

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO



Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e  
Materiais  
PPGEM

Fabiana Andresa Reis da Cruz

Espacialização de parâmetro de rocha intacta em modelos de  
blocos utilizando krigagem da indicatriz

Porto Alegre - RS  
2017

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas Metalurgia e de  
Materiais (PPG3EM)

Fabiana Andresa Reis da Cruz

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre de Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa.

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Porto Alegre - RS  
2017

Cruz, Fabiana Andresa Reis da

Espacialização de parâmetro de rocha intacta, através de variável categórica em modelos de blocos utilizando krigagem da indicatriz / Fabiana Andresa Reis da Cruz. - - 2017. 115 f.

Orientador: João Felipe Coimbra Leite Costa.

Dissertação (Mestrado) - - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2017.

- |                            |                          |
|----------------------------|--------------------------|
| 1. Krigagem da Indicatriz. | 2. Grau de Consistência. |
| 3. Resistência Uniaxial.   | 4. Maciço Rochoso.       |
| 5. Modelo de Blocos.       |                          |

I. Costa, João Felipe Coimbra Leite, orient.

II. Título.

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de concentração de Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa – Orientador

Banca Examinadora:

---

---

---

Prof. Dr. Carlos Bergman  
Coordenador do PPGE3M

*Aos meus amados: Evaldo Cruz, Evanir Reis da Cruz (**in memorian**) e Ana Rodrigues, companheiro Marcus Magalhães e filhota Helena.*

## **Agradecimentos**

Seria um mestrando a mais cruel das pessoas se não agradecesse antes de tudo a si mesmo, que não desse méritos as escolhas que por várias vezes se vê pronto a tomar... a de desistir e não o faz.

Fui eu um desses prestes a desistir por diversos motivos inventados e culpando as dificuldades que eu mesma escolhi. Agradeço a Deus sim por me dar discernimento a entender que o nosso fardo é nosso e que desistir é simples opção de escolha. Nesse caminho, encontrei pessoas que me ajudaram a interpretar esse “conceito” e a elas agradeço muito, Teófilo Costa meu grande amigo e parceiro de trabalho, ao Marco Braga por me fazer entender que não há escolhas a seguir e sim necessidades.

Ao João meu orientador por estar pronto, sempre que estive pronta a retomar e acreditou, que com todos esses percalços eu conseguiria atingir meu objetivo. Obrigada meu querido você é um ser iluminado.

Embora as vezes não nos lembramos de onde as bagagens da vida são formadas, eu me lembro pai de cada vez que tive um orgulho tremendo da sua inteligência lógica e emocional e essas eu tenho certeza que herdei, não roubei.

Minha querida mãe, grande incentivadora de uma vida inteira que estivemos juntas... se houvessem palavras que pudessem voar e te fizesse ouvir o quanto você foi importante em cada parte da minha vida pessoal e profissional .... mas sei que estive em cada momento. Obrigada!

Tantas vezes precisei de apoio para ter pequenos momentos de imersão e você dona Ana minha mãe substituta foi quem esteve ali, sem questionar, apoiando, dando amor, carinho e entendendo minhas angústias. A você uma gratidão imensa.

Aos amores da minha vida, meu companheiro querido Marcus e minha alma gêmea minha filha Helena, não um agradecimento, mas peço desculpas por não

conseguir me dedicar tanto quanto vocês merecem nesse tempo que me roubou paciência e tranquilidade. Vocês estiveram nos meus pensamentos em todo o processo, mas não há escolhas e sim necessidade.

Amigos que muitas vezes nem sabiam que estava em pânico e nem de longe poderia estar com vocês, muitos nomes iriam compor essa dedicação.

Aos meus colegas que direta e indiretamente trocaram ideias que mudaram o rumo do trabalho, Paulo Mauricio Dias, Allan Maia, Jocélio Filho, Janaina Silva, Eduardo Motta, Diniz Ribeiro.

*É melhor tentar e falhar, que preocupar-se e  
ver a vida passar.*

*É melhor tentar, ainda que em vão que sentar-  
se, fazendo nada até o final.*

*Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias frios  
em casa me esconder.*

*Prefiro ser feliz embora louco, que em  
conformidade viver*

**Martin Luther King**

## Sumário

1	CAPÍTULO 1.....	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	1
1.2	JUSTIFICATIVA.....	2
1.3	OBJETIVOS GERAIS.....	2
1.4	METODOLOGIA.....	4
1.5	ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA.....	6
2	CONCEITOS, FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	CONTEXTUALIZAÇÃO.....	7
2.1.1	Método de estimativas dos elipsoides locais ou anisotropia dinâmica.....	7
2.1.2	Escolha do método de estimativa.....	12
2.1.3	Escolha do parâmetro grau de consistência.....	14
2.2	ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA.....	17
2.2.1	Variável Regionalizada.....	17
2.2.2	Variável Aleatória e Valor Regionalizado.....	17
2.2.3	Função Aleatória.....	18
2.2.4	Distribuição de Probabilidade.....	20
2.2.5	Estacionariedade.....	20
2.2.6	Variograma.....	21
2.2.7	Krigagem dos indicadores.....	24
2.3	PARÂMETRO DE RESISTÊNCIA GRAU DE CONSISTÊNCIA.....	27
2.3.1	Classificações geomecânicas.....	27
2.3.2	Classificação geomecânica VALE e RMR.....	30
2.3.3	Grau de Consistência.....	35
2.4	BREVE HISTÓRICO DA GEOESTATÍSTICA APLICADA A GEOTECNIA.....	36
3	BANCO DE DADOS.....	40
3.1	AVALIAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS.....	40
3.1.1	Métodos de Validação.....	40
3.1.2	Discussão dos resultados da validação da base de dados.....	53
4	REPRESENTAÇÃO DA CONTINUIDADE ESPACIAL.....	55

4.1	DETERMINAÇÃO DO MÉTODO DE MODELAGEM DA CONTINUIDADE DO PARÂMETRO GRAU DE CONSISTÊNCIA.....	55
5	KRIGAGEM DOS INDICADORES DO GRAU DE CONSISTÊNCIA .....	61
5.1	PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS .....	61
5.2	GEOESTATÍSTICA.....	64
5.2.1	Análise exploratória dos dados e modelagem espacial da variável .....	64
5.2.2	Modelagem variográfica .....	66
5.2.3	Definição do modelo variográfico pelos variogramas direcionais .....	68
5.3	KRIGAGEM DOS INDICADORES.....	70
5.3.1	Modelo de Blocos .....	70
5.3.2	Estratégia de Busca .....	71
5.3.3	Resultado da krigagem .....	72
5.3.4	Validação do resultado da Krigagem dos indicadores.....	74
6	RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL.....	85
6.1	DISTRIBUIÇÃO DA RESISTÊNCIA UNIAXIAL POR CATEGORIA .....	85
6.2	TRANSFORMAÇÃO DO RESULTADO DA VARIÁVEL CATEGÓRICA EM VARIÁVEL CONTÍNUA.....	87
6.3	VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA ATRIBUÍDA AOS BLOCOS PELAS METODOLOGIAS ESTUDADAS.....	97
7	APLICAÇÕES E PROPOSTAS DE ESTUDOS FUTUROS.....	103
7.1	APLICAÇÕES .....	103
7.2	PROPOSTAS DE ESTUDOS FUTUROS.....	109
8	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	111
8.1	CONCLUSÕES .....	111
8.2	RECOMENDAÇÕES .....	114
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	116

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Exemplo de elipsoide 3D, com três eixos ortogonais.....	8
Figura 2.2: Exemplo de pontos com direção e mergulhos reais, construídos a partir de linhas horizontais, que definirão a direção do mergulho dos contatos.....	10
Figura 2.3: Linhas azuis representando as orientações dos contatos geológicos e transformação das mesmas em pontos de direção do mergulho. ....	11
Figura 2.4: Exemplo do banco de dados final composto pelos pontos gerados a partir das linhas de contato e mapeamento estrutural, ou seja, pontos representando a direção (Preto) e pontos representando mergulho (vermelho). ....	12
Figura 2.5: Figura esquemática do método de krigagem da indicatriz. ....	13
Figura 2.6: Esquema representando o modelo de função aleatória permitindo ver os pontos de vista da aleatoriedade e dos valores regionalizados. ....	19
Figura 2.7: Esquema representando a realização da variável aleatória (VA) em um valor regionalizado. ....	19
Figura 2.8: Anisotropia estrutural expressa no variograma.....	24
Figura 3.1: Exemplo de ajuste do intervalo geomecânico dentro do intervalo geológico de descrição de testemunho de sondagem, observado na terceira coluna. ....	41
Figura 4.1: Distribuição dos domínios estruturais e geoestatístico (extraído do relatório de modelagem mina do Tamanduá, 2010). ....	56
Figura 4.2: Ilustração da metodologia de criação de linhas para compor o banco de dados de azimutes do protótipo no método de estimativas locais. Em A observa-se o desenho das linhas de direção e em B o desenho das linhas transformadas em pontos que representam a direção. ....	57
Figura 4.3: Ilustração da metodologia de criação de linhas para compor o banco de dados de mergulho do protótipo no método de estimativas locais. Em A observa-se o desenho das linhas verticais e em B o desenho das linhas transformadas em pontos que representam o mergulho. ....	57
Figura 4.4: Seção típica mostrando o resultado da estimativa do azimute e mergulho, que serão base para a krigagem da variável grau de consistência. ....	58

Figura 4.5: A – Seção do modelo de grau de consistência estimado usando domínios específicos. B Seção do modelo de grau de consistência estimado usando anisotropia dinâmica. ....	59
Figura 5.1: Histograma dos dados originais das classes de consistência. ....	63
Figura 5.2: Histograma das classes dos dados agrupados. ....	64
Figura 5.3: Vista isométrica dos dados de sondagem. ....	65
Figura 5.4: Representação gráfica da estrutura de um variograma experimental e partes de um modelo variográfico (Fonte: Aula de Geoestatística, Prof.Dr.ElódioSebem).....	67
Figura 5.5: Imagem do variograma omnidirecional. ....	68
Figura 5.6: Parâmetros do modelo variográfico a ser usado na krigagem das categorias. ....	70
Figura 5.7: Mapa de distribuição das amostras em relação ao grid e o elipsoide usado para estratégia de busca.....	71
Figura 5.8: Visão geral do modelo geomecânico das tipologias do grau de consistência utilizando como protótipo modelo anisotrópico. ....	73
Figura 5.9: Visão geral da relação do banco de dados de sondagem e a Projeção da Cava final. ....	74
Figura 5.10: Exemplo de visão geral da distribuição do grau de consistência 1 em relação as amostras com o mesmo grau de consistência. ....	75
Figura 5.11: Seção horizontal cota 1200, comparando a distribuição de classes inconsistentes (A) Linha preta e o mapa de tipologia geomecânica grau de consistência (B). ....	78
Figura 5.12: Exemplo de validação visual em seções do modelo tipológico estimado em relação as amostras nos furos de sonda. ....	80
Figura 5.13: Comparação entre mapa de classes geomecânicas (A) e projeção do grau de consistência na superfície topográfica da data do mapeamento (B).....	81
Figura 5.14: Comparação da projeção das tipologias projetadas na cava final sem a redistribuição da resistência estimada (A) com a projeção das litologias com a redistribuição através da consistência (B). ....	82
Figura 5.15: Comparação entre a projeção do grau de consistência estimado na topografia da época do mapeamento geomecânico, com os pontos do mapeamento. ....	83
Figura 6.1: Vista em perspectiva das amostras de descrição do grau de consistência distribuídas ao longo do depósito e sua modelagem ao longo do depósito. ....	86

Figura 6.2: Seção tipo -9350 apresentando no detalhe o valor da resistência uniaxial atribuída ao bloco.....	94
Figura 6.3: Seção exemplo para comparação da distribuição das categorias pelo UCS atribuídos aos blocos pelas metodologias 01 e 02.....	95
Figura 6.4: Comparação entre o modelo de blocos classificado por categoria e pela expectativa da resistência uniaxial.....	96
Figura 6.5: Comparação entre o modelo de blocos com a distribuição das categorias de grau de consistência atribuídos pelo UCS classificados pela metodologia 01 (A) e a mesma com a revisão para categorias 0 e 1 (B). B-As linhas em preto demonstram a preservação das categorias 0. ....	97
Figura 6.6: Visão geral das amostras selecionadas para ensaios de resistência uniaxial (UCS) e o limite do modelo de blocos. ....	98
Figura 7.1: Seção típica mostrando as relações da anisotropia estimada com a direção do talude em zonas de baixa resistência.....	104
Figura 7.2: Mapa de distribuição da resistência na geometria da cava final considerando um possível desgaste de britadores se o cut-off do UCS for 100MPa. ....	105
Figura 7.3: Seção exemplo utilizada para comparar a recuperação do depósito utilizando os cenários 1 e 2. ....	108

## Índice de Gráficos

Gráfico 3.1: Distribuição de rochas hematíticas por grau de consistência. ....	47
Gráfico 3.2: Gráfico de distribuição de rochas itabiríticas por grau de consistência.....	48
Gráfico 3.3: Gráfico de distribuição de rochas básicas e vulcânicas por grau de consistência. .....	49
Gráfico 3.4: Gráfico de distribuição de rochas filíticas por grau de consistência .....	50
Gráfico 3.5: Distribuição das rochas de coberturas por grau de consistência.....	51
Gráfico 3.6: Distribuição de metacherts + quartzitos por grau de consistência. ....	52
Gráfico 3.7: Distribuição das amostras de dolomitos por grau de consistência.....	53
Gráfico 6.1: Histograma exemplificando o método de atribuição de valor simulado de resistência uniaxial por bloco. ....	88
Gráfico 6.2: Gráfico da função densidade da distribuição uniforme em [a,b].....	91
Gráfico 6.3: Gráfico da função de distribuição acumulada [a,b].....	92
Gráfico 6.4: Gráficos da função de distribuição acumulada para cada categoria.....	93
Gráfico 6.5: Gráfico de dispersão utilizado para comparar a correlação entre os resultados da resistência compressão obtidas por ensaios e a aproximada krigagem dos indicadores das categorias. ....	101

## Índice de Tabelas

Tabela 1.1: Tabela de descrição da resistência a compressão uniaxial proposta por Brown, 1981. ....	3
Tabela 2.1: Tabela de descrição geomecânica do parâmetro grau de consistência, baseada na tabela modificada por ISRM (International Society of Rock Mechanics), 1981.....	16
Tabela 2.2: Parâmetros geomecânicos e sua distribuição para classificação geomecânica RMR (Adaptada de Bieniawski, 1989). ....	32
Tabela 2.3: Correção relacionada com a orientação das discontinuidades (Adaptado Bieniawski, 1989).....	33
Tabela 2.4: Classificação dos maciços rochosos de acordo com a classificação geomecânica RMR (Adaptada de Bieniawski, 1989). ....	33

Tabela 2.5: Tabela que representa a correlação entre os parâmetros obtidos por descrições geomecânicas e o ranking estabelecido para as resistências da rocha intacta proposto na classificação RMR. ....	34
Tabela 3.1: Resumo das características granulométricas do minério da mina do Tamandú (Da Costa, 2009). ....	43
Tabela 3.2: Distribuição dos dados discrepantes de intervalos de descrição geomecânica. ....	44
Tabela 3.3: Distribuição das inconsistências nos intervalos de descrição geomecânica comparados com intervalos geológicos. ....	45
Tabela 3.4: Combinações testadas na relação do grau de consistência com grau de alteração. ....	45
Tabela 4.1: Comparações dos resultados da estimativa do grau de consistência nas duas metodologias. ....	59
Tabela 5.1: Quantidade de amostras por classe de consistência. ....	61
Tabela 5.2: Variâncias dos grupos de cada categoria dos graus de consistência. ....	62
Tabela 5.3: Número e porcentagem de dados por categoria. ....	63
Tabela 5.4: Parâmetros variográficos para estimativa das categorias de grau de consistência. ....	69
Tabela 5.5: Detalhes do grid de krigagem (Base no centroide do bloco). ....	71
Tabela 5.6: Número de blocos de grau de consistência krigados por classe. ....	73
Tabela 5.7: Porcentagem de volume de amostras e dos blocos estimados por cada tipologia de grau de consistência. ....	75
Tabela 5.8: Comparação da estatística básica do parâmetro grau de consistência do banco de dados original e do modelo estimado. ....	76
Tabela 5.9: Tabela apresentando validação da classificação da estimativa do modelo agrupado, com o modelo tipológico. ....	79
Tabela 5.10: Tabela resultado da comparação dos blocos estimados com a classificação por G1. ....	80
Tabela 6.1: Tabela de descrição da resistência a compressão uniaxial proposta por Brown, 1981. ....	86

Tabela 6.2: Tabela de descrição da resistência a compressão uniaxial proposta por ISRM, 1981 (Modificada). .....	87
Tabela 6.3: Tabela exemplo de classificação de um bloco através da ponderação pelo indicador. ....	89
Tabela 6.4: Tabela exemplificando acréscimos de resistência nos blocos devido a participação do percentual de material resistência. ....	89
Tabela 6.5: Tabela exemplo mostrando a formulação para atribuição do valor de UCS por cada categoria definida por IK através da metodologia 02. ....	93
Tabela 6.6: Tabela comparativa dos valores médios do UCS atribuídos aos blocos usando as duas metodologias. ....	94
Tabela 6.7: Tabela apresentando a transferência de categoria dos blocos após atribuir a resistência uniaxial pela metodologia 01. ....	96
Tabela 6.8: Tabela de ensaios que foram expurgados devido a sua perda e resistência observada na fase de análise do resultado. ....	99
Tabela 6.9: Tabela comparativa dos resultados dos ensaios de UCS em relação a aproximação do UCS atribuído os blocos em relação as duas metodologias. ....	100
Tabela 7.1: Tabela com os parâmetros geométricos do cenário 01. ....	106
Tabela 7.2: Tabela apresentando a diferença de massa de estéril recuperada nos cenários. ....	107
Tabela 7.3: Tabela apresentando a diferença de massa de minério recuperada nos cenários. ....	107
Tabela 7.4: Exemplo de melhoria de definição de ângulos gerais baseadas em litologias, resistência uniaxial e anisotropia. ....	108

## RESUMO

Os modelos geológicos 3D associado as suas compartimentações geomecânicas e hidrogeológicas não são atualmente usados na maioria das minas, particularmente na indústria mineira brasileira. Isso ocorre muitas vezes devido ao investimento em construção da base de dados de dados geomecânicos se inicia em etapas mais madura dos projetos e por consequência o seu volume não é suficiente para ser espacializada.

A ausência de informações sobre a qualidade dos maciços rochosos afeta os projetos de mineração, especialmente as mais sensíveis à incerteza associada aos parâmetros geotécnicos. Esta falta de modelos geomecânicos deve-se principalmente à escassa disponibilidade de dados geotécnicos e à consequente dificuldade de interpola-los e discretizá-los em vários locais de depósito.

Para superar esta escassez de dados, este estudo propõe a construção de modelo geomecânico 3D associado ao modelo geológico via modelagem indireta de classes de consistência de rochas, usando dados derivados da descrição tátil-visual em testemunhos de sondagem.

Estes dados foram agrupados em sete categorias de consistência de rochas e modelados espacialmente através de krigagem de indicadores categóricos. Cada uma destas categorias está associada a uma gama de valores possíveis de resistência à compressão uniaxial. Combinando cada probabilidade de categoria estimada e seu intervalo de possíveis valores de resistência, é possível atribuir a cada bloco uma resistência à compressão uniaxial média. Os valores numéricos podem ser estimados pela média dos histogramas categóricos (classe probabilidade x centro do intervalo de classe) para preencher o modelo de bloco com valores de resistência à compressão uniaxial. A dissertação também apresenta o esquema de interpolação de anisotropia dinâmica que facilita o processo de modelagem da continuidade das camadas em mineralizações dobradas. Este método basicamente modela a direção do mergulho de cada ponto mapeado ou interpolado em mapas de linhas de forma de cada tipo de rocha, permitindo que o variograma e o elipsóide de busca girem adequadamente em cada posição dentro do domínio.

O modelo final foi verificado dentro de regiões onde foram realizados ensaios laboratoriais de compressão uniaxiais.

A metodologia se mostrou eficiente e foi ilustrada em um grande depósito de minério de ferro no Brasil, apresentando propostas de aplicações, como mapeamento de zonas de instáveis baseadas na resistência e na relação entre descontinuidade e direção dos taludes.

## **Abstract**

Geomechanical 3D models are not currently used in most mines particularly at the Brazilian mining industry. The absence of rock mass quality information affects mining design specially the ones more sensitive to the uncertainty associated with geotechnical parameters. This lack of geomechanical models is mainly due the scarce availability of geotechnical data and the consequent difficulty to interpolate and discretize them at various deposit locations.

To overcome this data shortage, this study proposes building 3D geomechanical models via indirect modelling of rock consistency classes using data derived from tactile-visual description at borehole cores.

These data were grouped into seven rock consistency categories and spatially modelled via categorical indicator kriging. Each of these categories are associated with a range of uniaxial compressive resistance possible values. Combining each estimated category probability and its range of possible resistance values allow to assign to each block an average uniaxial compressive strength. Numerical values can be estimated by averaging these categorical histograms (class probability x center of the class interval) to fill the block model with compressive resistance values. The dissertation also presents the dynamic anisotropy interpolation scheme which facilitates the modelling process in folded mineralizations. This method basically models the dip direction of each rock type allowing the variogram and search ellipsoid rotate adequately at each position within the domain.

The final model was checked within regions of the model where compressive uniaxial lab tests were conducted.

The methodology proved to be efficient and was illustrated at a major iron ore deposit in Brazil, presenting applications proposals, such as mapping unstable zones based on resistance and the relationship between discontinuity and slope direction.

## 1 CAPÍTULO 1

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A construção de modelos geológicos que apresentem informações geomecânicas ao longo de todo o modelo de blocos, não é atualmente uma realidade na mineração brasileira. Estudos geotécnicos, baseados nos modelos geológicos/geomecânicos que consideram a qualidade do maciço rochoso e a influência das descontinuidades na estabilidade da escavação, são de fundamental importância para o melhor aproveitamento das reservas de minério e melhoria da segurança operacional. Além disso, os estudos geotécnicos utilizam métodos de análise de estabilidade de taludes que requerem um alto nível de conhecimento geotécnico, elevada qualidade da informação e considerável volume de informações geológicas e geotécnicas.

O aprimoramento dos estudos geotécnicos nos projetos de cavas finais foi determinado pelo:

- Aumento da demanda mundial por minério;
- Utilização de recursos minerais marginais;
- Necessidade de conversão de recursos minerais em reservas de minério;
- Aumento das exigências legais nos projetos de mineração.

Por outro lado, o número de informações e os investimentos na aquisição de dados geomecânicos que subsidiam os modelos geológicos/geomecânicos são escassos na maioria dos depósitos brasileiros a céu aberto. Desta forma, a determinação dos parâmetros de qualidade dos maciços rochosos é geralmente obtida a partir de descrições táteis-visuais em testemunhos de sondagem e durante o mapeamento da frente de lavra, utilizando tabelas de descrição de parâmetros geomecânicos e sistemas de classificação do maciço rochoso.

Atualmente, os dados obtidos na descrição geomecânica são simulados e inferidos por meio da interpretação de seções bidimensionais (2D) contando com a experiência do modelador, sem qualquer apoio de ferramentas computacionais para auxílio nessa interpretação. Isto pode causar inconsistências devido à necessidade de troca do geomodelador ao longo de todo o processo de construção da base ou da interpretação final

das seções. Essas seções serão a única fonte para a construção da base para análise de estabilidade geomecânica em softwares específicos, sejam baseadas no equilíbrio limite, análises numéricas em seções ou modelos.

Com base nesse cenário, a utilização de modelos de blocos tridimensionais (3D) com estimativas geoestatísticas dos parâmetros geomecânicos, vem sendo largamente discutida no meio técnico, como por Folle (2009) e Ramírez (2009). Esses modelos devem prover valores dos parâmetros geomecânicos a partir da descrição tátil-visual ao longo de todo o modelo de blocos.

Esses dados espacializados de forma tridimensional da qualidade de maciços rochosos, podem ser utilizados para melhorar o projeto de geometrias de cavas finais, tornando-as mais adequadas, com maior segurança operacional e com baixa perda de recursos minerais.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Esse estudo se justifica no âmbito interno do grupo de Geotecnia da empresa Vale S.A., dada a necessidade de construir modelos geomecânicos com menor grau de incerteza para subsidiar o processo de gestão de riscos geotécnicos. Adicionalmente, é necessária a utilização de técnicas computacionais em Geoestatística para diminuição da subjetividade da construção de modelos Geomecânicos.

A melhoria do processo de modelagem geotécnica dos depósitos minerais pode levar a um maior aproveitamento dos recursos minerais e reservas de minério através de conceitos de máxima extração com segurança operacional.

## 1.3 OBJETIVOS GERAIS

O principal objetivo dessa dissertação é a avaliar a aplicabilidade do método de krigagem das indicatrizes na modelagem de parâmetros geomecânicos. Além de avaliar a eficácia da

definição dos contornos/contatos dos parâmetros geomecânicos mediante técnica de estimativa dos elipsoides locais, pretendendo-se diminuir o tempo de modelagem com a interpretação de seções verticais/horizontais.

Pretende-se criar uma classificação de cada bloco do modelo usando a distribuição de probabilidade estimada do parâmetro grau de consistência e sua relação com o intervalo de resistência à compressão uniaxial, atribuindo ao bloco uma simulação convertida em valores de resistência conforme tabela 1.1.

Essa dissertação pretende utilizar os dados de parâmetros geomecânicos, em especial ao parâmetro grau de consistência, obtidos ao longo de todo o histórico de aquisição e construção do banco de dados geomecânicos de uma mina da Vale S.A, estimar a continuidade espacial dos parâmetros ao longo do depósito e posterior interpolação com krigagem das indicatrizes.

A partir da modelagem espacial do grau de consistência, poder-se-á classificar cada bloco do modelo usando a distribuição de probabilidade estimada e sua relação com o intervalo de resistência à compressão uniaxial. Adotando-se assim uma classificação pela ponderação da média da probabilidade obtida versus o ponto central do histograma da distribuição da resistência dos ensaios de resistência uniaxial proposta por Brown (1981) (Tabela 1).

Tabela 1.1: Tabela de descrição da resistência a compressão uniaxial proposta por Brown, 1981.

<b>Código</b>	<b>Grau</b>	<b>Resistência compressão uniaxial (Mpa)</b>
0	EXTREMAMENTE MACIA	R <sub>0</sub> (0,25 a 1 Mpa)
1	MACIA	R <sub>1</sub> (1 a 5 Mpa)
2	MEDIA MACIA	R <sub>2</sub> (5 a 25 Mpa)
3	MEDIA	R <sub>3</sub> (25 a 50 Mpa)
4	MEDIA DURA	R <sub>4</sub> (50 a 100 Mpa)
5	DURA	R <sub>5</sub> (100 a 250 Mpa)
6	EXTREMAMENTE DURA	R <sub>6</sub> (>250 Mpa)

Para modelar a continuidade espacial, essa dissertação também pretende avaliar a aplicação de um método denominado anisotropia dinâmica como técnica para modelar a continuidade espacial em domínios físicos curvilíneos ou dobrados. Essa técnica permite a rotação da anisotropia da continuidade espacial do parâmetro modelado, definindo um volume de busca e modelos de variograma adequados para cada posição espacial do modelo

de blocos. Assim, o volume de busca seria orientado de forma precisa seguindo a geometria da mineralização ou outro parâmetro geológico em análise.

#### 1.4 METODOLOGIA

Para se atingir os objetivos desejados o estudo foi construído em quatro fases:

##### Fase 1 – Construção e validação da base de dados

Definição da forma de construção da base de dados baseada no processo de descrição geomecânica adotado pela empresa, sua correlação com as descrições geológicas e classificação química, metodologia, validação e tratamento de valores espúrios.

Fase 2 – Modelagem geoestatística do parâmetro grau de consistência usando conceitos de anisotropia dinâmica

Estudo e avaliação da aplicabilidade da técnica de estimativa dos elipsoides locais em um método de anisotropia dinâmica, usando o *software Datamine* para modelagem de blocos das variáveis direção e mergulho, visando definir a continuidade do parâmetro grau de consistência sem a delimitação física dos contatos. A anisotropia dinâmica pode ser utilizada para reproduzir estruturas curvilíneas complexas, proporcionando a representação da continuidade do parâmetro sem construção por parte do operador de seções geomecânicas, Boisvert, Manchuk & Deutsch (2007).

Fase 3 – Aplicação do método de krigagem da indicatriz na modelagem do parâmetro geomecânico Grau de Consistência – GC.

Estudo e validação da aplicação da metodologia de estimativa por krigagem dos indicadores para modelagem do parâmetro grau de consistência, utilizando como base de estudo da variável os softwares *SGeMS* e *GSLIB90* e para a estimativa o programa *Datamine*®.

Fase 4 – Distribuição dos parâmetros de resistência

Desenvolvimento de metodologia de correlação entre a distribuição do intervalo da resistência uniaxial determinada para cada grau de consistência segundo Brown (1981).

#### Fase 5 – Aplicações

Desenvolver padronizações de aplicação em estudos e contextos dos projetos geomecânicos para avaliação da estabilidade de projetos de cavas finais, objetivando o maior aproveitamento econômico do depósito levando em consideração a segurança operacional.

Para construir essas fases foi utilizada uma metodologia que detalha a construção da base de dados, do modelo, validações e aplicação, conforme:

- i. Escolha de um depósito onde seja necessário estudo da distribuição das características físicas do maciço rochoso, para auxiliar na definição de geometria otimizada e segura da cava;
- ii. Construção, avaliação e validação dos dados, devido à incerteza associada a descrição geomecânica do parâmetro por parte de troca de operadores ao longo dos anos;
- iii. Criação do padrão estatístico dos parâmetros geomecânicos, norteando os possíveis agrupamentos e construção de novo banco de dados categorizado e agrupado que reflita a característica de continuidade individual de cada intervalo agrupado para o tipo de parâmetro;
- iv. Criação de métodos de decisão da expurgação de dados considerados *outliers* que podem alterar a qualidade dos resultados;
- v. Estudos e construção de banco de dados de pontos considerando o azimute e mergulho corrigidos para a modelagem da continuidade do parâmetro com a técnica de estimativa dos elipsoides locais;
- vi. Construção de script para a krigagem do indicador do grau de consistência usando como protótipo o modelo de anisotropia dinâmica para validar os melhores alcances dos variogramas aplicados no estudo;
- vii. Criação de classificação do bloco com a distribuição de probabilidade local;
- viii. Teste da distribuição espacial dos dados classificados baseados no agrupamento inicial dos parâmetros do banco de dados;

- ix. Estudo da correlação da distribuição do grau de consistência modelado relacionado à resistência a compressão simples simulada na descrição;

## 1.5 ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA

O capítulo 2 abordará a revisão bibliográfica, com conceitos e fundamentos teóricos de Geoestatística relacionados à metodologia de estimativa de variáveis indicadoras, conceitos do parâmetro grau de consistência e as aplicações da Geoestatística na modelagem de parâmetros geomecânicos.

No capítulo 3, será apresentada a construção do modelo da continuidade do parâmetro de estudo com a técnica de modelagem dos elipsoides locais e criação do protótipo para modelagem do parâmetro geomecânico.

O Capítulo 4 apresentará a construção do banco de dados do grau de consistência original com sua distribuição, tratamento de valores espúrios, correção de valores se necessário.

O capítulo 5 apresentará o processo de modelagem do parâmetro grau de consistência com krigagem dos indicadores, análise e validação dos resultados e discussões.

O Capítulo 6 irá tratar a transformação da variável categórica grau de consistência, resultado da krigagem apresentada no capítulo 5 em uma variável contínua baseada na média da resistência da distribuição de cada categoria determinada pela norma do Brown (1981).

O capítulo 7 apresentará propostas de aplicações do banco de dados em estudos para otimização das reservas.

O capítulo 8 será dedicado às conclusões finais, além de sugestões para trabalhos futuros.

## **2 CONCEITOS, FUNDAMENTOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo aborda a revisão bibliográfica de conceitos e fundamentos teóricos em Geoestatística relacionados à metodologia de estimativa de variáveis indicadoras; conceitos dos parâmetros de resistência (grau de consistência) e as aplicações da Geoestatística na modelagem de parâmetros geomecânicos.

A compilação de informações será baseada principalmente nos estudos realizados por Goovaerts (1997) e Journel (1982) e Brown (1981),

### **2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO**

#### **2.1.1 Método de estimativas dos elipsoides locais ou anisotropia dinâmica**

A estimativa de parâmetros em blocos é uma composição de processos de interpolação, que utiliza como base um volume de busca de amostras a serem interpoladas na forma de um elipsoide centrado em cada bloco, onde os comprimentos e direção dos três eixos ortogonais descrevem a continuidade, o alcance e a orientação do parâmetro a ser estimado. (Figura 2.1).

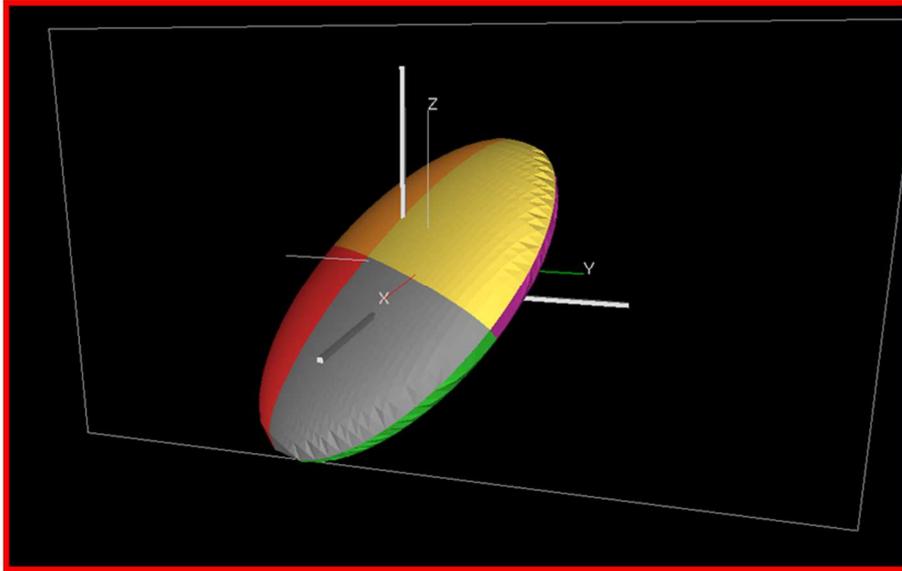


Figura 2.1: Exemplo de elipsoide 3D, com três eixos ortogonais.

A continuidade espacial do parâmetro modelado varia devido a eventos geológicos formadores do depósito (deformação, sedimentação, hidrotermalismo, supergênese, etc). Para representar esses eventos nos modelos de blocos, tradicionalmente são interpretadas seções geológicas verticais e horizontais, impondo ao processo de modelagem o conhecimento prévio da gênese do depósito. Esse conhecimento é adquirido através do mapeamento de superfície e em sub-superfície dos testemunhos dos furos de sondagem. Além disso, são somadas as informações granulométricas das análises de laboratório e por vezes perfilagens óticas ou geofísicas. Essas interpretações dos eventos em fatias são posteriormente transformadas em sólidos através de mecanismos matemáticos por operações Booleanas, os quais permitem combinar e dividir grupos de wireframes, ou por métodos Geoestatísticos. Esse processo por vezes é laborioso e exige grande esforço.

Essa dissertação pretende avaliar a aplicação de uma técnica matemática computacional dos elipsoides locais que utiliza anisotropia dinâmica para a modelagem da continuidade das camadas. Essa técnica detalhada por Boisvert, Manchuk & Deutsch (2007), permite a rotação da anisotropia do parâmetro, definindo o volume de pesquisa e modelos de variograma para cada célula no modelo de blocos. Assim, o volume de pesquisa é orientado de forma a seguir a tendência da forma dos eventos geológicos que controlam a distribuição espacial do parâmetro que está sendo modelado.

O método de estimativa dos elipsoides locais permite que os ângulos de rotação estejam alinhados aos dados de direção e mergulho do contato especificado para o parâmetro modelado, seja ele geológico ou geomecânico.

Para a geração dos parâmetros de orientação dos elipsoides, são utilizados dados primários, construindo um banco de dados de *azimutes* e *dips*, compostos por dados obtidos em mapeamentos estruturais e em orientações baseadas nos contatos geológicos.

O parâmetro grau de consistência possui forte correlação com os contatos geológicos, podendo variar entre os mesmos. Para a geração desses dados são construídas ou aproveitadas as linhas das seções produzidas para a geração do modelo geológico, porém as mesmas devem ser desenhadas na orientação exata do mergulho das camadas.

Para que os ângulos de direção e mergulho desses contatos sejam transformados em pontos, que posteriormente serão interpolados para a criação dos elipsoides locais, é necessária a criação de arquivos de linhas horizontais, indicando o azimute, e linhas verticais para o mergulho das camadas.

Os são gerados e processados a partir das linhas são transformadas em pontos com direção e mergulho aparente, que posteriormente são corrigidos, através das orientações das linhas dos mapas ou seções horizontais que representam a direção verdadeira dos contatos geológicos desenhados com azimutes reais.

Portanto, o azimute verdadeiro dos pontos é baseado em desenho dos mapas e seções horizontais convertidos em pontos azimutais (figura 2.2) e o mergulho do contato dos parâmetros representando o Dip é definido desenhando-se as linhas de orientação dos contatos geológicos/geomecânicos verticais (Figura 2.3).

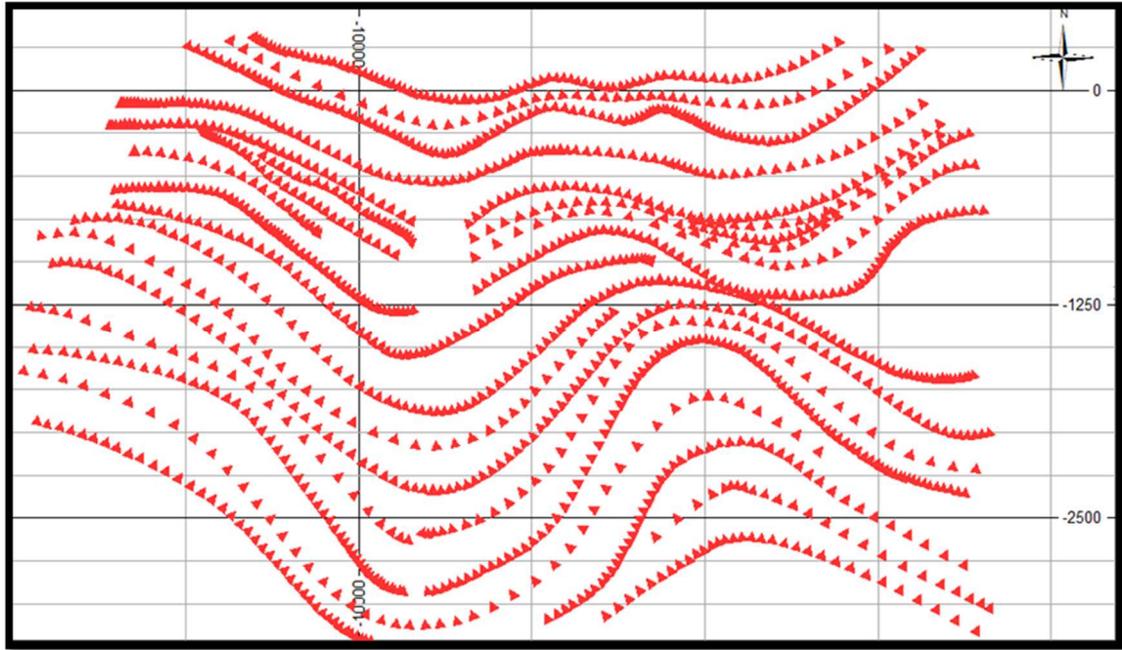


Figura 2.2: Exemplo de pontos com direção e mergulhos reais, construídos a partir de linhas horizontais, que definirão a direção do mergulho dos contatos.

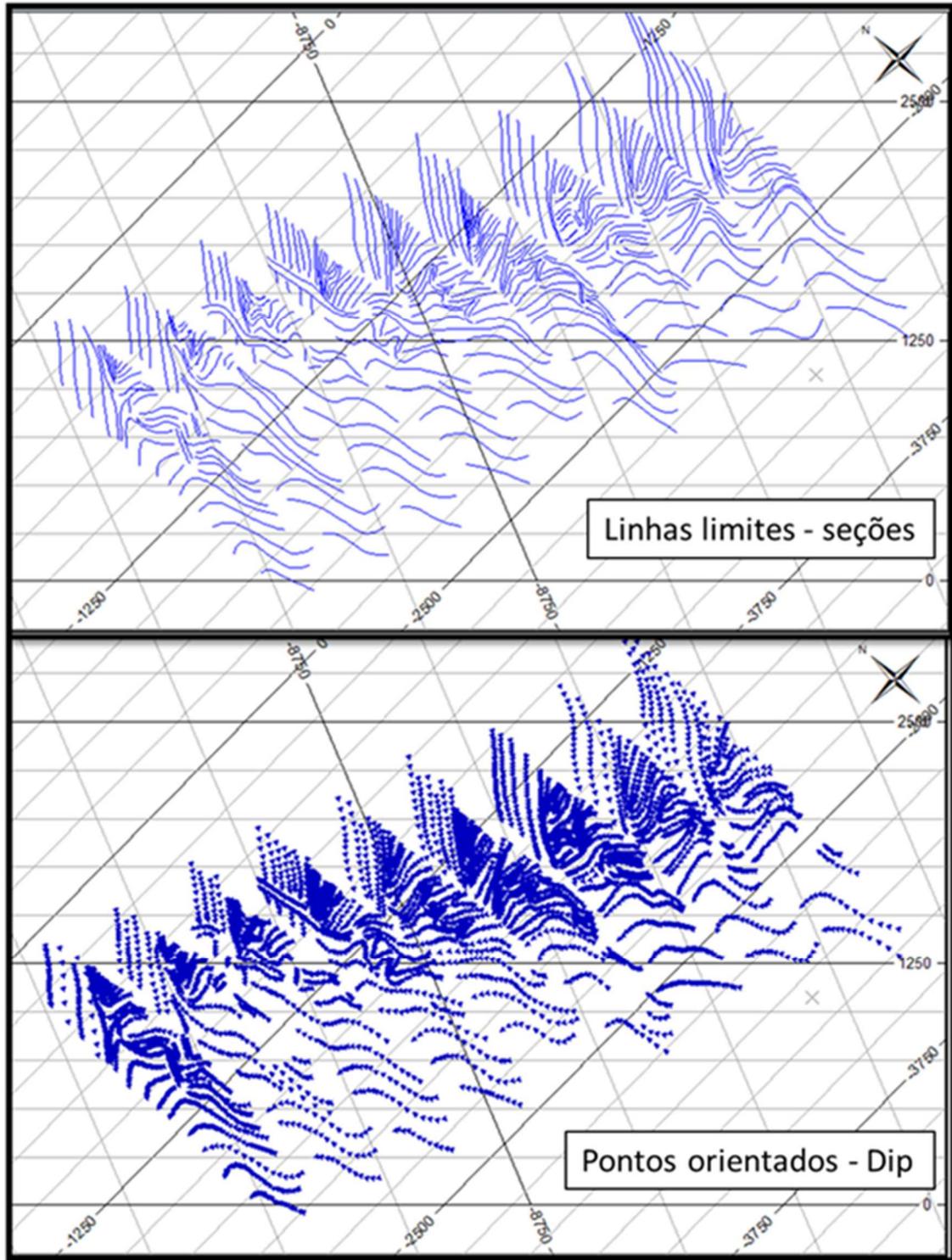


Figura 2.3: Linhas azuis representando as orientações dos contatos geológicos e transformação das mesmas em pontos de direção do mergulho.

O conjunto dos dados da direção do mergulho e do mergulho corrigidos compõe um banco de dados de estruturas limites dos contatos geológicos/geomecânicos (Figura 2.4), que estimados, resultarão em um modelo em 3D de orientações. Esses dados servirão como

protótipo de entrada no método de estimativa escolhido para o parâmetro desejado. Esse protótipo poderá ser usando por qualquer parâmetro que seja controlado por esses contatos.

O resultado do modelo de “orientação” estimados, posteriormente ser usado com qualquer método de estimativa – inverso da distância elevada a uma potência (IPD), vizinho mais próximo, krigagem ordinária, krigagem simples ou krigagem da indicatriz.

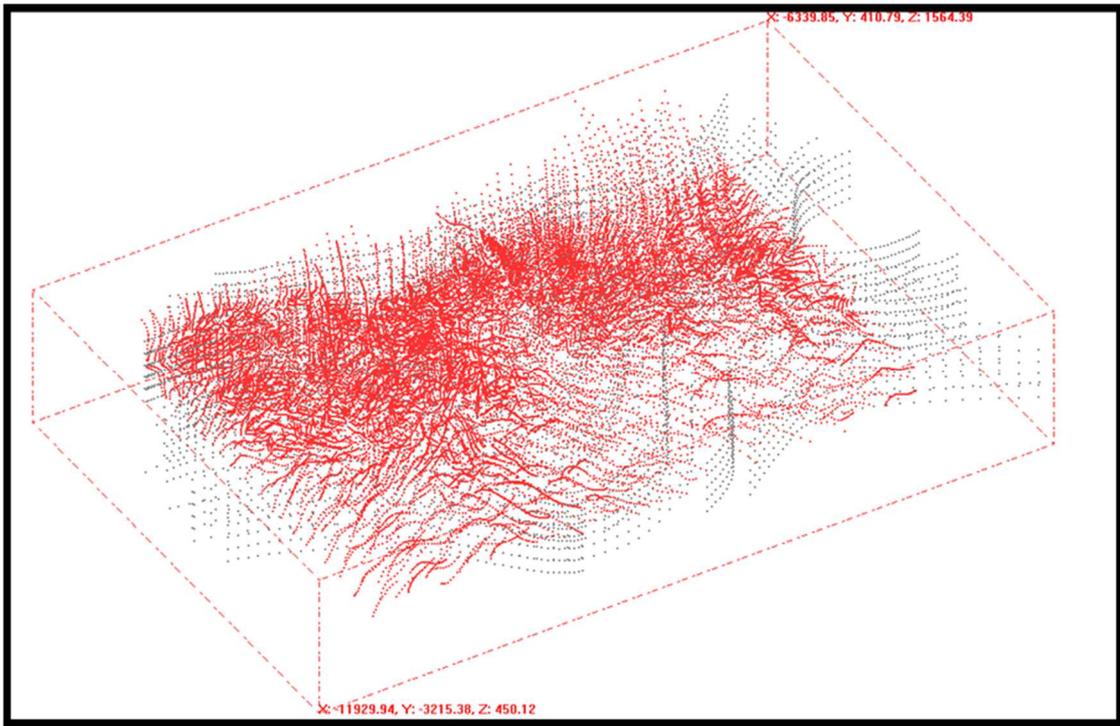


Figura 2.4: Exemplo do banco de dados final composto pelos pontos gerados a partir das linhas de contato e mapeamento estrutural, ou seja, pontos representando a direção (Preto) e pontos representando mergulho (vermelho).

### 2.1.2 Escolha do método de estimativa

Os métodos de estimativa são utilizados para prever valores ou categorias em locais onde a variável de interesse não foi amostrada. Esses dados devem necessariamente possuir correlação física e/ou espacial entre si, Matheron (1962) para seu uso com métodos Geoestatísticos. A escolha do método de estimativa a ser usado para uma determinada variável deve ser feita baseada na natureza dos dados e nas características da unidade de observação.

Os parâmetros geomecânicos visuais ou descritos são variáveis qualitativas de forma categóricas, não contínuas e não aditivas que pertencem a um intervalo de classificação. Entre as metodologias que atendem a estimativa de parâmetros categóricos, não aditivos típicos de geomecânica, a krigagem dos indicadores Journel (1982) foi o método escolhido para esse estudo. Esse é um método de Geoestatística não linear, onde cada um dos parâmetros é codificado em somente dois valores, por exemplo, entre 0 e 1 (Figura 2.5). Onde um é a probabilidade de pertencer a uma dada classe e zero é a probabilidade de não pertencer.

Como resultado, ao final da krigagem cada bloco terá a probabilidade distribuída entre zero e 1, que equivale a distribuição de 0 a 100% de chances de pertencer a qualquer um dos intervalos de classe.

A classificação final do bloco dependerá do tipo de parâmetro, que pode ser baseado no agrupamento inicial da base de dados ou na maior probabilidade do ponto estimado.

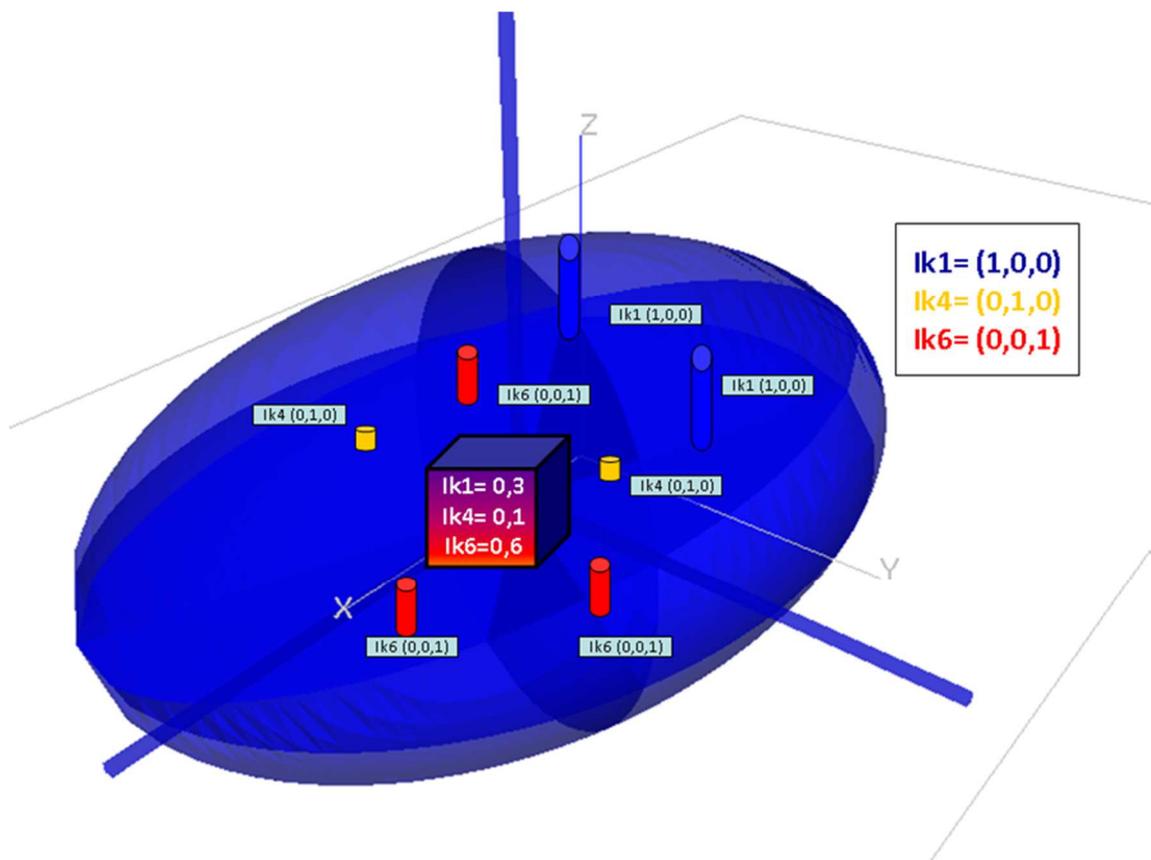


Figura 2.5: Figura esquemática do método de krigagem da indicatriz.

O cubo esquemático representa um bloco não amostrado com uma área de influência do elipsoide azul, cercado por amostras de grau de consistência provenientes da sondagem

rotativa (azul – Ik(CG)1), amostragem de frente de lavra (amarelo – Ik(GC)4) e canaletas (Vermelho – Ik(GC)6).

O exemplo representa a influência das amostras sobre a estimativa do bloco, que depois de estimado possui valores de 0,6 (60%) de chances de pertencer a classe grau de consistência 6 (seis); 0,3 (30%) de chances de pertencer a classe grau de consistência 1 (um) e 0,1 (10%) de chances de pertencer a classe grau de consistência 4 (quatro). Considerando a maior percentagem desse bloco com 60% ele é classificado como grau de consistência 6.

### 2.1.3 Escolha do parâmetro grau de consistência

As classificações geomecânicas baseiam-se em descrições táteis e visuais das amostras tais como: coloração, composição e orientação mineralógica, texturas, grau de alteração, desintegração, fissuração ou lasqueamento entre outros, conforme descrevem De Oliveira (2012).

Serra (1998) define as classificações geomecânicas como sendo o agrupamento de maciços rochosos em classes de acordo com comportamentos geomecânicos similares, relacionados com suas feições geológicas mais relevantes. A previsão do comportamento desses maciços rochosos em escavação constitui seu principal objetivo.

Para classificar um maciço combinam-se parâmetros de resistência da rocha intacta com as descontinuidades.

Essas unidades com similitude geomecânica foram definidas pela Brown (1981), de modo a auxiliarem na classificação de Bieniawski (1979). Essa classificação é utilizada nas minas da Vale S.A. para qualificar os maciços rochosos onde são descritos: o grau de alteração, grau de consistência (Resistência), grau de fraturamento e o índice da qualidade da rocha (RQD) para as características da rocha intacta, enquanto que para as descontinuidades são descritos o espaçamento, rugosidade, abertura, preenchimento e tipo de descontinuidade.

Segundo essa classificação, é necessária a estimativa de todos os parâmetros de forma individual, visto que cada um deles possui características de formação própria e distintas que

exigem avaliações do seu comportamento espacial em várias direções (provavelmente distinto entre as direções).

Para a construção dessa dissertação, o parâmetro geomecânico escolhido foi o grau de consistência, que avalia a resistência da rocha intacta. Esse parâmetro foi escolhido por três motivos: (i) é menos subjetivo nas descrições, (ii) é descrito para qualquer tipo de maciço, visto que as simulações necessárias são simples e podem ser avaliadas em materiais de diferentes resistências e (iii) pode ser utilizado na comparação com a classificação granulométrica em materiais cujo efeito da alteração é conhecido; (iv) Possui correlação direta com ensaios laboratoriais

Esse parâmetro é usualmente estimado por meio de tabela de descrição tátil-visual, que associa aos valores estimados de compressão uniaxial (UCS), carga pontual (*Point Load test*) ou do *martelo de Schmidt*.

Para a determinação do parâmetro grau de consistência, são feitos testes com simulações da penetração da resistência do material quando imposta a ele a força de golpes do martelo de geólogo, da pressão dos dedos, força cisalhante com as mãos ou a condição de saturação quando mergulhado em água, como pode ser visto na tabela 2.1.

Tabela 2.1: Tabela de descrição geomecânica do parâmetro grau de consistência, baseada na tabela modificada por ISRM (International Society of Rock Mechanics), 1981.

<b>Grau de Consistência ou Resistência</b>		
<b>CODIGO</b>	<b>GRAU</b>	<b>DESCRIÇÃO</b>
<b>00</b>	<b>EXTREMAMENTE MACIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetrável pelo polegar.</li> <li>- Esfarela facilmente sob pressão dos dedos e dissolve completamente quando agitado em água.</li> <li>- <math>R_0</math> (<math>T_c</math> 0,25 a 1 Mpa)</li> </ul>
<b>01</b>	<b>MACIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetrável por lâmina, desagregável manualmente.</li> <li>- Esfarela ao golpe do martelo.</li> <li>- <math>R_1</math> (<math>T_c</math> 1 a 5 Mpa)</li> </ul>
<b>02</b>	<b>MEDIA MACIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Penetrável por lâmina; quebra-se ao golpe do martelo.</li> <li>- As bordas do fragmento podem ser quebradas pela pressão dos dedos.</li> <li>- <math>R_2</math> (<math>T_c</math> 5 a 25 Mpa)</li> </ul>
<b>03</b>	<b>MEDIA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quebra com relativa facilidade ao golpe do martelo, as bordas do fragmento não podem ser quebradas pela pressão dos dedos.</li> <li>- A lâmina de aço provoca sulcos na superfície.</li> <li>- <math>R_3</math> (<math>T_c</math> 25 a 50 Mpa)</li> </ul>
<b>04</b>	<b>MEDIA DURA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- A lâmina de aço dificilmente provoca sulcos na superfície.</li> <li>- Quebra-se ao golpe de martelo.</li> <li>- <math>R_4</math> (<math>T_c</math> 50 a 100 Mpa)</li> </ul>
<b>05</b>	<b>DURA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Quebra-se com vários golpes de martelo.</li> <li>- Não riscável pela lamina de aço.</li> <li>- <math>R_5</math> (<math>T_c</math> 100 a 250 Mpa)</li> </ul>
<b>06</b>	<b>EXTREMAMENTE DURA</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Elevada resistência e são praticamente impenetráveis por lâminas de aço.</li> <li>- Os fragmentos possuem bordas ásperas e cortantes.</li> <li>- Quebra-se com dificuldade ao golpe do martelo.</li> <li>- <math>R_6</math> (<math>T_c</math> &gt;250 Mpa)</li> </ul>

Essas características, são correlacionadas aos resultados de ensaios de compressão uniaxial.

O grau de consistência, depois de interpolado ao longo do modelo, subsidiará a obtenção de uma distribuição simulada dos intervalos da compressão uniaxial, que serão validados em alguns trechos com os valores oriundos de ensaios de laboratório.

Esse parâmetro será correlacionado à resistência uniaxial em conjunto com a descrição da condição de deterioração ou alteração do mesmo, frente aos esforços geológicos caracterizados pelas descontinuidades.

A interpolação de parâmetros ao longo de todo o modelo geológico/geomecânico traz uma distribuição de valores simulados, compondo a informação de *input* para análises de estabilidade e, conseqüentemente, para análises de riscos de qualquer projeto desenhado para o depósito.

## 2.2 ABORDAGEM GEOESTATÍSTICA

### 2.2.1 Variável Regionalizada

Seguindo a abordagem de Matheron (1962), para o entendimento da variável regionalizada, consideramos uma certa propriedade  $Z$ , sendo coletada de diferentes objetos dispostos espacialmente em uma região do espaço  $W$ . Podemos representar essa propriedade, para esse conjunto de amostras, da seguinte maneira:

$$z(u_\alpha), \text{ com } \alpha = 1, \dots, n,$$

Em que  $u$  representa a posição da amostra e  $n$  o número de amostras observados. Se considerarmos que esses objetos são pontos, então, podemos coletar a dada propriedade de infinitos objetos dentro da região do espaço  $W$ .

Essa possibilidade de observar a dada propriedade em infinitas amostras dentro de uma região  $W$  define uma variável regionalizada.

Nesse caso, o conjunto  $\{Z(u_\alpha), \alpha = 1, \dots, n\}$  pode ser visto como  $n$  valores observados da variável regionalizada  $Z$ .

No estudo de uma variável regionalizada  $VR$  pelo menos dois aspectos geométricos se tornam importantes, o domínio  $W$  e o suporte do objeto na qual a propriedade é coletada.

### 2.2.2 Variável Aleatória e Valor Regionalizado

Dentro do contexto, cada valor coletado da variável regionalizada dentro do domínio  $W$  é tido como um “valor regionalizado”. Por exemplo: o teor de cobre dentro de um dado domínio coletado de um objeto, uma amostra de sondagem, é um valor regionalizado. Ou seja, o teor é uma propriedade regionalizada. De outro ponto de vista, podemos considerar esse valor

regionalizado como um valor gerado por algum processo probabilístico. Formalmente, esse mecanismo é chamado *Variável Aleatória* **VA** e o valor coletado de uma amostra, ou propriedade medida de um objeto,  $z(u_\alpha)$  representa um valor possível da variável aleatória  $Z(u_\alpha)$ .

É de muita importância perceber que em cada ponto do domínio,  $u_\alpha$  o mecanismo responsável por gerar o valor  $z(u_\alpha)$  pode ser diferente, de forma que, em cada ponto, a **VA**  $z(u_\alpha)$  pode ter propriedades diferentes em cada uma das diferentes regiões do domínio.

### 2.2.3 Função Aleatória

Considere agora, os valores regionalizados em todos os pontos do domínio. A função  $z(u)$  para todos os pontos do domínio é uma variável regionalizada. O conjunto de pontos

$$\{z(u), u \in W\}$$

Pode ser visto como um conjunto infinito de variáveis aleatórias (uma **VA** em cada ponto do domínio). A família de variáveis aleatórias

$$\{Z(u), u \in W\}$$

é chamada de *função aleatória* **FA**.

A Figura 2.6 nos permite ver que o modelo de função aleatória foi criado para permitir ver os dados sob dois pontos de vista.

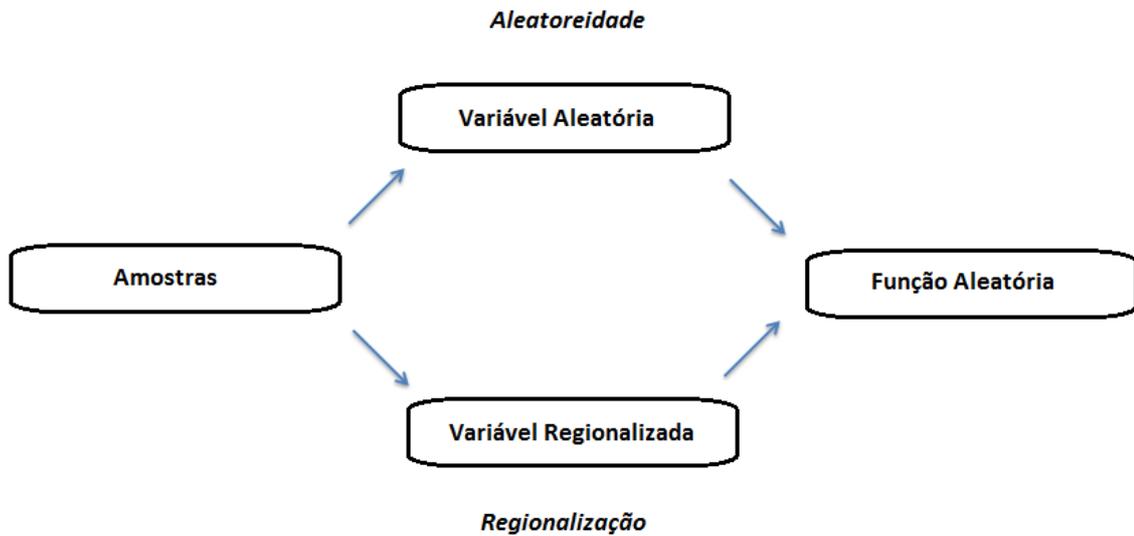


Figura 2.6: Esquema representando o modelo de função aleatória permitindo ver os pontos de vista da aleatoriedade e dos valores regionalizados.

O primeiro ponto de vista consiste no fato de que uma propriedade coletada a partir de amostras de um domínio contido em um ambiente físico, de alguma maneira é dependente da posição que ela ocupa dentro do domínio, ou seja, a variável é regionalizada. O segundo ponto de vista é que os valores regionalizados  $z(u_\alpha)$ , em geral, não podem ser modelados por uma função determinística. Olhando os valores da certa propriedade coletada a partir das amostras  $z(u)$ , o comportamento dos mesmos pode ser de fato muito complexo. Como na maioria dos casos, não é possível determinar os parâmetros do mecanismo que geram esses dados, usamos uma abordagem probabilística, ou seja, o mecanismo é considerado aleatório.

Juntando esses dois pontos de vista, *regionalização* e *aleatoriedade*, temos o conceito de Função Aleatória FA.

Em um jargão probabilístico, veja Figura 2.7, a VR é uma realização da FA  $Z(u)$ . Um valor regionalizado  $z(u_\alpha)$ , em uma posição específica  $u_0$  é uma realização de uma variável aleatória  $Z(u_0)$ , membro de uma família infinita de variáveis aleatórias, a Função Aleatória, FA.

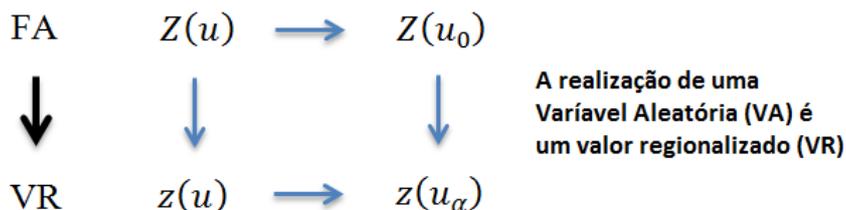


Figura 2.7: Esquema representando a realização da variável aleatória (VA) em um valor regionalizado.

#### 2.2.4 Distribuição de Probabilidade

No modelo apresentado, o mecanismo  $Z(u_0)$ , em cada ponto  $u_0$  do domínio  $W$ , gera realizações que seguem uma distribuição de probabilidade  $F$ .

$$P(Z(u_0) \leq z) = F_{u_0}(z)$$

em que  $P$  é a probabilidade, em um ponto  $u_0$ , que a VA é menor que um dado valor  $z$ .

A distribuição bivariada para duas variáveis aleatórias  $Z(u_1)$  e  $Z(u_2)$  em duas posições diferentes é:

$$P(Z(u_1) \leq z_1, Z(u_2) \leq z_2) = F_{u_1, u_2}(z_1, z_2),$$

Em que  $P$  é a probabilidade de que, simultaneamente,  $Z(u_1)$  é menor que  $z_1$  e  $Z(u_2)$  é menor que  $z_2$ .

Da mesma maneira, uma distribuição multivariada para  $n$  variáveis aleatórias em  $n$  diferentes posições pode ser definida como:

$$P(Z(u_1) \leq z_1, \dots, Z(u_n) \leq z_n) = F_{u_1, \dots, u_n}(z_1, \dots, z_n),$$

Raciocinando dessa maneira, o que se tem é um modelo generalista capaz de descrever uma série de processos naturais. Na prática, entretanto, podemos contar apenas com um número pequeno de amostras de uma realização ou de várias realizações da FA impossibilitando inferir todas as distribuições uni e multivariada em qualquer ponto. Para tanto, uma simplificação é necessária e ela provem da ideia de estacionariedade.

#### 2.2.5 Estacionariedade

Estacionariedade significa que as características de uma FA permanecem as mesmas, ao deslocar um conjunto de  $n$  pontos de uma região para outra do domínio. Ou seja, as propriedades não mudam se fizermos uma translação dos dados.

Para ser mais específico, a FA será restritamente estacionária se qualquer conjunto de  $z_1, \dots, z_n$  pontos e para qualquer vetor  $h$

$$F_{u_1, \dots, n}(z_1, \dots, z_n) = F_{u_1+h, \dots, x_n+h}(z_1, \dots, z_n)$$

Ou seja, a translação de uma configuração de pontos em uma dada direção não muda a distribuição multivariada.

Nesse ponto, é extremamente importante notar que estacionariedade é uma propriedade da FA e não da VR. Na prática podemos dizer que uma VR é estacionária, ressaltando que na verdade o que assumimos é que essa VR pode ser considerada como uma realização de uma FA estacionária.

### **Dos dois Primeiros Momentos**

A estacionariedade estrita requer que a especificação da distribuição multivariada de pontos seja especificada para qualquer conjunto de pontos  $(z_1, \dots, z_n)$ .

Uma estratégia mais simples é considerar pares de pontos  $\{u_1, u_2\}$  no domínio e tentar caracterizar apenas os dois primeiros momentos e não a distribuição como um todo. Essa abordagem funciona bem quando o histograma dos dados não é muito simétrico.

Uma possibilidade é assumir a estacionariedade dos dois primeiros momentos da variável: *estacionariedade de segunda ordem*. Outra possibilidade é assumir a estacionariedade dos dois primeiros momentos da diferença entre pares de valores em dois pontos: estacionariedade intrínseca. Essa última nos leva a ideia de variograma.

#### 2.2.6 Variograma

Segundo Journel & Huigbregts (1978), para entendimento do conceito de variograma, consideramos dois valores regionalizados  $z(u)$  e  $z(u + h)$  em dois pontos distintos  $u$  e  $u + h$  separados por um vetor  $h$ . A variabilidade entre estas duas quantidades é caracterizada pela função variograma  $2\gamma(u, h)$  que é definido como a esperança da VA  $[Z(u) - Z(u + h)]^2$ , isto é:

$$2\gamma(u, h) = E\{[Z(u) - Z(u + h)]^2\}$$

Observe que o variograma é uma função da posição  $u$  e do vetor  $h$ . Dessa forma, estimar esse variograma requer várias realizações  $[Z_k(u), Z_k(u + h)]$ ,  $[Z_{k'}(u), Z_{k'}(u + h)]$ , ...,  $[Z_{k^n}(u), Z_{k^n}(u + h)]$  dos pares das variáveis aleatórias.

Na prática, apenas uma realização  $[Z_k(u), Z_k(u + h)]$  está disponível, o que nada mais é que os pares tomados de um conjunto de amostras. Uma solução é trabalhar com o modelo intrínseco apresentado acima. Para lembrar, isso implica que a função variograma  $2\gamma(u, h)$  depende apenas do vetor  $h$  e não da posição  $u$ .

Dessa forma, é possível estimar o variograma  $2\gamma(h)$  a partir de amostras (dados). O estimador do variograma  $2\gamma^*(h)$  é a média aritmética da diferença quadrática entre duas propriedades medidas (amostras)  $[Z_i(u), Z_i(u + h)]$  entre dois pontos separados por um vetor  $h$ .

Nunca é demais recordar que a hipótese de estacionariedade intrínseca de segunda ordem é válida apenas para a diferença  $[Z(u) - Z(u + h)]$ . Fisicamente, isso significa que, dentro do domínio  $W$ , a variabilidade entre dois teores  $z(u)$  e  $z(u + h)$  é constante, independente da posição  $u$ . Porém, isso só é válido para mineralizações com domínio homogêneo.

A hipótese intrínseca não é tão forte quanto a hipótese de estacionariedade da própria função aleatória  $z(u)$ .

Na prática, a hipótese intrínseca pode ser reduzida, por exemplo, limitando-a a um determinado local. Em tal caso, a função  $\gamma(u, h)$  pode ser expressa como dois termos:

$$\gamma(u, h) = f(u) * \gamma_0(h)$$

Onde  $\gamma_0(h)$  é uma constante intrínseca da variabilidade ao longo do domínio  $W$  e  $f(u)$  caracteriza a intensidade da variabilidade e que depende da localização de  $u$ , cf. representando o conceito do efeito proporcional.

## **Variograma como uma ferramenta para a análise estrutural**

A análise estrutural, é o nome dado para o procedimento de caracterização das estruturas e distribuição espacial das variáveis consideradas (tipos, espessuras, acumulações). Esse é o primeiro passo e indispensável para qualquer estudo geoestatístico. O modelo variográfico funciona como um resumo quantificado de toda a informação estrutural disponível, que é então canalizada para os diversos estudos de espacialização das variáveis de interesse.

### **Continuidade**

Na definição do variograma  $2\gamma(h)$ ,  $h$  representa o vetor do módulo  $|h|$  e  $\alpha$  a direção preferencial. O mesmo então, começa na origem,  $\gamma(0) = 0$  e é incrementado em geral pelo módulo  $|h|$ . Essa expressão representa o fato, que em média, a diferença entre duas propriedades estudadas em dois pontos diferentes, aumenta à medida que a distância  $|h|$  entre elas aumenta. A maneira pela qual o variograma aumenta para pequenos incrementos de valores de  $|h|$ , caracteriza o grau de continuidade espacial da variável estudada.

A continuidade espacial então, pode ser definida no cálculo de parâmetros que medem a afinidade das relações entre os pontos separados pelo vetor  $h$ .

### **Anisotropia e zona de influência**

Além disso, numa dada direção  $\alpha$ , o variograma pode tornar-se estável para além de uma certa distância  $|h| = a$ , chamado de "range" (Figura 2.8).

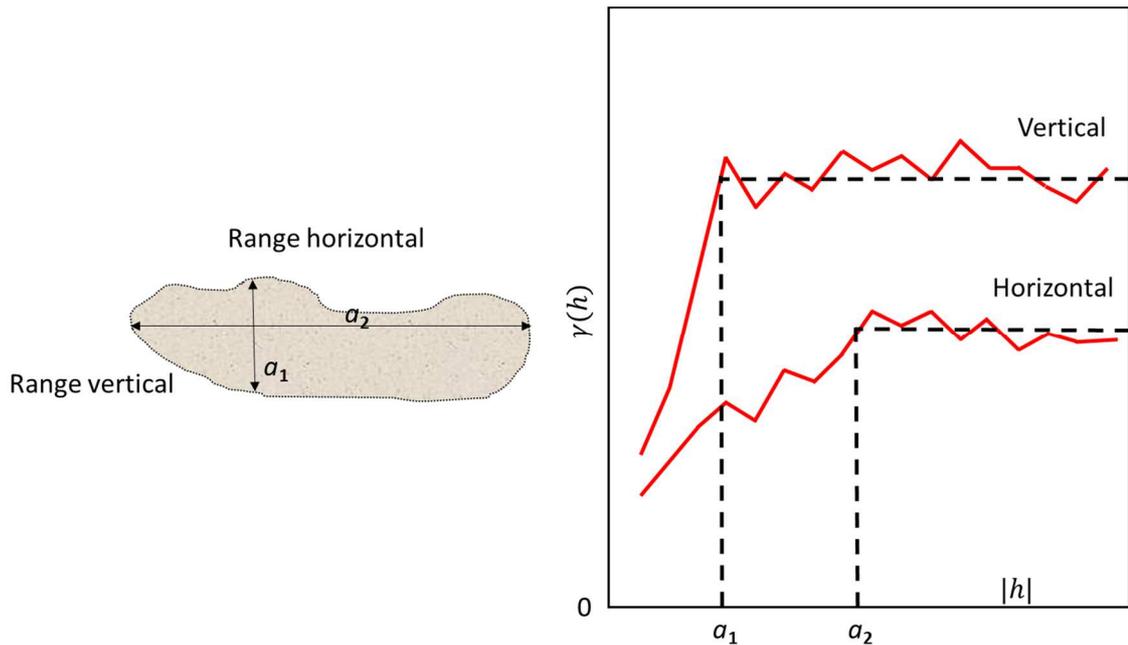


Figura 2.8: Anisotropia estrutural expressa no variograma.

Além desta distância  $\alpha$ , a média do quadrado do desvio entre duas quantidades  $Z(u)$  e  $Z(u + h)$  não depende da distância  $|h|$  entre eles e as duas quantidades não estão mais correlacionadas.

O alcance então representa um significado preciso para o conceito intuitivo da zona de influência de uma amostra  $Z(u)$ .

No entanto, não há nenhuma razão para o range ser o mesmo em todas as direções  $\alpha$  do espaço.

Na figura 2.8, é possível perceber que o range vertical caracteriza a dimensão vertical média das lentes mineralizadas, que nesse caso, diferente do range horizontal. Para uma dada distância  $|h|$ , o variograma horizontal apresenta uma variabilidade mais fraca do que a variograma vertical: representando uma característica sedimentar horizontal do fenômeno nesse depósito.

### 2.2.7 Krigagem dos indicadores

Uma variável indicadora aleatória  $I(u, z_k)$  é definida, em uma posição  $u$ , para um valor de  $Z_k$  como função do binário que assume o valor 0 ou 1, sob as seguintes condições:

$$\begin{aligned} I(u, z_k) &= 0 & \text{if } Z(u) \leq Z_k \\ I(u, z_k) &= 1 & \text{if } Z(u) > Z_k \end{aligned}$$

formando assim, uma distribuição binominal dos indicadores, onde a distribuição da média e variância dessa estatística pode ser representada:

$$\begin{aligned} m &= p \\ \sigma^2 &= p(1 - p) \end{aligned}$$

onde  $p$  é a proporção do valor obtido em relação ao binário 1, como definido acima. Exemplificando, se o ponto de corte  $Z_c$  é igual à mediana da distribuição,  $p$  terá um valor de 0,5, e a variância de 0,25.

Os dados são transformados e os variogramas das indicatrizes podem ser facilmente calculados por qualquer programa escrito para calcular um variograma experimental.

Goovaerts (1997) explica que o problema da estimativa dos indicadores se resume em estimar o valor do indicador  $I(u, z_k)$  em qualquer local  $u$ , usando dados convertidos em indicadores do banco de dados medido, definidos por um valor limite  $z_k$ .

Esse estimador é expresso em termos de indicador RVs como:

$$[I(u; z_k)]^* - E\{I(u; z_k)\} = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u; z_k) [i(u_{\alpha}; z_k) - E\{I(u_{\alpha}; z_k)\}] \quad \text{Eq. 03}$$

onde  $\lambda_{\alpha}(u; z_k)$  é o peso atribuído para os indicadores  $i(u_{\alpha}; z_k)$  interpretado como uma realização da RV  $I(u_{\alpha}; z_k)$ . Tal como acontece com krigagem de valores de atributo-Z, duas variantes de krigagem (IK) que distinguem-se, dependendo de como é considerada a média dentro da zona de estudo.

### 2.2.7.1 Krigagem simples dos indicadores

Ainda abordando Goovaerts (1997), a krigagem simples (sIK) é utilizada quando a média é assumida como estatisticamente constante para toda a área a ser krigada  $A$ :

$$E\{I(u; z_k)\} = F(z_k), \text{ para } \forall u \in A, \quad \text{Eq.04}$$

O estimador linear (Eq. 03) é escrito como uma combinação linear entre  $(n(u) + 1)$  informações. Em que  $n(u)$  é número de amostras do indicador  $I(u_\alpha; z_k)$  que participam da estimativa e,  $F(z_k)$  o valor estimado da distribuição acumulada (probabilidade) associada ao limiar  $z_k$ .

$$\begin{aligned} [F(u; z_k | (n))]_{sIK}^* &= [I(u; z_k)]_{sK}^* \\ &= F(z_k) + \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha^{sk}(u; z_k) [i(u_\alpha; z_k) - F(z_k)] \\ &= \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha^{sk}(u; z_k) i(u_\alpha; z_k) + \lambda_m^{sk}(u; z_k) F(z_k) \end{aligned} \quad \text{Eq.05}$$

onde o peso da média é definido por

$$\lambda_\alpha^{sk}(u; z_k) = 1 - \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_\alpha^{sk}(u; z_k) \quad \text{Eq. 06}$$

A média do indicador pode ser estimada pela frequência cumulativa da amostra  $F^*(z_k)$  após possível correção para amostragem preferencial.

Na krigagem simples IK, os pesos são fornecidos por um sistema de krigagem do tipo:

$$\begin{aligned} \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_\beta^{sk}(u; z_k) C_I(u_\alpha - u_\beta; z_k) &= C_I(u_\alpha - u; z_k) \\ \alpha &= 1, \dots, n(u) \end{aligned} \quad \text{Eq. 07}$$

onde  $C_I(h; z_k)$  é a covariância em função do indicador RF (função randômica)  $I(u; z_k)$  próximo ou no limite de  $z_k$ .

### 2.2.7.2 Krigagem ordinária dos indicadores

A krigagem ordinária dos indicadores (oIK), por sua vez, considera a média flutuante ou móvel por toda a área, ou seja limitando o domínio da estacionaridade da média em uma vizinhança  $W(u)$ :

$$E\{I(u'; z_k)\} = \text{constante mas desconhecida}, \quad \forall u' \in W(u),$$

O estimador ordinário IK é a combinação linear do indicador  $n(u)$  na RVs  $I(u_\alpha; z_k)$  na vizinhança  $W(u)$ :

$$\begin{aligned} [F(u; Z_k | (n))]^* oIK &= [I(u; Z_k)]^*_{OK} \\ &= \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{ok}(u; Z_k) i(u_{\alpha}; z_k) \end{aligned} \quad \text{Eq. 08}$$

Onde os pesos são dados por um sistema de krigagem ordinária do tipo:

$$\begin{cases} \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{ok}(u; z_k) C_I(u_{\alpha} - u_{\beta}; z_k) + \mu_{ok}(u; z_k) = C_I(u_{\alpha} - u; z_k) \\ \sum_{\beta=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}^{ok}(u; z_k) = 1 \quad \alpha \approx 1, \dots, n(u) \end{cases}$$

Vale ressaltar que tanto na krigagem simples quanto na ordinária, os estimadores são interpoladores exatos, porque honram os dados medidos nas suas posições no espaço:

$$[i(u; z_k)]^* = i(u_{\alpha}; z_k) \quad \forall u = u_{\alpha} \quad \alpha = 1, \dots, n$$

## 2.3 PARÂMETRO DE RESISTÊNCIA GRAU DE CONSISTÊNCIA

### 2.3.1 Classificações geomecânicas

Segundo Zhang (2005), as rochas são uma composição de material intacto com uma série de descontinuidades que associadas definem os maciços rochosos. Em engenharia, o maciço rochoso se difere dos materiais utilizados em obras diversas devido a sua particularidade de composição e descontinuidades, planos de estratificação, dobras, zonas cortadas e falhas que tornam a sua estrutura descontínua. Assim, se distingue também em engenharia, a relação entre a rocha intacta e o maciço rochoso.

A rocha intacta pode ser considerada como um meio contínuo ou sólido entre descontinuidades, constituídas por um agregado de minerais ou grãos policristalinos. A massa de rocha é a forma *in situ* composta por blocos de rocha intactos separados por descontinuidades.

As propriedades da rocha intacta são governadas pelas propriedades físicas dos materiais de que é composta e a maneira pela qual eles estão ligados um ao outro. Massas rochosas são descontínuas e muitas vezes têm propriedades heterogêneas e anisotrópicas. Como massas de rocha são descontínuas e variáveis no espaço, é importante escolher o domínio de estudo que seja representativo da massa de rocha afetada pela estrutura analisada, ou seja, o estudo deve ser separado por zonas ou setores com as mesmas características

Os maciços rochosos podem ser caracterizados e classificados quanto a sua qualidade através de diversas técnicas, porém a mais utilizada é a classificação geomecânica. O objetivo das classificações geomecânicas é hierarquizar e organizar as características principais da rocha intacta e das descontinuidades, sejam elas por meio de ensaios laboratoriais, sejam por simulações táteis-visuais associando comportamentos diferenciados do meio rochoso que quantificam e descrevem as diversas características desse maciço.

A partir do levantamento e análise dessas características da matriz e das descontinuidades que compõem o maciço, essas são quantificadas e associadas de forma a prever um comportamento que defina a condição do maciço. Cada classe de maciço recebe uma nota final de qualificação ou classificação.

Vários sistemas de classificação foram propostos ao longo do tempo, utilizando correlações entre os índices obtidos por simulação através de descrições e ensaios laboratoriais. Esses sistemas, provém informações não só para caracterizar as propriedades mecânicas, mas também para uso em projetos de escavação de túneis, direcionamento de lavra, escoramento de galerias, estabilidade de taludes entre outros.

As classificações geomecânicas mais utilizadas na mineração a céu aberto segundo Cervantes (2012) são: RMR, proposto por Bieniawski, Denkhaus & Vogler (1969), que simula parâmetros de resistência, módulos de deformação, tempo de auto sustentação, influência da água subterrânea e das descontinuidades na perda da resistência da rocha intacta. Já o SRM Romana & Montalar (2003), segue a mesma linha do RMR, adicionando um fator de ajuste em função da orientação das descontinuidades em relação a direção dos taludes em escavação, tornando a classificação mais aplicada ao projeto de estabilização. O RMi, ao contrário dos dois métodos anteriores, não orienta a determinação dos parâmetros do maciço em relação ao tipo de projeto. O sistema de classificação RQD definido por Deere et al (1967), propõe um relacionamento entre os parâmetros de alteração e fraturamento dos maciços, baseado em um índice calculado a partir da recuperação dos testemunhos em intervalos de sondagem. Nos trechos do testemunho que foram recuperados, calcula-se o quociente entre o somatório dos trechos de amostra com comprimento superior a 10 cm e o comprimento total furado em cada manobra da sonda. No uso do RQD, deve-se levar sempre em consideração o cuidado de avaliar a qualidade da execução da sondagem e determinar quais são os trechos que seguem o plano de fraqueza real, ou quais planos foram formados pelo efeito destrutivo do equipamento de perfuração sobre os testemunhos.

A classificação Q (*Rock Tunnelling Quality Index*) de Barton, Lien & Lunde (1974), baseia-se na determinação da qualidade do maciço rochoso relacionado diretamente a caracterização das descontinuidades, avaliando o volume, condições de parede das juntas, preenchimento das mesmas e a influência do estado de tensões do maciço rochoso as quais essas descontinuidades estão expostas. Como essa classificação implica num conhecimento detalhado das descontinuidades que compõe o maciço e a localização das mesmas, o resultado é aplicado a projetos de suporte, sustentação ou ancoragem. O método estuda os modos de falha relacionados aos planos de fraqueza dos maciços em análise.

Serra & Ojima (1998) elencam algumas vantagens para o uso das classificações geomecânicas, tais como: evitar a subjetividade nas descrições geomecânicas que por vezes carregam consigo dúvidas complicadas de serem traduzidas, tais como “maciço muito compartimentado” ou “bastante fragmentado” ou “moderadamente decomposto”. Essas designações não traduzem o quadro real do maciço, mesmo porque, cada profissional pode ter uma percepção diferente dos seus significados. Outra vantagem observada por esses

autores é a possibilidade de comparações dos resultados da estabilidade entre obras realizadas em maciços semelhantes, que tiveram em sua base, maciços descritos e classificados. Assim, possibilita o intercâmbio de experiências sobre o sistema de suporte mais eficiente em cada caso, o processo de escavação mais efetivo, o desempenho ao longo do tempo das cavidades em rocha exposta, além de realimentar as próprias classificações com novos casos históricos, tornando-se mais aptas as generalizações bem-sucedidas.

Os procedimentos para aplicação de uma classificação geomecânica são relativamente simples, não requerendo determinações complexas ou onerosas nas fases iniciais de implantação de um projeto, a não ser um entendimento preciso dos parâmetros geológicos e geotécnicos. Inexiste; portanto, motivos que impeçam ou dificultem sua utilização cita Serra & Ojima (1998). Porém, como observado por Bieniawski (1989) as classificações geomecânicas não devem ser tomadas por um substituto das investigações diretas, pois elas representam somente uma abordagem empírica, não eliminando; portanto, a necessidade de proceder-se à abordagem observacional e analítica dos projetos de engenharia.

Para Steffen (1976), embora a classificação seja de grande utilidade na fase de investigações preliminares, é ainda muito limitada para ser usada como único método de projeto, e recomenda que ela seja utilizada de forma conjugada com um sistema de monitoramento.

Porém, vale ressaltar que atualmente vários projetos utilizam como sua base de dados, informações baseadas em descrições de parâmetros geomecânicos e classificações dos maciços. Quando o mapeamento e a classificação das suas frentes de trabalho são atualizados frequentemente, esse método pode ser utilizado como método principal do projeto, o que caberá a definição baseada nas análises do porte, tempo de auto sustentação e modos de falha encontrados no mesmo.

### 2.3.2 Classificação geomecânica VALE e RMR

Atualmente, a Vale utiliza uma classificação geomecânica própria baseada na classificação RMR proposta por Bieniawski (1989), com modificações sugeridas pela ISRM (1978).

Essas modificações foram consideradas relevantes para adequar os parâmetros dos maciços rochosos típicos dos minérios de ferro, em geral relacionadas aos parâmetros de

condições das descontinuidades, que são pobremente observadas nos maciços tipicamente friáveis. As correlações adaptadas foram:

- i. Correlação do grau de consistência com grau de alteração (representando a resistência da rocha intacta);
- ii. RQD com grau de Fraturamento;
- iii. Condição das descontinuidades (Persistência, abertura de parede e preenchimento).

Porém cabe ressaltar que a obtenção dos parâmetros não foi alterada, e sim o peso de cada parâmetro e suas combinações.

Sobre a história da definição da classificação RMR (Rock Mass Rating), a mesma foi proposta por Bieniawski entre 1973 e 1976 quando foram publicados os detalhes da classificação do maciço rochoso. Esse sistema foi inicialmente proposto para o entendimento do maciço rochoso e sua sustentação quando um vão livre escavado fosse deixado sem suporte até que entrasse em colapso. Tem seu uso em aplicações nas obras subterrâneas.

Ao longo dos anos 1976, 1979, 1984 e 1989 esse sistema foi sendo refinado à medida que a técnica era aplicada em casos reais, com modificações normalmente relacionadas aos valores dos parâmetros que compõe o ranking final.

Os parâmetros que obtidos definem a classe do maciço, segundo Bieniawski (1989) são (Tabela 2.2):

- Resistência à compressão uniaxial da rocha ou índice de compressão puntiforme;
- Índice de qualidade da rocha (RQD);
- Espaçamento das descontinuidades;
- Padrão das descontinuidades;
- Influência da água subterrânea;
- Orientação relativa das descontinuidades com relação à escavação.

Os parâmetros são simulados em valores ponderais ou intervalos e cada resultado são somados na tentativa de definir um índice que é designado de RMR ou classe de resistência do maciço.

Segundo Bieniawski (1989), para aplicação da classificação geomecânica RMR, é necessária a divisão do maciço em seções ou setores, que apresentem características

geomecânicas uniformes, sendo cada região classificada separadamente, de acordo com dados de campo.

Tabela 2.2: Parâmetros geomecânicos e sua distribuição para classificação geomecânica RMR (Adaptada de Bieniawski, 1989).

		Parâmetros de Classificação							
1	Resistência da rocha intacta	Resistência à compressão uniaxial (Mpa)	>250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	5 - 25	1 - 5	<1
		Valores Ponderais	15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)	Valores Ponderais	90 - 100	75 - 90	50 - 75	25 - 50	<25		
			20	17	13	8	3		
3	Descontinuidades	Valores Ponderais	>2	0.6 - 2	0.2 - 0.6	0.06 - 0.2	<0.06		
			20	15	10	8	5		
4	Condições das descontinuidades	Comprimento (m)	<1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	>20		
		Valores Ponderais	6	4	2	1	0		
		Abertura (mm)	Nenhuma	<0.1	0.1 - 1	1 - 5	>5		
		Valores Ponderais	6	5	4	1	0		
		Rugosidade	Muito Rugosa	Rugosa	Ligeiramente Rugosa	Ondulada	Suave		
		Valores Ponderais	6	5	3	1	0		
		Preenchimento (mm)	Nenhuma	Duro<5	Duro>5	Mole<5	Mole>5		
		Valores Ponderais	6	4	2	2	0		
		Meteorização	Inalterada	Ligeiramente alterada	Moderadamente alterada	Muito alterada	Decomposta		
Valores Ponderais	6	5	3	1	0				
5	Presença de água	Condições gerais do maciço	Seco	Ligeiramente úmido	Úmido	Escorrimento	Fluxo abundante		
		Valores Ponderais	15	10	7	4	0		

Ainda de acordo com o autor, essa setorização se justifica pelo fato dos maciços rochosos poderem ter sido formados pelas mesmas litologias, que sofreram os eventos geológicos de maneira uniforme e as características das descontinuidades serem as mesmas em toda uma região. Sendo assim, os domínios estruturais e características geológicas/geomecânicas similares, formam setores com mesmo padrão de classificação final e por consequência a separação daqueles que é possível verificar a diferença geomecânica/geológica e estruturais.

O RMR é determinado adicionando-se os valores relativos a todos estes cinco parâmetros discriminados na tabela 2.2. Este índice permite, ainda, estimar valores de referência para a resistência (coesão e ângulo de atrito), e para o tempo de auto sustentação do maciço. Permite, também, estabelecer correlações com outras grandezas, como o vão livre máximo de uma escavação.

Os parâmetros listados na Tabela 2.2, tanto da rocha intacta, quanto das descontinuidades são obtidos em furos de sondagem ou nos afloramentos, porém é necessário fazer correções em relação à orientação das descontinuidades em relação à orientação da escavação e as condições das águas subterrâneas Freitas, 2014 (Tabela 2.3).

Tabela 2.3: Correção relacionada com a orientação das descontinuidades (Adaptado Bieniawski, 1989)

Direção das descontinuidades perpendicular ao eixo do túnel				Direção das descontinuidades paralelas ao eixo do túnel		Qualquer
Avanço do túnel no sentido da vergência		Avanço do túnel no sentido inverso da vergência		Inclinação		Inclinação
45 - 90°	20 - 45°	45 - 90°	20 - 45°	45 - 90°	20 - 45°	0 - 20°
Muito Favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável	Razoável	Razoável
Orientação das descontinuidades		Muito Favorável	Favorável	Razoável	Desfavorável	Muito Desfavorável
Valor ponderação para ajusta RMR	Túneis	0	-2	-5	-10	-12
	Fundações	0	-2	-7	-15	-25
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60

Essa correção é de extrema importância, mas é de difícil aplicação já que uma mesma descontinuidade pode ser favorável ou desfavorável dependendo da direção do talude ou da interferência das águas subterrâneas.

Após o ajuste com relação a orientação das descontinuidades e da saturação, o maciço rochoso é então classificado de acordo com a Tabela 2.4. O RMR agrupa o maciço rochoso em cinco classes que vão desde “Muito Bom - classe I” a “Muito Fraco - classe V”, com valores variando de 100 a 0 respectivamente.

Tabela 2.4: Classificação dos maciços rochosos de acordo com a classificação geomecânica RMR (Adaptada de Bieniawski, 1989).

Somatório de Pesos	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	<20
Classe	I	II	III	IV	V
<b>Qualidade do maciço</b>	<b>Muito bom</b>	<b>Bom</b>	<b>Razoável</b>	<b>Fraco</b>	<b>Muito Fraco</b>
Coesão da massa rochosa (kPa)	>400	300-400	200-300	100-200	<100
Ângulo de atrito da massa Rochosa (°)	>45	35<45	25<35	15<25	<15

Como citado acima, na classificação baseada no RMR, é possível correlacionar com os valores de ensaios e simular um possível range dos parâmetros da rocha intacta, conforme exemplo da tabela 2.4.

Vale citar, que na determinação da qualidade da rocha intacta utilizando a resistência a compressão simples, o grau de intemperismo do maciço e as estruturas planares ou mesmo de formação, se comportam como descontinuidades, reduzindo a resistência da rocha intacta, levando a um índice mais realista aos resultados.

Para então se conhecer e obter os parâmetros considerados na classificação de Bieniawski (1989) conforme já citado no início da seção, é utilizado o método da ISRM (*International Society of Rock Mechanics*). Esse método caracteriza tanto o maciço rochoso quanto as descontinuidades, por meio da descrição das características do material.

Para a caracterização do maciço rochoso são descritos o grau de consistência relacionado a rocha intacta, o grau de alteração, o grau de fraturamento e o RQD, e quanto as descontinuidades são descritas, o espaçamento, a rugosidade, a abertura, o preenchimento e tipo de descontinuidade, todos por meio da descrição das características do material.

Para dessa dissertação conforme já abordado no item 2.1.3 de contextualização, o parâmetro escolhido para o estudo foi o grau de consistência, e por consequência a correlação mais importante estabelecida na classificação Vale que foi inclusive utilizada na seção validação da base de dados, é a divide a resistência e seu ranking através do grau de alteração, conforme tabela 2.5.

Tabela 2.5: Tabela que representa a correlação entre os parâmetros obtidos por descrições geomecânicas e o ranking estabelecido para as resistências da rocha intacta proposto na classificação RMR.

<b>Grau de Consistência</b>	<b>Grau de Alteração</b>	<b>Peso na classificação de Bieniawski</b>
GC6	GA1/GA2	15
GC5	GA1/GA2/GA3	12
GC4	GA2/GA3	7
GC3	GA3/GA4	4
GC2	GA3/GA4	2
GC1	GA5/GA4	1
GC0	GA5/GA6	0

Essa alteração na relação dos parâmetros foi definida de uma forma geral para as formações ferríferas puras. Se consideradas as exceções presentes no contexto, tais como a Canga, cuja característica de resistência é alta e alta também é sua alteração é possível observar grau de consistência cinco (GC5) e grau de alteração cinco ou seis (GA5/GA6) se torna inconsistente com a maioria das litologias. Portanto as relações terão grande parte delas atendidas na sua média, porém as exceções deverão ser tratadas separadamente.

### 2.3.3 Grau de Consistência

Um dos parâmetros mais importantes para se definir a base de todo o estudo geomecânico do maciço rochoso é a condição da resistência da rocha intacta, que também é chamado de grau de resistência ou grau de consistência.

O processo de obtenção dos parâmetros que compõe a classificação geomecânica RMR pode ser dividido em duas etapas. A primeira, para a obtenção dos parâmetros de resistência da rocha intacta seja por meio de ensaios ou por simulações na descrição, e a segunda para a obtenção das discontinuidades marcadas pelos processos geológicos. A conjunção e inter-relacionamento dessas informações define a classe do maciço rochoso.

Um dos grandes problemas na Geotecnia, segundo Zhang (2005) é estimar a resistência do maciço rochoso, haja vista que os blocos de rochas podem apresentar diferentes níveis de intemperismo ou grau de alteração condicionado a intemperes e mineralogia das rochas. Além disso, as superfícies de contato podem não estar totalmente expostas e a determinação de testes *in situ* por meio de testes de laboratório, geralmente, não é prático, por isso esses maciços devem ser estimados a partir de observações geológicas e de resultados de testes em blocos de rocha individuais segundo Hoek & Brown (1997). As observações geológicas e geomecânicas do grau de consistência são obtidas por uma apreciação tátil e visual das características de resistência do material frente ao impacto manual, iniciando pelo toque dos dedos nas rochas menos resistentes ao golpe do martelo nas rochas mais resistentes, além das características físicas relacionadas à trabalhabilidade do material .

Essa observação pode ser feita também com o auxílio do martelo de Schmidt ou com ensaios em prensa de carga pontual. Esse último é um ensaio de bancada que traz um resultado índice, que posteriormente poderá ser correlacionado com os valores de resistência à compressão simples.

Segundo Dinçer *et al.* (2004) a correlação entre a resistência obtida pelo martelo de Schmidt e a resistência à compressão simples é feita através da equação:

$$\sigma_c = 2,75R - 36,83$$

sendo  $\sigma_c$  é a resistência a compressão uniaxial simples e  $R$  o valor do ressalto do martelo de Schmidt.

A correlação do resultado do teste de resistência puntual e a compressão simples é feita através de uma relação linear proposta por Brown, (1981).

$$\sigma_c = \alpha I_{s(50)}$$

onde  $\sigma_c$  representa a resistência à compressão uniaxial,  $\alpha$  fator de correção e  $I_{s(50)}$  índice de resistência.

Os valores da resistência obtidos permitem a definição do respectivo peso para esse quesito na classificação geomecânica de Bieniawski (1989).

#### 2.4 BREVE HISTÓRICO DA GEOESTATÍSTICA APLICADA A GEOTECNIA

Para a elaboração dos projetos de exploração mineral é necessário um bom conhecimento da jazida, não só em relação aos teores, mas também em relação à qualidade do maciço rochoso. Essas informações subsidiam projetos geotécnicos que visam à exploração do minério com a necessária segurança operacional.

Várias são as maneiras de investigação do maciço rochoso, seja iniciando pela caracterização da rocha intacta em ensaios laboratoriais, ou pelo mapeamento das estruturas que condicionam a perda da resistência do mesmo.

Essas investigações podem levar ao uso das classificações geomecânicas, que são sistemas de agrupamento de materiais com resposta geomecânica similar e que permitem analisar o comportamento em uma linguagem universal, que permite relacionar a situação em análise com as situações análogas.

Depois de caracterizados esses maciços, essas informações podem ser inseridas em modelos geológicos de blocos, compondo os modelos geomecânicos. As informações necessárias para compor um modelo geomecânico segundo Damasceno (2008), são a composição das características geomecânicas globais, como os parâmetros geomecânicos e

suas classes, e as particularidades que condicionam o comportamento do maciço, como nível de água, descontinuidades, e parâmetros de resistência. Essas informações devem ser adicionadas ao modelo geológico para melhor subsidiar os projetos de aproveitamento econômico da jazida.

Ao longo de décadas, observou-se poucas aplicações para construção desses modelos baseados em técnicas Geoestatísticas com conseqüente espacialização desses dados. Grande parte das aplicações observadas foi na construção de modelos de espacialização de dados superficiais para subsidiar projetos de fundação em engenharia.

Alguns estudos de espacialização de parâmetros geomecânicos encontrados foram relacionados a parâmetros obtidos em rochas de mais alta resistência que preservam as estruturas tais como RQD ou em estudos das previsões da identificação dos modos de falha na qualificação das estruturas observadas nos mapeamentos estruturais.

Também em rochas resistentes a possibilidade de obtenção dos parâmetros geomecânicos é maior, devido à preservação das estruturas, são encontrados estudos de construção de modelos de qualidade dos maciços rochosos através das simulações dos resultados das classificações do RMR.

Observa-se também que dados das propriedades físicas e mecânicas do solo superficial, utilizadas nos estudos geotécnicos visando fundações em edificações, compõe o maior volume de aplicações da Geoestatística em prol dos estudos geotécnicos. Autores como Folle (2002); Mackean & Rosenbaum (1990); Da Nóbrega (2014); Sturaro (1994); Xavier (1999); Peres & Saturaro (1998), entre outros utilizam técnicas de estimativa por krigagem ordinária e simulações sequenciais gaussianas para:

- ✓ Estimar densidade e índice de resistência à penetração dos materiais obtidos em sondagem SPT,
- ✓ Avaliação da variabilidade espacial das propriedades físicas,
- ✓ Mapeamento de áreas de qualificação do maciço ou solo para serem usados em projetos de fundações.

Estudos de Damasceno (2008) utilizam informações de parâmetros de resistência da rocha intacta, como coesão e ângulo de atrito efetivo e também parâmetros relacionado às descontinuidades, como o RQD (Rock Quality Designation) espacializados utilizando krigagem ordinária no software Petrel. A espacialização desses parâmetros torna possível a definição

de zonas de baixa e alta resistência do maciço. Embora a ferramenta escolhida para a realização da geoestatística não é transparente para o usuário, os resultados indicam que a utilização de modelagem geoestatística dos parâmetros geomecânicos foram efetivas e compuseram um banco de dados robusto para as análises de estabilidade.

Estudo de Marchesi (2008) utilizam krigagem para a geração de modelo de RMR e grau de fraturamento. A autora estima as propriedades geomecânicas ao longo do maciço, sendo o modelo usado nos projetos geotécnicos e na avaliação de estabilidade em regiões críticas.

Trabalho de Leite (2008) destacam a necessidade do conhecimento das condições e distribuições das descontinuidades no maciço rochoso como forma de avaliação da perda da qualidade da resistência da rocha intacta. Esse autor apresenta uma fragilidade nos métodos de análise espacial das descontinuidades e agrupamentos em famílias pelos métodos convencionais que utilizam diagramas de densidade, e propõe a utilização da krigagem das indicatrizes como método para estimar as distribuições de probabilidade para as atitudes das descontinuidades. O resultado do modelo de indicatriz é um mapa de distribuição de probabilidade de um dado grupo de descontinuidades pertencerem ao um mesmo grupo de famílias, orientando ao modelador na regionalização das orientações e qualificação do maciço.

Klen (2015) percebendo o mesmo grau de fragilidade nos métodos convencionais de distribuição de famílias, criou um algoritmo de particionamento com base no método FUZZY K-MEANS que promove o agrupamento das descontinuidades em famílias de forma a amenizar e permitir a análise dos fatores de subjetividade do método clássico.

Thierry *et al.* (2009) elaboraram uma aplicação de gestão de risco urbano utilizando modelos de suscetibilidade dos movimentos dos maciços de solo em Paris, usando krigagem ordinária, interferências e influências na dissolução dos maciços com a variação do nível de água no “gesso de Paris”.

Jaksa (1995) quantifica e estima o modelo de variação espacial de materiais geotécnicos de solos e rochas usando a investigação da variabilidade espacial com geoestatística clássica com técnicas de regressão e teoria de campo aleatório, também com objetivo de analisar a influência da variabilidade espacial sobre os projetos geotécnicos.

Redondo (2003) também aplica krigagem da indicatriz para obter distribuição do parâmetro RQD obtido na descrição dos testemunhos de sondagem. Nesse caso, o objetivo

foi a utilização de parâmetros da qualidade do maciço rochoso no processo de avaliação econômica da jazida, sendo que o resultado permitiu não só subsidiar informações relevantes ao planejamento de lavra, mas um prévio reconhecimento de áreas com contatos bruscos da qualidade do maciço, indicando, por exemplo, presença de descontinuidades geológicas relevantes passíveis de tratamento.

Alguns registros de aplicação de métodos geoestatísticos aplicados a geotecnia de incluem, segundo Molinero (2010), a utilização da krigagem ordinária na construção de modelos probabilísticos dos parâmetros que promovem o processo erosivo nos taludes as margens de rodovias de forma espacializada e regionalizada.

No campo das investigações dos maciços para aplicações em construção de túneis, alguns autores como Exadaktylos & Stavropoulou (2008) investigaram a variabilidade espacial do RMR utilizando krigagem universal. A distribuição desse parâmetro associado aos ensaios de deformabilidade e resistência da rocha intacta, foram base para cálculos mais precisos da energia específica para os cortes na escavação dos túneis. Esses mesmos autores em 2013 avançaram nos estudos geoestatísticos para aplicações em krigagem ordinária para a modelagem do RMR ao longo de toda a extensão de maciços rochosos de túneis exploratórios.

Egaña & Ortiz (2013) avaliaram as aplicações das técnicas geoestatísticas atualmente utilizadas para estimar comportamentos de maciços rochosos através do RMR diretamente estimado e propõem numa nova técnica de espacialização a partir de simulações das variáveis:

- Rock Quality Designation (RQD);
- Frequência de fratura (FF),
- Resistência à compressão Uniaxial (UCS),
- Condição das juntas (JC) e
- Condição de água (WC).

Ao final, o resultado de cada uma delas somadas caracterizou o maciço rochoso. Assim, com a utilização da simulação foi possível a avaliação de risco e incerteza da quantificação da qualidade do maciço rochoso. Este estudo teve como objetivo avaliar as condições geomecânicas e estudar possíveis modificações no projeto dos taludes que eventualmente possam prolongar a vida útil de uma mina a céu aberto atualmente em produção. Os resultados foram comparados com a estimativa do RMR diretamente, e observa-se uma melhoria significativa da qualidade da estimativa local.

### 3 BANCO DE DADOS

Este capítulo apresenta a construção do banco de dados do grau de consistência com sua distribuição, tratamento de valores espúrios e outras correções necessárias.

#### 3.1 AVALIAÇÃO E CONSTRUÇÃO DO BANCO DE DADOS

O banco de dados utilizado é composto de duas fontes de dados: mapeamento geomecânico e estrutural de superfície e testemunhos de sondagem totalizando 29.634 amostras geológicas e 27.274 amostras geomecânicas.

Nesse capítulo, é abordado o tratamento e validação das informações incorporadas ao banco de dados. Essa discussão faz-se necessária por não haver metodologia estabelecida para validação de descrição de amostras geomecânicas, considerando que são dados obtidos por descrições táteis-visuais (subjetivos) sem validação com ensaio laboratorial.

##### 3.1.1 Métodos de Validação

Para criação da metodologia de avaliação do banco de dados, foram considerados os seguintes critérios:

- ✓ Correspondência de intervalos de descrição de testemunhos;
- ✓ Correspondência dos intervalos geomecânicos com os intervalos de descrição geológica e da amostragem;
- ✓ Para as formações ferríferas, a correlação das grandezas do grau de consistências com a distribuição granulométrica das peneiras que definem os produtos de britagem;
- ✓ Regularização dos intervalos.

- ✓ Correlação do grau de consistência com os demais parâmetros geomecânicos;

Idealmente, a primeira verificação que se faz necessária em todo o processo de validação é a análise da correspondência de intervalos de descrição dos testemunhos.

No processo de obtenção dos intervalos de descrição geomecânica é correto se estabelecer os intervalos onde visualmente se detecte o limite entre os litotipos diferentes. Posteriormente, subdivide-se os limites de grau de consistência e grau de alteração, parâmetros esses que definem resistência da rocha intacta. Não sendo respeitada essa regra, devido a particularidades dos processos, os intervalos devem ser ajustados para que os intervalos geomecânicos sejam contidos dentro dos intervalos geológicos.

Nesse contexto, a forma de se fazer esse ajuste é subdividir os intervalos fazendo com que a caracterização geomecânica esteja sempre contida no intervalo geológico (Figura 3.1).

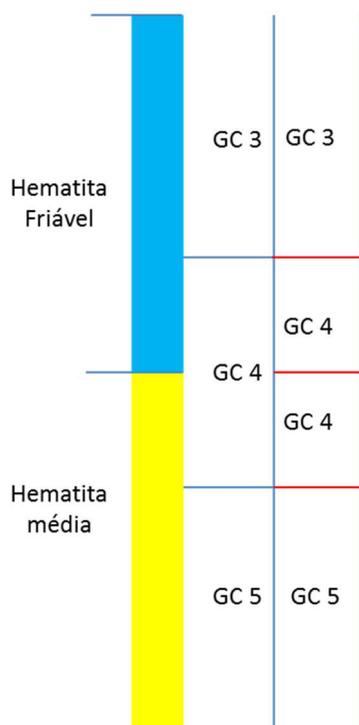


Figura 3.1: Exemplo de ajuste do intervalo geomecânico dentro do intervalo geológico de descrição de testemunho de sondagem, observado na terceira coluna.

Dessa maneira, a distribuição geomecânica é estabelecida levando em consideração as mesmas regras da descrição geológica, facilitando uma regularização das amostras antes da estimativa.

Num segundo momento, são analisadas as correspondências entre os intervalos com análises granulométricas relacionando-os aos intervalos de descrição geomecânica.

Para isso, foi estudado um conjunto de dados contendo intervalos de descrição geológica com análises granulométricas e descrição geomecânica do grau de consistência. Ressalta-se, que são analisados granulometricamente somente intervalos considerados minérios alvo e marginais.

Para essa correspondência, deve-se levar em consideração algumas particularidades dos depósitos. Uma, é que a resistência dos materiais pode variar muito, principalmente, devido ao grau de alteração a que foram expostos. Portanto, é importante avaliar a correlação das faixas granulométricas com o grau de consistência, sempre associado ao grau de alteração no momento de se estabelecer a análise.

Alguns estudos foram determinantes e auxiliaram para se estabelecer uma correlação direta do grau de consistência com a granulometria. Da Costa (2009) propõe uma correlação entre as faixas granulométricas para os minérios hematíticos friáveis, baseados em estudos detalhados de suas características físicas, usando classificação da compacidade, densidade natural e umidade. Em seu estudo, observa-se uma coerência dessa correlação maior que 70%, sendo os 30% restantes determinados pela diluição dos contaminantes do contato.

Os maciços estudados por Da Costa (2009) têm comportamento geomecânico conhecido. Na maioria das vezes comportam-se de forma frágil, com rupturas repentinas em baixas deformações já descritas na literatura e com fácil associação entre a resistência e o tipo de produto gerado na britagem e peneiramento. Por exemplo, os materiais que possuem resistência uniaxial mais alta, geram maior volume de material retido na peneira mais grossa no processo industrial.

Em linhas gerais, a classificação desse comportamento pode ser definida pela porcentagem retida na peneira mais grossa (6,3mm), chamado de G1.

- Grosseiro - >50 %
- Médio - 25 a 50%
- Friável - <25%

Note, que essa correlação foi estipulada durante o estudo, numa tentativa de determinação de uma metodologia de validação das descrições geomecânica das rochas que possuem análise granulométricas. Portanto, essa distribuição pode variar dependendo da característica do depósito, reforçando a importância de que vários testes sejam feitos para

que se defina a distribuição da resistência de forma adequada às condições do banco de dados em estudo.

Para o restante da base de dados que não possui análise granulométrica, principalmente nas amostras de rochas estéreis da formação ferrífera ou estéreis francos, faz-se necessário uma validação geológica e geomecânica, analisando características geológicas e relações entre os parâmetros geomecânicos.

A regularização das amostras geomecânicas pode ser considerada crítica no estudo estatístico, base para a construção do modelo de blocos. Os intervalos geomecânicos diferentes dos intervalos geológicos não devem ser regularizados levando em consideração a geometria do modelo de blocos. Intervalos geomecânicos são determinados pelas características do maciço, que podem afetar o tempo de auto-sustentação de um talude ou do teto de uma obra subterrânea. Portanto, é importante estabelecer-se o tamanho mínimo da composta (amostra regularizada) que pode afetar a estabilidade do talude que será construído a partir do modelo de blocos, que no caso do estudo foi a menor subdivisão geomecânica encontrada

- Correlação entre dados geomecânicos com resultados granulométricos do depósito

Utilizando o método descrito no item acima, o banco de dados da Mina do Tamandú foi analisado e suas características granulométricas apresentam a distribuição padrão da compacidade conforme Tabela 3.1, apresentada por Da Costa (2009).

Tabela 3.1: Resumo das características granulométricas do minério da mina do Tamandú (Da Costa, 2009).

Tipologia de Minério Hematítico	Granulometria	Porcentagem retida acima da peneira de 6,35 mm (%)	Porcentagem passante abaixo da peneira de 100# (%)	Produtos
Compacto (MHC)	W1 (31,5 a 12 mm)	+ 50		<i>Lump Ore</i> (LO)
Médio (MHM)	W2 (12 a 0,15 mm)	50 a 25		<i>Sinter Feed</i> (SF)
Friável (MHF)	W3 (- 0,15mm)	- 25	+ 80	<i>Pellet Feed Fine</i> (PFF)

Com base nas faixas granulométricas, foram analisadas as suas relações com os intervalos geomecânicos, sendo simulados diversos cenários de distribuições. A distribuição que melhor se adequa as características desse depósito foi correlacionando ao agrupamento de grau de consistência 0, 1 e 2 compondo um grupo de materiais friáveis relacionando a faixa granulométrica onde até 25% do material se mantém retido na peneira grossa, 3 e 4 compondo o grupo de materiais médios relacionando com o intervalo da faixa granulométrica de 20 a 50% do grosseiro e 5 e 6 para o grupo de compacto com 50% dos grossos retidos.

Baixa resistência: GC 0, GC 1 e GC 2 → Friável ( $W_1 < 0.15$  mm) até 25 %

Média resistência: GC 3, GC 4 → Médio ( $12\text{mm} < W_1 < 0.15$  mm) de 25 a 50 %

Alta resistência: GC 5 e GC 6 → Grosseiro ( $W_1 > 12\text{mm}$ ) >50 %

O resultado da validação apresentou uma quantidade de dados discrepantes da correlação do grau de consistência com o percentual de retidos de 29% conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Distribuição dos dados discrepantes de intervalos de descrição geomecânica.

<b>Validação</b>	<b>Nº de Intervalos</b>	<b>Porcentagem</b>
Discrepantes	6999	29%
Coerentes	17092	71%
Total	24091	100%

Os 29% de intervalos da validação granulométrica definidos como não coerentes, foram pós processados considerando as características geológicas, pois observou-se a existência de condições que modificaram as características de resistência baseadas em processos de alteração natural. Para isso, considerou-se que a alteração das rochas está relacionada a modificações físicas e químicas do material rochoso, que normalmente levam a perda da resistência da rocha intacta e diminui por consequência o grau de consistência das mesmas.

Um exemplo clássico desse fenômeno é observado nas cangas, litologias muito expostas a agentes intempéricos onde o nível de alteração é extremamente alto e há uma consequente perda de resistência e muitas vezes não é perceptível ao toque devido a couraça formada.

Portanto foram feitas análises refinadas por cada litotipo, principalmente nas cangas, lateritas, solos e materiais rolados, isolando as características de alteração descritas na

descrição geológica. Posterior ao pós processamento o percentual de desvios caiu para 9% (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Distribuição das inconsistências nos intervalos de descrição geomecânica comparados com intervalos geológicos.

Validação	Nº de Intervalos	%	Nº de Intervalos	% pós processados
Discrepantes	6999	29%	2155	9%
Coerentes	17092	71%	21936	91%
Total	24091	100%	24091	100%

Para garantir a veracidade da análise geológica e apurar a análise do grau alteração sofrido pelo maciço, foi também feita uma comparação do parâmetro geomecânico grau de consistência com a diminuição da resistência com base na descrição geomecânica do parâmetro grau de alteração.

Dessa forma, foi possível confrontar a alteração natural descrita na perfilagem geológica com as variações da alteração observadas sob a ótica geomecânica.

A condução da validação pode ser observada na Tabela 3.4.

Tabela 3.4: Combinações testadas na relação do grau de consistência com grau de alteração.

Código	Grau de consistência	Código	Grau de Alteração
0	Extremamente macia	6	Solo Residual
		5	Completamente alterada
1	Macia	5	Completamente alterada
		4	Altamente alterada
2	Média Macia	4	Altamente alterada
		3	Moderadamente alterada
3	Média	4	Altamente alterada
		3	Moderadamente alterada
4	Média Dura	3	Moderadamente alterada
		2	Levemente alterada
5	Dura	3	Moderadamente alterada
		2	Levemente alterada
		1	Fresca
6	Extremamente dura	2	Levemente alterada
		1	Fresca

**Rochas de Altas resistência (Máxima acima de 250MPa)**

Código	Grau de consistência	Código	Grau de Alteração	Resistência (Mpa)
0	Extremamente macia	6	Solo Residual	SOLO
		5	Completamente alterada	SOLO
1	Macia	5	Completamente alterada	1-2
		4	Altamente alterada	2-5
2	Média Macia	4	Altamente alterada	5-10
		3	Moderadamente alterada	10-25
3	Média	4	Altamente alterada	25-35
		3	Moderadamente alterada	35-50
4	Média Dura	3	Moderadamente alterada	50-75
		2	Levemente alterada	75-100
5	Dura	3	Moderadamente alterada	100-150
		2	Levemente alterada	150-200
		1	Fresca	200-250
6	Extremamente dura	2	Levemente alterada	250-300
		1	Fresca	>300

Na validação acima, foi encontrado 8% de dados discrepantes, mostrando que o critério adotado na descrição foi coerente com ambas características e inclusive utilizando tabelas de referências diferentes.

➤ Correlação dos dados geomecânicos com dados de descrição litológica do depósito

A base de dados que não possui análise granulométricas incluem total de 3183 intervalos, que foram então validados somente usando a correlação de descrição do grau de consistência com a descrição geológica. Essa análise é a mesma utilizada no pós processamento descrito anteriormente. O resultado foi analisado e será discutido na forma de gráficos comparativos para ilustrar o processo.

Como essa análise em grande parte foi feita em materiais estéreis ou minérios marginais, com alto percentual de argilominerais, materiais de baixa densidade e com alta porosidade, observou-se que houve uma transferência de classes devido ao perfil de alteração ser pouco marcante, podendo na maioria das vezes confundir o descritor. Os intervalos classificados como incoerentes com o critério adotado, foram marcados na base de dados para posterior tratamento.

✓ Comparação de rochas hematíticas

As rochas hematíticas descritas como hematitas friáveis, médias e compactas apresentam boa aderência com as descrições geológicas conforme observado no gráfico 3.1.

Observa-se que 83,8% das amostras de hematitas friáveis estão entre graus de consistência 1 e 2, hematitas médias, 69,8% estão distribuídas entre os graus de consistência 3 e 4 e as compactas 86,2% em grau de consistência 5.

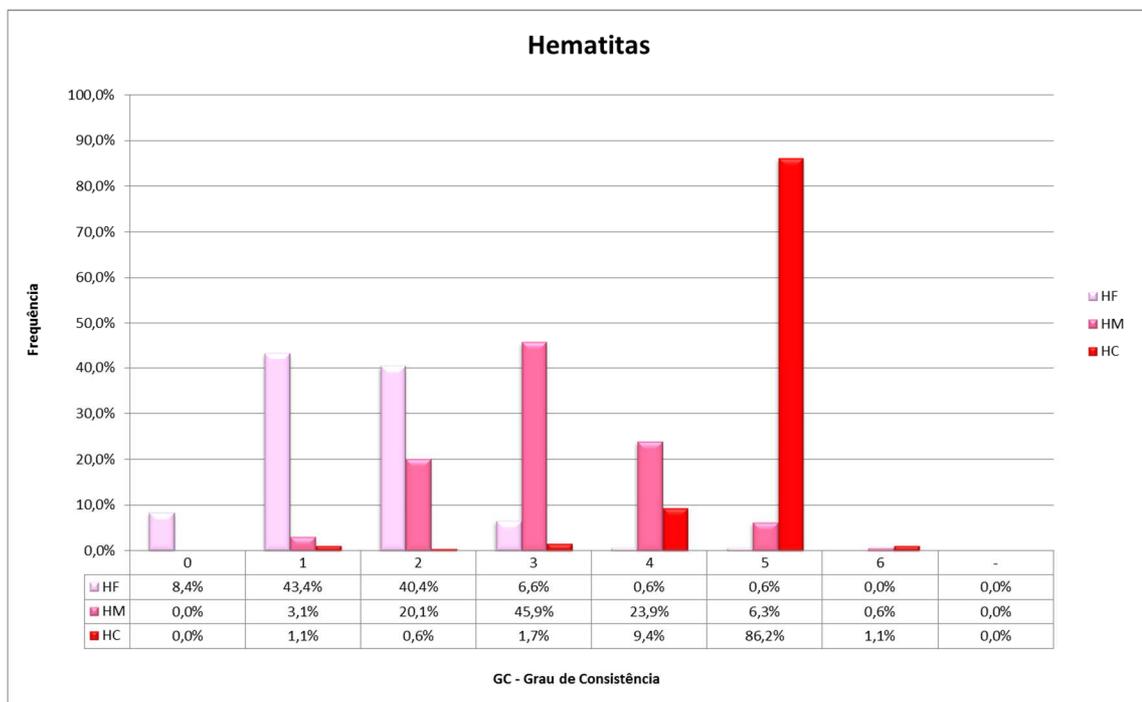


Gráfico 3.1: Distribuição de rochas hematíticas por grau de consistência.

#### ✓ Comparação de rochas Itabiríticas

As rochas itabiríticas apresentam o mesmo comportamento observado nas hematíticas, onde as distribuições das resistências relacionadas às compacidades apresentam resultado dentro do esperado em relação as categorias do grau de consistência. Como observado no gráfico 3.2, 90,2% das amostras de itabiritos friáveis estão entre graus de consistência 0, 1 e 2. Para itabiritos médios, 74,3% estão distribuídas entre os graus de consistência 3 e 4 e as compactas 68,7% em grau de consistência 5 e 6.

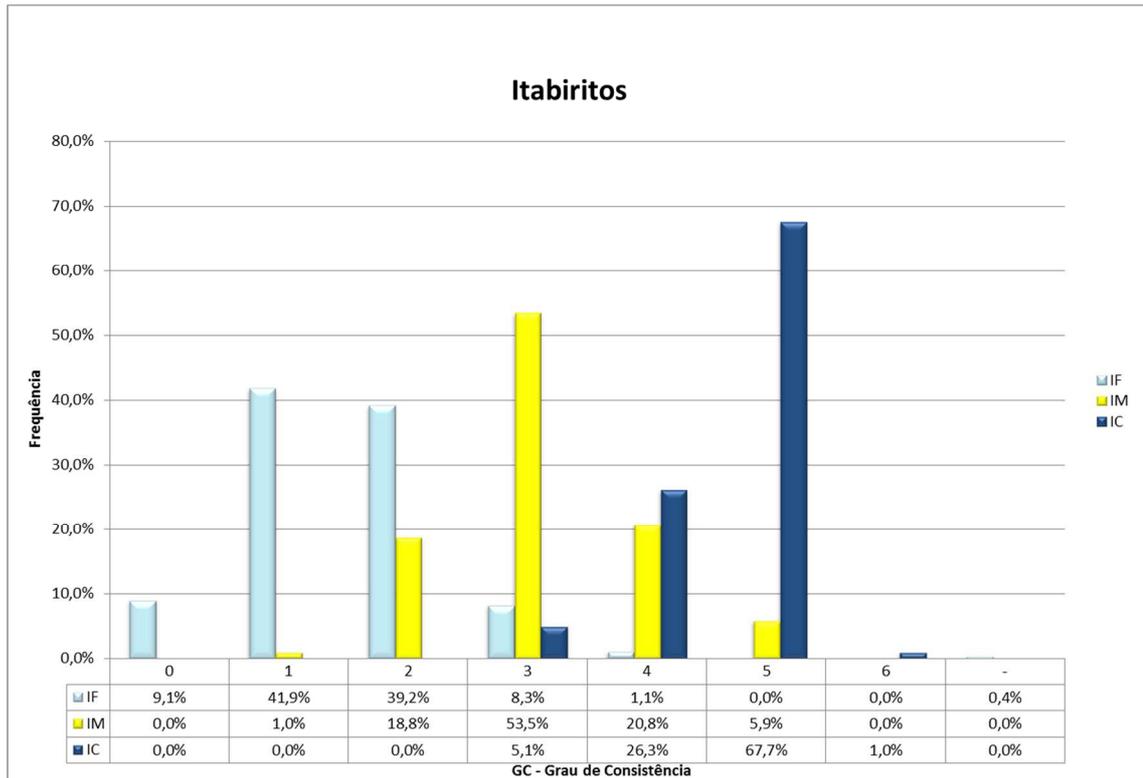


Gráfico 3.2: Gráfico de distribuição de rochas itabiríticas por grau de consistência.

#### ✓ Comparação de rochas básicas e vulcânica

No caso das rochas básicas e vulcânicas, o padrão de distribuição da resistência dos maciços não segue o comportamento observado nas formações ferríferas. Seu comportamento dúctil tende a ter resistências influenciadas pela quantidade de material argiloso e muitas vezes pela ação do intemperismo de acordo com a posição geográfica da rocha, sendo quanto mais próximo à superfície, maior a perda de resistência.

Observa-se nas descrições geológicas/geomecânicas que as amostras próximas à superfície apresentam maiores alterações mineralógicas e resistências mais baixas.

No gráfico 3.3, observa-se que as rochas básicas descritas como sã (BI) estão distribuídas 24,1% entre graus de consistência 0, 1 e 2, 51,7% entre os graus de consistência 3 e 4 e 24,1% entre os graus de consistência 5 e 6.

As rochas básicas descritas como alteradas (BIS) estão distribuídas com 68,3% entre graus de consistência 0, 1 e 2, 30,1% entre os graus de consistência 3 e 4 e 1,6% entre os graus de consistência 5 e 6, caracterizando esses litotipos como alterados e friáveis.

As rochas vulcânicas estão distribuídas com 93,8% entre graus de consistência 0, 1, 2, 6% entre os graus de consistência 3 e 4 e 0% entre os graus de consistência 5 e 6, caracterizando esses litotipos como alterados e friáveis

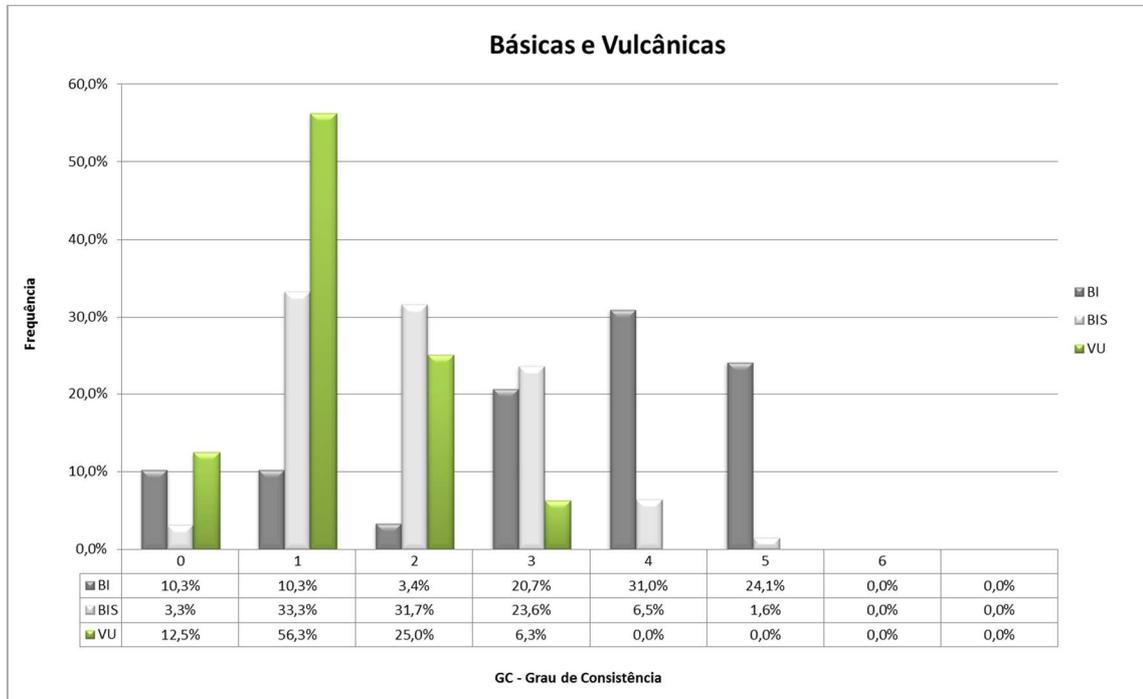


Gráfico 3.3: Gráfico de distribuição de rochas básicas e vulcânicas por grau de consistência.

#### ✓ Comparação de rochas filíticas

Os filitos, em geral, apresentam comportamento parecido em termos de resistência com as rochas básicas e vulcânicas. Essa semelhança pode se explicar devido a presença de argilo minerais e ao percentual de materiais com granulometria fina a muito fina.

No gráfico 3.4, observa-se que os filitos indistintos, ou seja, não classificados como dolomíticos ou sericíticos, estão distribuídos com 70,6% entre graus de consistência 0, 1 e 2, 29,4% entre os graus de consistência 3 e 4 e 0% entre os graus de consistência 5 e 6.

Os filitos sericíticos estão distribuídos com 36,4% entre graus de consistência 0, 1 e 2, 45,5% entre os graus de consistência 3 e 4 e 18,2% entre os graus de consistência 5 e 6.

Os filitos dolomíticos estão distribuídos com 77,8% entre graus de consistência 0, 1 e 2, 22,2% entre os graus de consistência 3 e 4 e 0% entre os graus de consistência 5 e 6.

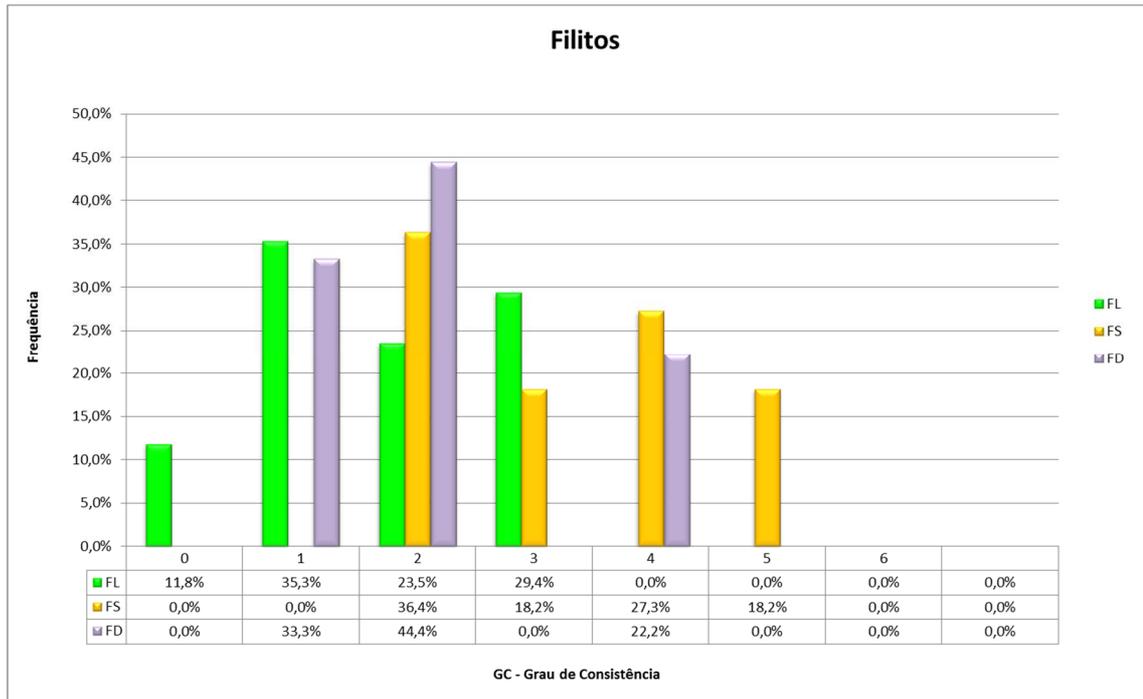


Gráfico 3.4: Gráfico de distribuição de rochas fílicas por grau de consistência

#### ✓ Comparação das rochas de cobertura

Com exceção das cangas, as rochas de cobertura possuem características bem parecidas entre si em resultados de ensaios de resistência uniaxial. Possuem comportamento variável e dependente do processo de alteração, oxidação ou lixiviação atuante.

Em geral, são mais resistentes ao golpe do martelo manual, também observado no teste de resistência com martelo de Schmidt, induzindo a classificá-las com consistências superiores aos que realmente são obtidas nos resultados laboratoriais.

Na base analisada, as argilas e aterro estão distribuídos com 100% entre graus de consistência 0, 1 e 2. As lateritas somente 6,3% estão acima de 2 e as cangas possuem uma distribuição bem dispersa, sendo 38,4% entre as consistências 0,1 e 2, 46,1% entre 3 e 4 e 15,5% entre 5 e 6.

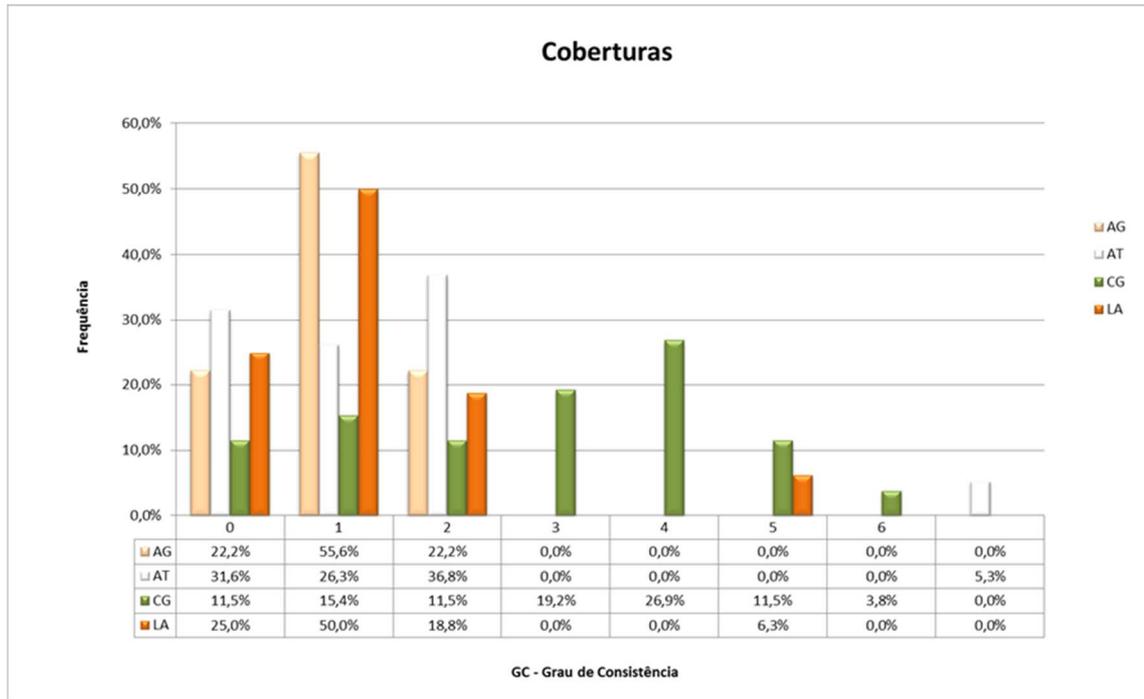


Gráfico 3.5: Distribuição das rochas de coberturas por grau de consistência.

#### ✓ Comparação de metacherts e quartzitos

As rochas ricas em sílica possuem uma distribuição de resistências ampla, que depende do processo geológico que foram submetidas. Aquelas posicionadas próximas à zonas de cisalhamento ou próximas à superfície, mais expostas a alteração intempérica, são esperadas resistências muito baixas devido a baixa densidade e alto índice de vazios. Já, as que sofrem processo de silicificação ou metamorfismo de contato, são esperadas resistências mais elevadas.

Os metacherts da base do pit da mina do Tamanduá estão distribuídos com 77,8% das amostras coletadas com grau de consistência 0, 1 e 2, 22% entre os graus de consistência 3 e 4 e 0% entre os graus de consistência 5 e 6, caracterizando esse litotipos como de baixa resistência. Os quartzitos estão distribuídos com 11% entre graus de consistência 0, 1 e 2, 44,4% entre os graus de consistência 3 e 4 e 44,4% entre os graus de consistência 5 e 6, caracterizando esse litotipo como de mais alta resistência.

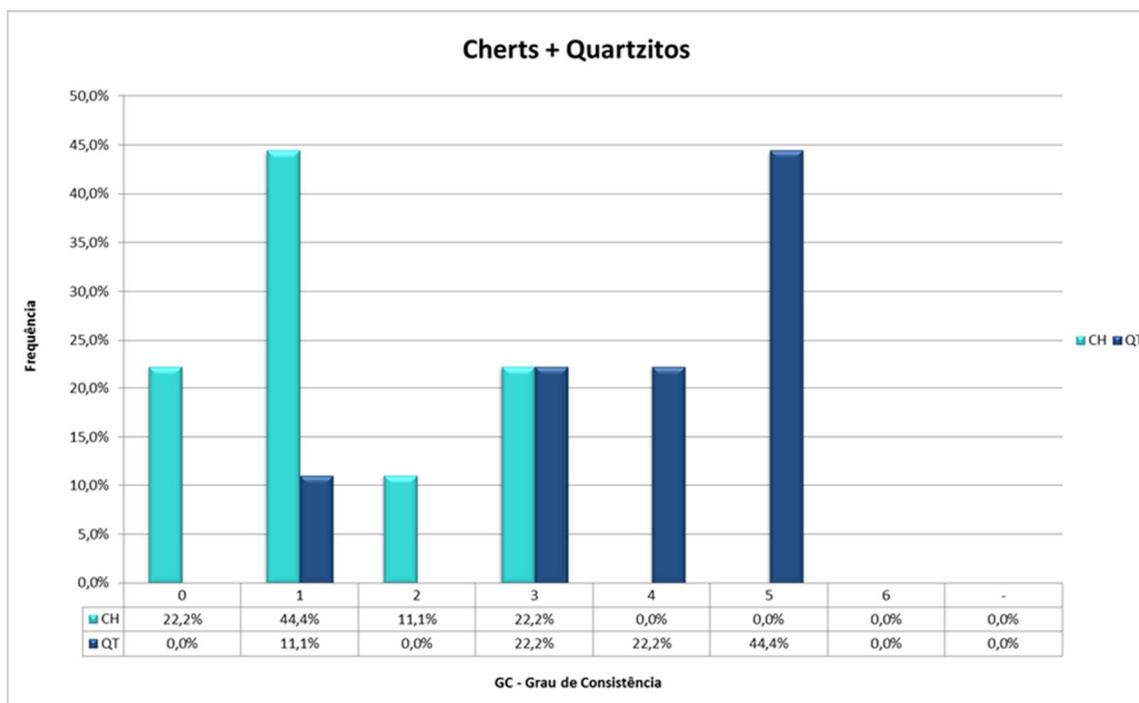


Gráfico 3.6: Distribuição de metacherts + quartzitos por grau de consistência.

#### ✓ Comparação de dolomitos

Os dolomitos são caracterizados como rochas de alta resistência. A distribuição encontrada do grau de consistência para as rochas dolomíticas atendeu a expectativa para esse litotipo, sendo que 100% das amostras se encontram dentro das distribuições de grau de consistência 5 e 6, consideradas de alta resistência.

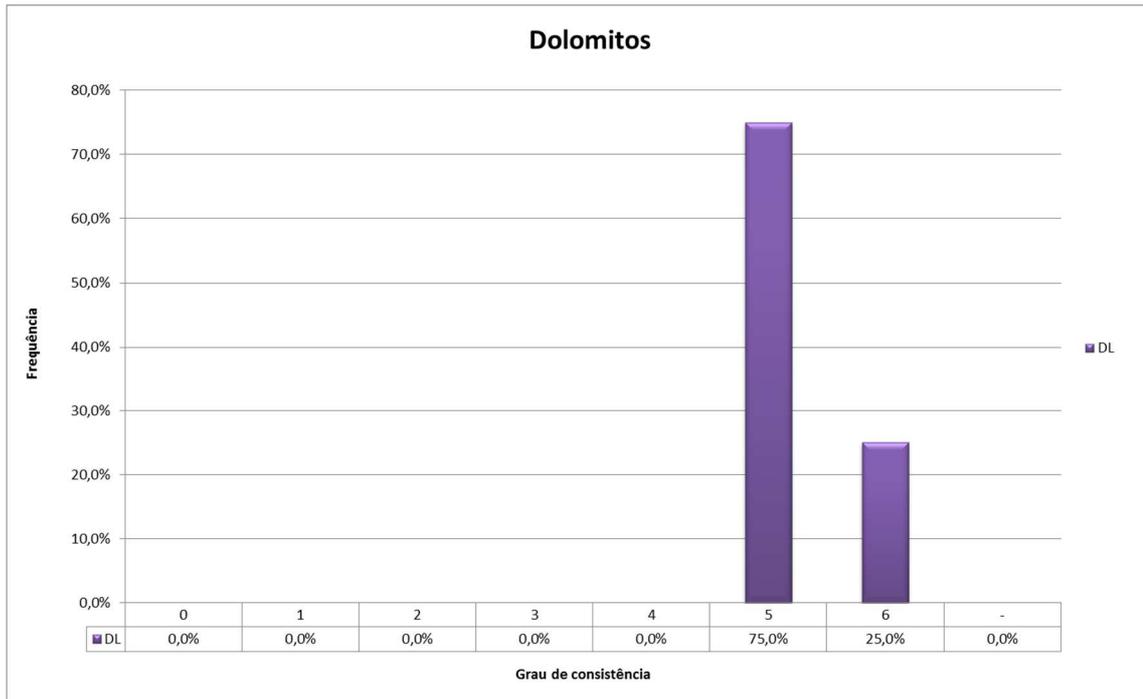


Gráfico 3.7: Distribuição das amostras de dolomitos por grau de consistência.

### 3.1.2 Discussão dos resultados da validação da base de dados

A validação, levando em consideração a análise granulométrica das amostras, apresentou um percentual de erro de 29% (alto). Após reanálise e consequente redefinição de algumas amostras considerando as características geológicas descritas, reduziu-se as discrepâncias para 9%.

Essa redução, após o pós processamento, evidencia a necessidade de validações geológicas das características geomecânicas. É recomendável uma descrição conjunta alinhando as características geológicas que afetem na redução da resistência da rocha intacta, definido pelo o grau de alteração mineralógica.

No resultado da validação das amostras que não possuem análises granulométrica, observa-se uma variação geológica marcada por dois grandes extremos. O extremo das porções das rochas de menor competência, com o grau de consistência variando de 0 a 2 e as de maior competência de 3 a 6. Essas rochas de baixa competência possuem características

geomecânicas comparável a dos solos, mas ainda preservam todas as formas reliquias de rochas.

Os resultados mostraram a necessidade de se revisar o método de descrição dos parâmetros geomecânicos, incluindo sempre o grau de alteração. Esse último, não compõe um parâmetro da classificação proposta por Bieniawski, Denkhaus & Vogler (1969), o RMR. Esse método clássico foi desenvolvido para rochas e necessita de uma boa caracterização das descontinuidades, o que em rochas no extremo das baixas resistências não conseguem ser observadas, e por consequência são muito penalizadas.

Portanto, considerando todas os métodos de validação, o percentual total de dados incoerentes foi de 12,41%. Embora acima do considerado aceitável de 10%, a base de dados foi aceita.

## 4 REPRESENTAÇÃO DA CONTINUIDADE ESPACIAL

### 4.1 DETERMINAÇÃO DO MÉTODO DE MODELAGEM DA CONTINUIDADE DO PARÂMETRO GRAU DE CONSISTÊNCIA

Para representar a continuidade espacial e as configurações físicas e geológicas do parâmetro grau de consistência, foi utilizada uma metodologia computacional que se baseia na anisotropia dinâmica para modelar a continuidade das camadas. Essa técnica rotaciona a anisotropia da continuidade espacial do parâmetro de acordo com as informações do azimute e direção do mergulho da formação geológica que forma o domínio sendo estimado. Esses são mapeados e definidos pelos contatos interpretados nas seções geológicas e nos mapeamentos superficiais.

A distribuição geométrica dos contatos do parâmetro grau de consistência possui uma correlação direta com os contatos geológicos, tendo a mesma influência da deformação regional. Portanto, a configuração dos contatos geológicos definiu a distribuição dos mergulhos e azimutes que controlam esse parâmetro.

Determinada essa configuração, foram testadas duas técnicas para estimativa desses parâmetros em um modelo 3D: método dos domínios geoestatísticos utilizados para krigar a variável categórica litologia (Figura 4.1) e a estimativa dos elipsoides locais alinhado com os eixos de mineralização (Figura 4.2).

A Figura 4.1 representa os domínios geoestatísticos criados e determinados através da regionalização e extrapolação dos domínios estruturais definidos pelos mapeamentos de superfície. Esses mapeamentos e domínios foram determinados em trabalho de campo de geologia regional e afloramentos durante o desenvolvimento da mina.

Outras informações como estruturas determinantes que definem e controlam a mineralização são os conjuntos de falhas do Tamanduá do Morro do Chapéu que seccionam o dobramento homoclinal central e definem uma quebra e separação dos domínios. A falha do Morro do Chapéu, por exemplo, definiu uma importante separação do depósito em dois grandes domínios estruturais, separados por dois importantes sistemas com falhas (falhas

transcorrentes): a falha do Tamanduá, ao sul (Coordenadas Norte-Local=-8050 Leste-local: 7900) e a falha do Tamanduá Norte, NW (Coordenadas Norte Local=9900 e Leste- local: 9800).

A distribuição dos domínios geoestatísticos segue as condições estruturais, relacionadas a variações de direção das camadas em profundidade. As variações são mais significativas superficialmente, onde os materiais são de menor resistência e assim mais impactados. Em maiores profundidades, as informações começam a ter uma incerteza considerável, porque nas porções mais profundas normalmente se encontram rochas de maior resistência, onde a deformação é menos penetrativa podendo inverter as condições propostas pelo conjunto de domínios previamente estabelecidos em mapeamentos estruturais.

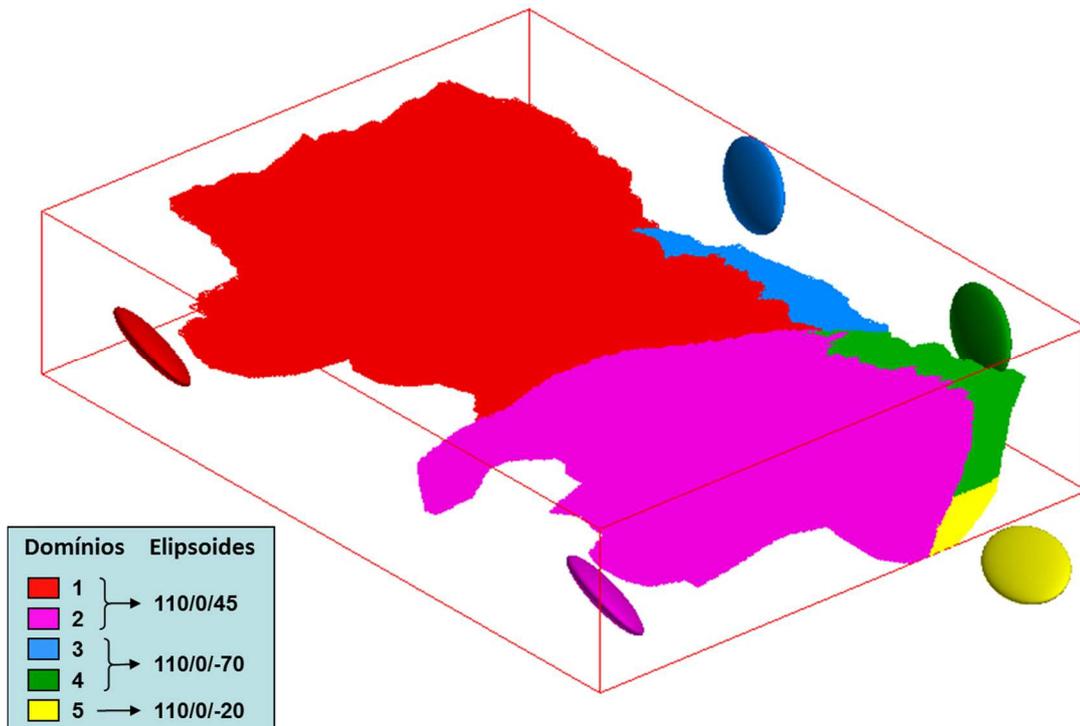


Figura 4.1: Distribuição dos domínios estruturais e geoestatístico (extraído do relatório de modelagem mina do Tamanduá, 2010).

No método de interpolação com emprego de anisotropia dinâmica, os blocos podem ser estimados rotacionando os ângulos do elipsoide de busca individualmente para cada bloco alinhado a estruturação da mineralização. Esse alinhamento é obtido com a geração de linhas horizontais (Figura 4.2) interpoladas com medidas de campo, indicando o azimute e linhas verticais interpretadas com informações de direções das camadas observadas nos furos de sondagem e perfilagens, interpoladas indicadas pelos mergulhos (Figura 4.3). Essas linhas são transformadas em pontos e adicionadas ao conjunto de dados estruturais. Esses conjuntos de

pontos irão compor o banco de dados de direção e mergulho, que serão estimados para todos os blocos que compõem o modelo geológico da mina.

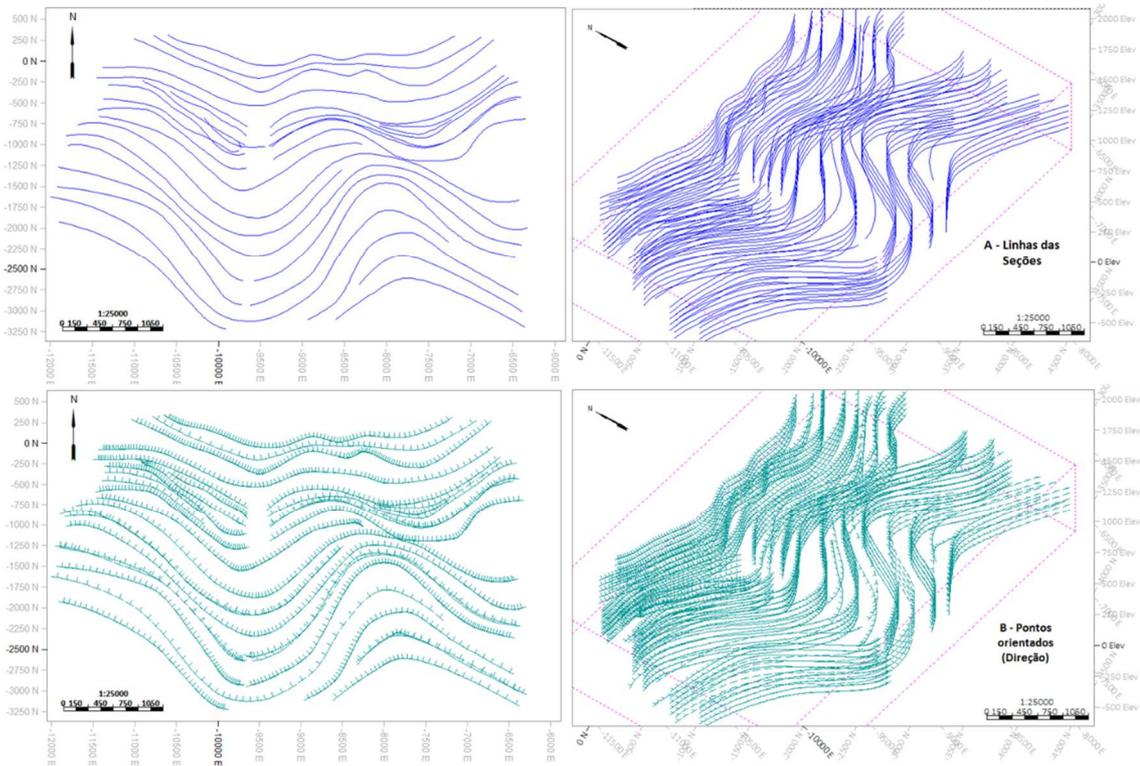


Figura 4.2: Ilustração da metodologia de criação de linhas para compor o banco de dados de azimutes do protótipo no método de estimativas locais. Em A observa-se o desenho das linhas de direção e em B o desenho das linhas transformadas em pontos que representam a direção.

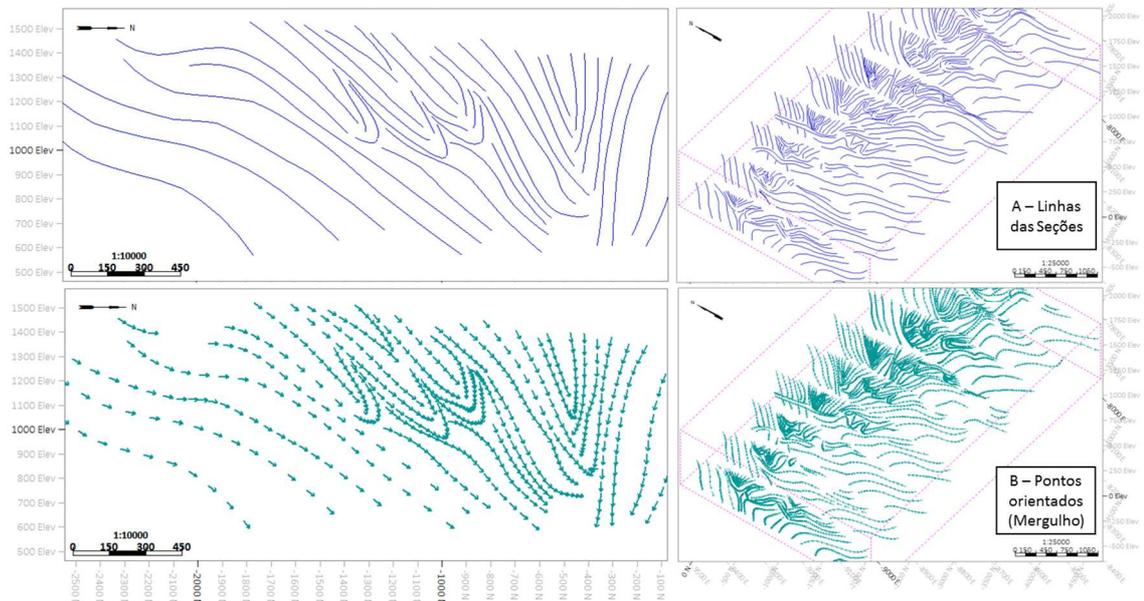


Figura 4.3: Ilustração da metodologia de criação de linhas para compor o banco de dados de mergulho do protótipo no método de estimativas locais. Em A observa-se o desenho das linhas verticais e em B o desenho das linhas transformadas em pontos que representam o mergulho.

O resultado de ambas as técnicas, utilizando os domínios estruturais na definição dos contornos geológicos e a técnica da anisotropia dinâmica, apresentaram similaridade. A

anisotropia dinâmica possui a vantagem de representar a gradação no contato e fornecer a rotação do mergulho das camadas bloco a bloco.

As direções e mergulhos dos contatos bloco a bloco, poderão ser utilizados para detalhar a posição do mergulho da camada apresentado próximo à face do talude, o que trará uma informação mais precisa da favorabilidade ou não a rupturas formadas pelas descontinuidades (Figura 4.4).

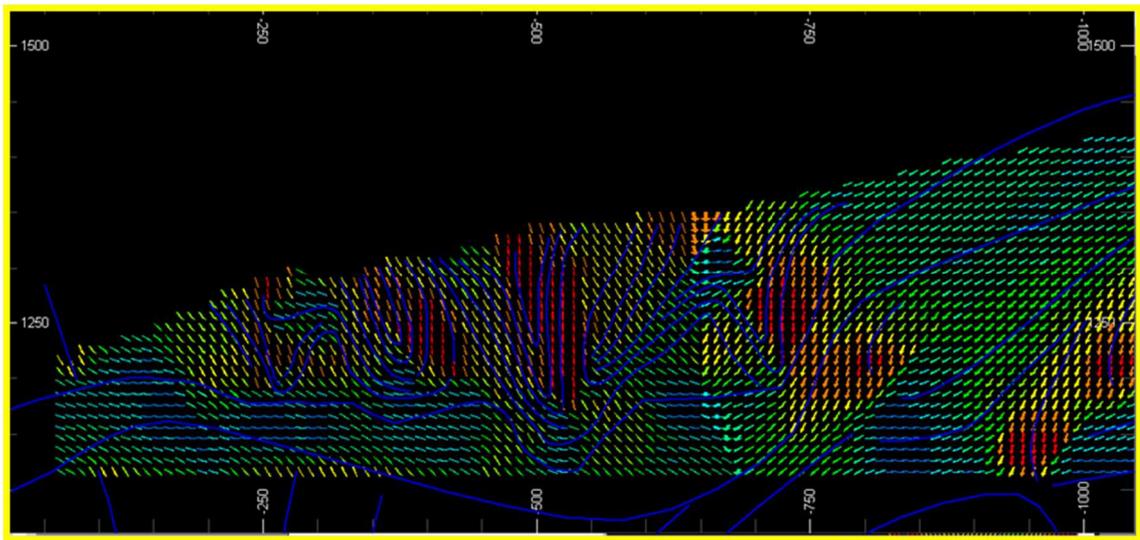


Figura 4.4: Seção típica mostrando o resultado da estimativa do azimute e mergulho, que serão base para a krigagem da variável grau de consistência.

Considerando que os pontos de mapeamento estrutural entram no banco de dados para construção do modelo de blocos, a estimativa próxima a esses dados tende a ter menor erro. Esses pontos estão próximos ao talude a ser analisado, e refletirão bem a realidade estrutural na superfície espacializada.

Para efeito comparativo, foi feito um estudo geoestatístico para auxiliar no processo de escolha do método a ser seguido. Esse estudo previu de forma sucinta um modelo variográfico preliminar.

Com o modelo variográfico prévio escolhido e os domínios selecionados, os parâmetros geomecânicos foram preparados em um banco de dados para estimativa por krigagem de indicadores. Cada variável foi estimada separadamente e os blocos classificados pela classe dominante (moda).

Ainda para efeito de comparação, foi selecionado aleatoriamente um setor do modelo estimado com as duas metodologias. Não houve diferença significativa nos resultados,

conforme pode ser visto na Tabela 4.1 e na Figura 4.5. Nessas se observa apenas uma mudança de classificação dos blocos nos limites dos domínios (contatos).

Tabela 4.1: Comparações dos resultados da estimativa do grau de consistência nas duas metodologias.

Setorização			Anisotropia dinâmica			$\Delta$
GC	AMOSTRAS	%	GC	AMOSTRAS	%	%
0	266969	22,3%	0	123644	20,4%	1,8%
1	540714	45,1%	1	217778	36,0%	9,1%
2	187393	15,6%	2	149441	24,7%	-9,1%
3	140422	11,7%	3	61418	10,2%	1,6%
4	13109	1,1%	4	15107	2,5%	-1,4%
5	32372	2,7%	5	24973	4,1%	-1,4%
6	16985	1,4%	6	12557	2,1%	-0,7%
	1197964	100,0%		604918	100,0%	0,0%

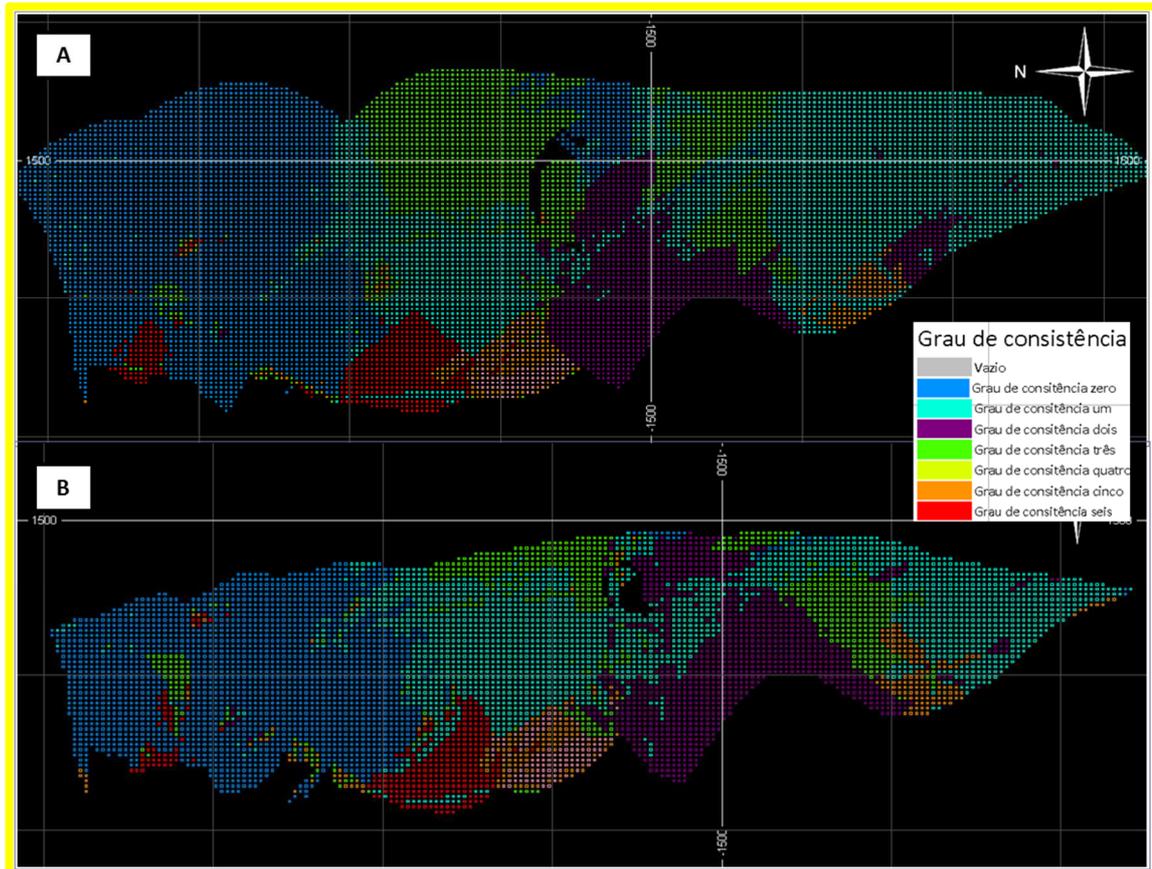


Figura 4.5: A – Seção do modelo de grau de consistência estimado usando domínios específicos. B Seção do modelo de grau de consistência estimado usando anisotropia dinâmica.

Considerando que as metodologias possuem precisão nos resultados e produzem resultados bem aproximados, é possível afirmar que a utilização do método de estimativa dos elipsoides locais (anisotropia dinâmica) traz maiores benefícios para a modelagem de dados geotécnicos. Esses benefícios podem ser classificados em:

- ✓ Velocidade no processo de construção do banco de dados (não sendo necessária geração de seções verticais);
- ✓ Representação das características individuais da distribuição dos dados estruturais, podendo levar em consideração detalhamentos;
- ✓ Representação da relação descontinuidade x face do talude em nível de bancada;

## 5 KRIGAGEM DOS INDICADORES DO GRAU DE CONSISTÊNCIA

O capítulo 5 apresenta o processo de modelagem do parâmetro grau de consistência por uma abordagem geoestatística usando krigagem dos indicadores, análise e validação dos resultados e discussões.

Será apresentado o tratamento geoestatístico com uso da krigagem dos indicadores.

### 5.1 PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS

A validação do banco de dados foi detalhada no capítulo 4. Nesse item do capítulo 5, iniciaremos a preparação do banco de dados para a krigagem dos indicadores, onde cada um dos intervalos de grau de consistência foi transformado em um valor binário.

O parâmetro a ser krigado é o grau de consistência, que é uma variável não aditiva composta por sete intervalos descritos. O grau de consistência varia em sete categorias ou classificações, conforme Tabela 2.1 apresentada no capítulo 2.

Com uma análise da base de dados, verifica-se poucas amostras em algumas classes de grau de consistência dificultando uma boa modelagem variográfica (Tabela 5.1) principalmente nas classes mais resistentes (4, 5 e 6).

Tabela 5.1: Quantidade de amostras por classe de consistência.

Grau de consistência	Amostras	%
0	5188	19%
1	8180	30%
2	3624	13%
3	4776	17%
4	1587	6%
5	2525	9%
6	1479	5%
Total	27359	100%

Diante disso, foi necessário um agrupamento de classes que possuem as mesmas características geomecânicas para que o volume de dados fosse suficiente para um estudo do modelo variográfico.

Para isso, foi construída uma métrica de agrupamento, levando em consideração a variâncias de cada classe e as formas dos variogramas individuais. Nessa análise foi possível perceber uma quebra na variância na passagem das categorias 2 para 3 e que 60% dos dados estavam distribuídos nas classes 0, 1 e 2, demonstrando claramente uma mudança nas características físicas dos materiais em dois grandes grupos.

Basicamente essas classes podem ainda ser consideradas como rochas com características de solo, porém preservam estruturas que as definem como rocha.

Portanto, nas amostras das sondagens existentes, as características dos maciços apresentam resistências baixas, optando assim pelo agrupamento no intervalo de 0,1 e 2 para materiais ditos inconsistentes e 3,4,5 e 6 para os consistentes (Tabela 5.2).

Tabela 5.2: Variâncias dos grupos de cada categoria dos graus de consistência.

<b>Grau de consistência</b>	<b>Variância</b>
0	0.14
1	0.20
2	0.12
3	0.06
4	0.05
5	0.08
6	0.05

Após esse agrupamento, foi construído um banco de dados composto por dois grandes grupos, o primeiro de baixas resistências, chamado assim de inconsistentes e o segundo grupo de mais alta resistência, chamado de consistentes (Figura 5.1).

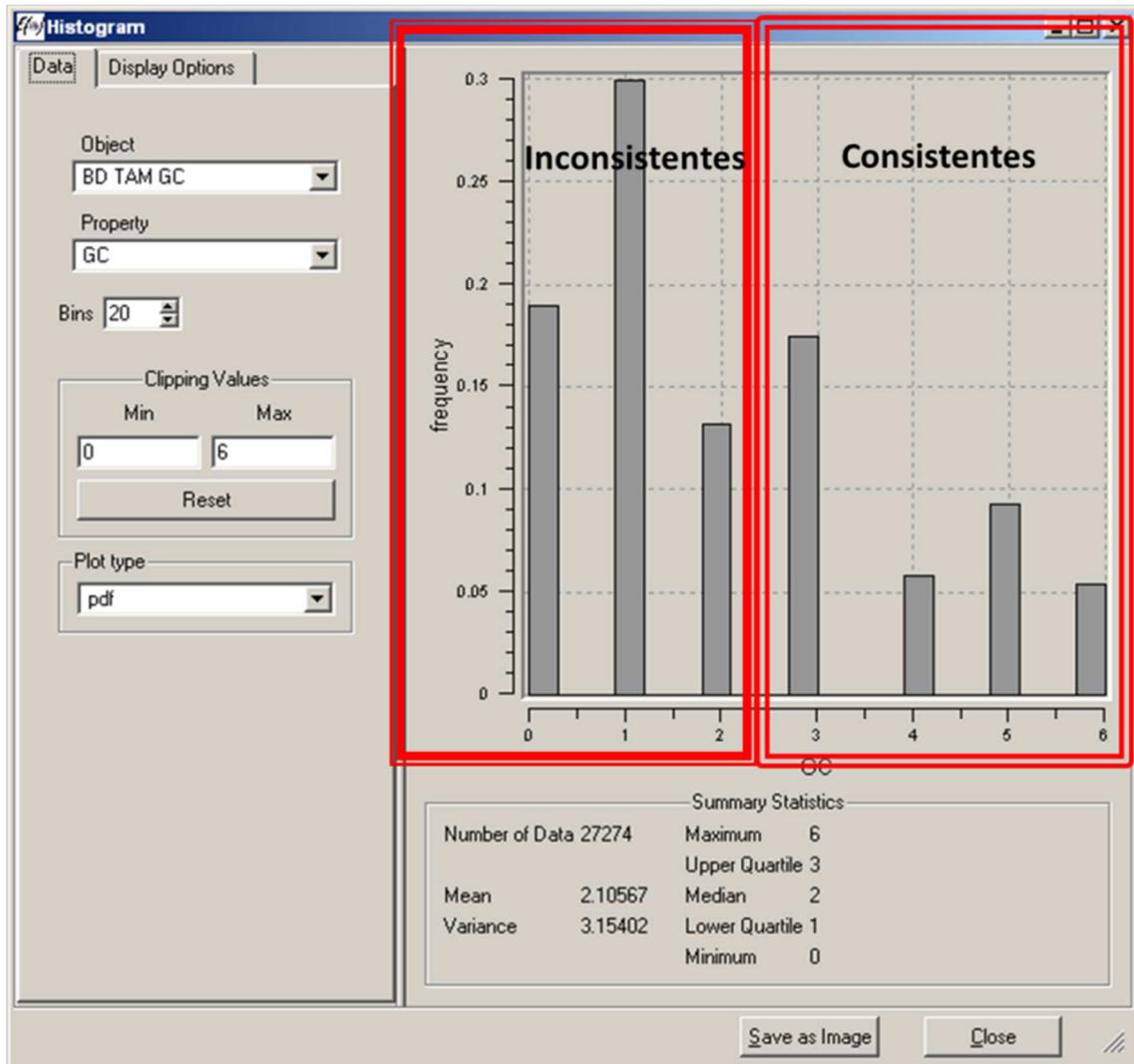


Figura 5.1: Histograma dos dados originais das classes de consistência.

As proporções do volume de dados de GC 0, 1, 2 somados representam 60% (Figura 5.1) do total dos dados, sendo uma boa proporção para divisão dos intervalos em apenas duas categorias (Tabela 5.3):

0, 1 e 2 – categoria 1 (inconsistente)

3,4,5 e 6 – categoria 0 (consistente)

Tabela 5.3: Número e porcentagem de dados por categoria.

<b>Grau de Consistência</b>	<b>Amostras</b>	<b>%</b>
INCONSISTENTES	16949	62%
CONSISTENTES	10325	38%
Total	27274	100%

## 5.2 GEOESTATÍSTICA

### 5.2.1 Análise exploratória dos dados e modelagem espacial da variável

A análise exploratória dos dados é o primeiro passo do estudo geoestatístico, pois através dela é que se tem a compreensão da estatística e da continuidade espacial da variável de interesse.

O banco de dados totaliza 27274 amostras com média 0.62 e variância 0.23 (Figura 5.2).

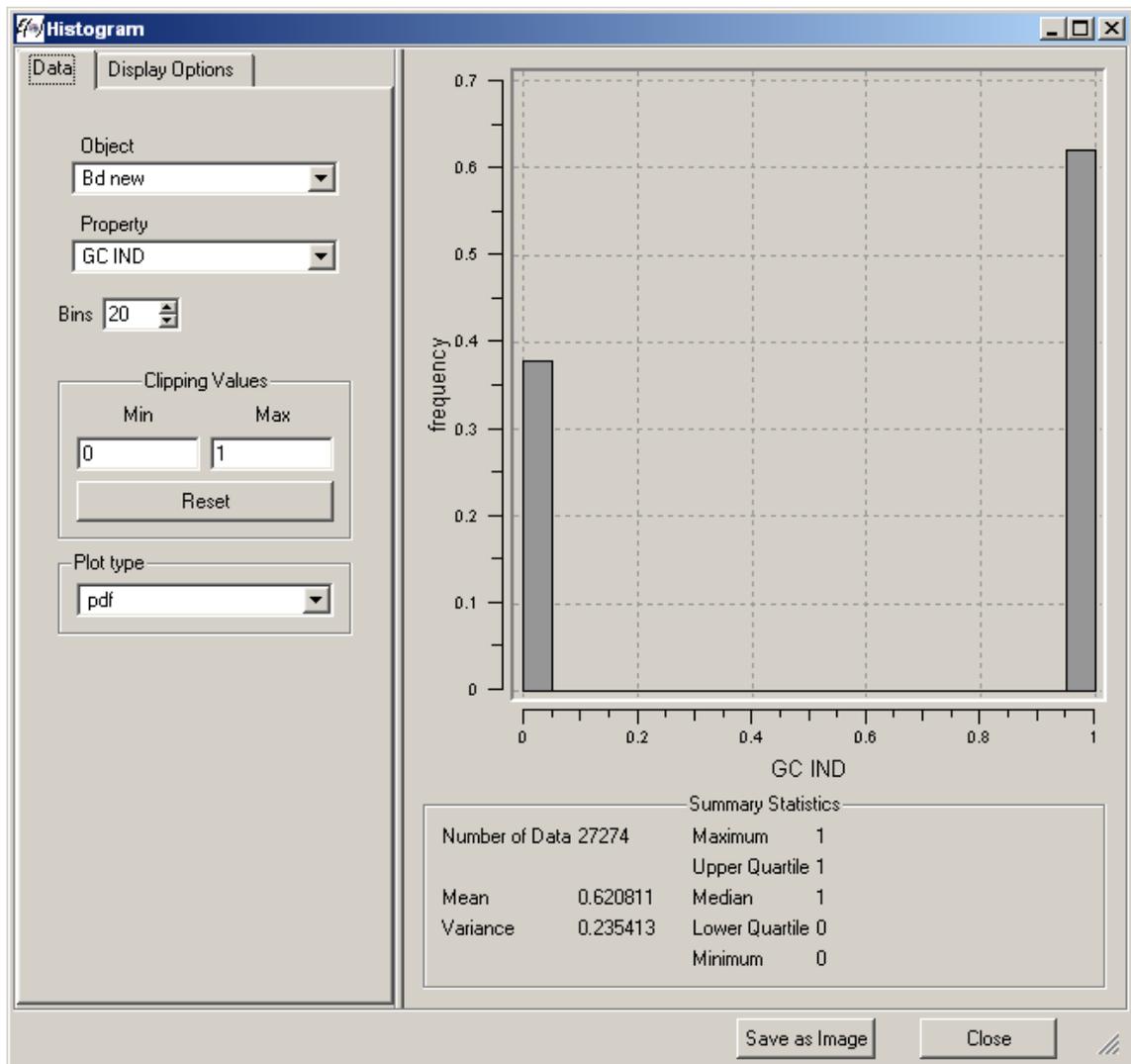


Figura 5.2: Histograma das classes dos dados agrupados.

O banco de dados proposto possui continuidade espacial e apresenta zonas preferenciais de amostragem na direção NW-SE. A malha dessa amostragem na região em estudo possui dimensões de 430 m x 350 m x 100 m. Essa malha não é regular, possuindo um adensamento de amostras na zona da cava atual (Figura 5.3). A malha média é 100 x 100m com adensamento na área em lavra de 50 x 50m em um alinhamento principal obedecendo à orientação principal do corpo mineralizado NW-SE.

Observa-se também uma tendência dos materiais, na zona mineralizada em lavra, possuírem amostras com resistência mais baixa. Apesar dessa tendência de concentração de amostras com resistência mais baixa, intercalações ou variações com contatos bruscos também estão presentes.

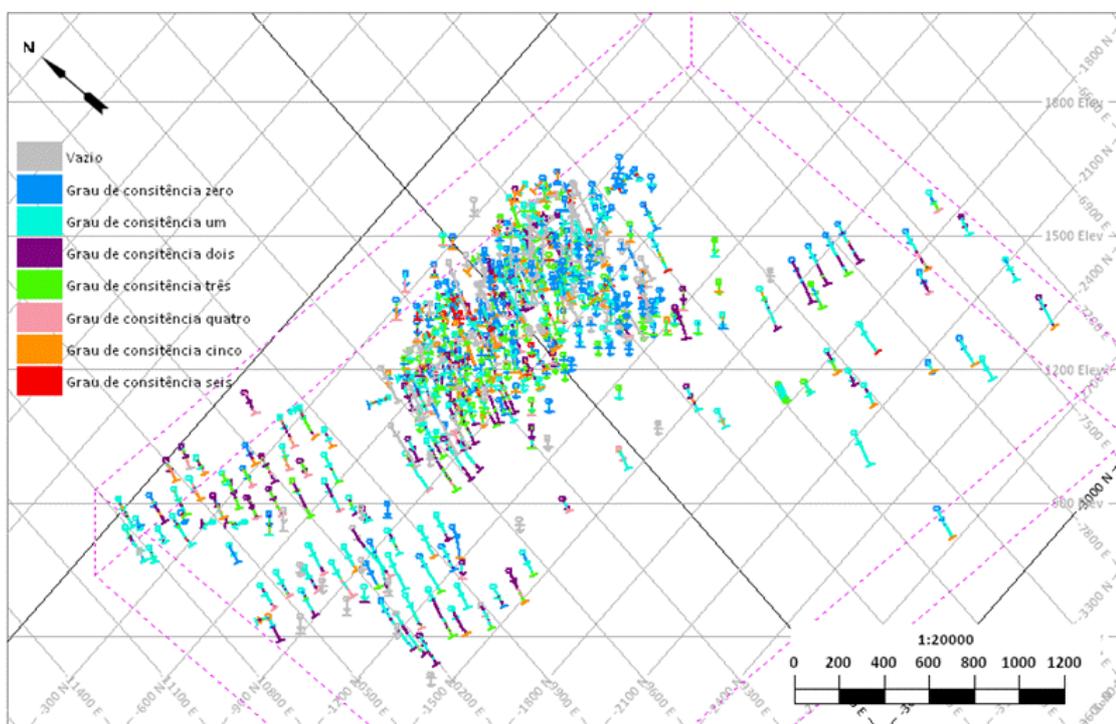


Figura 5.3: Vista isométrica dos dados de sondagem.

Devido a esse agrupamento preferencial observado, foi necessário desagrupar esses dados, para que a análise estatística não seja tendenciosa pela amostragem preferencial e possa refletir uma condição mais representativa do depósito.

A variável grau de consistência, associada à resistência da rocha intacta, deve ser sempre avaliada e setorizada de acordo com um agrupamento prévio das condições estruturais, visto que pode haver uma mudança da resistência devido ao esforço estrutural a que foi submetido o maciço. Essa referência pode ser feita krigando os dados pertencentes a um mesmo domínio

estrutural ou fazendo as estimativas respeitando a direção do mergulho dos contatos determinado pela anisotropia dinâmica. Desta forma, haverá, bloco a bloco, variações das orientações dos corpos.

### 5.2.2 Modelagem variográfica

Segundo Armstrong & Matheron (1986), no processo de estimativa precisa-se da interdependência espacial do parâmetro de interesse. Para tal são usadas funções matemáticas conhecidas como variogramas ou covariogramas que definirão os propósitos acima citados, ou seja, medir a descorrelação ou correlação.

A função básica do variograma é medir a variância de pares de amostras separados em múltiplas direções no espaço amostral. As distâncias entre os pares de amostras ( $h$ ) são definidas como sendo múltiplos inteiros de um dado intervalo ( $\Delta h$ ) (Eq.5.1). Assim, para cada conjunto de pares é calculada a variância ( $\gamma(h)$ ) usando:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_1^n \{v(i+h) - v(i)\}^2}{2n} \quad \text{Equ.(5.1)}$$

Sendo:

$\gamma(h)$  = variância dos pares dados separados pela distância  $h$ .

$h$  = distância entre os dados que formam um par.

$v(i)$  = valor do dado na posição  $i$ .

$v(i + h)$  = valor do dado na posição  $i + h$

$n$  = número de pares encontrados para cada distância  $h$ .

Os valores calculados podem ser representados graficamente em forma de variograma experimental (pontos azuis na Figura 5.4) e ajustados com um modelo (curva vermelha), composto pelos seguintes componentes:

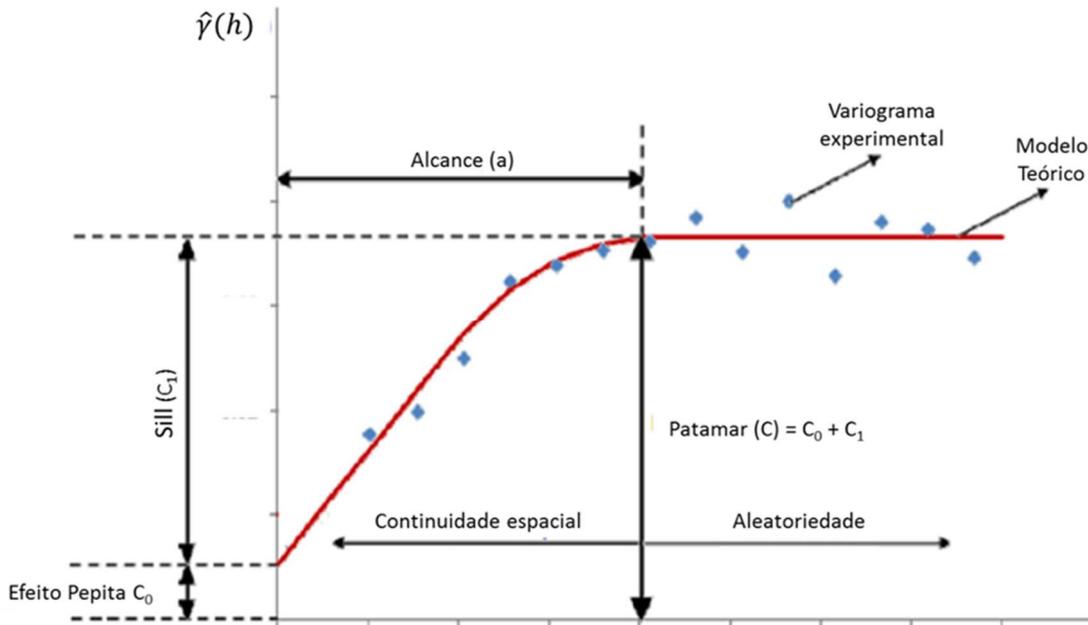


Figura 5.4: Representação gráfica da estrutura de um variograma experimental e partes de um modelo variográfico (Fonte: Aula de Geoestatística, Prof.Dr.ElódioSebem).

As diferenças  $\{v(i) - v(i + h)\}$  decrescem, à medida que as distâncias entre as amostras diminuem. É o que se espera de amostras no mesmo domínio, ou seja, apresentem semelhança de valores a curta distância.

Os componentes do variograma são:

- ✓ Alcance  $(a)$ : distância dentro da qual as amostras possuem correlação espacial;
- ✓ Patamar  $(C)$ : é o valor do variograma correspondente ao seu alcance  $(a)$ ;
- ✓ Efeito Pepita  $(C_0)$ : idealmente igual à zero. Entretanto, na prática, à medida que  $h$  tende a 0 (zero),  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo,  $(C_0)$ , que revela a descontinuidade do variograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras, causado por variabilidade do fenômeno a curta distância ou por erros amostrais;
- ✓ Patamar ou contribuição ao sill  $(C_1)$ : é a diferença entre o patamar  $(C)$  e o efeito pepita  $(C_0)$ .

Para o banco de dados em estudo, a variografia foi feita considerando o banco de dados integral, sem divisão dos dados em domínios estruturais. Os parâmetros variográficos e de busca serão ajustados localmente bloco a bloco com a anisotropia dinâmica.

### 5.2.3 Definição do modelo variográfico pelos variogramas direcionais

Para a variável grau de consistência considerando dois grandes domínios, “inconsistentes e consistentes” foi gerado o variograma experimental omnidirecional dos indicadores (Figura 5.5). Ainda, para uma melhor modelagem da continuidade espacial do fenômeno foram calculados os variogramas nas direções azimutais.

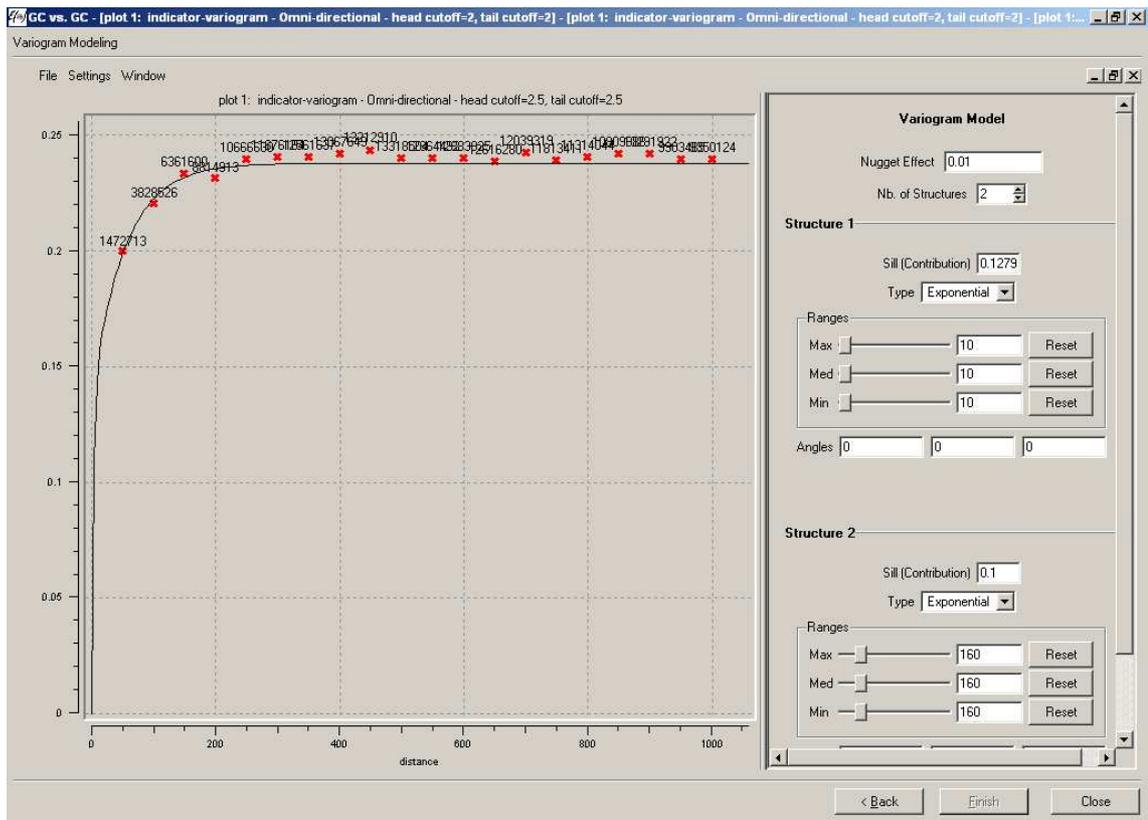


Figura 5.5: Imagem do variograma omnidirecional.

Com essa análise inicial do variograma omnidirecional, foram determinados os parâmetros iniciais para ajuste dos variogramas direcionais.

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = c * \text{Exp} \left[ \frac{h}{a} \right] = c * \left[ -\frac{h}{a} \right]$$

2)

Modelo	C0	Sill	
		C1	C2
Exponencial	0.01	0.1279	0.1

Para a escolha do modelo variográfico que melhor ajustasse as categorias do banco de dados, todas as direções azimutais foram estudadas, inicialmente nas direções no plano horizontal, em oito direções azimutais variando em 22.5° (0°, 22.5°, 45°, 68.5°, 90°, 112.5°, 135° e 157.5°) e todos os mergulhos de 0° a 90°.

A direção de anisotropia do corpo determina a direção da mineralização, conforme mapeada pelo estudo geológico, encontra-se nos intervalos de 110 a 135° de azimute da direção de maior alcance.

O espaçamento entre amostras escolhido foi de 50m, considerando os setores mais adensados, com tolerância de 50% (25m). Os demais parâmetros para cálculo dos variogramas experimentais são:

- Tolerância angular de 22.5° para cada lado
- Largura de banda 50m

Nos azimutes próximos da direção da mineralização, a análise da continuidade espacial foi mais detalhada e se mostrou coincidente com a orientação espacial da zona preferencial das categorias geomecânicas (Figura 5.6). Essa coincidência era esperada devido a uma forte correlação entre os parâmetros.

Para um adequado ajuste dos variogramas, foi necessário o uso de três estruturas na equação, sendo a primeira a componente do efeito pepita, seguida de duas estruturas exponenciais (Tabela 5.4).

Tabela 5.4: Parâmetros variográficos para estimativa das categorias de grau de consistência.

Grau de consistência	Modelo	Azimute	Plunge	Dip	Estrutura 01				Estrutura 02			
					Sill	Alcance 1	Alcance 2	Alcance 3	Sill	Alcance 1	Alcance 2	Alcance 3
0 a 6	Exponencial	135	0°	45°	0.12	70	50	25	0.1	290	180	160

Os parâmetros do modelo variográfico e o elipsóide de anisotropia que melhor representam a variabilidade do grau de consistência podem ser observados na Figura 5.6.

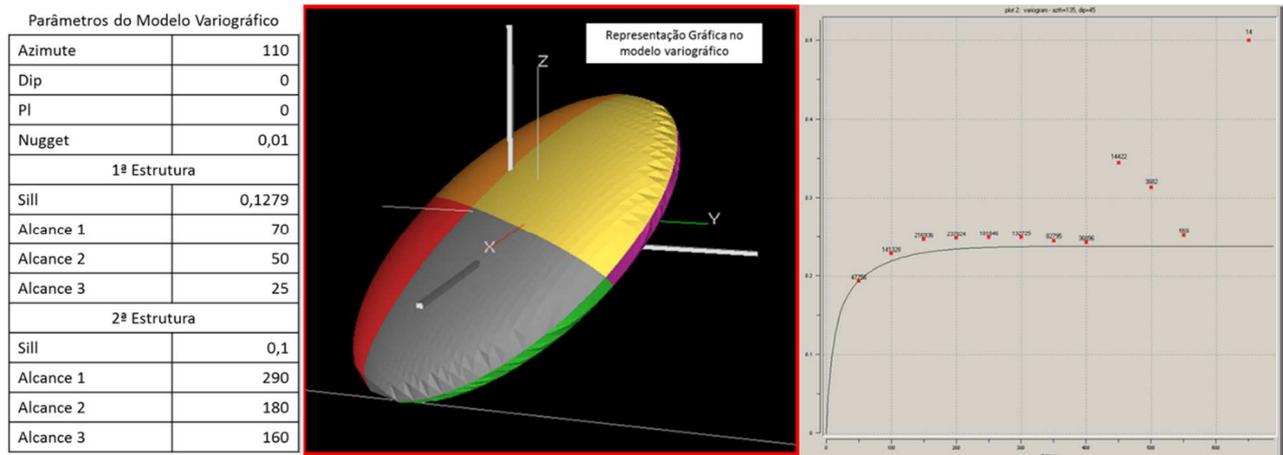


Figura 5.6: Parâmetros do modelo variográfico a ser usado na krigagem das categorias.

### 5.3 KRIGAGEM DOS INDICADORES

Para prever os valores em áreas não amostradas, foi utilizada a krigagem ordinária dos indicadores usando os modelos ajustados de continuidade espacial.

#### 5.3.1 Modelo de Blocos

Embora o estudo estatístico e a modelagem variográfica tenham sido feitas nos softwares *SGeMS* e *GSLIB90*, para a estimativa usou-se o programa *Datamine*® (CAE Mining software limited, 1983 - 2014). Essa escolha foi feita considerando que o modelo geológico de blocos foi criado no *Datamine*®, e que o protótipo para a krigagem usaria como base o modelo rotacionando pela anisotropia das camadas dinamicamente.

As parametrizações da construção do grid, coordenadas de partida, posicionamento das estimativas e as dimensões do bloco (Figura 5.7 e Tabela 5.5) foram as mesmas do protótipo do modelo geológico, para que ao final pudéssemos obter um modelo geológico/geomecânico.

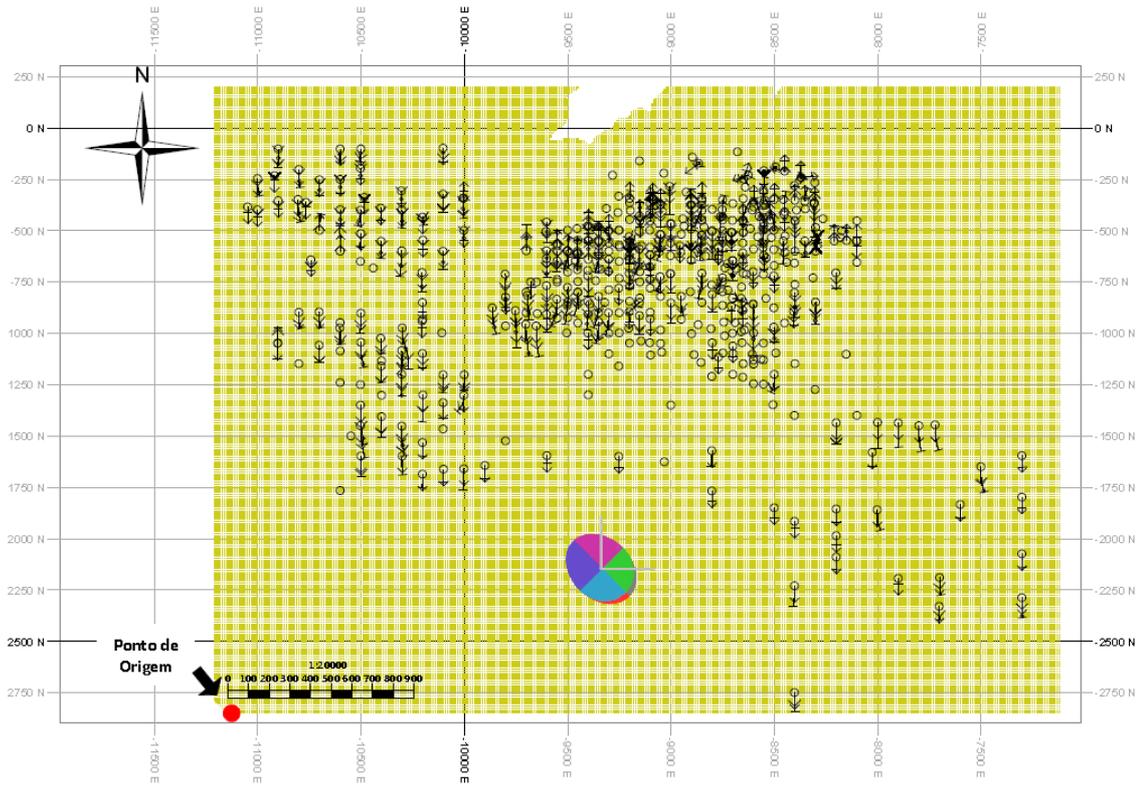


Figura 5.7: Mapa de distribuição das amostras em relação ao grid e o elipsoide usado para estratégia de busca.

Tabela 5.5: Detalhes do grid de krigagem (Base no centroide do bloco).

Dimensões do Grid					
X origem	Y origem	Z origem	Nx	Ny	Nz
-11125	-2850	700	430	350	100

### 5.3.2 Estratégia de Busca

Após construído o grid, foi então definida a estratégia de busca e o número que amostras que farão parte da estimativa.

Para compor o volume de busca, foi definido o primário ou principal, acompanhados de mais dois ranges de busca.

Sendo selecionadas o número de amostras no mínimo 3 e no máximo de 16 para serem consideradas na estimativa do ponto de interesse. Os dados que estiveram fora do alcance do

elipsoide de busca não serão considerados na estimativa daqueles pontos. Foram criados também mais duas expansões desse elipsoide caso não serem encontradas amostras no primeiro volume de busca, a expansão secundária de 1.5 os alcances da primária e a terciária de duas vezes.

Para limitar a utilização de dados muito próximos no furo de sondagem, foi limitado a utilização de dois octantes e o número de amostras mínimo de um (1) e máximo de quatro (4) em cada um desses octantes.

### 5.3.3 Resultado da krigagem

Como a modelagem do grau de consistência utilizou como protótipo o modelo anisotrópico com a orientação do dip/direction obtidos dos mapeamentos geológicos e interpretação dos contatos das seções, é possível observar que os desenhos das tipologias representaram os contatos geológicos. O resultado final é um modelo de blocos respeitando o alinhando do arcabouço estrutural da mineralização, sem que houvesse a necessidade de dados adicionais condicionantes obtidos a partir da interpretação de seções verticais e horizontais para delinear esses contornos (Figura 5.8).

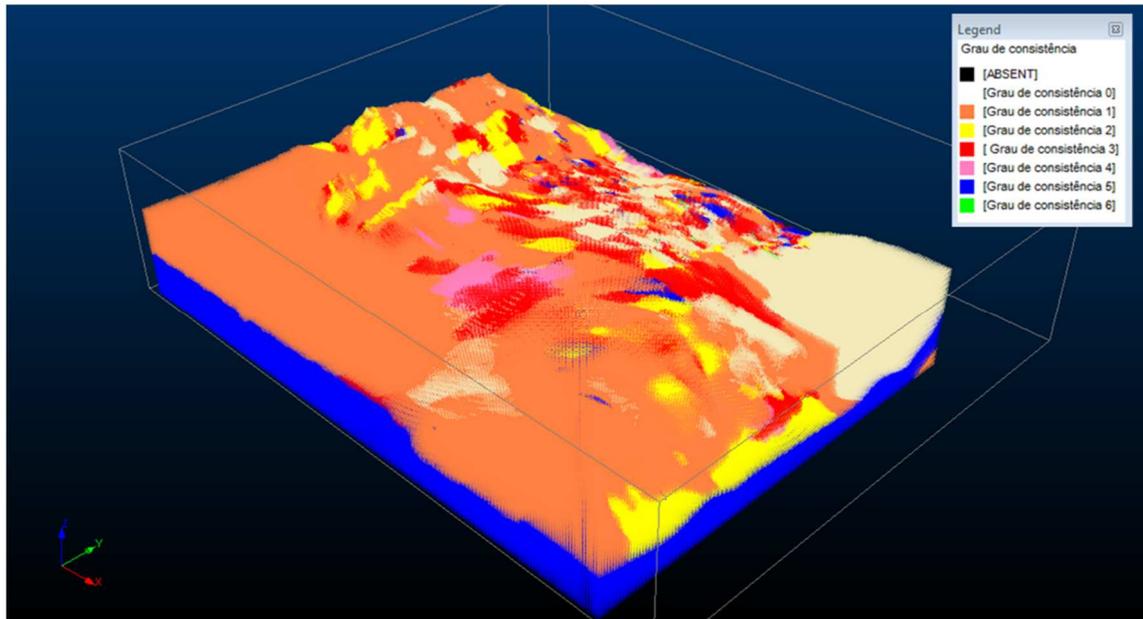


Figura 5.8: Visão geral do modelo geomecânico das tipologias do grau de consistência utilizando como protótipo modelo anisotrópico.

No modelo tipológico final, é observado um grande volume de materiais de baixa resistência próximo a superfície, sendo as tipologias geomecânicas mais atribuídas aos blocos foram as 1 e 2 (Tabela 5.6) aumentando a resistência em maiores profundidades. Essa característica é facilmente observada *in loco* no depósito e na base de dados originais, onde a sondagem buscou atender não só o objetivo geológico, mas também o geotécnico, estendendo os furos a níveis mais profundos e buscando alcançar também os limites com litologias estéreis, atendendo assim objetivos geomecânicos (Figura 5.9).

Tabela 5.6: Número de blocos de grau de consistência krigados por classe.

Grau de consistência	Nº de blocos estimados	% de blocos
0	440923	13%
1	1169532	34%
2	647184	19%
3	388700	11%
4	396900	12%
5	315850	9%
6	61971	2%
Total	3421060	100%

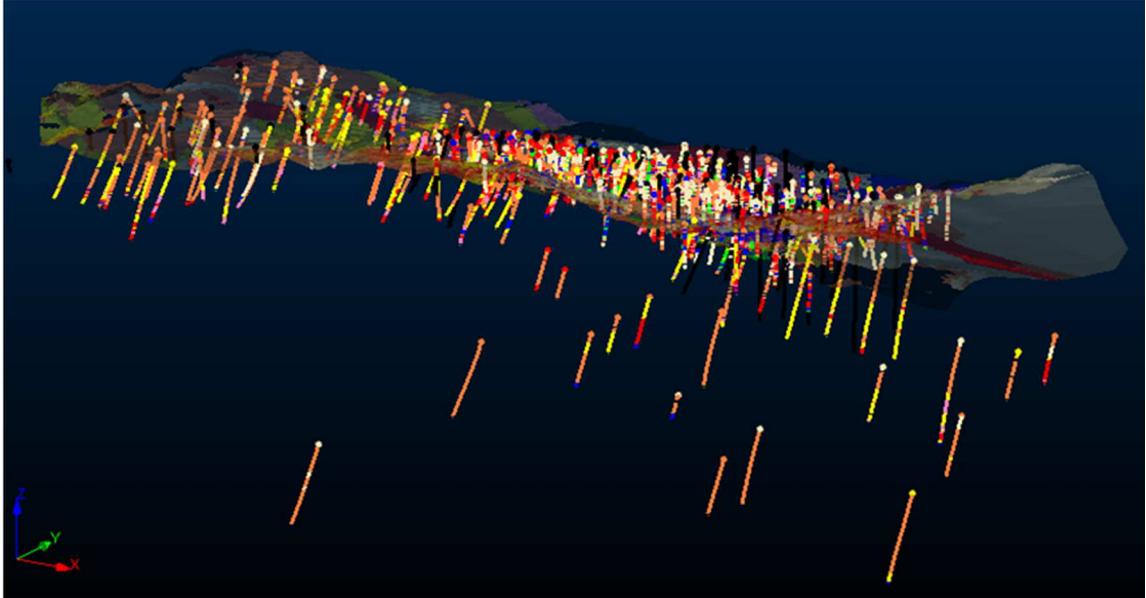


Figura 5.9: Visão geral da relação do banco de dados de sondagem e a Projeção da Cava final.

### 5.3.4 Validação do resultado da Krigagem dos indicadores

#### 5.3.4.1 Validação do volume de blocos estimados por categoria em relação ao volume de amostras no banco de dados

Uma importante validação a ser apresentada, é a verificação do volume de blocos estimados em relação ao volume de amostras na base de dados original por tipologia geomecânica.

Houve uma diferença relativa significativa nas tipologias extremas, reduzindo nas porções mais centrais, o que pode ser observado na tipologia grau de consistência cinco (Tabela 5.7) valores esperados para esse tipo de estimativa.

Tabela 5.7: Porcentagem de volume de amostras e dos blocos estimados por cada tipologia de grau de consistência.

BANCO DE DADOS ORIGINAL

Grau de consistência	Amostras	%
0	5188	19%
1	8180	30%
2	3624	13%
3	4776	17%
4	1587	6%
5	2525	9%
6	1479	5%
Total	27359	100%

GRAU DE CONSISTÊNCIA

Grau de consistência	COUNT	%
0	440923	13%
1	1169532	34%
2	647184	19%
3	388700	11%
4	396900	12%
5	315850	9%
6	61971	2%
Total	3421060	100%

Grau de consistência	Amostras	%
INCONSISTENTES	16992	62%
CONSISTENTES	10367	38%
Total	27359	100%

Grau de consistência	Amostras	%
INCONSISTENTES	2257639	66%
CONSISTENTES	1163421	34%
Total	3421060	100%

Considerando-se a distribuição dos blocos no modelo por tipologia e as amostras na base da sondagem (Figura 5.10), como validação visual, observa-se uma distribuição coerente, que respeita a distribuição espacial amostral.

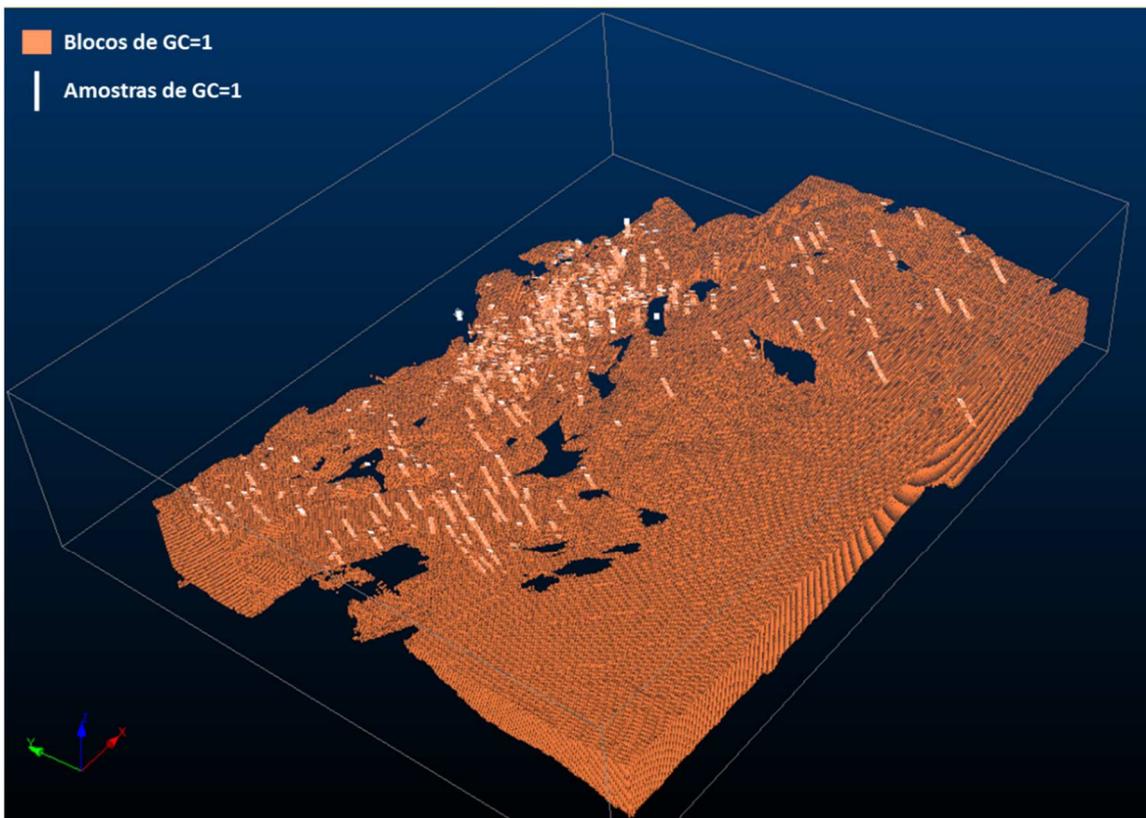


Figura 5.10: Exemplo de visão geral da distribuição do grau de consistência 1 em relação as amostras com o mesmo grau de consistência.

### 5.3.4.2 Validação estatística dos blocos estimados em relação as amostras no banco de dados

Ainda como forma de validação, checa-se a concordância entre a estatística básica do modelo e do banco de dados original.

O banco de dados original totaliza 29.634 amostras de grau de consistência com média de 2.10, e o modelo com um total de blocos estimados da tipologia grau de consistência de 8.947.467 com média de 2.09 (Tabela 5.8)

A diferença relativa foi de 0,47%, considerada insignificante, mostrando que o resultado da estimativa reproduz a média global da base original, revelando ausência de viés global.

Tabela 5.8: Comparação da estatística básica do parâmetro grau de consistência do banco de dados original e do modelo estimado.

<b>Estatística</b>	<b>Banco de dados Original</b>	<b>Modelo Estimado</b>
Média	2,11	2,10
Variância	3,15	2,55
Desvio Padrão	1,77	1,59

### 5.3.4.3 Validação da estimativa dos dados agrupados com estimativa das categorias

Mais uma maneira de validação do modelo estimado das tipologias de grau de consistência, foi feita uma comparação do modelo agrupado e do modelo tipológico.

Esse modelo foi estimado levando-se em consideração somente a probabilidade dos dados inconsistentes no modelo, sendo denominado modelo de inconsistências.

O banco de dados contendo somente a probabilidade de ser inconsistente ou não, foi estimado por krigagem de indicadores, gerando um mapa de distribuição das inconsistências, onde 1 é a probabilidade de ser “inconsistente” e 0 de ser “consistente”

Para classificação dos blocos do modelo de inconsistências, foi utilizada a classificação por porcentagens, sendo que foram consideradas 60% de chances de ser inconsistentes e 40% de consistentes, da mesma maneira que foi observado na base original.

De posse desse modelo de inconsistências, foram comparadas as distribuições dos blocos agrupados com os blocos individualizados pelo modelo tipológico (Figura 5.11).

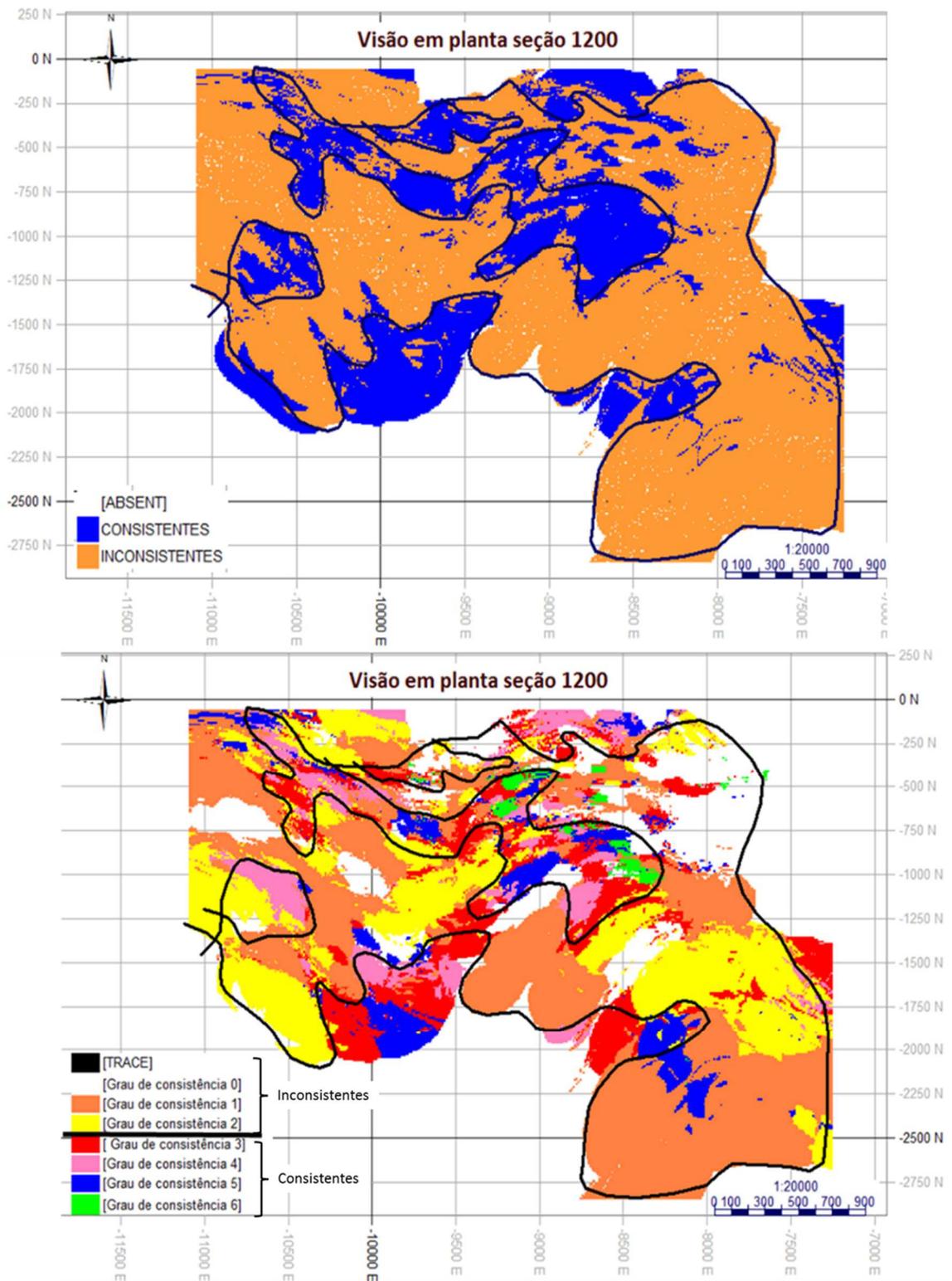


Figura 5.11: Seção horizontal cota 1200, comparando a distribuição de classes inconsistentes (A) Linha preta e o mapa de tipologia geomecânica grau de consistência (B).

Conforme observa-se na figura e na tabela 5.9, a distribuição espacial dos blocos estimados por tipologias apresenta 10% de blocos estimados de forma discrepante ao modelo agrupado.

Tabela 5.9: Tabela apresentando validação da classificação da estimativa do modelo agrupado, com o modelo tipológico.

<b>Validação</b>	<b>Nº de Blocos</b>	<b>Porcentagem</b>
Discrepantes	314214	10%
Coerentes	2744275	90%
Total	3058489	100%

Após a varredura dos blocos estimados de forma discrepantes, os mesmos foram utilizados como alvo para pós processamento de cada tipologia, reclassificando os blocos de acordo com a probabilidade local obtida por média móvel das classes dos blocos na vizinhança.

Na configuração dessa lógica, primeiro o bloco é classificado em “inconsistente ou consistente” considerando modelo agrupado, depois é feita uma análise de quantidade de blocos por cada classe no entorno no mesmo. Exemplo, um bloco classificado como tipologia 5; porém a vizinhança local predomina tipologia inconsistente (0, 1 ou 2). No exemplo, é verificado que 3 dos blocos limítrofes estão na classe 2. Esse bloco então será reclassificado como 2.

Após essa reclassificação essa discrepância reduziu para um percentual de 5%.

#### 5.3.4.4 Validação em relação a estimativa do percentual do material retido na peneira grossa

Foi também aqui considerada a mesma validação determinada no banco de dados original (Ver capítulo 4) com o percentual de material retido na peneira grossa.

O modelo das tipologias estimadas foi incluído no modelo geológico onde esse percentual já havia sido estimado pela equipe de recursos da VALE ferrosos; e portanto, possibilitando a comparação com as tipologias de grau de consistência, seguindo a logica:

Baixa resistência: GC 0, GC 1 e GC 2 → Friável (>25% retido)

Média resistência: GC 3, GC 4 → Médio (25 a 50% retido)

Alta resistência: GC 5 e GC 6 → Grosseiro (> 50% retido)

A percentagem de blocos discrepantes do modelo tipológico comparado ao de G1 (Percentual de material retido na peneira mais grossa > 6,3mm) foi de 17% conforme pode ser observado na tabela 5.10.

Tabela 5.10: Tabela resultado da comparação dos blocos estimados com a classificação por G1.

Validação	Nº de Blocos	Porcentagem
Discrepantes	514214	17%
Coerentes	2544275	83%
Total	3058489	100%

O percentual de discrepantes encontrados na base de dados original foi de 17,65%, próximo da percentagem obtida na validação pelo modelo de G1.

#### 5.3.4.5 Validação visual das categorias relacionadas as litologias e distribuição das classes do depósito

Após a reclassificação e validação do retido na peneira grosseira, foi feita uma validação visual considerando a distribuição de cada tipologia geomecânica dentro de cada corpo litológico.

Essa inspeção visual revisa seções verticais e horizontais a cada intervalo da malha amostral. (Figura 5.12).

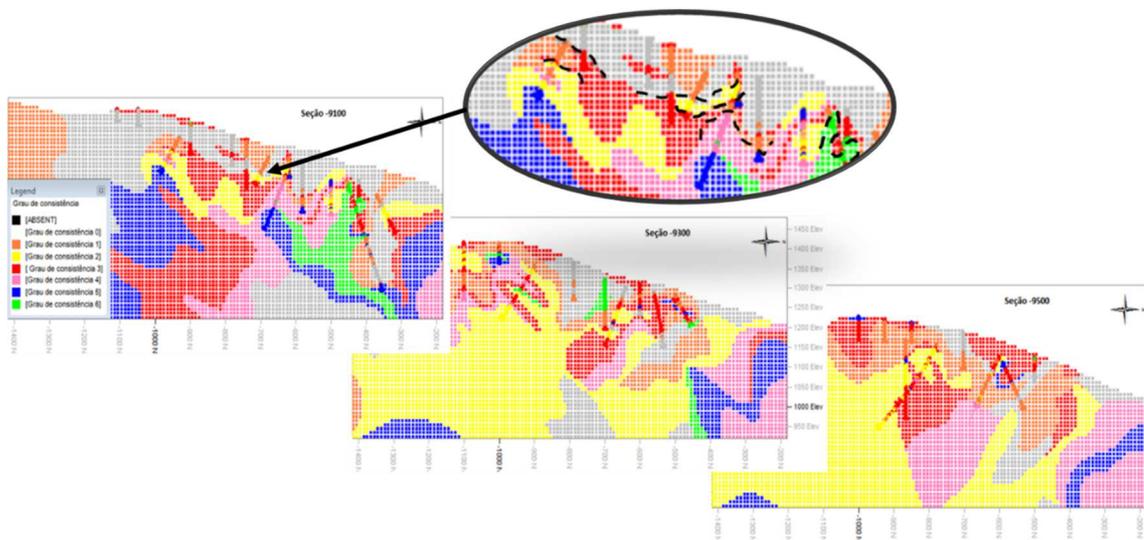


Figura 5.12: Exemplo de validação visual em seções do modelo tipológico estimado em relação as amostras nos furos de sonda.

Na validação visual, foi possível validar os intervalos amostrados com o modelo de blocos estimados, sendo que não houveram pontos que não tenham sido respeitadas as amostras.

Foram também comparadas a projeção das tipologias geomecânicas do grau de consistência com o mapa temático das classes geomecânicas (Figura 5.13).

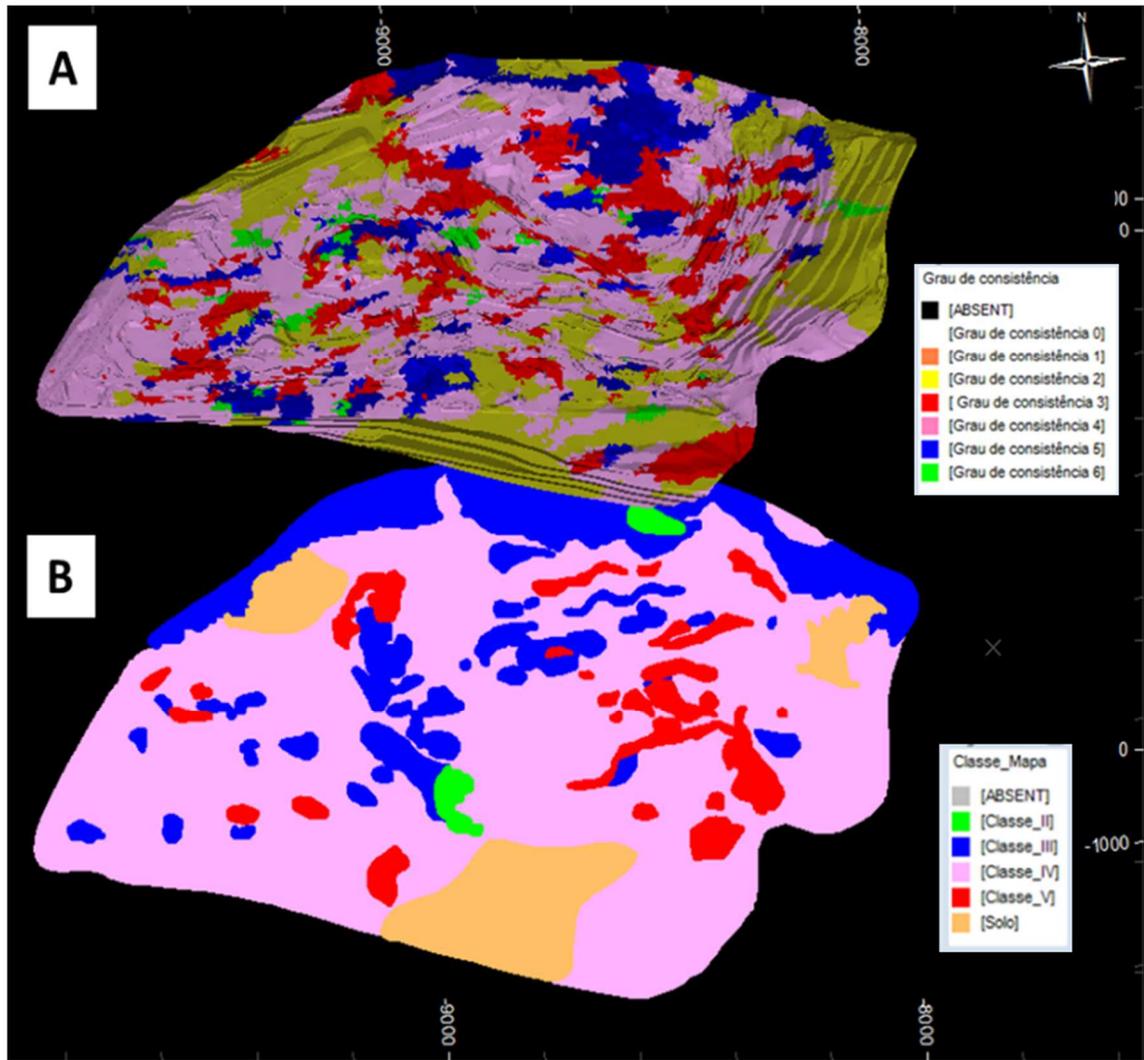


Figura 5.13: Comparação entre mapa de classes geomecânicas (A) e projeção do grau de consistência na superfície topográfica da data do mapeamento (B).

A comparação da projeção do grau de consistência na topografia com o mapa temático de classes geomecânicas, apresenta similaridade regional, determinando porções de maiores resistências nas zonas de classes de maciços de alta qualidade e baixas resistências nas porções mapeadas com classes de maciços de baixa qualidade, ou seja, classes de maciço II e III e IV com resistências variando entre 4, 5 e 6 e classe V e solo em regiões de resistência variando de 0 a 3. Essa validação qualifica a distribuição espacial das classes geomecânicas no modelo estimado.

Além da comparação com a projeção da litologia na topografia da época da construção dos mapas temáticos, foi feita uma validação da distribuição da litologia original com a projeção na cava final das litologias reclassificadas utilizando grau de consistência (Figura 5.14).

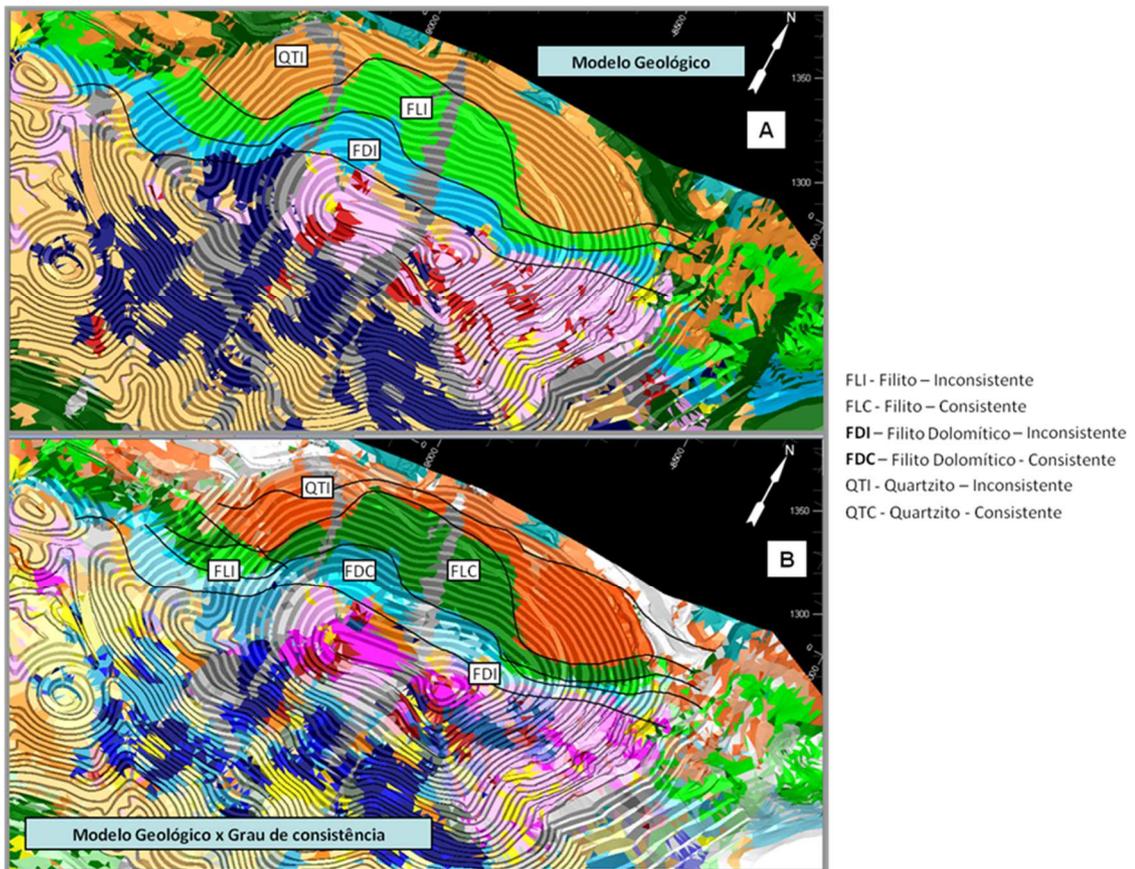


Figura 5.14: Comparação da projeção das tipologias projetadas na cava final sem a redistribuição da resistência estimada (A) com a projeção das litologias com a redistribuição através da consistência (B).

Nessa projeção, foi possível observar que as rochas estéreis possuem uma consistência maior à medida que vão se afastando da mineralização. Notoriamente, as zonas mineralizadas em ferro sofreram algumas influências de eventos deformacionais, remobilização mineral entre outros eventos que diminuem a resistência da rocha intacta claramente observado nessa revisão visual.

#### 5.3.4.6 Validação entre modelo estimado e mapeamento geomecânico superficial

Considerando ainda uma validação dos blocos com grau de consistência atribuídos pela moda com o mapeamento geomecânico de superfície, foram encontrados 15% de discrepâncias (Figura 5.15).

Mapeamento do grau de consistência na projeção do modelo de blocos estimados na topografia

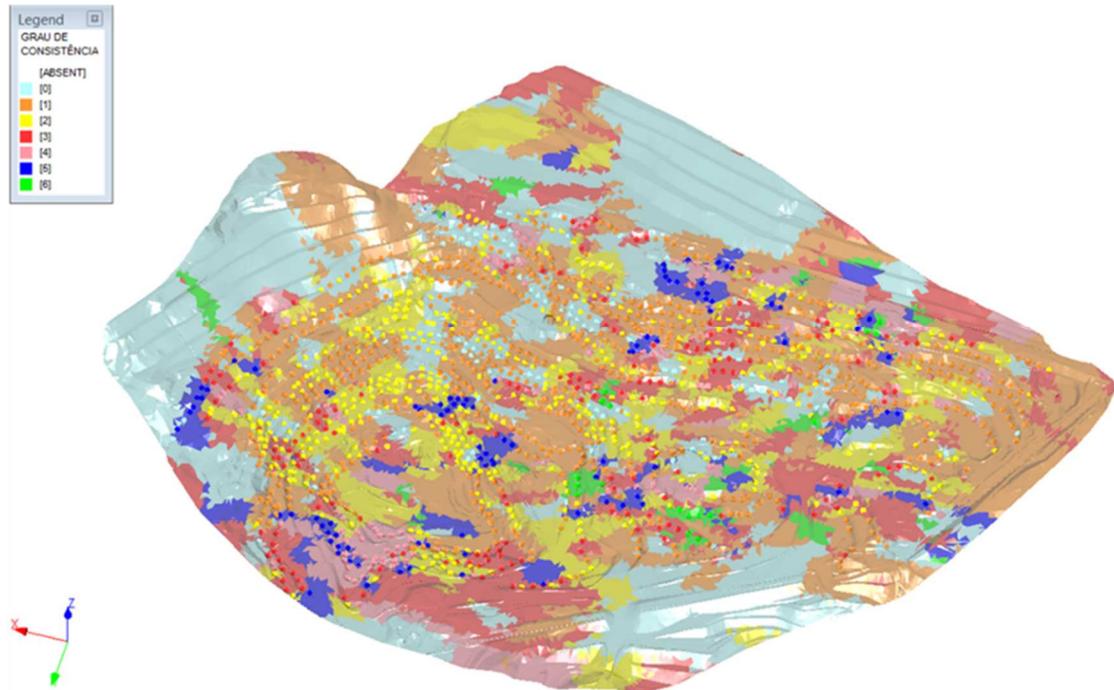


Figura 5.15: Comparação entre a projeção do grau de consistência estimado na topografia da época do mapeamento geomecânico, com os pontos do mapeamento.

Considerando todo o viés na fase de coleta dos dados, tais como suporte pois no mapeamento é considerado o maço rochoso enquanto no testemunho é considerado somente o trecho em caracterização, descrição dos pontos de mapeamento feito por um único profissional especialista no assunto, 15% de discrepância é um valor aceitável principalmente porque ocorrem nos trechos de difícil separação (grau de consistência 3 e 4).

#### 5.3.4.7 Discussão dos resultados das validações

A krigagem dos indicadores para a variável grau de consistência conseguiu delinear de forma eficaz as 7 tipologias geomecânicas, apresentando uma distribuição da

consistência/resistência das litologias compatíveis com o observado nos mapeamentos e projeções nas cavas finais.

A utilização da anisotropia dinâmica para definição dos contornos considerando as delimitações interpretadas geologicamente e acrescidas das orientações estruturais, permitiu o acompanhamento dos limites geomecânicos sem necessidade de dados imputados a partir da interpretação de seções paralelas, construídas com dados de sondagens e afloramentos.

Há de se considerar que em áreas com maior adensamento das amostras, os contornos foram mais acurados, possibilitando visualmente a determinação de regiões que necessitam de mais amostras, e que podem ser adensadas no desenvolvimento da mina por mapeamento geomecânico das frentes de lavra bem como na extensão dos furos de sondagem nas rochas estéreis excaixantes.

Os materiais de contato brusco e com espessuras muito pequenas sofrem influências das amostras de maior resistência vizinhas, sendo necessário uma mudança de estratégia, estimando somente dentro dos limites dos corpos desses litotipos reduzindo a influência das amostras na estimativa.

## 6 RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO UNIAXIAL

Este capítulo, trata de uma proposta para se obter, a partir das classes da variável categórica grau de consistência, resultado da krigagem apresentada no capítulo 5, em valores de resistência à compressão uniaxial. Usam-se das relações construídas por Bieniawski (1974).

### 6.1 DISTRIBUIÇÃO DA RESISTÊNCIA UNIAXIAL POR CATEGORIA

Nas etapas iniciais dos projetos, se caracteriza o parâmetro de resistência nos depósitos, preliminarmente, através da descrição geomecânica do grau de consistência, conforme abordado nos capítulos anteriores. Nas etapas subsequentes, são necessários testes laboratoriais que fornecem maior exatidão aos parâmetros de resistência utilizados, levando-se sempre em consideração a norma que determina o número de ensaios por categoria.

Porém, para se espacializar os resultados dos ensaios, é necessária uma amostragem densa, aportando aos projetos uma grande dificuldade na criação da base de dados capaz de ser espacializada e por consequência criar-se um modelo de blocos das propriedades geomecânicas.

Considerando o potencial ganho na melhoria dos projetos conhecendo-se à distribuição do valor da resistência uniaxial bloco a bloco, tanto para o estudo de estabilidade das geometrias dos taludes quanto para um planejamento mais adequado, escolheu-se definir uma relação entre a distribuição dos blocos estimados do grau de consistência e os ensaios por categoria.

Para testar a técnica, foi utilizada a relação definida por Bieniawski (1974), onde para a definição da classificação RMR, uma grande quantidade de ensaios diretos (UCS) e indiretos (PLT) foram executados para cada um dos níveis de classe de consistência em diversas litologias. Os resultados desses ensaios definiram uma tabela de referência que correlaciona as categorias de descrição tátil visual, com os intervalos de resultados de resistência uniaxial (Tabela 6.1).

Tabela 6.1: Tabela de descrição da resistência a compressão uniaxial proposta por Brown, 1981

Grau de consistência	Descrição	Resistência (MPa)	
		Mínima	Máxima
0	EXTREMAMENTE MACIA	0,25	1
1	MACIA	1	5
2	MEDIA MACIA	5	25
3	MEDIA	25	50
4	MEDIA DURA	50	100
5	DURA	100	250
6	EXTREMAMENTE DURA	250	400

*\*Range de resistência do grau de consistência 6 limitado aos valores dos resultados dos ensaios.*

Considerando que a informação do grau de consistência nas sete categorias está amplamente modelada ao longo do depósito, conforme abordado no capítulo 5 (Figura 6.1), é possível atender a norma do ISRM (Normas ASTM D2938-95 e D4543-01) quanto a volume e distribuição.

Essa norma determina que, para se caracterizar a resistência uniaxial de uma categoria, são necessários ensaiar pelo menos 10 amostras por categoria por litologia, considerando cada camada de "solo idealizada" ou camada de intemperismo para o perfil geológico. Deve-se também garantir, que as amostras sejam coletadas em três ou mais locais diferentes bem distribuídas ao longo do depósito.

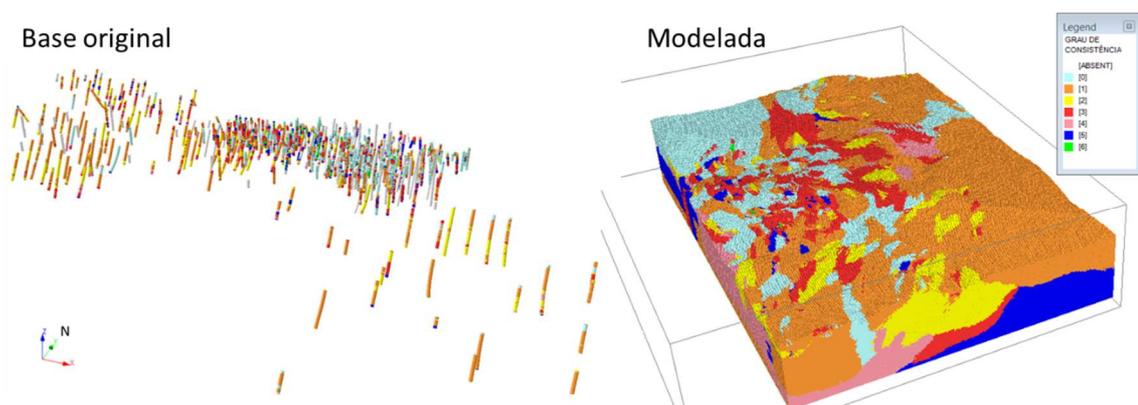


Figura 6.1: Vista em perspectiva das amostras de descrição do grau de consistência distribuídas ao longo do depósito e sua modelagem ao longo do depósito.

Foi então possível expressar ou simular o valor da resistência uniaxial bloco a bloco, inicialmente caracterizado pelo grau de consistência.

Vale ressaltar, que após a validação da técnica utilizando a tabela proposta pelo ISRM, será necessário construir a própria base e ensaios do depósito, considerando litologia, classe e distribuição igualmente construído na base testada.

Várias podem ser as técnicas para classificar o valor da resistência uniaxial a partir da probabilidade do grau de consistência, sendo que nesse estudo duas foram testadas, sendo assim expressas:

1. Metodologia 01: Média ponderada atribuída pela probabilidade por categoria relacionada com seu valor médio da resistência uniaxial (UCS) de cada classe.
2. Metodologia 02: Considera um valor de resistência simulada tirada aleatoriamente de uma distribuição uniforme dos possíveis valores de UCS da classe ao qual o bloco pertence.

Ambas as possibilidades fornecerão a expectativa da resistência uniaxial do bloco.

## 6.2 TRANSFORMAÇÃO DO RESULTADO DA VARIÁVEL CATEGÓRICA EM VARIÁVEL CONTÍNUA

Considerando as metodologias acima propostas para atribuir o valor de resistência uniaxial aos blocos, a metodologia 01 basicamente se propõe a definir inicialmente um valor médio da distribuição de resistência uniaxial baseada nos valores de máximo e mínimo proposta por ISRM (1981) e considerando essa distribuição como uniforme (Tabela 6.2).

Tabela 6.2: Tabela de descrição da resistência a compressão uniaxial proposta por ISRM, 1981 (Modificada).

Grau de consistência	Descrição	Resistência (ISRM) - Mpa		
		Mínima	<b>Média</b>	Máxima
0	EXTREMAMENTE			
	MACIA	0,25	<b>0,625</b>	1
1	MACIA	1	<b>3</b>	5
2	MEDIA MACIA	5	<b>15</b>	25
3	MEDIA	25	<b>37,5</b>	50
4	MEDIA DURA	50	<b>75</b>	100
5	DURA	100	<b>175</b>	250
6	EXTREMAMENTE			
	DURA	250	<b>325</b>	<b>400</b>

Acima a tabela definida pela ISRM é apresentada de forma modificada, onde a distribuição do UCS em relação a categoria de grau de consistência considera a distribuição uniforme com média simples.

Diante disso, as probabilidades obtidas a cada bloco no processo de krigagem da indicatriz do grau de consistência de cada categoria, é multiplicada pela média ou esperança matemática da resistência uniaxial de cada classe, considerada distribuída uniformemente (Gráfico 6.1).

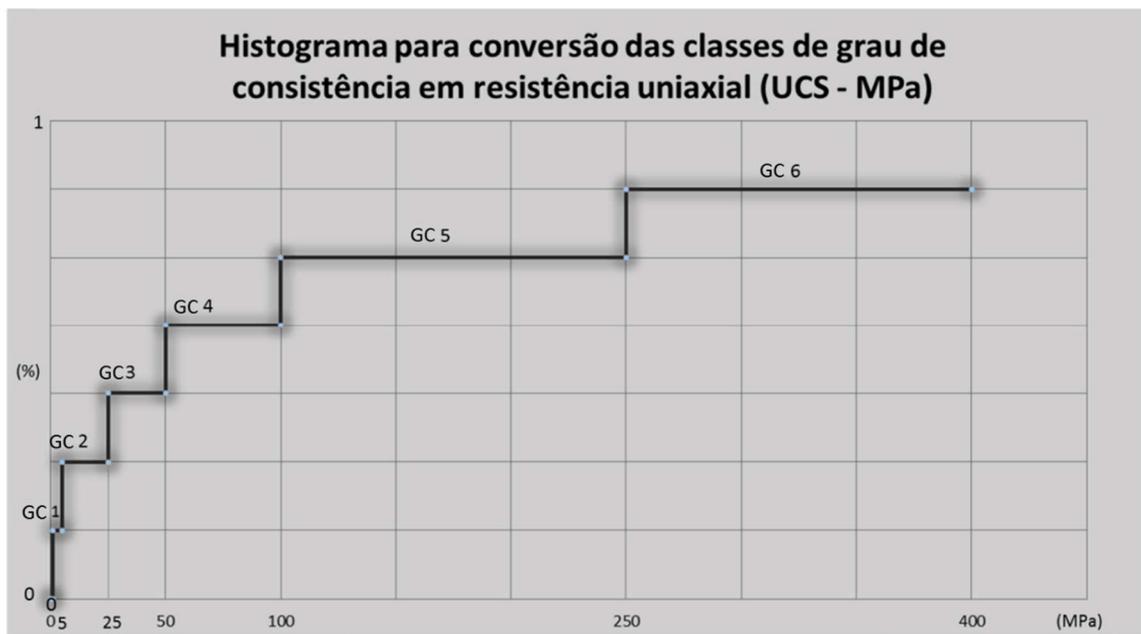


Gráfico 6.1: Histograma exemplificando o método de atribuição de valor simulado de resistência uniaxial por bloco.

A metodologia 01 é então expressa pela formulação da equação 6.1

$$UCS_x = F(x_0) * E(UCS_0) + F(x_1) * E(UCS_1) + F(x_2) * E(UCS_2) + F(x_3) * E(UCS_3) + F(x_4) * E(UCS_4) + F(x_5) * E(UCS_5) + F(x_6) * E(UCS_6) \quad \text{Eq.(6.1)}$$

onde o valor esperado de UCS é a somatória da probabilidade de cada categoria  $F(x)$  multiplicada pelo valor médio esperado para a categoria.

O cálculo da resistência baseado na metodologia 01 pode ser verificada também de forma simplificada no exemplo da Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Tabela exemplo de classificação de um bloco através da ponderação pelo indicador.

<b>Categoria atribuída Aos blocos por IK</b>	<b>Probabilidade por categoria do bloco</b>	<b>UCS (Média) de cada categoria</b>	<b>(Probabilidade * UCS (média))</b>
GC0	0%	0,62	0
GC1	0%	3	0
GC2	10%	15	1,50
GC3	15%	37,50	5,63
GC4	20%	75	15,00
GC5	55%	175	96,25
GC6	0%	325	0
<b>Resistência total prevista</b>			<b>118.38</b>

\* GC= grau de consistência

No exemplo, a célula da coluna probabilidade é multiplicada pela célula da coluna UCS média da categoria e ao final todas as linhas da coluna “Probabilidade x UCS” é somada e o valor final será o valor de UCS atribuído ao bloco.

Nessa metodologia, os resultados obtidos mostram-se bastante aderente a magnitude de valores esperados na maioria das categorias.

Nas categorias 0, 1 cuja característica do maciço se assemelham ao solo ou a um material transitório entre solo e rocha, portanto, com um alcance de distribuição do UCS muito pequeno, a atribuição do valor de UCS através desse método sofre um acréscimo significativo nos valores a um menor percentual das classes cujos valores de UCS são altos, caracterizadas como rochas de alta resistência. Em geral quando acontece esse fenômeno o UCS final atribuído, leva o bloco a uma mudança de classe (Tabela 6.4).

Tabela 6.4: Tabela exemplificando acréscimos de resistência nos blocos devido a participação do percentual de material resistência.

<b>Categoria atribuída aos blocos por IK</b>	<b>% Probabilidades por categoria</b>								<b>UCS (Mpa) Calculado</b>	<b>UCS (Mpa) da categoria</b>	<b>Nova Classe</b>
	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>				
GC1	7%	71%	0%	0%	0%	22%	0%	<b>41</b>		3	
GC1	5%	91%	0%	4%	0%	0%	0%	4,3		-	
GC1	10%	72%	0%	18%	0%	0%	0%	<b>9</b>	(1 -5)	2	
GC1	0%	70%	5%	5%	0%	10%	10%	<b>55</b>		4	
GC1	20%	60%	20%	0%	0%	0%	0%	5		-	

\*GC=Grau de consistência

O exemplo da tabela exemplo, apresenta cinco blocos que foram previamente classificados como categoria de grau de consistência 1 na krigagem dos indicadores através da moda e os percentuais de probabilidade distribuída em todas as categorias.

Na linha 1 e 4 cuja probabilidade de serem classificados como categoria 5 e 6 estão presentes na distribuição, o valor final de UCS está muito acima da expectativa, transferindo o bloco para as categorias 3 e 4 respectivamente.

Esse resultado demonstra a necessidade de estimar os blocos de baixa resistência 0 e 1 separados dos de alta resistência, para que as classes transitórias não sejam efetivamente afetadas, ou que seja feito um isolamento das classes através da avaliação primária do resultado do bloco por IK antes da atribuição dos valores de UCS.

Exemplos:

Se o bloco for classificado como categorias 0 e 1 por IK, o UCS atribuído ao bloco será o UCS médio da categoria, se classificado como 2,3,4,5 e 6 utiliza a equação 6.1.

Se o percentual de probabilidade do bloco for maior que 70% das classes 0 e 1, atribuir o valor médio da categoria de maior percentual aos blocos, se não aplicar a equação 6.1.

Já a metodologia 02, considera um valor de resistência simulada tirada aleatoriamente de uma distribuição uniforme dos possíveis valores de UCS da classe ao qual o bloco pertence.

De uma maneira genérica, os dados são simulados a partir de uma tiragem aleatória de um intervalo (a, b) (Gráfico 6.2), que no caso do estudo é o máximo e mínimo de cada intervalo de classe de UCS. Portanto, inicialmente cada bloco é visitado e verificada qual classe foi atribuída usando krigagem dos indicadores das categorias. Da classe atribuída ao bloco (moda das categorias) monta-se a distribuição de probabilidades local uniforme baseada nos valores máximos e mínimos dos ensaios.

Matematicamente, a distribuição uniforme é a probabilidade de se gerar qualquer ponto em um intervalo contido no espaço amostral proporcional ao tamanho do intervalo. Então a distribuição uniforme geraria um número finito de resultados com chances iguais de acontecer.

A distribuição uniforme de uma variável aleatória contínua X é caracterizada pela função (Equação 6.2) de densidade de probabilidade:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{1}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad \text{Eq.(6.2)}$$

onde  $a$  e  $b$  são os parâmetros da distribuição, indicando os valores mínimo e máximo respectivamente (Gráfico 6.1).

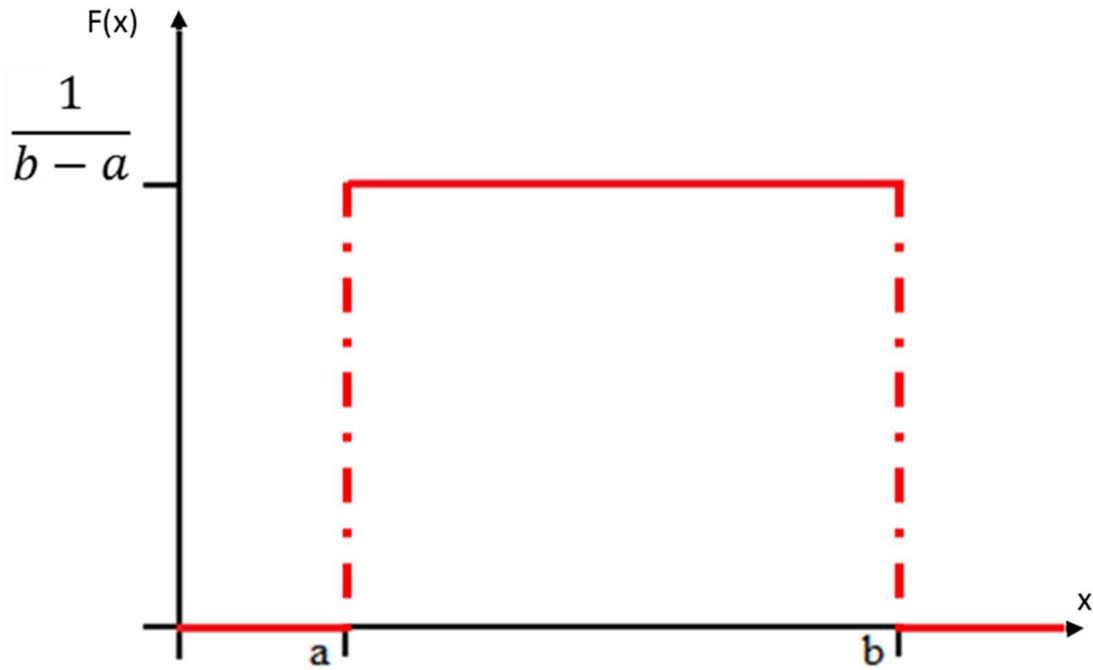


Gráfico 6.2: Gráfico da função densidade da distribuição uniforme em  $[a,b]$ .

E a função de sua distribuição acumulada é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a \leq x \leq b \\ 0 & \text{se } x > b \end{cases} \quad (\text{Eq. 6.3})$$

Representada graficamente (Gráfico 6.2),

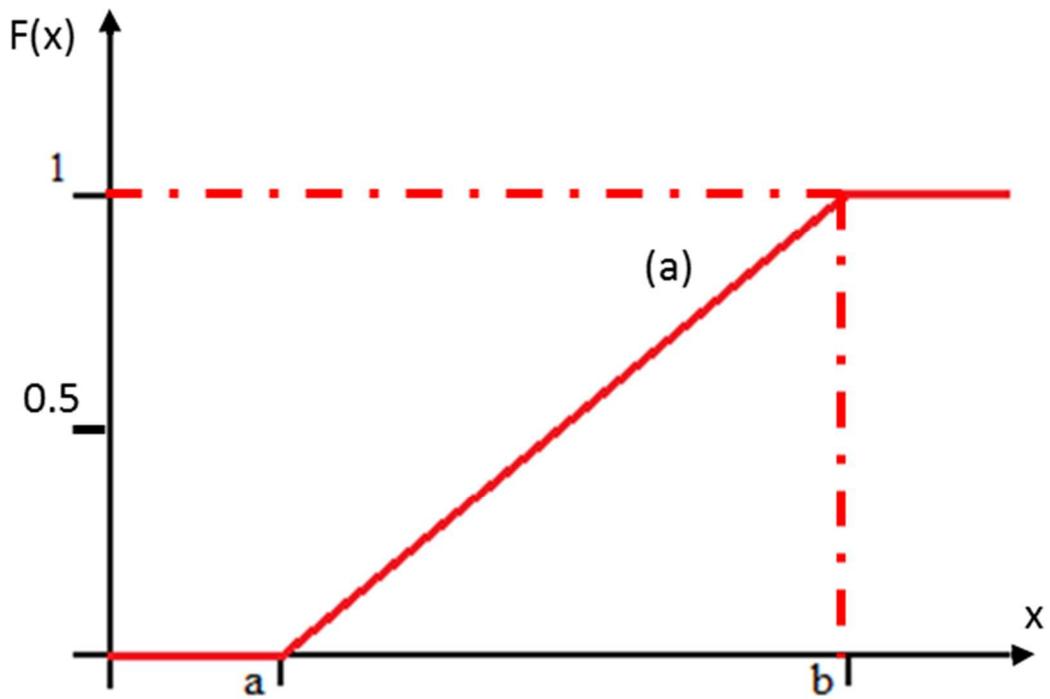


Gráfico 6.3: Gráfico da função de distribuição acumulada  $[a,b]$ .

Em resumo, basicamente o processo usa da probabilidade obtida por IK para cada classe do grau de consistência atribuída ao bloco na etapa inicial, relacionando essas probabilidades com os valores de UCS através do seu histograma de distribuição uniforme de igual probabilidade por categoria, conforme gráficos (Gráfico 6.4).

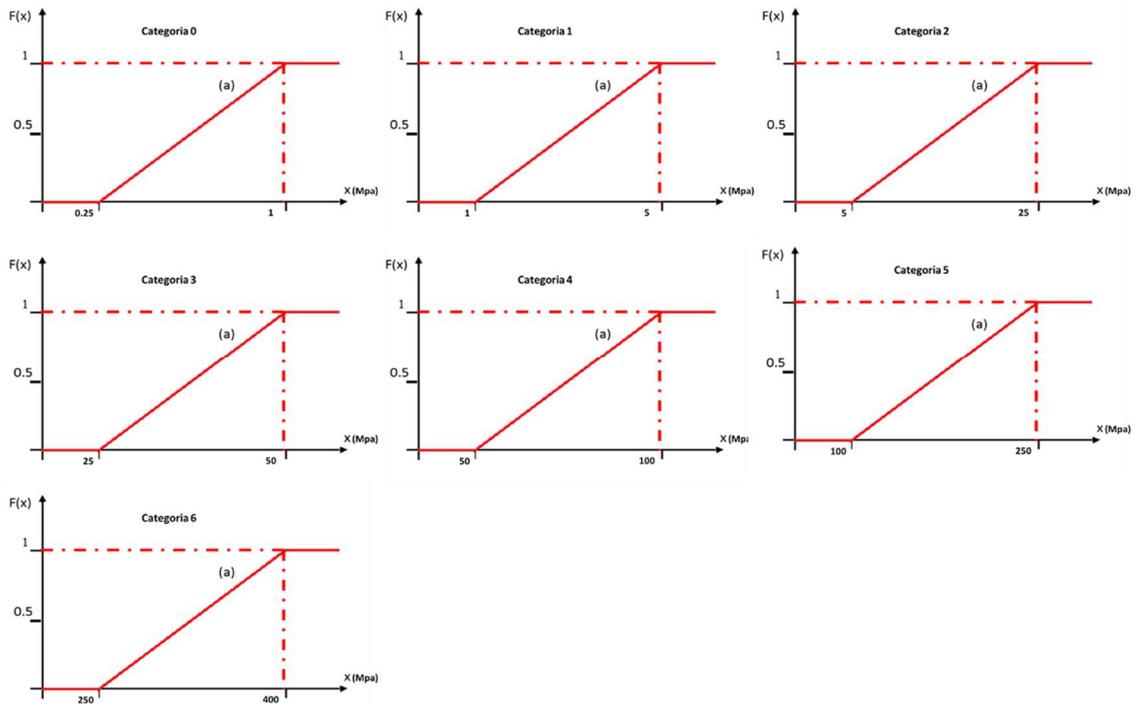


Gráfico 6.4: Gráficos da função de distribuição acumulada para cada categoria.

Em resumo, a formulação para definição do UCS pode ser definida por:

$$UCS_x = F(x) * (b - a) + a \quad (\text{Eq. 6.4})$$

onde o valor esperado de UCS é o valor da probabilidade  $F(x)$  obtida por uma simulação randômica, multiplicada pela função da distribuição acumulada entre os valores de máximo e mínimo do range da distribuição dos ensaios de UCS.

A classificação da resistência baseada na metodologia 02 pode ser verificada no exemplo da Tabela 6.5.

Tabela 6.5: Tabela exemplo mostrando a formulação para atribuição do valor de UCS por cada categoria definida por IK através da metodologia 02.

Bloco aleatório	Categoria atribuída aos blocos por IK	Formulação baseada na distribuição UCS de cada categoria	UCS aleatório
1	GC0	ALEATÓRIO () * (1-0,25) + 0,25	0,61
2	GC1	ALEATÓRIO () * (5-1) + 1	4,75
3	GC2	ALEATÓRIO () * (25-5) + 5	17,01
4	GC3	ALEATÓRIO () * (50-25) + 25	48,29
5	GC4	ALEATÓRIO () * (100-50) + 50	53,51
6	GC5	ALEATÓRIO () * (250-100) + 100	216,25
7	GC6	ALEATÓRIO () * (400-250) + 250	367,61

\*GC= Grau de consistência

Esse valor de resistência prevista para o bloco será também aleatório, podendo ser simulado quantas vezes for solicitado, prevendo valores diferentes e podendo então representar um histograma do resultado bloco a bloco, com sua média e dispersão.

Para ambos os métodos, o resultado dessa variável transformada, é a expectativa de um valor de resistência uniaxial bloco a bloco (Figura 6.2).

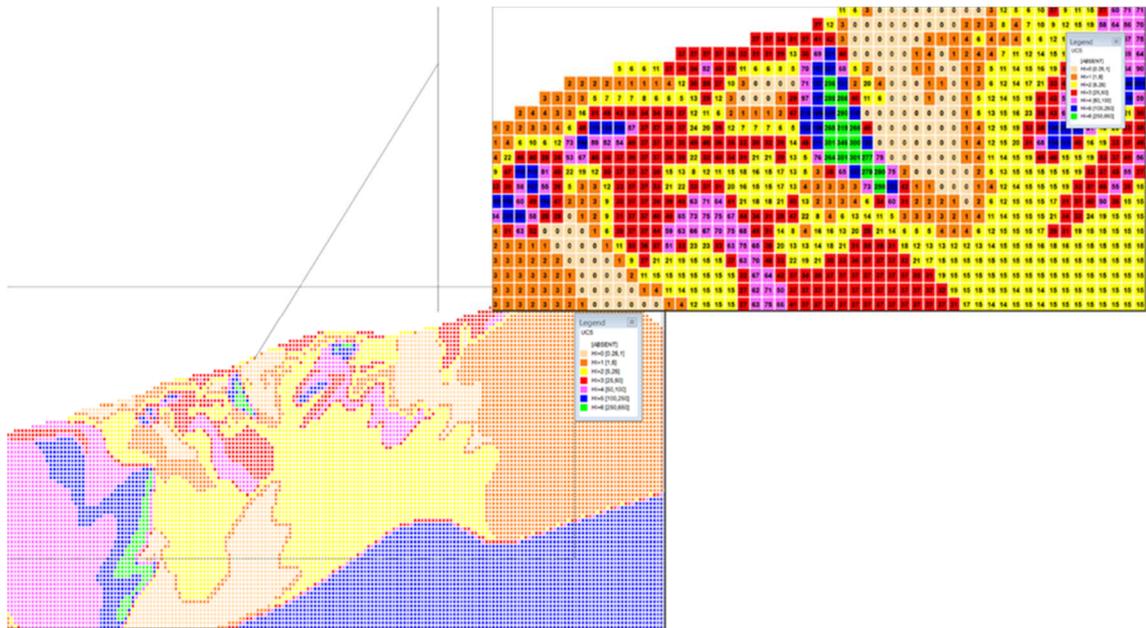


Figura 6.2: Seção tipo -9350 apresentando no detalhe o valor da resistência uniaxial atribuída ao bloco.

O resultado dos valores de UCS atribuídos aos blocos usando as duas metodologias, podem ser comparados na Tabela 6.6, onde são apresentados pela média da classe de consistência atribuída ao bloco pela krigagem da indicatriz.

Tabela 6.6: Tabela comparativa dos valores médios do UCS atribuídos aos blocos usando as duas metodologias.

Categoria atribuída ao bloco (IK)	UCS_Mpa médio (Metodologia 01)	UCS_Mpa médio (Metodologia 01) isolando categorias 0 e 1	UCS_Mpa médio (Metodologia 02)
GC0	9	0,63	0,63
GC1	10	3	3
GC2	20	20	15
GC3	46	46	38
GC4	72	72	75
GC5	167	167	175
GC6	259	259	325

GC= Grau de consistência

Em geral os valores médios do UCS apresentam coerentes com a expectativa em ambas as metodologias, com exceção das classes de grau de consistência 0 e 1 na metodologia 01. Nesses casos os valores de UCS médio foram afetados por percentuais de probabilidade de categorias de alta resistência, conforme abordado no setor de resultados para essa metodologia.

Esse comportamento não é observado na metodologia 02, visto que as simulações estão sendo limitadas aos valores máximos e mínimos. Esse fenômeno pode ser melhor observado visualmente numa comparação da distribuição das categorias de grau de consistência atribuídas ao bloco por IK em uma seção do modelo de blocos, e a mesma distribuição considerado a atribuição do UCS por ambas as metodologias (Figura 6.3).

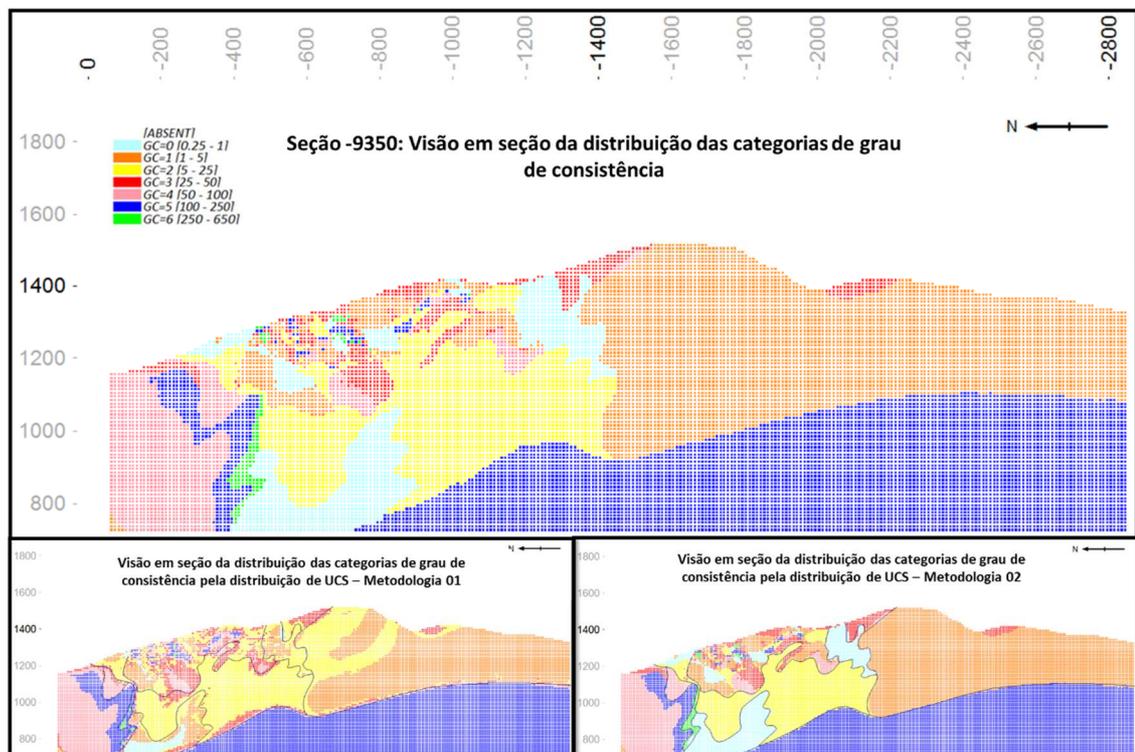


Figura 6.3: Seção exemplo para comparação da distribuição das categorias pelo UCS atribuídos aos blocos pelas metodologias 01 e 02.

Na figura 6.3 é possível observar que nos limites definidos em preto na seção A utilizando a metodologia 01 a classe de grau de consistência 0 e 1 em geral foram migradas para as classes 1 e 2 e as demais tiveram uma pequena transferência nas bordas (Figura 6.3 e Tabela 6.7).

Matematicamente a transferência de classe do bloco é observada na tabela 6.6, onde os valores de UCS coerentes com a categoria por IK estão marcados em azul, em amarelo a transferência dos blocos para classes acima ou abaixo e em vermelho são marcados os

percentuais de blocos cuja influência da resistência média das categorias de maior resistência que elevou o valor de UCS final transferindo o bloco de classes muito além da expectativa.

Tabela 6.7: Tabela apresentando a transferência de categoria dos blocos após atribuir a resistência uniaxial pela metodologia 01.

Grau de Consistência	Resistência uniaxial						
	0 0.25 a 1	1 1 a 5	2 5 a 25	3 25 a 50	4 50 a 100	5 100 a 250	6 >250
0	54%	17%	17%	6%	4%	1%	0%
1	0%	67%	24%	6%	4%	0%	0%
2	0%	0%	83%	12%	4%	0%	0%
3	0%	0%	10%	65%	23%	3%	0%
4	0%	0%	0%	9%	85%	5%	0%
5	0%	0%	0%	0%	2%	98%	0%
6	0%	0%	0%	0%	2%	17%	81%

O aumento da resistência dos blocos é claramente observado nas porções mais superficiais do modelo onde em geral a distribuição do material de baixa resistência é mais expressiva (Figura 6.4).

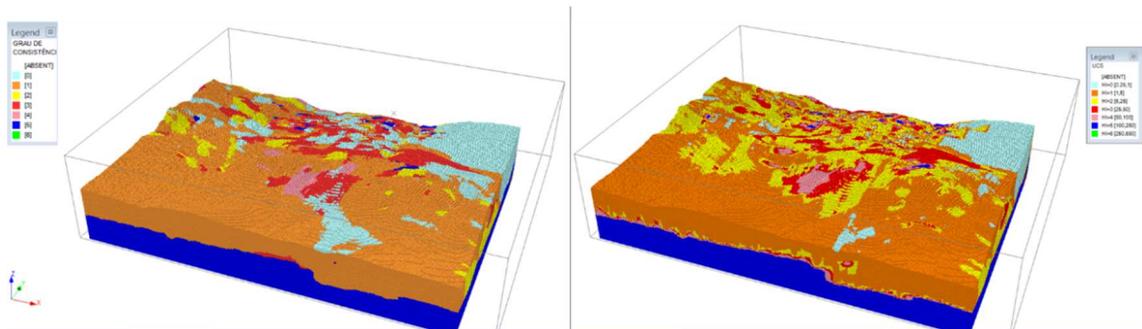


Figura 6.4: Comparação entre o modelo de blocos classificado por categoria e pela expectativa da resistência uniaxial.

Usando a correção proposta no início dessa seção para tratar a atribuição do UCS na metodologia 01, onde os blocos classificados com as categorias 0 e 1 na primeira etapa da classificação por IK os mesmos terão como valor de UCS a média da categoria e as demais categorias terão seu UCS calculado pela equação 6.1.

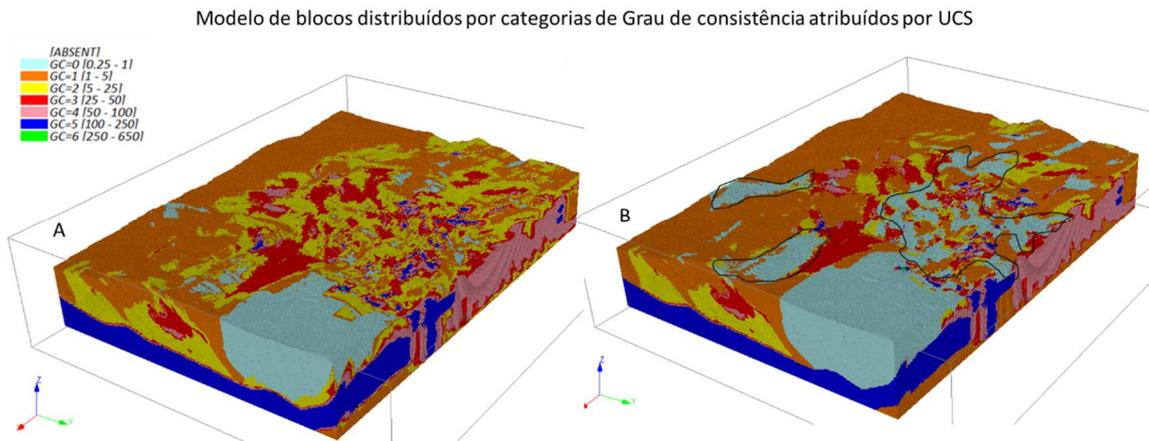


Figura 6.5: Comparação entre o modelo de blocos com a distribuição das categorias de grau de consistência atribuídos pelo UCS classificados pela metodologia 01 (A) e a mesma com a revisão para categorias 0 e 1 (B). B- As linhas em preto demonstram a preservação das categorias 0.

Na figura 6.5 observa-se que quando os tipos de categorias são tratados de forma diferentes, as de “solos” com as de “alta resistência”, os solos são preservados e suas características de baixa resistência não são afetadas e transferidas de classe.

### 6.3 VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA ATRIBUÍDA AOS BLOCOS PELAS METODOLOGIAS ESTUDADAS

No intuito de verificar a validade da classificação dos blocos usando a correlação entre o grau de consistência e os ensaios laboratoriais de resistência uniaxial (UCS), foram selecionadas na base de testemunhos antigos, amostras em pontos estratégicos distribuídas ao longo do depósito de forma que representassem a maior parte dos litotipos estimados. Muitas litologias, devido à perda de umidade verificada na fase de coleta, foram descartadas.

Houve empenho na busca por representatividade espacial ao longo do depósito, com o propósito de verificar a eficácia tanto da metodologia de estimativa das classes de grau de consistência por IK, quanto das metodologias de atribuição dos valores de UCS (Figura 6.6).

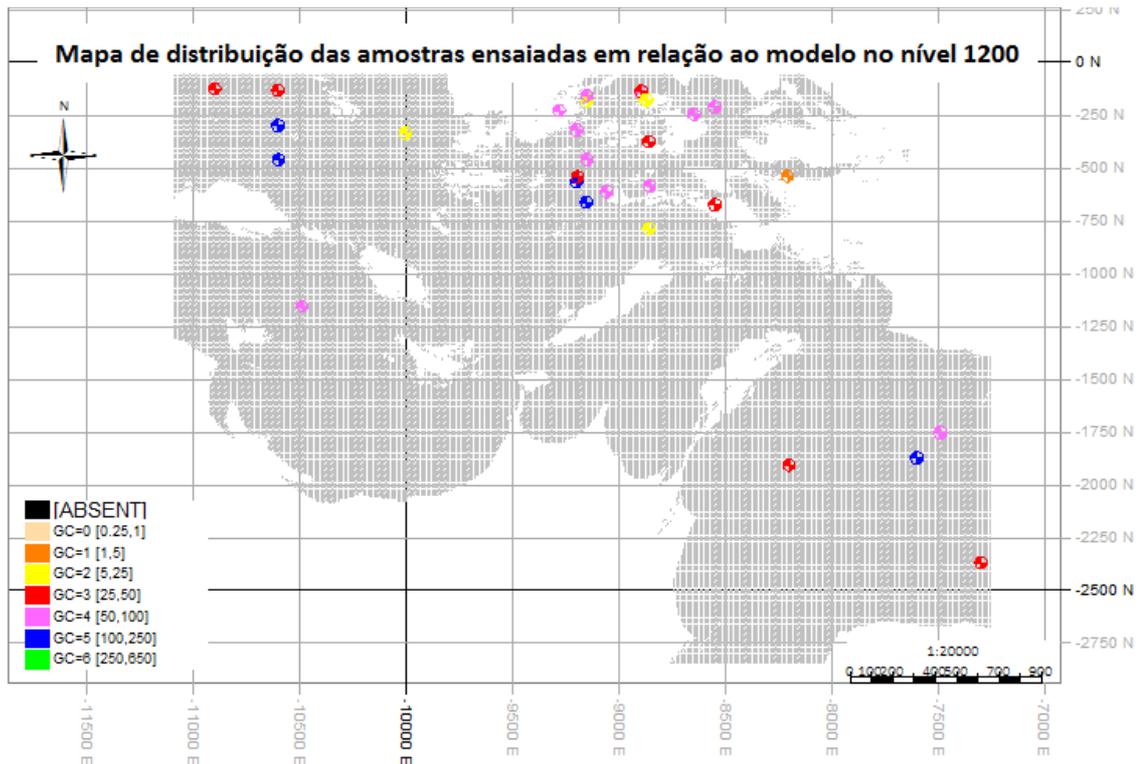


Figura 6.6: Visão geral das amostras selecionadas para ensaios de resistência uniaxial (UCS) e o limite do modelo de blocos.

Em geral, para esse tipo de ensaio, a resistência mínima para a coleta é da classe 3 com UCS acima de 25 MPa, porém nessa campanha foram coletadas muitas amostras com resistência mais baixa pois as rochas que possuem argilominerais na matriz mostraram potencial para retirada de corpos de prova intactos. Um importante ponto a se ressaltar é que as características de preservação dos corpos de prova, podem ser alteradas pela degradação devido ao tempo de exposição as intempéries ou pela perda de umidade ao longo do tempo de arquivamento do testemunho. Considerando que a descrição geomecânica é feita logo após a sondagem, pode ocorrer uma diferença significativa entre o estado de conservação do material que foi coletado da base histórica para o ensaio devido ao tempo e condições do armazenamento.

Esse fenômeno ocorreu em grande parte dos materiais argilosos que foram ensaiados (Tabela 6.8), tendo essas amostras sido descartadas pois enviesaram o resultado final.

Tabela 6.8: Tabela de ensaios que foram expurgados devido a sua perda e resistência observada na fase de análise do resultado.

Amostras	Litologia	UCS (Mpa)	Grau de alteração descrição	Grau de consistência descrição	Grau de consistência ensaio	Idade da amostra	Justificativa
TAM-FSD-02-0037-ER003	Rocha intrusiva	4,23	2	4	1	14	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSD-03-0011-ER004	Filito Sericítico	30,5	2	4	3	13	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSD-04-0011-ER005	Rocha intrusiva	44,8	2	4	3	12	Material muito alterado in situ
TAM-FSD-06-0001-ER003	Rocha intrusiva	20,3	2	4	2	10	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSD-06-0031-ER002	Rocha intrusiva	30,78	2	4	3	10	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSG-04-0001-ER003	Filito Sericítico	21,2	2	4	2	12	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSG-04-0001-ER006	Rocha intrusiva	68,2	1	4	4	12	Material muito alterado in situ
TAM-FSG-04-0001-ER005	Rocha intrusiva	26,9	2	4	3	12	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSG-04-0002-ER002	Rocha intrusiva	19,86	1	4	2	12	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSG-04-0002-ER005	Rocha intrusiva	59,02	2	4	4	12	Material muito alterado in situ
TAM-FSG-06-0006-ER003	Filito Sericítico	31,65	1	4	3	12	Material muito alterado in situ
TAM-FSG-07-0002-ER006	Rocha intrusiva	20,2	1	4	2	9	Material muito alterado in situ e ao longo do tempo
TAM-FSG-07-0004-ER007	Rocha intrusiva	79,3	2	4	4	9	Material muito alterado in situ

Diante disso, o resultado do UCS somente das amostras que não sofreram degradação, foram comparados com a resistência associada ao bloco através das metodologias propostas no item 6.2, referenciando as classes obtidas por IK.

É possível notar, que a ordem de grandeza dos resultados é muito semelhante em ambas as metodologias com o resultado dos ensaios (Tabela 6.9).

Tabela 6.9: Tabela comparativa dos resultados dos ensaios de UCS em relação a aproximação do UCS atribuído os blocos em relação as duas metodologias.

Amostras	Litologia	Grau de consistência	UCS Ensaio (Mpa)	UCS calculado (Mpa) Bloco Metodologia 01	UCS calculado (Mpa) Bloco Metodologia 02
TAM-FSD-02-0037-ER001	Rocha intrusiva alterada	1	3,13	3,45	3,19
TAM-FSD-05-0047-ER001	Canga laterizada	1	5,74	5,01	2,75
TAM-FSG-04-0002-ER001	Rocha intrusiva	2	19,96	22,09	16,08
TAM-FSG-04-0001-ER004	Rocha intrusiva	3	25,98	43,53	39,28
TAM-FSD-06-0031-ER001	Rocha intrusiva	2	27,68	33,30	7,36
TAM-FSD-04-0025-ER001	Dolomito	2	25,21	17,14	15,04
TAM-FSD-03-0011-ER002	Rocha intrusiva	2	29,37	24,60	16,58
TAM-FSG-06-0006-ER001	Rocha intrusiva	3	30,55	71,14	48,64
TAM-FSD-07-0014-ER001	Dolomito	3	42,10	43,63	38,22
TAM-FSD-04-0011-ER002	Rocha intrusiva	3	44,77	40,85	20,46
TAM-FSD-05-0026-ER002	Itabirito compacto	4	50,91	74,00	75,71
TAM-FSD-04-0008-ER001	Itabirito compacto	3	51,42	63,19	36,67
TAM-FSD-03-0009-ER001	Itabirito compacto	3	53,10	61,84	35,68
TAM-FSG-04-0003-ER002	Veio de quartzo	4	58,29	62,71	52,75
TAM-FSG-04-0002-ER003	Rocha intrusiva	3	58,72	50,40	39,59
TAM-FSG-06-0001-ER002	Quartzito	4	62,18	56,82	80,39
TAM-FSG-04-0001-ER002	Rocha intrusiva	4	66,28	51,04	59,94
TAM-FSD-07-0008-ER002	Quartzito	4	75,63	65,23	73,82
TAM-FSG-07-0004-ER001	Rocha intrusiva	4	78,63	76,34	81,31
TAM-FSD-07-0016-ER001	Itabirito compacto dolomítico	4	92,34	53,44	78,60
TAM-FSD-05-0057-ER003	Itabirito compacto	5	159,46	150,16	157,55
TAM-FSD-03-0003-ER001	Rocha intrusiva	6	166,49	146,69	319,42
TAM-FSD-05-0013-ER001	Itabirito compacto argiloso	5	178,35	120,38	202,14
TAM-FSD-05-0016-ER001	Itabirito compacto	5	205,06	149,18	194,36

\* Para esses resultados não foram comparados o grau de alteração, que justificaria uma possível perda de resistência.

Utilizando a função relação entre os ensaios e os valores atribuídos aos blocos por ambas as metodologias num modelo de regressão linear, e interpretando o coeficiente de correlação (R) para medir a intensidade e a direção da relação linear entre as variáveis, nota-se que ambas apresentam valores próximo a 1 mostrando uma forte relação entre as variáveis (Gráfico 6.4).

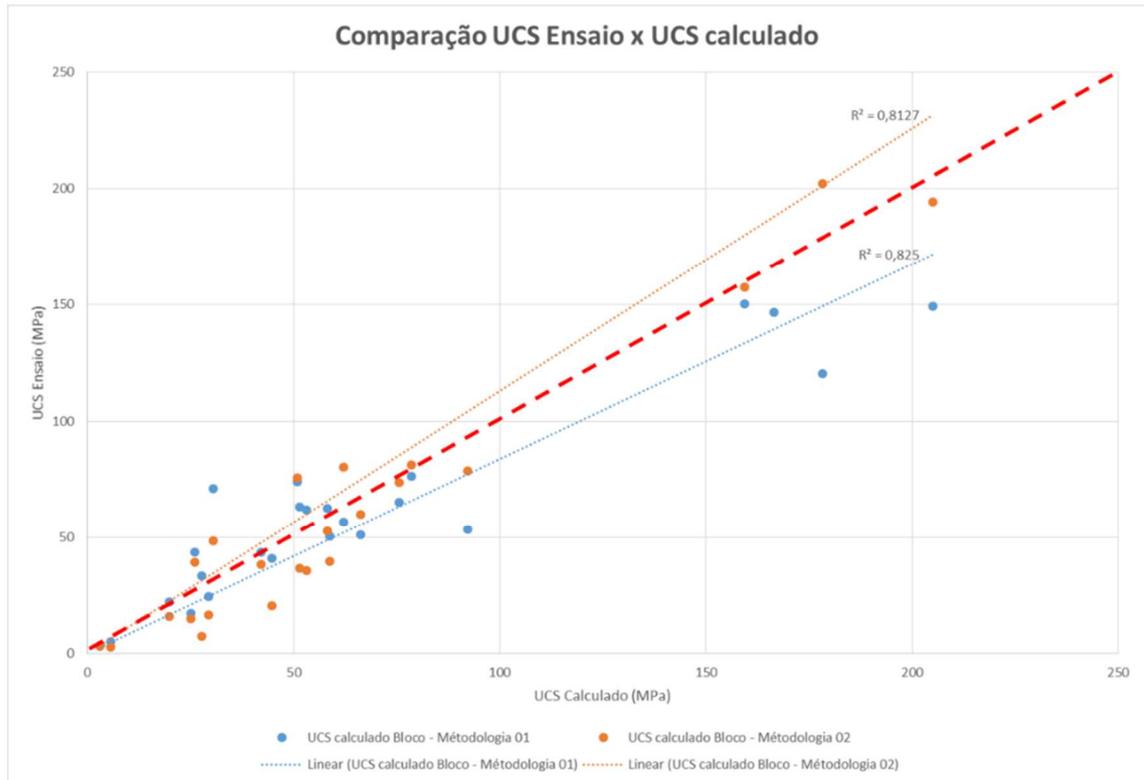


Gráfico 6.5: Gráfico de dispersão utilizado para comparar a correlação entre os resultados da resistência compressão obtidas por ensaios e a aproximada krigagem dos indicadores das categorias.

Validando ambas as metodologias de classificação de UCS nos blocos.

Para o processo de formação bem como o comportamento de alteração dos maciços rochosos das formações ferríferas, são atribuídos processos diferentes por diversos autores. Uma frente seguida por Dorr (1964) defende que sua gênese é atribuída ao enriquecimento supergênico das formações ferríferas bandadas metamorfizadas, que sofreram processos de alteração intempérica. Sendo que outra atribui o enriquecimento hidrotermal associado a tectônica e que resultam em processos de alterações mineralógicos e texturais apresentando mudanças bruscas de comportamentos nos maciços Rosière & Chemale (2000).

Para esse estudo adotaremos a ideia do enriquecimento supergênico para todas as litologias, considerando que as relações de mudança da resistência abruptas já estarão tratadas no próprio processo de krigagem por indicatriz que assumirá esses valores da amostra e refletirá nas estimadas no entorno. Se a amostra a ser estimada é de alta resistência e em seu entorno todas as outras são de baixa resistência, a probabilidade da amostra de baixa resistência não terá forte influência na redução do valor de UCS, mantendo ainda o contato brusco pois a diferença da ordem dos valores é alta nos ranges das classes baixas para as altas é muito grande.

Sendo assim, em relação a macro escala dos resultados ao longo do modelo de blocos, é esperado que as mudanças de resistência sejam gradativas e não tenham em geral uma passagem brusca de materiais de baixa resistência para os de alta resistência. Isso pode ser explicado porque o maciço rochoso é composto da rocha intacta e suas descontinuidades, que em geral podem apresentar diferentes maneiras de perda ou ganhos de resistência influenciados por outros fatores e/ou características.

Em se tratando de resistência da rocha intacta, as mesmas podem ou não ser afetadas por modificações climáticas, ou mesmo nas características dos minerais. Essas modificações podem estar associadas ao tipo de origem da rocha, onde em geral as rochas metamórficas e magmáticas esse conceito é claramente observado. Rochas sedimentares podem sofrer efeitos reversos, apresentando maior resistência quanto maior for sua alteração. Portanto, as variações da resistência em geral são gradacionais, com exceções para alguns tipos rochosos ou por uma quebra na sua continuidade sem efeitos climáticos ou de movimento.

Considerando a diferença de suporte, os ganhos na natureza da distribuição dos valores e seu comportamento de diluição o resultado da metodologia 01 apesar da pouca diferença em relação ao coeficiente de correlação da metodologia 02, pode ser considerada mais representativa.

## 7 APLICAÇÕES E PROPOSTAS DE ESTUDOS FUTUROS

O capítulo 7 apresenta propostas de aplicações do modelo geomecânico da resistência uniaxial e anisotropia, visando aumento da previsibilidade no planejamento de lavra, melhorando a recuperação de reservas e incremento nas análises de estabilidade, além de propostas de estudos futuros.

### 7.1 APLICAÇÕES

Considerando os valores de resistência atribuídos aos blocos, algumas possibilidades de aplicações podem ser definidas:

- I. Mapeamento das áreas de menor resistência onde deve haver maior acompanhamento geotécnico;
- II. Definição da direção média das descontinuidades nos taludes de modo a definir a relação descontinuidade x direção do talude;
- III. Definição das áreas com materiais de maior resistência auxiliando nos projetos de desmonte e previsão de desgastes de equipamentos;
- IV. Criar banco de dados de parâmetros de resistência da rocha intacta para definir parâmetros geométricos da cava mais precisos, possibilitando o incremento no aproveitamento da reserva.

O melhor aproveitamento do depósito está intimamente relacionado ao desenvolvimento da lavra, de forma a interligar as características físicas ou geomecânicas do depósito, as influências dessas características na geometria da cava, com foco em melhorar a relação custo e benefício e segurança operacional.

Nesse projeto, a base de dados para fomentar esse processo de interligação está no modelo 3D da resistência geomecânica e anisotropia dinâmica, detalhado nos capítulos 3 e 6.

Considerando que cada bloco possui os valores de resistência uniaxial, direção do mergulho e o próprio mergulho, cabe ao profissional definir como utilizar essas informações

de modo a melhor visualizar por exemplo, áreas de possíveis instabilizações (Figura 7.1).

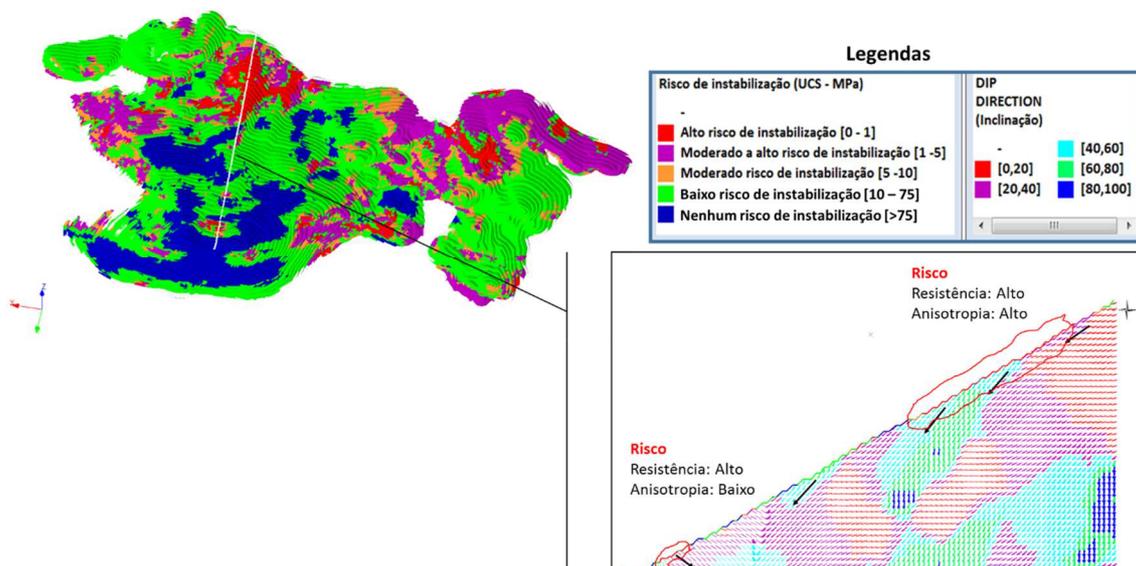


Figura 7.1: Seção típica mostrando as relações da anisotropia estimada com a direção do talude em zonas de baixa resistência.

No exemplo apresentado na Figura 7.1, os valores de resistência uniaxial dos blocos foram projetados na cava final, além das áreas classificadas como alto a baixo risco de instabilização, considerando somente as condições da rocha intacta. Posteriormente, foram definidas as seções típicas nos pontos de baixa resistência e analisadas as relações das anisotropias com a direção do talude de interesse. Esse tipo de análise pode ser feito em qualquer tipo de geometria, seja operacional ou final, servindo principalmente para: definição de áreas críticas para inspeções ou instalação de monitoramento por instrumentação possibilitando uma maior previsibilidade de zonas de risco.

As aplicações relacionadas ao mapeamento de regiões de mais alta resistência podem servir para melhor prognóstico de zonas de necessidade de planos especiais de detonação e desmonte, bem como cuidados com o desgaste de equipamento, seguindo a mesma lógica do mapeamento das áreas de menor resistência para acompanhamento de segurança geotécnica. Para isso, podem ser considerados diversos valores de corte (cut-offs). Esses cut-offs serão estabelecidos de acordo com a necessidade do projeto. Um exemplo apresentado na Figura 7.2, o corte no valor da resistência especificada para atender a capacidade do britador, sendo que acima de 100 MPa o fabricante indica uma possibilidade de desgaste excessiva e até mesmo quebra do equipamento.

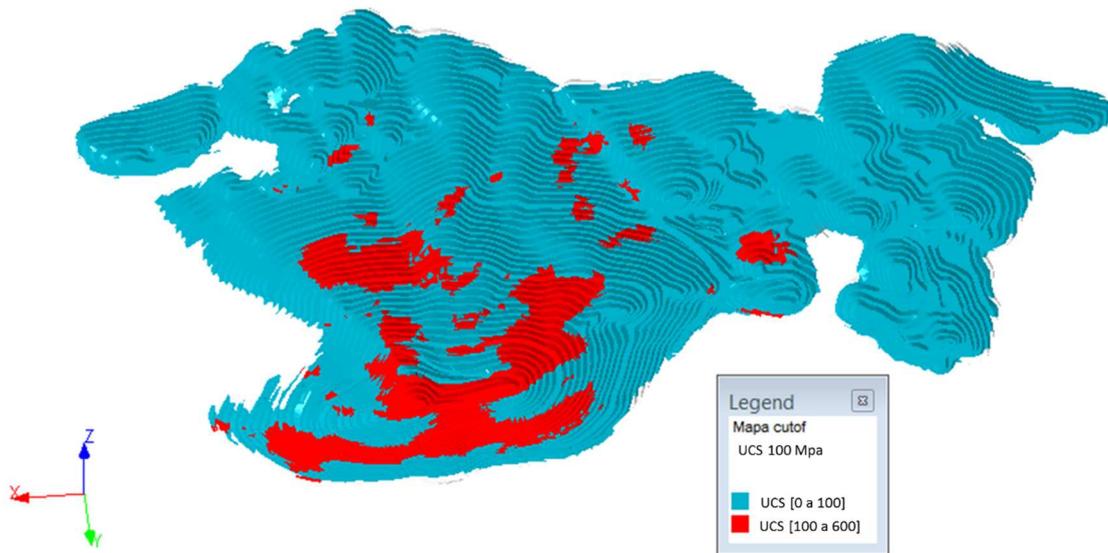


Figura 7.2: Mapa de distribuição da resistência na geometria da cava final considerando um possível desgaste de britadores se o cut-off do UCS for 100MPa.

Nas etapas da construção de geometrias de cavas, são desenvolvidas cartas de estabilidade, cujo objetivo é o maior aproveitamento do depósito. As cartas de estabilidade basicamente traduzem o modelo geomecânico em parâmetros geométricos.

Em geral, para definir esses parâmetros, são usadas informações básicas do modelo de blocos (tais como litologia e compacidade), e informações do modelo geomecânico com médias das características físicas por litologia. No modelo proposto por esse projeto, o modelo de blocos apresenta uma integração das informações geológicas e geomecânicas estimadas bloco a bloco sem atribuição de valores médios.

Como um exemplo simples, foram estabelecidos dois cenários. O cenário 1 (Tabela 7.1) com o modelo atualmente em vigor e um novo cenário utilizando a combinação das informações bloco a bloco.

Nesses cenários, é possível observar que é atribuído um ângulo geral para o talude a cada litologia e que no cenário 02 esse ângulo é ajustado de acordo com as resistências uniaxiais de cada litotipo presente em cada parte da cava (Tabela 7.2).

Tabela 7.1: Tabela com os parâmetros geométricos do cenário 01.

<b>Cenário 01</b>	
<b>Litologia</b>	<b>Ângulo Geral</b>
Dolomito (DO)	47
Hematita Compacta (HC)	47
Itabirito Compacta (IC)	47
Canga (CG)	41
Hematita Friável (HF)	38
Itabirito Friável (IF)	38
Itabirito Argiloso (IAL)	38
Itabirito Friável Rico (IFR)	38
Itabirito Goethítico (IGO)	38
Itabirito Manganêsífero (IMN)	38
Rocha Intrusiva (IN)	34
Quartzito (QT)	35
Rocha Vulcânica (VU)	35
Xisto (XI)	34
Argila (AG)	33
Filito Dolomítico (FD)	33
Filito Sericítico (FL)	33

Tabela 7.2: Tabela com os parâmetros geométricos do cenário 02.

<b>Resistência uniaxial</b>	<b>Ângulo Geral por Litologia</b>																
	AG	CG	DO	FD	FL	HC	HF	IAL	ICC	IF	IFR	IGO	IMN	IN	QT	VU	XI
0.25 a 1	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
1 a 5	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
5 a 25	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34
25 a 50	35	36	36	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	35	36	35	36
50 a 100	35	45	45	35	35	45	45	45	45	45	45	45	45	35	45	35	45
100 a 250	36	48	48	36	36	48	48	48	48	48	48	48	48	36	48	36	48
> 250	40	55	55	40	40	55	55	55	55	55	55	55	55	40	55	40	55

Na simulação do exemplo acima, foram geradas duas cavas matemáticas, com cenário 01 (Tabela 7.1) definidos somente com informações de litologia e sua compacidade e o cenário 2 utilizando a litologia e a resistência uniaxial. No resultado, apresentado na Tabela 7.3, é possível observar uma redução de lavra de estéril na ordem de 47,42Mt e um acréscimo da recuperação de minério da ordem de 1,49Mt (Tabela 7.4) no cenário 02. Também, é possível observar, na tabela de estéril (Tabela 7.3), que se deixou de lavar estéril franco e houve um

aproveitamento de estéril marginal oriundo de minério pobre, marcado na coluna com a letra “w”.

Tabela 7.2: Tabela apresentando a diferença de massa de estéril recuperada nos cenários.

<b>Estéril</b>	<b>Cenário 1 (Mt)</b>	<b>Cenário 2 (Mt)</b>	<b>Diferença (Mt)</b>
CG (w)	60.50	60.92	0.42
IF (w)	98.66	100.02	1.36
IGO (w)	113.82	114.41	0.59
HF (w)	36.74	36.75	0.01
IFR (w)	10.87	10.91	0.04
IAL (w)	22.57	22.53	<b>-0.05</b>
IMN (w)	16.52	16.52	0.00
HC (w)	4.35	4.34	<b>-0.01</b>
DO	0.00	0.00	0.00
ICC	218.43	197.36	<b>-21.07</b>
FD	83.11	76.79	<b>-6.32</b>
FL	45.33	37.81	<b>-7.52</b>
QT	22.98	8.45	<b>-14.53</b>
IN	106.60	106.33	<b>-0.26</b>
VU	34.55	34.63	0.09
AG	2.59	2.40	<b>-0.18</b>
XI	0.13	0.13	0.00
FALH	1.20	1.21	0.01
<b>Total</b>	<b>878.95</b>	<b>831.53</b>	<b>-47.42</b>

Tabela 7.3: Tabela apresentando a diferença de massa de minério recuperada nos cenários.

<b>Minério</b>	<b>Cenário 1 (M)</b>	<b>Cenário 2 (Mt)</b>	<b>Diferença (Mt)</b>
CG	95.41	95.41	0.00
IF	326.52	326.95	0.43
IGO	138.92	138.94	0.02
HF	236.40	237.36	0.96
IFR	37.71	37.72	0.01
IAL	6.48	6.47	<b>-0.01</b>
IMN	10.23	10.24	0.01
HC	59.72	59.79	0.07
<b>Total</b>	<b>911.39</b>	<b>912.89</b>	<b>1.49</b>

Para a comparação visual, é apresentado um exemplo de uma seção vertical típica dos cenários na Figura 7.3. É possível observar o aumento da reserva, com a parede em azul (Cenário 2) com ângulos gerais mais elevados que no cenário 1 (vermelho).

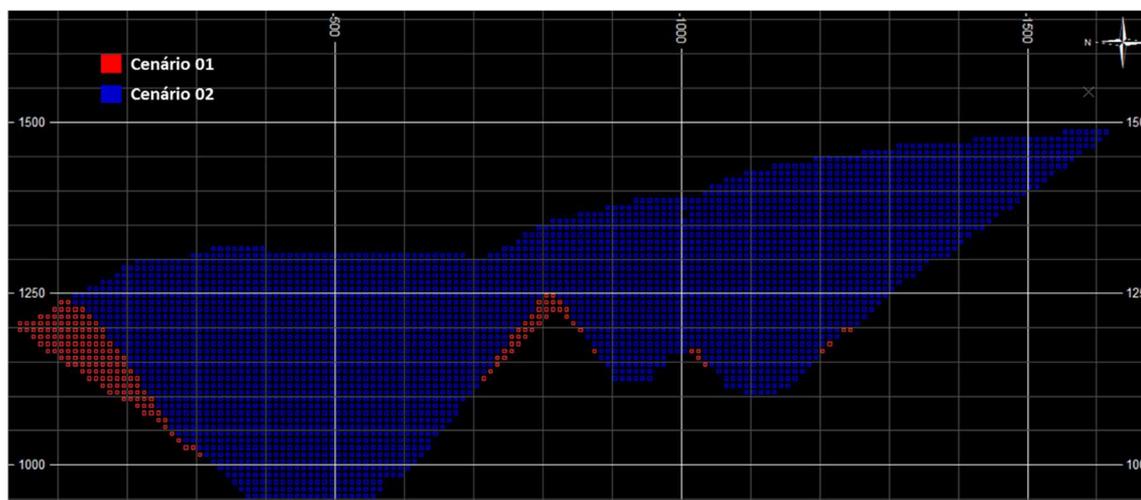


Figura 7.3: Seção exemplo utilizada para comparar a recuperação do depósito utilizando os cenários 1 e 2.

Nessa mesma linha da construção da carta de estabilidade com base nas informações de resistência, é possível também na cava matemática melhorar a definição dos ângulos através da análise da direção da descontinuidade com a direção do talude. Associando não só a resistência da rocha intacta, mas relação de rocha intacta com a anisotropia (Tabela 7.4).

Tabela 7.4: Exemplo de melhoria de definição de ângulos gerais baseadas em litologias, resistência uniaxial e anisotropia.

Resistência uniaxial	Cenário 02																Direção da Anisotropia/ direção do Talude			
	Ângulo Geral por Litologia																(0° a 30°)	(30° a 60°)	(60° a 90°)	
	AG	CG	DO	FD	FL	HC	HF	IAL	ICC	IF	IFR	IGO	IMN	IN	QT	VU	XI			
0.25 a 1	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	Mantém	Mantém	Mantém
1 a 5	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	- 3°	Mantém	+ 3°
5 a 25	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	34	- 5°	Mantém	+ 5°
25 a 50	35	36	36	35	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36	35	36	35	- 5°	Mantém	+ 5°
50 a 100	35	45	45	35	35	45	45	45	45	45	45	45	45	35	45	35	45	- 5°	Mantém	+ 5°
100 a 250	36	48	48	36	36	48	48	48	48	48	48	48	48	36	48	36	48	Mantém	+ 3°	+ 5°
> 250	40	55	55	40	40	55	55	55	55	55	55	55	55	40	55	40	55	Mantém	+ 3°	+ 5°

A Tabela 7.4 apresenta os ângulos propostos para cada litologia pelo intervalo de resistência uniaxial, ajustado pela direção da anisotropia em relação a direção do talude. Exemplificando o caso, para a hematitita com resistência uniaxial variando entre 50 a 100 Mpa, o ângulo geral proposto é 45°. Se a relação entre a anisotropia a direção do talude variar de 60° a 90°, o ângulo poderia passar para 50° (marcado em amarelo).

De posse do modelo geotécnico 3D, uma série de estudos geotécnicos e geomecânicos serão facilitados e melhor embasados, principalmente o que tange os seguintes pontos:

- nas análises de estabilidade de taludes;

- nas definições sobre a abordagem da análise, ou seja, (determinística ou probabilística);
- seleção do modelo constitutivo e critério de ruptura conforme a resistência do litotipo e de suas condições geológicas (por exemplo, anisotrópicas).
  - plano de desmonte controlado pela orientação média das camadas;
  - plano de monitoramento geotécnico baseados em zonas de possíveis instabilizações; entre outros.

Basicamente, com essas informações atribuídas aos blocos será possível melhor caracterizar o maciço rochoso, bem como, propor várias matrizes de decisão para diversas aplicações da geotecnia de mineração.

## 7.2 PROPOSTAS DE ESTUDOS FUTUROS

Com base na experiência adquirida nesse estudo, nota-se que para uma maior acurácia do modelo geomecânico 3D é imprescindível a construção de um modelo integrado com as informações geomecânicas, tais como, resistência da rocha intacta, grau de consistência, grau de alteração e fraturamento, ensaios geomecânicos, bem como, informações do modelo hidrogeológico como condutividade hidráulica. Neste contexto, o modelo resultante será tratado como modelo geotécnico 3D, o qual se tornará base para os estudos geotécnicos.

A partir da implementação das metodologias utilizadas nessa dissertação e dos resultados obtidos, vários aspectos que podem ser analisados em trabalhos futuros:

- i. Aplicar a metodologia de modelagem geológica com compartimentação geomecânicas em todos os depósitos;
- ii. Aplicar a modelagem da continuidade das camadas utilizando o método de elipsoides locais com objetivo de traçar um modelo de avaliação de estabilidade em todos os depósitos;
- iii. Testar a técnica para modelar o parâmetro grau de alteração com intuito de avaliar a redução da resistência frente ao intemperismo;

- iv. Testar a técnica para modelar o parâmetro grau de faturamento com intuito de avaliar a redução do tamanho dos blocos e melhorar a previsibilidade dos projetos de desmonte;

## 8 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O capítulo 8 será dedicado as conclusões sobre o uso da metodologia de krigagem da indicatriz para espacializar o parâmetro geomecânico grau de consistência e trará recomendações acerca da melhor prática.

### 8.1 CONCLUSÕES

Essa dissertação de mestrado se propôs atingir três grandes objetivos traçados de forma a atender um vazio significativo no que diz respeito a construção de modelos geomecânicos, São eles:

- (i) Testar a aplicabilidade do método de krigagem das indicatrizes na modelagem de parâmetros geomecânicos em maciços rochosos;

O objetivo em questão é considerado o principal ganho desse estudo. Algumas considerações podem ser pontuadas, dentre elas a base de dados. Considerando que os parâmetros geomecânicos são obtidos por descrições táteis e visuais, a incerteza dos dados já está na própria construção da base de dados original. Diante desse dilema, a avaliação da base de dados foi de fundamental importância, não somente para garantir um volume de dados que apresentasse correlação espacial entre as amostras, mas também para permitir um resultado final da estimativa que refletisse a resistência dos materiais que formam o depósito.

Foi possível perceber, que para o minério de ferro, a distribuição da resistência em sete categorias não coincide com a subdivisão observada na descrição dos litotipos. As categorias intermediárias se confundem e acabam se rearranjando em dois grandes domínios. Aqueles cujas categorias são de resistências muito baixas e os de medianos a altas resistências.

Esse fenômeno indica a necessidade de uma revisão no número de categorias de descrição, podendo além de facilitar o operador no momento da obtenção do dado, traçar um perfil mais adequado para estudos geoestatístico.

Como a base de dados não apresentou dados suficientes para um estudo estatístico para cada categoria, foi necessário agrupar as categorias. Houve dificuldade na definição a respeito da formatação desse agrupamento e a escolha final se baseou na característica geomecânica e na variância dos grupos, onde claramente se observa a formação de grupos com semelhança.

O método de krigagem da indicatriz foi indicado para esse estudo devido ao fato de a variável de interesse, o grau de consistência, ser de natureza não aditiva e categórica.

Inicialmente, a krigagem foi feita somente com a base de dados, utilizando somente os domínios geológicos/estruturais utilizados para a estimativa das litologias.

O resultado da krigagem apresentou uma imagem bastante realista da distribuição das resistências ao longo do depósito, porém apresentou falhas na delimitação dos corpos e direção da distribuição dessa resistência. Para sanar esse problema, duas maneiras poderiam ser utilizadas, a interpretação de seções geomecânicas e adição dessa informação como dado condicionante ou a delimitação de subdomínios localizados por meio do método de construção do modelo base usando estimativa dos elipsoides locais.

Diante disso, foi testada a técnica dos elipsoides locais, devido a possibilidade de redução no tempo de modelagem e possibilidade de inclusão de informações reais dos mapeamentos estruturais e orientações e furos de sondagem. O resultado apresentou uma mudança significativa na imagem do modelo, refletindo as condições expostas nos mapeamentos superficiais e os *dips* das camadas em sub-superfície.

Portanto, concluiu-se que a técnica de krigagem da indicatriz foi eficaz para prever blocos com os parâmetros geomecânicos. O modelo beneficiou-se e produziu melhor delimitação dos corpos bem como refletir a orientação das camadas após uso de anisotropia dinâmica.

- (ii) Testar a eficácia da definição dos contornos/contatos dos parâmetros geomecânicos mediante técnica de estimativa dos elipsoides locais, objetivando diminuir o tempo de modelagem com a interpretação de seções verticais/horizontais;

Para representar a continuidade espacial e as configurações físicas do grau de consistência, foi testada a metodologia computacional intitulada “estimativa dos elipsoides locais” com intuito de substituir a interpretação manual de múltiplas seções.

Porém, durante a aplicação e estudo dessa técnica, percebeu-se o potencial que a anisotropia das camadas estimadas bloco a bloco, poderiam ter na base de dados para análises de estabilidade, onde a relação da anisotropia da camada e a direção do talude definiriam zonas de possíveis instabilizações.

Para possibilitar o uso do modelo para essa aplicação, a base de dados precisou ser trabalhada para que pudesse ser composta por mapeamento estrutural de superfície e a base obtida nos furos de sondagem (goniômetros e orientação por perfilagem).

Para esse tratamento, foram criadas interpretações por linhas de forma, projeções dos mapeamentos em subsuperfície e rebatimento.

Depois do tratamento, foi então feita a estimativa e uma análise detalhada do resultado, onde foi possível definir os pontos de fragilidade, em regiões de intenso dobramento, falhas com rejeitos direcionais e percebe-se a necessidade de um pós processamento para refinar e delimitar essas regiões.

Conclui-se que a técnica foi considerada muito eficaz e de extrema validade para a geotecnia, tanto para o processo de modelagem sem necessidade de interpretação de seções, quanto para espacializar a anisotropia dos maciços.

- (iii) Testar a classificar a resistência uniaxial dos blocos usando a distribuição de probabilidade estimada do parâmetro consistência e sua relação com o intervalo de resistência à compressão uniaxial, atribuindo ao bloco uma simulação convertida em valores de resistência;

De posse do modelo de blocos caracterizado pelo grau de consistência, o objetivo era simular o valor da resistência uniaxial utilizando as probabilidades de cada uma das categorias. Foram então testadas duas metodologias, uma utilizando a média ponderada atribuída pela probabilidade relacionada com seu valor médio da resistência uniaxial, com base na tabela proposta pela ISRM (1981), e outra considerando um valor de resistência tirada aleatoriamente de uma distribuição uniforme dos possíveis valores de UCS da classe atribuída ao bloco.

Ambas metodologias apresentaram valores de resistência e distribuição da mesma ao longo do depósito muito representativas, caracterizando de forma eficaz a resistência dos litotipos.

Porém, adotando ideia do enriquecimento supergênico como forma de representação do processo de alteração dos litotipos, onde são esperadas mudanças gradativas de resistência uniaxial, a metodologia 01 consegue delinear melhor esse processo.

Essa classificação da resistência aos blocos traz um potencial de ganhos muito grande, abordado no capítulo 7.

Finalmente, conclui-se que o uso de técnicas geoestatística para a construção de modelos geomecânicos é fortemente indicada, seja para espacialização de parâmetros geomecânicos, quanto para possibilitar estudos de correlação entre eles. Esses modelos tridimensionais abrem um campo enorme de possibilidades de estudos geotécnicos, mudando o conceito local para um conceito de estudos regionais com maior previsão dos riscos e benefícios para os negócios.

## 8.2 RECOMENDAÇÕES

Os parâmetros geomecânicos obtidos de forma tátil e visual, representam uma característica do maciço de forma muito particular. Essas características são influenciadas não só pelas características físicas contabilizadas no processo de descrição, mas também pelas particularidades quanto a sua gênese, processo de alteração, deformação, descontinuidades entre outros. Diante disso, recomenda-se que para cada aplicação das técnicas geoestatísticas como forma de espacialização, sejam definidos processos e procedimentos.

Como recomendação para as melhores práticas para a criação desses processos e procedimentos, sugere-se uma possível revisão no processo de coleta/descrição, no método de classificação e por consequência dos parâmetros a serem coletados e nos métodos de validação dos parâmetros.

E finalmente definir a composição mínima desses processos incluindo:

- Método de coleta;
- Estudo do parâmetro;
- Gênese de formação do depósito;
- Processos de alteração;

- Deformação;
- Descontinuação;
- Método de validação;
- Correlações com outros parâmetros;
- Técnica Geoestatística;
- Integrações com modelos geológicos;
- Integração com modelos hidrogeológicos;
- Aplicações

## 9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMSTRONG, M. & MATHERON, G. Disjunctive kriging revisited: Part I. *Mathematical Geology*, v. 18 (8):711-728, 1986.

BARTON, N.R., LIEN, R. & LUNDE, J. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. *Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6(4):189-236, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T., DENKHAUS, H. G., & VOGLER, U. W. Failure of fractured rock. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. V.6 (3): 323IN29331-330IN32341), 1969.

BIENIAWSKI, Z. T. Engineering classification of jointed rock masses. *Civil Engineer in South Africa*, v. 15 (12): 335-344, 1973.

BIENIAWSKI, Z. T. Estimating the strength of rock materials. *National Mechanical Engineering Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, v.74 (8): 312-320, 1974.

BIENIAWSKI, Z. T. (Ed.). *Exploration for rock engineering: proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering*, v.1: 273-289, 1976.

BIENIAWSKI, Z. T. Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. Pergamon, v.16 (2):138-140, 1979.

BIENIAWSKI, Z. T. *Engineering Rock Mass Classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons, 251p, 1989.

BOISVERT, J.; MANCHUK, J. & DEUTSCH, C. V. Calculating distance in presence of locally varying anisotropy. *IAMG Geomath GIS Anal Resour Environ Hazards*, 82-85, 2007.

BROWN, E. T. *Rock Characterization, Testing & Monitoring: ISRM (International Society for Rock Mechanics) Suggested Methods ("Yellow Book")*: Pergamon Press, Oxford, UK, published for the Commission on Testing Methods of ISRM, 211p, 1981.

DAMASCENO, C.S.R. Modelagem geológica e geomecânica 3D e análises de estabilidade 2D da cava da Mina de Morro da Mina, Conselheiro Lafaiete, MG, Brasil. (Dissertação de Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

DA COSTA, T.A. V. Caracterização geológico-geotécnica e modos de ruptura do minério hematítico friável nas minas da Vale, Borda Oeste do Quadrilátero Ferrífero-MG (Dissertação de mestrado). Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

DA NÓBREGA FONTELES, H. R. Geoestatística aplicada ao mapeamento da superfície impenetrável ao SPT: o caso da porção nordeste de Fortaleza/CE, Nordeste do Brasil. *Revista de Geologia*, v.27(1): 52, 2014.

DE OLIVEIRA, P. C. Caracterização geológico-geotécnica de diferentes litotipos basálticos: basalto denso, basalto vesículo-amigdaloidal e brecha basáltica (Tese de Doutorado) Universidade de São Paulo, 2012.

DEERE, D. U.; HENDRON, A. J., Jr.; PATTON, F. D. and CORDING, E. J., Design of Surface Near Surface Construction in Rock. In *Failure and Breakage of Rock*, C. Fairhurst, Ed., Society of Mining Engineers of AIME, New York, 237-302p, 1967.

DINÇER, I., ACAR, A. ÇOBANOĞLU, I., & URAS Y. Correlation between Schmidt hardness, uniaxial compressive strength and Young's modulus for andesites, basalts and tuffs. v. 63 (2): 141-148, 2004.

DORR, J. V. N. Supergene iron ores of Minas Gerais, Brazil. *Economic Geology*, v.59 (7): 1203-1240, 1964.

EGAÑA, M., & ORTIZ, J. M. Assessment of RMR and its uncertainty by using geostatistical simulation in a mining project. *Journal of GeoEngineering*, v. 8(3), 83-90, 2013.

EXADAKTYLOS, G. & STAVROPOULOU, M. A. Specific upscaling theory of rock mass parameters exhibiting spatial variability: analytical relations and computational scheme. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, v. 45(7): 1102-1125, 2008.

FOLLE, D. Análise e aplicações da geoestatística no contexto geológico-geotécnico urbano. (Tese de Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 2009.

FOLLE, D. O estudo geoestatístico de sondagens spt para geração de mapas auxiliares em obras de Engenharia. (Dissertação de Mestrado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, 2002.

FREITAS, S. B. N. Caracterização geomecânica e classificações RMR (Bieniawsky) e SMR (Romana) de maciços rochosos em taludes do Funchal (Tese de Doutorado). Universidade da Madeira. Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, 2014.

GOOVAERTS, P. Geostatistics for natural resources evaluation, New York: Oxford University Press Inc., 483 p., IL: ISBN 0-19-511538-4, 1997.

HOEK, E & BROWN, E. T. Practical estimates of rock mass strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, v. 34(8): 1165-1186, 1997.

ISRM, B. E. Suggested methods: rock characterization, testing and monitoring. ISRM Commission on Testing Methods. Pergamon, Oxford, 1981.

JAKSA, M. B. The influence of spatial variability on the geotechnical design properties of a stiff, overconsolidated clay (Doctoral these). The University of Adelaide, Faculty of Engineering, 1995.

JOURNEL, A.G. The Indicator Approach to Estimation of Spatial Distributions, in Proceedings of the 17th APCOM (International Symposium on the Application of Computers and Mathematics in the Mineral Industry), SME-AIME, New York, 793-806, 1982.

JOURNEL, A. G. & HUIJBREGTS, C. J. Mining geostatistics. Academic Press, London, 600 p, 1978.

KLEN, A. M. Algoritmo para agrupamento de descontinuidades em famílias baseado no Método Fuzzy K-Means. (Tese de Doutorado) Programa de Pós-graduação em Geotecnia do Núcleo da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.

LEITE, L. D. F. Aplicação de métodos estatísticos e geoestatísticos no estudo de famílias de descontinuidades. (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2008.

MATHERON, G. Traité de géostatistique appliquée, tome i: Mémoires du bureau de recherches géologiques et minières, v.14 Paris, 1962.

MACKEAN, R.A.N. & ROSENBAUM, M. S. Geostatistical Characterisation of the SPT. 6th International Congress, International Association of Engineering Geology (IAEG), Balkema, Rotterdam, 317-322, 1990.

MARCHESI, V. R. Modelagem Geomecânica Tridimensional de Maciços Rochosos para Análise Bidimensional da Estabilidade dos Taludes de Escavação da Casa de Força do AHE-Simplicio (Dissertação de Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, 2008.

MOLINERO, G. R. Modelagem de previsão de evolução de processos erosivos. (Tese de Doutorado). Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, 2010.

PERES, JP & SATURARO, J.R. Tratamento geoestatístico do índice de resistência do solo (SPT) com base no software ISATIS e modelamento 3D no software DATAMINE – um ensaio preliminar. Anais do VI Workshop DATAMINE, 1998.

RAMÍREZ, J. E. G. Variabilidade Espacial do Parâmetro Geomecânico RQD no Depósito Mineral Animas-Peru. (Tese de Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, PUC-Rio, 2009.

REDONDO, F. Classificação probabilística do padrão geomecânico de um maciço rochoso mineralizado com base no índice RQD. (Dissertação de Mestrado) Curso de Pós-Graduação em Geociências, área de Concentração em Geociências e Meio Ambiente, 2003.

ROMANA, M., SERÓN, J. & MONTALAR, E. SMR Geomechanics classification: Application, experience and validation. ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics. 1-4, 2003.

ROSIÈRE, C. A. & CHEMALE JR. F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero—uma visão geral e discussão. Revista Geonomos, v. 8(2), 2000.

SERRA JUNIOR, E. & OJIMA, L. M. Caracterização e classificação de maciços rochosos. OLIVEIRA, AM; BRITO, SNA Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 211-226, 1998.

STEFFEN, O. K. H. Research and development needs in data collection for rock engineering. In: Proc. Int. Symp. Exploration for Eng., v. 2: 95-104, 1976.

STURARO, J.R. Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento. (Tese de Doutorado) Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos-SP, 1994.

TEJADA CERVANTES, L. M. Resistência de maciços rochosos estruturalmente complexos de mineração submetidos a carregamentos dinâmicos (Tese de Doutorado) Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Brasília-DF, 2012.

THIERRY, P., PRUNIER-LEPARMENTIER, A. M., LEMBEZAT, C., VANOUDEUSDEN, E., & VERNOUX, J. F. 3D geological modelling at urban scale and mapping of ground movement susceptibility from gypsum dissolution: The Paris example (France). *Engineering Geology*, v. 105(1): 51-64, 2009.

WACKERNAGEL, H. *Multivariate geostatistics: an introduction with applications*. Springer Science & Business Media, 41-44, 2013.

XAVIER, S.R. Estudo geoestatístico do Subsolo da Usina Nuclear de Angra 2, RJ. (Dissertação de Mestrado), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 1999.

ZHANG, L. *Engineering properties of rocks: Elsevier Geo-Engineering Book Series*. Lexington, MA, v. 4: 36-223, 2005