7	Matacões como indicadores de sistema de juntas	211
Apêndice A-8	Fratura de alívio em um matacão	211
Apêndice A-9	Corte conchoidal em rocha isotrópica (Pocinhos)	212

Apêndice A-10	Feições auxiliares na orientação do planejamento da lavra	212
Apêndice A-11	Inclusões dispersas em afloramento de migmatito (Santa Luzia)	213
Apêndice A-12	Aspecto de xenólito em face de corte	213
Apêndice A-13	Feição ondulada por interseção de planos de veio de muscovita e superfície	214
Apêndice A-14	Corte evidenciando veios pegmatíticos, feição de superfície e resquício de plano de fratura de alívio	214
Apêndice A-15	Superfície suave de matacão que está sendo lavrado (Serra da Barriga)	215
Apêndice A-16	Formação de repé por deficiência operacional e superfície de alívio	215
Apêndice A-17	Destaque a bolsões de paleossoma e sistemas de descontinuidades em migmatito (Caracará)	216
Apêndice A-18	Evidencia-se fraturas, veios de feldspato e solo típico de migmatito	216
Apêndice A-19	Corte efetuado com maçarico e direções dos planos de partição	217

RESUMO

Com a abertura comercial ocorrida em 1990 houve possibilidade de importação de equipamentos e insumos que influenciaram o grande salto qualitativo que o setor de rochas ornamentais realizou, visando consolidar a participação do País no mercado internacional

O Nordeste, principalmente na região do semi-árido dispõe de uma vasta exposição do embasamento cristalino, apresentando um grande potencial de produção. Apesar dos progressos conseguidos, e de se dispor de mais de uma centena de produtos catalogados para exportação, o seu desempenho tem declinado, passando, no ano de 1996, de quinto para sétimo lugar na carteira de comercialização internacional, tendo sido suplantado por Portugal e África do Sul. Nosso trabalho objetiva sugerir uma conduta técnica para análise empírica de maciços rochosos voltados ao setor de pedras de revestimento, analisando-se seus aspectos genéricos, podendo servir de base para um sistema de exploração mais racional para a atividade, através de três vertentes de características: geologia regional e geomorfologia; composição mineral e petrografia; e, geotecnia do maciço rochoso.

A metodologia consistiu no levantamento bibliográfico e de observações de campo. Com isto, conseguiu-se: definir a situação atual do setor produtivo de blocos brutos no País; abordar princípios sobre estimativa e medição de tensões *in situ*; avaliar processos de classificação de maciços para fins de rochas ornamentais; e observar feições referentes aos aspectos geológico e sobre o campo de tensões em oito áreas visitadas.

Ficou definido que dados bibliográficos sobre geologia estrutural, execução de análises petrográficas em amostras orientadas, análise de feições topográficas, bem como técnicas de análise de testemunhos de sondagem, devem ser utilizadas já na fase inicial de prospecção, com vistas ao planejamento da exploração.

Também conseguiu-se identificar que os sistemas de classificação devem ser aplicados com a devida ressalva ao índice RQD (quase sempre igual a 100 para rochas ornamentais), o que não invalida a aplicação do critério de ruptura de Hoek e Brown, para fazer estimativa do campo de tensão *in situ* que o maciço pode suportar; afóra a utilidade do escore de espaçamento de Laubscher sobre a estimativa do tamanho médio dos blocos desde a fase inicial do projeto.

As conclusões incluem algumas recomendações de ordem prática que podem ser aplicadas para pesquisa geológica de diferentes tipos genéticos de granitos de uso ornamental.

ABSTRACT

The liberalization of international trade which was implemented by the Brazilian government in 1990 made possible to import sophisticated equipment for the ornamental stones industry. That fact had a positive influence helping the country to become an important player in the international market of the ornamental stone economic sector.

The Northeast region, mainly in its dry portion, has a large exposure of crystalline pre Cambrian rock, which has great potential for production of dimension stone granitic rocks. At present, important progress has been achieved in the ornamental rock industrial sector, and there are more than a hundred different types of rocks of commercial value for exporting already cataloged. In spite of that, the overall performance of Brazil in the international market has decreased to seventh in rank, having the country been surpassed by Portugal and South Africa.

This research has the objective of suggesting technical procedures for the empirical analysis of rock masses suited for the extraction of covering stones. Generic aspects are treated in the search of more rational quarrying methods, with emphasis in the following characteristics: regional geology and geomorphology; mineral and petrographic aspects; and geotechnical characterization of the rock mass.

The methodology adopted consisted in bibliographic survey and field observations. It has been possible to define the present situation of the sector of row blocks from the commercial and economic points of view; principles and techniques for estimating in situ stresses; evaluation of methods for rock mass classification oriented to ornamental rock; observation of geologic aspects and state of stresses at eight quarries.

In order to prepare quarrying plans it has been concluded that the following sources of information should be used during the early stages of prospecting: analysis of previous works about the structural geology of the region; petrographic study in oriented rocks; analysis of topographic characteristics of the area; and analysis of rock cores.

It has also been observed that rock mass classification systems oriented to dimension stones should use RQD index with caution, since it is generally equal to 100 in that case, and that Hoek-Brown failure criteria is useful in establishing the maximum limit of stress that the rock mass can withstand. The usefulness of Laubsher classification system in estimating the mean size of blocks is highlighted.

The final conclusions include recommendations of practical procedures, which may be adopted for geologic exploration of dimension stone granitic rocks, according to their different genetic types.

CAPÍTULO 1

ROCHAS PARA FINS ORNAMENTAIS

1.1- Introdução

✓ Rochas para fins ornamentais, ou de revestimento, são todos os materiais que respondem ao polimento e lustro, podendo pertencer geneticamente às rochas ígneas, metamórficas ou sedimentares, sendo utilizadas em revestimentos de pisos e fachadas, arte funerária e obras de arte.

Seus principais atributos são a aparência, resistências, durabilidade e trabalhabilidade, que devem ser definidos na fase de avaliação do depósito, ou pesquisa mineral. ✓ ^{Durabilidade} Esta consiste em quantificar e qualificar o material existente, através de mapeamento geológico preliminar; detalhamento geológico e estrutural do corpo; amostragens para ensaios laboratoriais e posterior campanha de sondagem para verificar o comportamento geotécnico e a homogeneidade do material em profundidade.

De acordo com Diehl et al. (1996) o modelo de análise de uma ocorrência de rocha para uso ornamental, seguido internacionalmente, consiste em se definir os planos de partição do maciço rochoso; a textura e estrutura da rocha e seus parâmetros estéticos em termos de cor e brilho.

No Brasil o dispositivo institucional de “guia de utilização”, existente no Regulamento do Código de Mineração, tem possibilitado que as empresas atuantes no setor iniciem o processo de extração (e comercialização) nas fases iniciais do processo administrativo. Este fato tem catalisado a prática de lavras completamente empíricas, sem conhecimento dos parâmetros litológicos e geoestruturais. As empresas melhor estruturadas e participantes do comércio exterior tem desenvolvido um trabalho mais próximo dos procedimentos internacionais, conforme citado anteriormente.

Contudo, para conceituar completamente uma rocha para uso ornamental, necessita-se de informações conjuntas quanto a:

1. Aspecto estético – definir sua cor (e variações), desenho, transparência, homogeneidade e brilho.
2. Caracterização mínero-petrográfica – analisar, em amostra de mão e em escala de afloramento, o tamanho dos grãos cristalinos, a composição mineralógica, a presença de minerais deletérios, a textura da rocha e estrutura do maciço, e as condições de alteração dos cristais.
3. Características físicas da rocha – analisar as resistências à compressão, flexão e ao desgaste por abrasão, definir seus índices físicos e realizar testes de dilatação térmica e alterabilidade.
4. Características geológicas – definir o tipo de rocha, seu modo de ocorrência, modelo do sistema de descontinuidades, as condições de estabilidade locais e o estado de tensão *in situ*.
5. Conceituação da lavra – planejar os planos de corte e recuperação da mina, além de dimensionar os equipamentos, praças, bota-fora, etc.
6. Características mercadológicas – analisar a infra-estrutura disponível, o mercado alvo, a existência de materiais similares, definir o custo de extração e o limite de preço de comercialização.

Sendo assim, existe uma lacuna entre a metodologia aplicada e as exigências para se conceituar uma rocha para uso ornamental, desde a fase preliminar de detalhamento de uma ocorrência. Esta lacuna pode ser preenchida futuramente por um critério que aborde, de forma conjunta, todos os parâmetros envolvidos, servindo-se também de base para comparar diferentes opções de empreendimentos do setor: um sistema de classificação de maciços rochosos para rochas para fins ornamentais.

1.2- Questões Motivacionais

Nossa atuação, a partir de 1981, em consultoria de projetos e obras permitiu-nos uma visão sobre o estágio de desenvolvimento tecnológico das explorações e acompanhar a aplicação de técnicas de corte contínuo, mais precisamente o uso do fio diamantado, inicialmente para mármore e a seguir para rochas graníticas.

O Brasil tem um importante papel no cenário internacional de rochas para fins ornamentais, mas sua participação está muito aquém de seu vasto potencial, haja visto que no início dos anos 90 o País já dispunha de mais de 150 materiais diferentes catalogados para exportação.

✓ Por outro lado, em todo País, principalmente em regiões de dobramentos, existem exposições de faixas antigas do embasamento cristalino, faixas de reativação plataformar e bacias intracratônicas onde ocorrem os denominados granitos movimentados (gnaisse-migmatitos), granitos negros e mármore, respectivamente, que apresentam, a grosso modo, um intenso fraturamento devido aos eventos tectônicos que se sucederam à sua formação.

No Nordeste, excetuando-se a área de cobertura sedimentar fanerozóica, que recobre os Estados do Maranhão e Piauí, nos outros, do Ceará até a Bahia, existem extensas áreas de exposição do embasamento cristalino que apresentam enorme potencialidade em produzir rochas para fins ornamentais, com reflexos e impactos positivos para a zona semi-árida que tem regime de chuvas em período curto e bem definido, o que para algumas atividades antrópicas é um problema, passa a ser mais um atrativo para a atividade de mineração a céu aberto.

Há uma carência técnica de adaptabilidade de tecnologia externa às rochas nacionais, o que só pode ser saneado, ou minimizado, com a evolução de processos tecnológicos elaborados com base nas condições locais.

1.3- Objetivos

O objetivo principal do trabalho é sugerir uma conduta técnica para análise empírica de maciços rochosos para aplicação em rochas para fins ornamentais. Trata-se de um instrumento, que agrupa dados e observações aplicáveis nas fases de prospecção, pesquisa, desenvolvimento e lavra, através de elementos de análises mineralógica, petrográfica, geomorfológica e geológica.

Secundariamente, sua aplicação desde a fase de prospecção permite uma visão mais objetiva dos resultados de estudos e levantamentos, convergindo à otimização de investimentos necessários em base mais técnica e menos empírica.

1.4- Justificativa

No Brasil não há formação de mão-de-obra própria e divulgação de metodologias específicas para pesquisa e exploração de pedras naturais, apesar de seu potencial. Prospecção, pesquisa e desenvolvimento, quando realizados, são efetuados em conformidade com os modelos aplicáveis às análises de não-metálicos, resultando em trabalhos inconsistentes e que não abordam pontos de destaque à atividade: a classificação dos materiais em conformidade com as exigências técnicas e mercadológicas.

Todavia, as particularidades da lavra de rochas para fins ornamentais, relativas ao índice de qualidade da rocha, resistências físico-mecânicas dos materiais, índices físicos e comportamento estrutural do maciço rochoso inviabilizam a utilização direta dos modelos de análises existentes.