MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS, METALÚRGICA E DE MATERIAIS (PPGEM)

LINO CORRÊA MAZZALI

ÍNDICE ALTERNATIVO DE FRATURAMENTO DE MACIÇOS ROCHOSOS APLICADO AO PLANEJAMENTO DE PEDREIRAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Porto Alegre, RS

2014

LINO CORRÊA MAZZALI

ÍNDICE ALTERNATIVO DE FRATURAMENTO DE MACIÇOS ROCHOSOS APLICADO AO PLANEJAMENTO DE PEDREIRAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Dissertação realizada no Laboratório de Pesquisa Mineral e Planejamento Mineiro da Escola de Engenharia da UFRGS, através do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral, Ambiental e Metalurgia Extrativa

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Porto Alegre, RS

2014

LINO CORRÊA MAZZALI

ÍNDICE ALTERNATIVO DE FRATURAMENTO DE MACIÇOS ROCHOSOS APLICADO AO PLANEJAMENTO DE PEDREIRAS DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Tecnologia Mineral e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. João Felipe Coimbra Leite Costa

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker - Coordenador do PPGEM

Aprovado em: 24/04/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. André Zingano - DEMIN/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Otávio Petter - DEMIN/UFRGS

Prof. Dra. Vanessa Koppe - DEMIN/UFRGS

Aos meus pais e minha esposa

AGRADECIMENTOS

Ao Prof João Felipe, por ter aberto as portas do LPM, pela orientação, ensinamentos e amizade.

Ao Prof Paulo Salvadoretti, pelos ensinamentos, amizade e por ter proporcionado um excelente ambiente de trabalho durante minha “estada” no laboratório de geofísica.

Aos professores do DEMIN que se tornaram amigos ao longo desses anos de graduação e pós graduação.

Aos meus pais, pelo carinho, amor, educação e dedicação. Muito obrigado por tudo que fizeram e fazem por mim.

Ao meu irmão pelo coleguismo nesses anos de UFRGS e amizade.

À minha esposa, minha companheira agradeço pelo carinho, compreensão e ajuda técnica que foi fundamental para a conclusão deste trabalho. Júlia, muito obrigado por estar sempre comigo, aceitar os desafios de forma positiva e fazer minha vida mais fácil e feliz.

À UFRGS pelo ensino de qualidade.

Ao CNPQ por incentivar a pesquisa e contribuir para o crescimento do país.

RESUMO

A caracterização estrutural do maciço rochoso é fundamental em obras de Engenharia e em diversos campos da Geologia. Durante os estudos de viabilidade de uma jazida de rochas ornamentais, são indispensáveis análises sobre as descontinuidades presentes no maciço. Diversos métodos existem para avaliar o fraturamento de uma área, técnicas usando medições sobre os testemunhos de sondagens, amostragem em janelas nos afloramentos e *scanlines* podem inclusive serem combinadas. Na mineração de rochas ornamentais, a amostragem de afloramentos é limitada, pois a maior parte do maciço está coberta por vegetação ou solo. Sendo assim, essa dissertação propõe uma técnica para estimar o fraturamento baseado em parâmetros coletados nos afloramentos existentes. Foram amostrados o número de fraturas e o comprimento total de fraturas por janela quadrada, e combinaram-se esses parâmetros para gerar um índice de fraturamento. A estimativa do índice foi realizada por dois métodos de krigagem. Analisa-se o efeito que a composição de parâmetros (direta e indireta) causa nos resultados. O estudo foi realizado em uma pedreira de rocha ornamental localizada no município de Encruzilhada do Sul, RS/Brasil. As taxas de recuperação estimadas mostraram forte correlação positiva com as recuperações atuais atingidas pela mineradora, o índice (NFxLF) é um parâmetro robusto que consegue agregar informação sobre o fraturamento, o que torna os resultados útil no planejamento de lavra de pedreiras de extração de rochas ornamentais.

Palavras-chaves: krigagem. Índice de fraturamento. Rochas ornamentais.

ABSTRACT

The structural characterization of rock mass is fundamental in engineering works and in various fields of geology. During the feasibility studies of an ornamental rocks deposit, the discontinuities analysis whitin the massif is essential. Several methods exist to evaluate the fracturing of an area using technical measurements on core samples, sampling windows in outcrops and even scanlines can be combined. Into ornamental rocks mining, the outcrops sampling is limited because of the soil coverage. Therefore, this work proposes a technique to estimate the fracturing based on parameters collected from the existing outcrops. The number of fractures and the total length of fractures per square window were sampled and combined to generate a fracturing index. The estimation of this index was performed by two kriging methods. Analysis of the effect that the composition parameters (direct and indirect) on the results. The study was conducted at an ornamental stones quarry located in the city of Encruzilhada do Sul, RS/Brazil. The recovery rates estimated show strong positive correlation with the actual recoveries achieved by the mining company, the index (NFxLF) is a robust parameter that can aggregate information about fracturing, which makes them useful to be used in the mine planning of ornamentalrock quarries.

Key words: Kriging. Index fracturing. Ornamental rocks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Construções realizadas com rochas ornamentais. 20
Figura 2 - Granito (G), Mármore (M), Arenito (A) e Ardósia (A(S)). 21
Figura 3 - Aplicações das rochas ornamentais em esculturas (a) e (b), revestimentos externos (c) e revestimentos internos (d). 23
Figura 4 - Lavra em matacão de Granito. 24
Figura 5 - Lavra em fossa. 25
Figura 6 - Lavra em poço. 26
Figura 7 - Lavra por desabamento. 27
Figura 8 - Lavra com bancadas altas 28
Figura 9 - Lavra de tombamento com bancadas baixas 28
Figura 10 - Mineração de RO com lavra subterrânea (Grécia, EUA e Slovênia). 29
Figura 11 - Lavra Subterrânea de RO (Brasil e Inglaterra). 29
Figura 12 - Serragem (talha multidisco diamantada), polimento e flamagem. 30
Figura 13 - Gráfico da produção brasileira de RO. 32
Figura 14 - Participação percentual em valor das RO na exportação nacional de bens minerais. 33
Figura 15 - Índice de demanda mundial de RO beneficiadas (ano base 2000=100). 34
Figura 16 - Amostragem por *scanline*. As linhas vermelhas, amarela e azul representam as *scanlines*, as linhas pretas as fraturas. 38
Figura 17 - Janela Amostral. 39
Figura 18 - *Scanline* circular em azul, linhas pretas são fraturas em uma janela de amostragem. 40
Figura 19 - Vista de um afloramento com a estação total utilizada para obtenção das coordenadas planares das descontinuidades. 41
Figura 20 - Três diferentes tamanhos de células (A, B e C) e representação do triangularização *Delaunay* utilizada para a definição do tamanho mínimo de célula (D). 42
Figura 21 - Descontinuidades utilizadas no cálculo de LF e NF: 2 (com as duas terminações dentro da célula), 3 (atravessando a célula) e 5 (com apenas uma terminação dentro da célula) são consideradas no cálculo. 42
Figura 22 - Centro das células 5m x 5m (pontos pretos) na área do estudo. Distâncias em m (X e Y). 43
Figura 23 - Exemplo ilustrando os resultados interpolando o índice combinado NF x LF usando dois métodos: direto (A) e indireto (B). 45
Figura 24 - Escudo Sul-Rio-Grandense. 48
Figura 25 - Cinturão Dom Feliciano. 49
Figura 26 - Mapa geológico do Batólito Pelotas. 50
Figura 27 - Mapa geológico Sienito Piquiri. 51
Figura 28 - Mapa estrutural da intrusão do Sienito Piquiri. 53
Figura 29 - Diagrama de rosetas mostrando a frequência de direções para as fraturas mapeadas na pedreira. 54
Figura 30 - Mapa de localização das amostras NF. 56
Figura 31 - Mapa de localização das amostras LF. 56
Figura 32 - Mapa de localização das amostras DIRETO. 57
Figura 33 - Histograma (pdf) da variável NF agrupada. 58
Figura 34 - Histograma (cdf) da variável NF agrupada. 59
Figura 35 - Gráfico de probabilidade da variável NF. 60

Figura 36 - Mapa de localização das amostras NF do quartil inferior, IQR, quartil superior e do percentil 90. 60
Figura 37 - Histograma (pdf) da variável LF 61
Figura 38 - Histograma (cdf) variável LF. 62
Figura 39 - Gráfico de probabilidade da variável LF. 62
Figura 40 - Gráfico de probabilidade LF escala log. 63
Figura 41 - Mapa de localização das amostras LF do quartil inferior, IQR, quartil superior e percentil 90. 64
Figura 42 - Histograma (pdf) da variável DIRETO. 65
Figura 43 - Histograma (cdf) da variável DIRETO. 65
Figura 44 - Gráfico de probabilidade da variável DIRETO escala log. 66
Figura 45 - Mapa de localização das amostras de NFxLF do quartil inferior, IQR, quartil superior e percentil 90. 67
Figura 46 - Histogramas (pdf) das variáveis NF e LF para comparação das distribuições. 69
Figura 47 - Gráfico de dispersão entre NF e LF no intervalo de valores 0-16. 70
Figura 48 - Gráfico de dispersão entre NF e LF. 71
Figura 49 - Histograma (pdf) para os dados desagrupados da variável NF. 72
Figura 50 - Histograma (pdf) para os dados desagrupados da variável LF. 73
Figura 51 - Histograma (pdf) para os dados desagrupados da variável DIRETO. 73
Figura 52 - Gráfico de dispersão entre média e variância da variável NF. 75
Figura 53 - Gráfico de dispersão entre média e variância da variável LF. 75
Figura 54 - Gráfico de dispersão entre média e variância da variável DIRETO. 76
Figura 55 - Covariograma omnidirectional para a variável NF. 77
Figura 56 - Covariograma direcional para a variável NF na direção do eixo de menor continuidade espacial (NS). 77
Figura 57 - Covariograma direcional para a variável NF na direção do eixo de maior continuidade espacial (EW). 77
Figura 58 - Covariograma omnidirectional para a variável LF. 78
Figura 59 - Covariograma direcional para a variável LF na direção do eixo de menor continuidade espacial (NS). 78
Figura 60 - Covariograma direcional para a variável LF na direção do eixo de maior continuidade espacial (EW). 78
Figura 61 - Covariograma omnidirecional para a variável NFxLF. 79
Figura 62 - Covariograma direcional para a variável NFxLF na direção do eixo de menor continuidade espacial (NS). 79
Figura 63 - Covariograma direcional para a variável NFxLF na direção do eixo de maior continuidade espacial (EW). 80
Figura 64 - Histograma da validação cruzada para a variável NF e gráfico de dispersão (NF vs NF ESTIMADO). 81
Figura 65 - Histograma da validação cruzada para a variável LF e gráfico de dispersão (LF vs LF estimado). 81
Figura 66 - Histograma da validação cruzada para a variável DIRETO e gráfico de dispersão (DIRETO vs DIRETO estimado) e histograma da validação cruzada para o índice INDIRETO e gráfico de dispersão (DIRETO vs INDIRETO estimado). 82
Figura 67 - Histograma (pdf) para as estimativas da variável NF. 83
Figura 68 - Mapa das estimativas da variável NF. 83
Figura 69 - Histograma (pdf) das estimativas da variável LF. 84
Figura 70 - Mapa de localização das estimativas da variável LF. 84
Figura 71 - Histograma (pdf) das estimativas da variável DIRETO. 85
Figura 72 - Mapa das estimativas da variável DIRETO. 85

Figura 73 - Histograma (pdf) das estimativas pelo método INDIRETO. 86
Figura 74 - Mapa de localização das estimativas pelo método INDIRETO. 86
Figura 75 - *QQ-plot* e *PP-plot* entre as distribuições dos métodos Direto e Indireto. 87
Figura 76 - Gráfico de dispersão entre valores estimados nos blocos pelo método direto e método indireto. 88
Figura 77 - Histogramas das estimativas do método direto e indireto respectivamente 88
Figura 78 - Mapas de das estimativas do índice para os métodos Direto e Indireto respectivamente. 89
Figura 79 - Mapa de localização das estimativas com índice menor que 20 para os métodos Direto e Indireto, respectivamente. 89
Figura 80 - Análise de deriva (norte) para a variável NF. 91
Figura 81 - Análise de deriva (leste) para a variável NF 91
Figura 82 - Análise de deriva (norte) para a variável LF. 92
Figura 83 - Análise de deriva (leste) para a variável LF. 92
Figura 84 - Análise de deriva (norte) para a variável DIRETO. 93
Figura 85 - Análise de deriva (leste) para a variável DIRETO. 93
Figura 86 - *Check* visual entre as estimativas e as amostras da variável NF. 94
Figura 87 - *Check* visual entre as estimativas e as amostras da variável LF. 94
Figura 88 - *Check* visual entre as estimativas e as amostras da variável DIRETO 94
Figura 89 - *Check* visual entre as estimativas pelo método INDIRETO e as amostras da variável DIRETO. 95
Figura 90 - Comparação entre a utilização de dados contínuos *vs* truncados (discretos), para o método INDIRETO. 96
Figura 91 - Gráfico de dispersão entre os índices do método INDIRETO obtidos com dados contínuos *vs* truncados (discretos), visualização dos valores no intervalo de 0-50 a esquerda mostrando a classificação divergente e de toda a distribuição a direita. 97
Figura 92 - Histogramas (pdf e cdf) da variável DIRETO. 98
Figura 93 - Saída do aplicativo *Quantile* com os quantis para os 9 percentis utilizados na discretização da distribuição. 98
Figura 94 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 10, direção Az 0º. 100
Figura 95 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 10, direção Az 90º. 100
Figura 96 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 20, direção Az 0º. 101
Figura 97 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 20, direção Az 90º. 101
Figura 98 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 30, direção Az 0º. 102
Figura 99 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 30, direção Az 90º. 102
Figura 100 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 40, direção Az 0º. 103
Figura 101 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 40, direção Az 90º. 103
Figura 102 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 50, direção Az 0º. 104
Figura 103 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 50, direção Az 90º. 104

Figura 104 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 60, direção Az 0º. 105
Figura 105 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 60, direção Az 90º. 105
Figura 106 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 70, direção Az 0º. 106
Figura 107 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 70, direção Az 90º. 106
Figura 108 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 80, direção Az 0º. 107
Figura 109 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 80, direção Az 90º. 107
Figura 110 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 90, direção Az 0º. 108
Figura 111 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 90, direção Az 90º. 108
Figura 112 - Mapas de localização da área favorável à lavra pelos métodos *Full-Ik*, *KO* Direto e *Median Ik* respectivamente. 109
Figura 113 - Mapas de probabilidade obtidos por MIK (*multiple indicator kriging*) para a variável DIRETO. O mapa à esquerda apresenta todas as probabilidades, o mapa à direita apresenta em branco os blocos com probabilidades acima de 50% de chance de estarem acima do índice 20. 110
Figura 114 - Mapas de probabilidade obtidos por krigagem dos indicadores da mediana para a variável DIRETO. O mapa à esquerda apresenta todas as probabilidades, o mapa à direita apresenta em branco os blocos com probabilidades acima de 50% de chance de estarem acima do índice 20. 110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Identificação do tipo de fratura: T= fratura de partição; R= fratura de cisalhamento de Riedel; P= fratura de cisalhamento 55
Tabela 2 - Sumário estatístico dos dados. 57
Tabela 3 - Sumário estatístico das duas variáveis, NF e LF. 69
Tabela 4 - Diferença entre as médias após o desagrupamento das amostras. 74
Tabela 5 - Dados de continuidade espacial. 80
Tabela 6 - Comparação das Médias. 90
Tabela 7 - Parâmetros de variografia dos indicadores (ex: percentil 10). 99
Tabela 8 - Modelos variográficos dos indicadores. 99

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS 14
1.2 ROCHAS ORNAMENTAIS E A MINERAÇÃO 15
1.3 PLANEJAMENTO DE LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS 16
1.4 ÍNDICES DE FRATURAMENTO 16
1.5 PROBLEMA 17
1.6 META 18
1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 18
1.8 METODOLOGIA 18
1.9 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO 19
2 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS 20
2.1 CONCEITO 20
2.2 DIVISÃO COMERCIAL 21
2.2.1 Granitos 21
2.2.2 Mármores 22
2.3 APLICAÇÕES 22
2.4 LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS 23
2.4.1 Lavra a céu aberto 24
2.4.1.1 Matacões 24
2.4.1.2 Maciços Rochosos 24
2.4.1.2.1 Fossa 25
2.4.1.2.2 Poço 25
2.4.1.2.3 Desabamento 26
2.4.1.2.4 Tombamento 27
2.4.2 Lavra Subterrânea de Rochas Ornamentais 29
2.5 BENEFICIAMENTO 30
2.6 PANORAMA NACIONAL 31
2.7 PANORAMA INTERNACIONAL 32
3 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE MACIÇOS ROCHOSOS 35
3.1 INTRODUÇÃO 35
3.2 PARÂMETROS DE FRATURAMENTO 36

3.3 VIÉS DE AMOSTRAGEM 36
3.4 AMOSTRAGEM POR *SCANLINES* 37
3.5 JANELAS AMOSTRAIS 38
3.6 *SCANLINES* CIRCULARES 39
3.7 CONSIDERAÇÕES 40
3.8 METODOLOGIA 40
3.8.1 Obtenção do índice de fraturamento 43
3.8.2 Abordagem Direta e Indireta 44
4 ESTUDO DE CASO 47
4.1 ACESSIBILIDADE, RECURSOS LOCAIS E FISIOGRAFIA. 47
4.1.1 Localização e Vias de Acesso 47
4.1.2 Topografia, clima e vegetação. 47
4.2 GEOLOGIA 47
4.2.1 Geologia Regional 47
4.2.2 Geologia Local 50
4.2.3 Caracterização Estrutural 51
4.3 RECURSO MINERAL E ESTIMATIVA DA RESERVA DE MINÉRIO 55
4.3.1 Localização das Amostras 55
4.3.2 Análise Estatística dos Dados 57
4.3.2.1 Estatística Univariada 57
4.3.2.1.1 Variável NF 58
4.3.2.1.2 Variável LF 61
4.3.2.1.3 Variável Direto 64
4.3.2.2 Análise de valores extremos 67
4.3.2.3 Estatística Bivariada 68
4.3.2.4 Desagrupamento das Amostras 71
4.3.2.5 Efeito Proporcional 74
4.3.2.6 Análise da Continuidade Espacial 76
4.3.3 Estimativa de Recursos e Reservas 80
4.3.4 Validação da Estimativa 89
4.3.4.1 Média Global 90
4.3.4.2 Análise de Deriva 90
4.3.4.3 Check Visual 93
4.3.4.4 Check truncamento 95

4.3.4.5 ***Krigagem de Indicadores*** 97
4.3.4.6 ***Definição dos Limiares*** 97
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 111
5.1 RECAPITULAÇÃO 111
5.1.1 Capítulo 1 111
5.1.2 Capítulo 2 111
5.1.4 Capítulo 4 112
5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS VERSUS RESULTADOS OBTIDOS 112
5.3 TRABALHOS FUTUROS 114
REFERÊNCIAS 116
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 124

1 INTRODUÇÃO

A indústria mineral está cada vez mais racional quanto ao uso dos recursos naturais, e busca novas tecnologias que possam otimizar a extração dos bens minerais reduzindo os custos. O aumento da produção mineral do país nos últimos anos trouxe benefícios como riqueza e desenvolvimento tecnológico, porém, este aumento desordenado também trouxe um ônus que é o impacto ambiental. É comum a presença de medidas de remediação em empreendimentos mineiros para lidar com o passivo ambiental gerado no processo de extração.

O país passa por um momento de grande incentivo à produção mineral, principalmente dos bens minerais que são essenciais para a indústria civil (areia, cimento, agregados, etc.). Este incentivo é devido ao programa de aceleração do desenvolvimento (PAC) um programa do governo federal que foi proposto no início do ano de 2007 e tem como meta aprimorar a infraestrutura do país (energia, recursos hídricos, habitação, transporte e saneamento).

Além do PAC que inicialmente foi previsto para o período de 2007-2010, a copa do mundo de futebol (2014), as olimpíadas (2016) e o PAC2 que foi lançado em 2010 e não tem data prévia para conclusão, continuam a aquecer a indústria civil e consequentemente a indústria mineral. Este incentivo pode gerar um crescimento da produção mineral e mais investimentos em metodologias de produção voltadas para minimizar a geração de rejeito.

A otimização da produção é primordial para o sucesso de qualquer empreendimento mineiro, e este trabalho busca estudar uma nova metodologia aplicada à estimativa de fraturas para auxiliar o planejamento da produção de rochas ornamentais. Atualmente, o passivo ambiental gerado pela mineração de rochas ornamentais (RO) é muito alto.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DE MACIÇOS ROCHOSOS

A caracterização de maciços rochosos vem sendo amplamente estudada na literatura ultimamente. Um grande aliado para essa pesquisa são as empresas petrolíferas que tem um interesse muito especial na modelagem da distribuição de fraturas, pois a geometria do fraturamento está diretamente ligada ao fluxo dos fluídos nos reservatórios de óleo e gás. Existem inúmeras aplicações, em diversas áreas, que necessitam de um estudo de caracterização de fraturamento em maciços rochosos, entre elas: escavações, hidrogeologia, lavra de rochas ornamentais e projetos para depósitos de resíduos nucleares entre outros.

A maior parte desses estudos está voltados para a geração de uma rede de fraturas que simule a geometria do fraturamento no local estudado, conhecida como *Discrete Fracture Network* (DFN), (DVERSTORP & ANDERSSON, 1989; SRIVASTAVA et al., 2005). Outros estudos utilizam uma abordagem clássica que é a estimativa da geometria das fraturas através de células em um grid preeestabelecido que contemple a área em estudo (VIRUETE et al. 2001), apresentando assim mapas zonais que indicam o nível de fraturamento local.

1.2 ROCHAS ORNAMENTAIS E A MINERAÇÃO

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro, documento formulado pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2010), as rochas ornamentais representam o terceiro maior bem primário exportado pelo país, um dado importante visto que a demanda mundial de rochas ornamentais entre os anos de 2000 e 2006 duplicou, segundo publicação especializada da área *Dimension Stones Advocate News* (DSAN) (Disponível em: <http://www.basicsmines.com/dimensionstone/>. Acessado em 25 de Setembro de 2012).

As rochas ornamentais figuram atualmente como a terceira maior reserva mineral do Brasil, isto significa 70% das reservas de Ferro do Brasil em peso (t), porém apresenta uma produção muito baixa. Mesmo com essa baixa produção, o Brasil figura entre os maiores produtores de rochas ornamentais no mundo.

Outro fato importante é a atual recuperação de lavra em rochas ornamentais, quando esta é feita em maciços rochosos, a recuperação de blocos atingida pela industria nacional atualmente fica em torno de 30% do volume do maciço (KOPPE, 2013) o que acaba gerando um passivo ambiental significativo. Essa baixa produtividade é um reflexo da falta de investimentos na pesquisa mineral nestes tipos de empreendimentos mineiros. O resultado disso é: custo de lavra elevado, geração de passivo ambiental e consequentemente um menor lucro para a empresa mineradora. Historicamente, a indústria de rochas ornamentais não faz o uso adequado dos recursos existentes para uma pesquisa mineral mais completa e elaborada. Essa falta de interesse reflete na pequena ou quase inexistente inovação tecnológica para este tipo de lavra, fazendo com que se crie um círculo vicioso que mantém estagnado o setor de rochas ornamentais.

De acordo com Anuário Mineral Brasileiro (DNPM, 2010), existem atualmente 134 minas em operação. Dos investimentos realizados no ano de 2009, (aquisição de novos equipamentos e/ou manutenção, inovações tecnológicas e de sistemas, infraestrutura e

Pesquisa mineral/Geologia), apenas 3.1% foram destinados à Geologia e Pesquisa Mineral, mostrando que em lavra de rochas ornamentais a pesquisa não tem recebido a devida atenção.

1.3 PLANEJAMENTO DE LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

O planejamento de lavra de RO leva em consideração diversos fatores, (KOPPE, 1992; GROSS, 1996) listam alguns dos principais, entre eles:

a) relevo;
b) tipo de rocha;
c) arranjo textural (microscópico e macroscópico) mineralogia, cor;
d) principais estruturas presentes (diques, falhas e etc.);
e) tipo de afloramento;
f) geometria do afloramento;
g) tamanho do afloramento;
h) grau de alteração;
i) homogeneidade do material rochoso;
j) cobertura.

De forma geral, a caracterização do maciço rochoso é o fator mais importante no planejamento de lavra para rochas ornamentais. Pode se dizer que o grau de fraturamento do maciço é inversamente proporcional a probabilidade de viabilidade do empreendimento. Algumas abordagens clássicas para determinar esse grau de fraturamento não são práticas. Situações como cobertura de solo existente sobre o maciço impedem essas medidas em campo. Quando possíveis alguns parâmetros de avaliação do maciço são observados, sendo os mais importantes:

a) número de fraturas;
b) tamanho de fraturas;
c) orientações das estruturas;
d) família e período geológico da geração.

1.4 ÍNDICES DE FRATURAMENTO

A análise de parâmetros como número de fraturas acaba por gerar determinados índices como: intensidade de fratura (fraturas/m). Esses índices são usados para caracterizar o maciço rochoso; porém, estudos recentes (QUIGLEY & MCSWINEY, 1996; MAULDON et al., 2001) mostraram a necessidade de combinar os parâmetros a fim de obter um índice representativo da intensidade de fraturamento, visto que eles separadamente não conseguem quantificar corretamente o dano estrutural causado pelas fraturas na jazida.

A determinação da densidade de fraturas em rochas é relevante para diversas aplicações na engenharia e geologia. Um índice capaz de efetivar uma avaliação quantitativa das fraturas tem sido discutido extensivamente na literatura (TERZAGHI, 1965; DEERE et al., 1964; PRIEST & HUDSON, 1976 ; LA POINTE et al., 1985).

Provavelmente, o índice mais usado para medir o grau do dano estrutural de rochas duras é o chamado *Rock Quality Designation* (RQD). Este índice foi idealizado para estimar a integridade das rochas utilizando amostras obtidas com furos de sondagens. O RQD é o valor percentual definido através da relação entre o somatório de comprimento dos fragmentos de testemunho superiores a 100mm, dividido pelo tamanho total da monobra de sondagem (DEERE et al., 1964). Os testemunhos de sondagem devem ser obtidos em barriletes duplo-livres de tamanho mínimo NX (54.7mm).

Dificuldades aparecem quando a intensidade de fraturas é avaliada em duas dimensões (afloramentos rochosos). Para esse caso, o RQD não pode ser diretamente empregado e uma maneira mais representativa de avaliar o fraturamento nessas condições vem sendo estudada (PRIEST & HUDSON, 1976; HUDSON & PRIEST 1983; CASAS et al., 2000). Apesar do progresso obtido por esses trabalhos, algumas deficiências foram relatadas.

1.5 PROBLEMA

Atualmente, a política de sustentabilidade e a geração “verde” vêm inviabilizando empreendimentos em todas as áreas da mineração e em outras áreas, devido ao impacto ambiental gerado por determinadas atividades.

A lavra de rochas ornamentais apresenta atualmente uma recuperação média de 30%, o que gerou no último ano um montante de 27 milhões de toneladas de estéril que vem a ser um passivo ambiental significativo (INFORME11/2012 ABIROCHAS). Um melhor entendimento da disposição espacial das fraturas e sua incorporação no planejamento de lavra podem contribuir para um uso mais racional dos recursos minerais com diminuição do passivo ambiental.

1.6 META

A meta desta dissertação é desenvolver uma nova metodologia de mapeamento de fraturas através de um modelamento geoestatístico bidimensional que possa ser usado pelo planejamento para otimizar a lavra. Estudar como parâmetro um novo índice de fraturamento que não apresente as deficiências relatadas por estudos anteriores, verificar suas vantagens e deficiências. Um estudo de caso será usado para ilustrar a metodologia.

1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este trabalho propõe o desenvolvimento e avalia uma nova metodologia direcionada ao auxílio do planejamento de lavra de rochas ornamentais (RO) através dos seguintes objetivos específicos:

a) estudar a formulação do índice apropriado de fraturamento para auxilio a lavra em rochas ornamentais;
b) verificar se existe correlação entre os resultados de recuperação de lavra apresentado pelos índices com a recuperação real de lavra de RO;
c) avaliar a estimativa do grau de fraturamento do maciço rochoso através de um novo índice composto;
d) verificar a aplicabilidade e viabilidade da metodologia ao cenário atual da indústria de RO;
e) estudar a qualidade e a representatividade dos mapas zonais indicativos gerados para otimizar o planejamento de lavra em RO.

1.8 METODOLOGIA

O trabalho lança mão do uso de *softwares* de domínio público e também comercial para a realização do estudo proposto, entre os aplicativos utilizados tem-se o *Geostatistical Software Library* (GSLIB®), *Stanford Geostatistical Modeling Software* (SGEMS®), *Microsoft Excel*® e LINDENS®.

Para a realização dos objetivos específicos, foi adotada a sequência de trabalho abaixo:

a) análise exploratória dos dados buscando um melhor entendimento das variáveis em estudo;
b) estudo da continuidade espacial das variáveis número de fraturas (NF), comprimento total das fraturas (LF) e do índice (DIRETO);
c) estimativa através de krigagem ordinária de todas as variáveis;
d) tratamento dos dados discretos (transformação de estimativas de nf para valores discretos);
e) formulação do índice indireto;
f) estudo dos resultados;
g) validação das estimativas;
h) comparação entre as abordagens realizadas (uso de índice direto e indireto);
i) verificação da representatividade dos mapas indicativos gerados e da recuperação informada pelas abordagens realizadas;

1.9 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, estando os restantes organizados da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta uma contextualização das rochas ornamentais quanto às definições, à lavra, às aplicações/usos e a importância no setor mineral nacional e mundial.

No capítulo 3, o estado da arte, apresenta-se como a geoestatística vem sendo usada para lidar com problemas de definição de fraturas, mostrando as dificuldades encontradas assim como as medidas e soluções tomadas por trabalhos anteriores nesta área.

Presente no capítulo 4 está a apresentação do estudo de caso assim como a análise dos seus resultados nos quais foi aplicada a metodologia antes mencionada, com a completa discussão, comparação e validação dos modelos criados.

O capítulo 5 contém as conclusões obtidas.

No final desta dissertação, estão apresentadas as referências utilizadas.

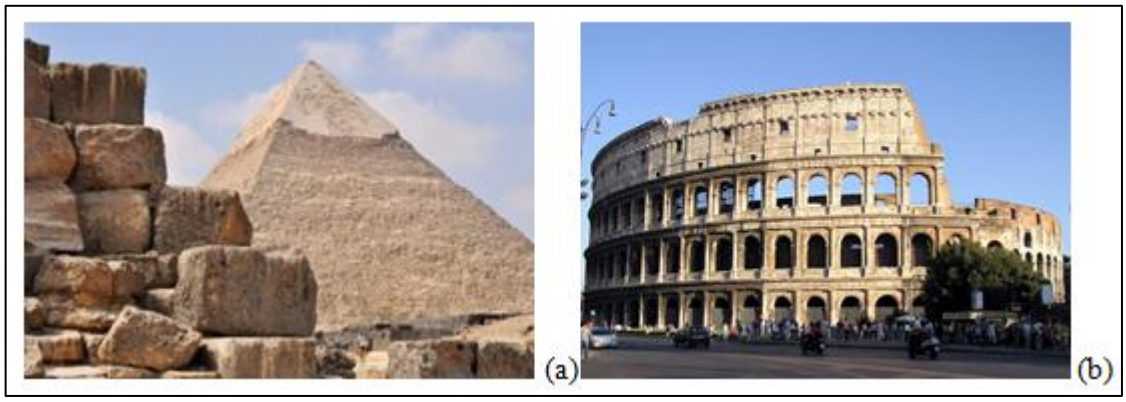
2 CONTEXTUALIZAÇÃO DAS ROCHAS ORNAMENTAIS

As rochas ornamentais abrangem diversos tipos de rochas, e, no âmbito nacional, existe uma divisão para as rochas ornamentais separando entre rochas graníticas e mármores. A maioria dos países produtores de RO também utiliza essa regra, porém apresentam por vezes subdivisões dentro dos dois grupos principais. Este capítulo tem a função de apresentar conceitos da indústria das rochas ornamentais. Primeiramente, apresenta-se o conceito de RO. A divisão comercial é comentada e ilustrada, trazendo exemplos de aplicações para os dois grupos principais de RO. Em seguida, está descrito o processo de lavra de rochas ornamentais e beneficiamento explicando os principais métodos praticados pela indústria mundial. Por fim, um panorama econômico nacional e internacional do comércio de RO é comentado e encerra o capítulo mostrando a importância deste bem mineral para a economia do Brasil.

2.1 CONCEITO

Rocha ornamental (RO) é uma rocha natural que pode ser lavrada para a obtenção de blocos com dimensões específicas, dimensões estas que variam de acordo com a natureza da rocha e o uso que esta rocha terá. Apesar de ser vista apenas como rocha de decoração ou revestimento interno, as RO também estão presentes nas estruturas de algumas famosas construções como as pirâmides (Figura 1a) e o Coliseu de Roma (Figura 1b).

Figura 1 - Construções realizadas com rochas ornamentais.



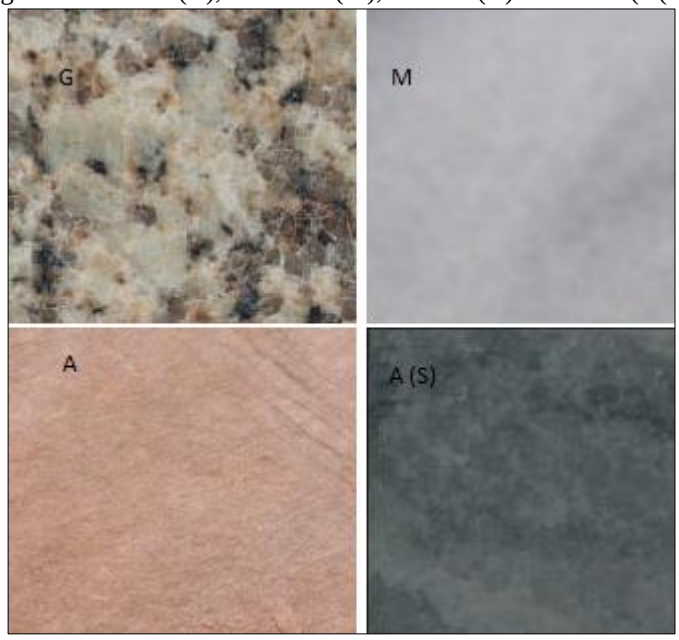
Fonte: (a) UNIVERSITY OF MARYLAND PHYSICS EDUCATION RESEARCH GROUP. <http://www.physics.umd.edu/perg/abp/aha/pyramid.htm> (b) UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ. <http://engenhariacivildauesc.blogspot.com.br/2010/11/historia-da-resistencia-dos-materiais_04.html>

As pedreiras de RO seguem uma dinâmica de lavra diferente das pedreiras de agregados. A lavra de RO deve ser mais precisa e suave a fim de obter blocos com o mínimo

de fraturamento possível. Esses blocos lavrados seguem para um beneficiamento que geralmente é realizado *in situ* como o esquadrejamento, o corte em chapas (serragem) e os acabamentos finais como: polimento, tratamento térmico e jateamento para a produção de texturas.

As principais rochas utilizadas são os granitos, mármores, arenitos e ardósias (Figura 2). As aplicações para as RO estão relacionadas aos atributos de cada tipo de rocha, entre eles: coloração, textura dos grãos, padrão dos grãos, dureza, resistência e outros.

Figura 2 - Granito (G), Mármore (M), Arenito (A) e Ardósia (A(S)).



Fonte: MAZZALI (arquivo pessoal)

2.2 DIVISÃO COMERCIAL

Rochas ígneas, metamórficas e sedimentares fazem parte das RO comercializadas, porém a indústria acabou por dividir as RO em dois grupos: granitos e mármores.

2.2.1 Granitos

Englobam rochas ígneas, algumas metamórficas e sedimentares de diagênese alta como os arenitos, de uma forma geral os granitos são definidos como as rochas silicáticas. Os principais minerais encontrados nos granitos apresentam dureza entre 6 e 7 na escala de Mohs atribuindo assim uma maior resistência, de forma geral, do que as rochas pertencentes a classe

dos mármores. Esta divisão é meramente comercial e por isso rochas com diferentes propriedades físico-químicas encontram-se relacionadas. Quartizitos, ardósias, esteatitos e serpentinitos, por exemplo, são considerados comercialmente como “granitos” pelo fato de serem utilizados em condições muito similares a estes.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais (ABIROCHAS), as principais rochas presentes no grupo dos granitos são: monzonitos, granodioritos, charnocktitos, sienitos, dioritos, diabásios/basaltos e os granitos propriamente ditos.

2.2.2 Mármores

A maior parte é de rochas carbonáticas, incluindo calcários, dolomitos e seus correspondentes metamórficos. Estas rochas apresentam em sua composição, sobretudo minerais com dureza entre 3 a 4 na escala de Mohs (calcita e dolomita) o que acaba por limitar seu uso a situações onde não seja necessária uma resistência a abrasão e/ou ao intemperismo por exemplo. Entre suas vantagens está a menor dificuldade de efetuar o processo de desdobramento dos blocos em teares e também a menor absorção de água (mármores calcítico, dolomítico, sepertinítico e travertino).

No grupo dos mármores, as principais rochas presentes são: calcários, dolomitos, mármores (calcários e dolomitos metamórficos) e travertinos.

2.3 APLICAÇÕES

Atualmente, as rochas ornamentais são utilizadas em revestimentos externos, internos (pisos, degraus, tampos) e esculturas.

Cada aplicação traz consigo parâmetros tecnológicos que devem ser respeitados para um melhor aproveitamento e conservação da rocha utilizada, dentre os parâmetros tecnológicos estão: coeficiente de dilatação térmica, resistência à flexão (3 e 4 pontos), resistência à compressão uniaxial, índice de absorção de água, densidade aparente seca e coeficiente de atrito entre outros. Desta maneira, pode-se classificar uma determinada rocha como mais favorável a uma dada aplicação do que outra. Normas específicas, tanto nacionais como internacionais, regem as diretrizes para os ensaios laboratoriais que avaliarão essas propriedades.

A Figura 3 (a) mostra um afloramento de granito no monte Rushmore no estado da Dakota do Sul nos Estados Unidos, onde foi realizada a escultura de quatro presidentes americanos, a Figura 3(b) o Cristo Redentor monumento localizado na cidade do Rio de Janeiro, foi revestido em pedra Sabão, Figura 3(c) apresenta o uso do granito como elemento estrutural e de revestimento externo na ponte Arlington na cidade de Washington, D.C. A Figura 3(d) mostra o uso de granitos em revestimento interno.

Figura 3 - Aplicações das rochas ornamentais em esculturas (a) e (b), revestimentos externos (c) e revestimentos internos (d).

Fonte: GEOSCIENCE NEWS AND INFORMATION. <http://geology.com/rocks/>

2.4 LAVRA DE ROCHAS ORNAMENTAIS

Koppe (1992) e Gross (1996) elencam diversos fatores geológicos que estão diretamente ligados à escolha do método de lavra mais adequado para as rochas ornamentais, entre eles, o relevo, o tamanho do afloramento, a presença de descontinuidades, a cobertura, a homogeneidade do material rochoso e o arranjo textural são de extrema importância e devem ser levados em consideração na fase de pesquisa de rochas ornamentais. Estes parâmetros também são usados para a escolha do método de lavra.

A lavra de rochas ornamentais pode ser realizada em matacões ou em maciços rochosos, e, geralmente, são realizadas a céu aberto. Apesar de ser menos frequente, a lavra subterrânea de rochas ornamentais também se faz presente em alguns empreendimentos. O

Brasil teve uma mina subterrânea de Quartizito Azul Imperial localizada na cidade de Oliveira dos Brejinhos no estado da Bahia. Esta mina apresentou alguns problemas estruturais e não está mais em operação.

2.4.1 Lavra a céu aberto

A lavra a céu aberto de rochas ornamentais apresenta como principal divisão a lavra em matacões e a lavra em maciços rochosos (CHIODI, 1995).

2.4.1.1 Matacões

Matacões (Figura 4) são partes do maciço rochoso que apresentam desprendimento ou separação do bloco original. A lavra de matacões é praticamente manual sem a utilização de equipamentos. O desdobramento dos blocos é geralmente realizado através de cunhas manuais, porém, a utilização de pólvora negra em furos tamponados é comum em blocos com volume superior a 100 m³.

Figura 4 - Lavra em matacão de Granito.

Fonte: MATTA. <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=2055>

Este método apresenta um custo de produção baixo assim como apresenta baixas taxas de recuperação, o que acaba gerando um passivo ambiental significativo. A lavra de matacões é mais frequente nos granitos, dado a maior facilidade de formação de matacões que as rochas deste grupo apresentam.

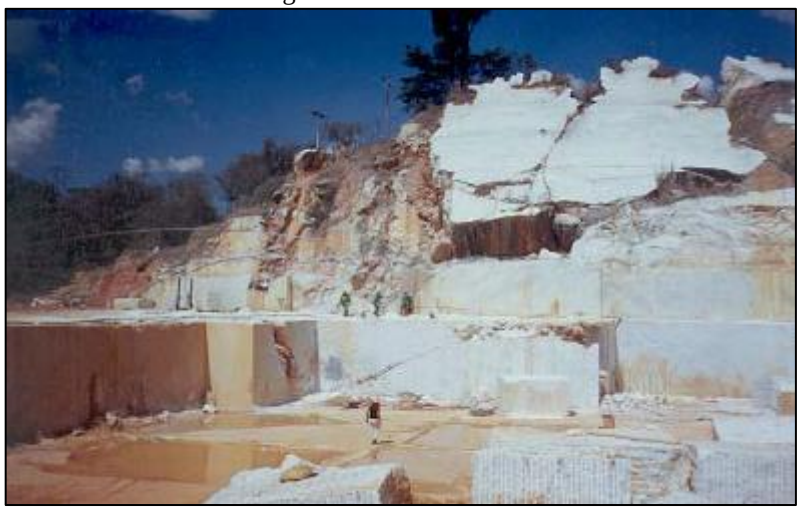
2.4.1.2 Maciços Rochosos

A escolha do método de lavra mais apropriado para a lavra de maciços rochosos pode ser inicialmente baseada na topografia do terreno. Métodos diferentes são recomendados para terrenos com relevo acentuado (desabamento, tombamento de bancadas altas e tombamento de bancadas baixas) e planícies (poço e fossa).

2.4.1.2.1 Fossa

Nas lavras deste tipo, Figura 5, os blocos são acessados por rampas construídas nos taludes da cava. As profundidades variam conforme a técnica de desmonte utilizada. Instabilidade no maciço e abalos estruturais ocasionados pelo uso de explosivos geralmente restringem a cava a aproximadamente 30 m de profundidade. Uma das principais vantagens deste método está ligada ao baixo investimento necessário para realizar a recuperação de mina e a principal desvantagem é o constante bombeamento de água necessário em locais onde aquíferos geram grandes taxas de infiltração na cava.

Figura 5 - Lavra em fossa.

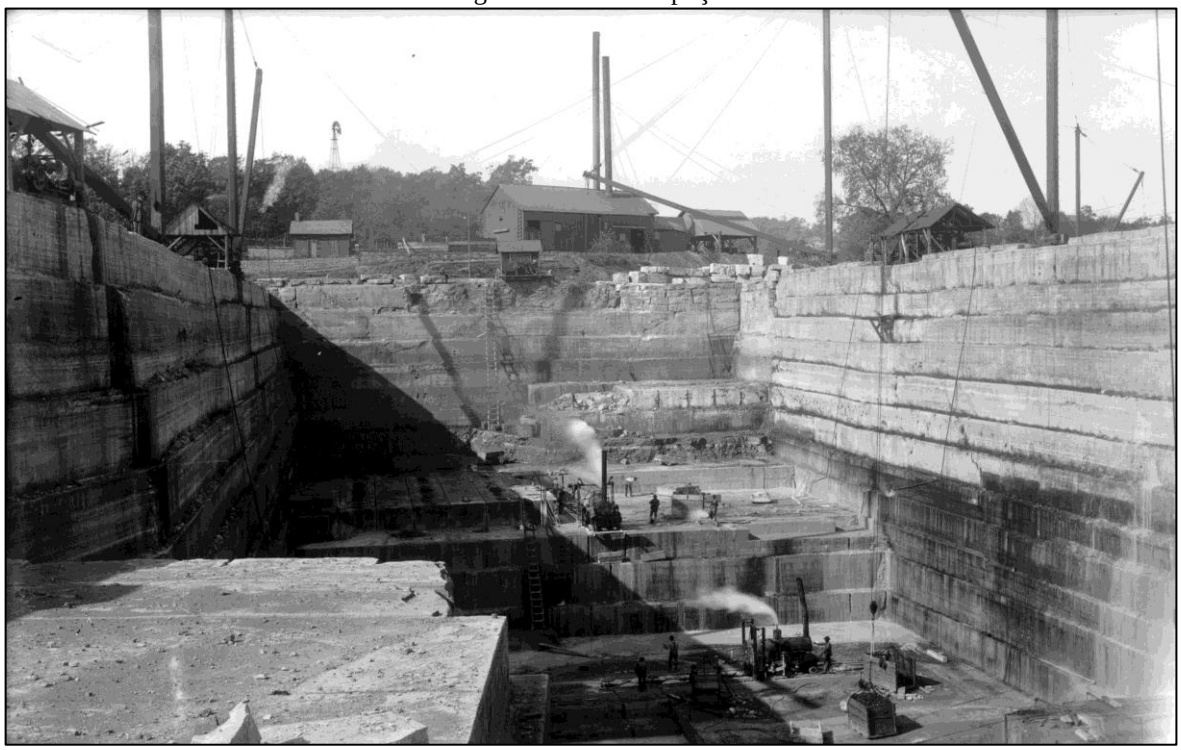


Fonte: MATTA. <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=2055>

2.4.1.2.2 Poço

Este método (Figura 6) é muito semelhante ao método de fossa, apresenta maiores inclinações das rampas e menor espaço físico para manobras dos equipamentos. Uma desvantagem deste método é o elevado risco de acidentes em virtude de desabamentos.

Figura 6 - Lavra em poço.



Fonte: DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES.
<http://www.iowadnr.gov/Environment/GeologyMapping/EconomicResources.aspx>

2.4.1.2.3 Desabamento

Este método, muito utilizado no passado, consiste em utilizar explosivos confinados em uma pequena galeria (Figura 7) que se encontra abaixo do maciço rochoso de interesse, para que a energia da detonação gere blocos e fragmentos de rocha. Este método apresenta uma taxa de recuperação baixíssima e só é viável em rocha de alto valor econômico e que se encontra em terrenos de topografia acidentada.

Figura 7 - Lavra por desabamento.

Fonte: MAZZALI (arquivo pessoal)

Problemas relacionados à segurança estão presentes nesse método por empregar desmontes de grandes volumes por detonação, o que acaba gerando desmoronamentos não controlados (CHIODI, 1995).

2.4.1.2.4 Tombamento

Este método consiste em realizar um corte inicial no maciço rochoso (vertical ou horizontal) e provocar o tombamento deste bloco (tombamento integral) ou após o primeiro corte realizar cortes secundários deste bloco e tombá-lo parcialmente (tombamento fracionado). É um método mais apropriado a terrenos que apresentam certo relevo que facilite o tombamento e pode ser realizado em bancadas baixas ou altas. Para ser realizado em bancadas altas é necessário uma jazida com maciço rochoso de altura significativa, as bancadas apresentam entre 4 e 16 metros de altura (Figura 8).

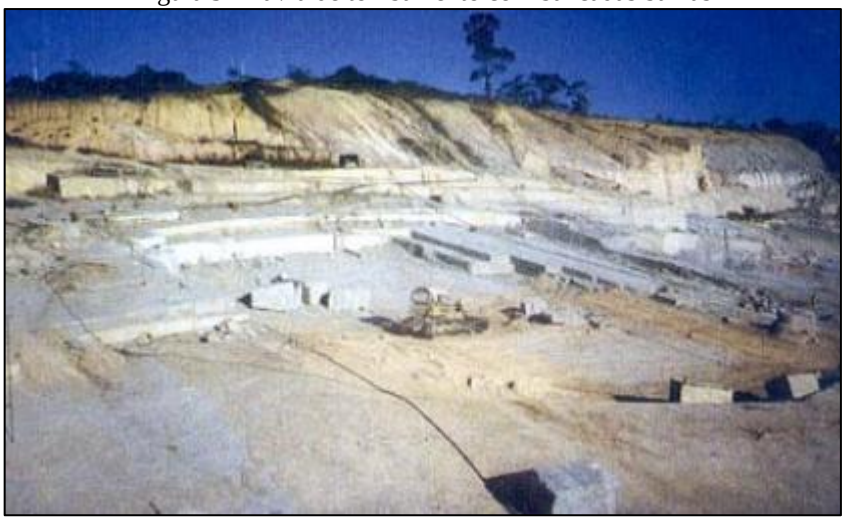
Figura 8 - Lavra com bancadas altas

Fonte: MATTA. <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=2055>

É recomendado para maciços rochosos que apresentam heterogeneidade de textura e/ou fraturas, pois após o desmonte do bloco primário pode-se efetuar o desdobramento através do esquadrejamento deste bloco em blocos secundários e terciários. Essa operação acaba contribuindo para aumento da seletividade da lavra. Devido a essa seletividade, o método pode apresentar uma geração de rejeito maior do que outros métodos.

A lavra de tombamento com bancadas baixas (Figura 9) é recomendada para maciços rochosos que apresentem homogeneidade de textura e/ou fraturas, grande extensão horizontal e um baixo índice de fraturamento. A altura da bancada (não superior a 3,0 m) corresponde a uma das dimensões finais do bloco, o que reduz os custos de lavra e também diminui a geração de passivo ambiental.

Figura 9 - Lavra de tombamento com bancadas baixas



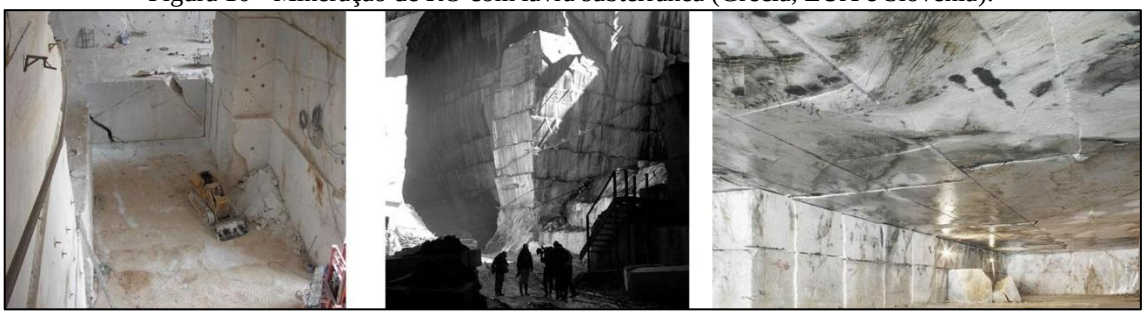
Fonte: MATTA. <http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=2055>

As frentes de lavra devem ser modificadas para que o avanço se realize paralelamente as fraturas, a fim de obter uma maior recuperação.

2.4.2 Lavra Subterrânea de Rochas Ornamentais

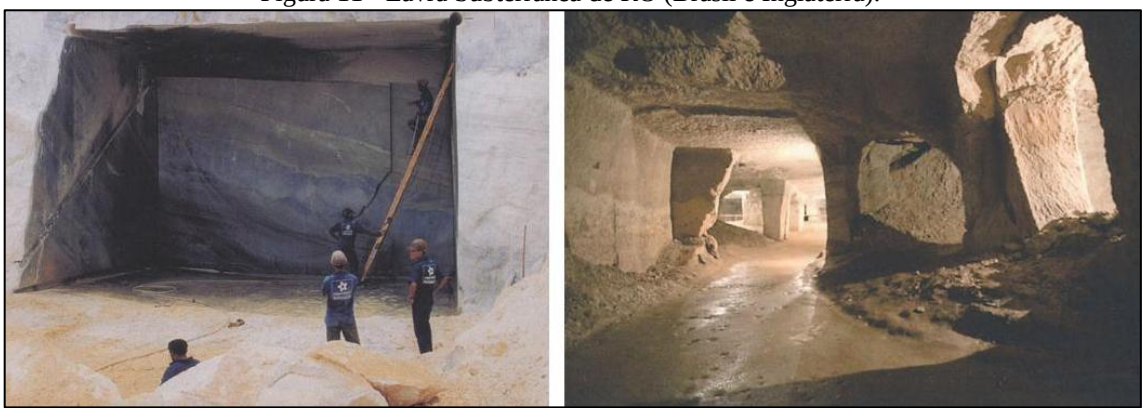
A lavra subterrânea de RO é bastante desenvolvida em países europeus. A Itália, por exemplo, apresenta diversas minas com lavra subterrânea na região dos Alpes Apuanos, onde aproximadamente 10% dos depósitos de mármore são extraídos através deste tipo de lavra. Outros países também apresentam minas de rochas ornamentais lavradas por métodos subterrâneos, os principais são: Bélgica, Croácia, Espanha, Estados Unidos, Grécia (Figura 10), Inglaterra (Figura 11), Portugal e Rússia.

Figura 10 - Mineração de RO com lavra subterrânea (Grécia, EUA e Slovênia).



Fonte: NATURAL STONE INDUSTRY MAGAZINE OF THE WORLD. < http://litosonline.com/ >.

Figura 11 - Lavra Subterrânea de RO (Brasil e Inglaterra).



Fonte: NATURAL STONE INDUSTRY MAGAZINE OF THE WORLD. < http://litosonline.com/ >.

Para evitar abalos sísmicos que possam provocar instabilidade no maciço, o uso de um método de corte que apresenta baixo dano estrutural é amplamente empregado (fio

diamantado). Esta técnica é mais empregada na extração de rochas do grupo dos mármores, pois apresentam maior facilidade para corte que as rochas do grupo dos granitos.

Parker (1996) expõe três principais vantagens que os métodos de lavra subterrânea apresentam:

a) não necessitam grandes desenvolvimentos na superfície;
b) diminuição dos gastos com recuperação ambiental (baixa poluição visual);
c) a constante presença de reservas abaixo do nível do piso.

Algumas das principais desvantagens estão ligadas ao alto custo inicial de abertura da mina e a presença de zonas fraturadas no maciço que geram acidentes de trabalho mais graves.

Destacam-se três métodos básicos de lavra subterrânea para rochas ornamentais:

a) tunelamento (*long face quarrying*);
b) câmaras e pilares;
c) lavra de grandes pilares.

2.5 BENEFICIAMENTO

Após a lavra dos blocos de rocha (granito, mármore), os blocos passam por um beneficiamento (Figura 12) para atingir certas especificações como largura, espessura e comprimento entre outras. Etapas como: serragem, polimento, levigamento e flamagem são algumas das técnicas utilizadas pela indústria para produzir o produto final (telhas, bancadas, etc.).

Figura 12 - Serragem (talha multidisco diamantada), polimento e flamagem.

Fonte: POLICENTER. <http://policenter.wordpress.com/>

A serragem por vezes é vista como um beneficiamento primário, onde o bloco é serrado para a obtenção de chapas. As chapas podem receber um beneficiamento secundário (jateamento, apicotamento, etc.) para produzir chapas com especificações mais detalhadas em termos de texturas e geometria das bordas. Para os diferentes usos das RO, existem diferentes tratamentos específicos. Os principais acabamentos disponíveis no mercado são:

a) polido - acabamento plano com reflexo, produzido por abrasão mecânica;
b) jateado - produzido por um jato de partículas abrasivas;
c) apicotado - obtido por um martelo que cria uma textura na rocha através de pontos de pressão, pode ser obtido com máquinas ou através de artesões;
d) lavigado - acabamento plano não reflexivo, produzido por abrasão mecânica (afinamento da chapa);
e) flameado - textura criada na face da chapa com a utilização de chamas, é mais comum em granitos usados como pisos por tornar a superfície antiderrapante.

A maioria das empresas que beneficiam rochas ornamentais consegue produzir uma grande variedade de acabamentos.

2.6 PANORAMA NACIONAL

O Brasil apresenta um enorme potencial de reservas de rochas ornamentais, e figura entre os principais países produtores (Sumário Mineral DNPM, 2012). Com o aquecimento da indústria civil nos últimos anos, o consumo interno tem contribuído para o aumento da produção.

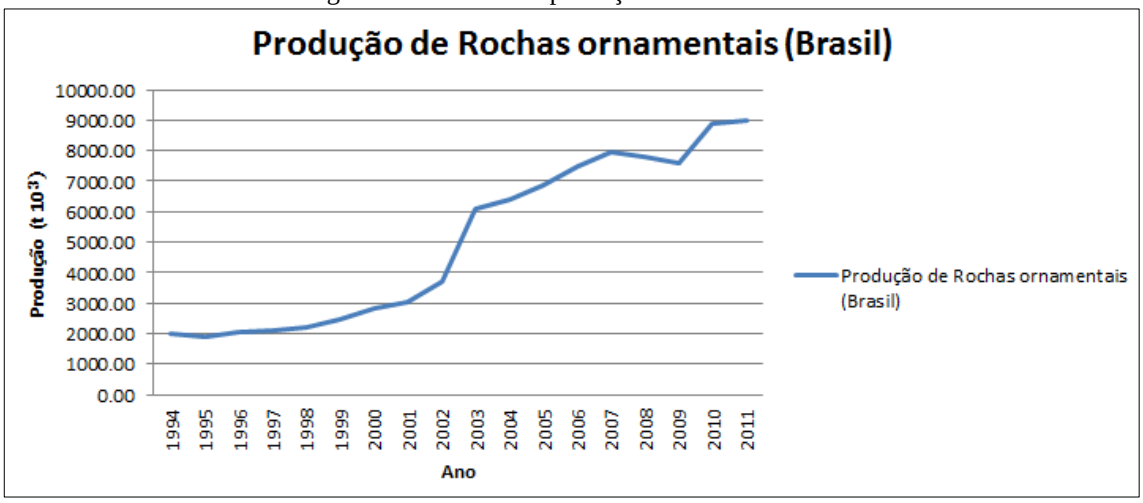
Segundo o Anuário Mineral Brasileiro de 2010, produzido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral, as reservas lavráveis de rochas ornamentais figuram entre as três maiores reservas em massa (t) do país, ficando atrás apenas das reservas de calcário e ferro. Em proporção, as reservas de rochas ornamentais representam 70% em massa das reservas de Ferro e são três vezes superiores que as reservas de carvão. Este cálculo das reservas de RO é feito com base em uma recuperação média de 27% de blocos em relação ao volume *in situ*. As maiores reservas nacionais de RO estão nos estados do Espirito Santo, Minas Gerais e Paraná.

A produção de RO em 2011 foi de aproximadamente nove milhões de toneladas (ABIROCHAS INFORME 11/2012), o que representa 2.3% da produção de ferro no mesmo

período. Com essa produção, o Brasil é o quarto maior produtor no mundo ficando atrás de China, Índia e Turquia.

No gráfico da Figura 13, nota-se que a produção teve um salto entre 2002 e 2003. Esse aumento repentino é explicado pelo despreparo do setor em suprir as necessidades do mercado que já vinha crescendo anos antes e a produção não acompanhou esse aumento da demanda de forma linear como vemos no período de 2003 a 2007. Vemos também o impacto da crise mundial na produção de 2008 e 2009.

Figura 13 - Gráfico da produção brasileira de RO.



Fonte: MAZZALI (dados: DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL:<http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=64 >)

Em 2011, o consumo de RO no Brasil foi de 6.2 Mt (Sumário Mineral 2012, DNPM), dado que a indústria da construção civil continua aquecida em virtude do programa de aceleração do crescimento e das obras para a Copa de 2014, é de se esperar que esta demanda continue alta para os próximos anos.

Existe uma diferença entre os destinos dos produtos brutos e beneficiados consumidos no país. Os principais estados consumidores dos produtos brutos são: Espirito Santo (48,32%), Minas Gerais (15,29%) e Paraná (8,34%), enquanto os produtos beneficiados têm como principais destinos os estados de Pernambuco (13.06%), Espirito Santo (9.62%) e Ceará (4.50%).

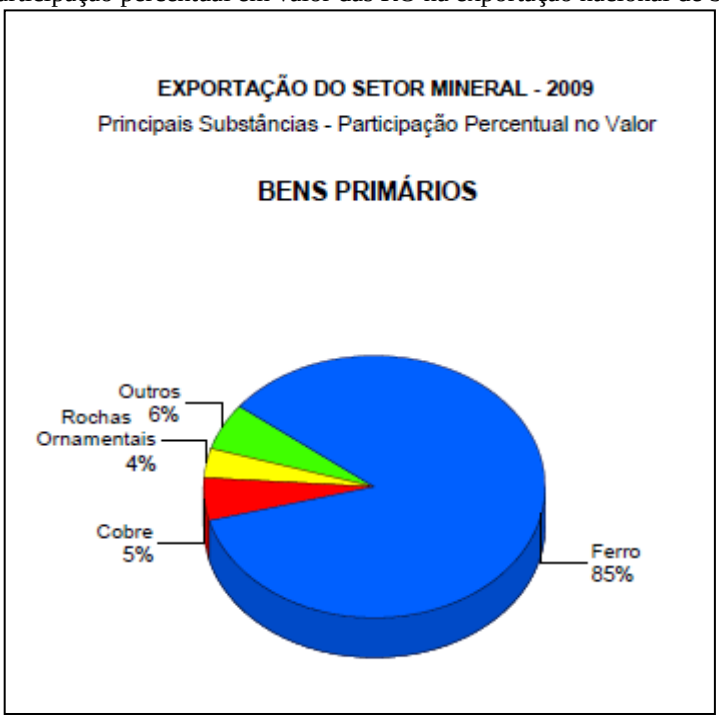
2.7 PANORAMA INTERNACIONAL

O Brasil importou no ano de 2011, segundo dados do DNPM, 105.800,00(t) de RO, num valor total de 67.900.000 US$. De acordo com o ministério do desenvolvimento,

indústria e comércio exterior (MDIC), as importações de RO nos últimos anos estão diminuindo. De 2009 para 2010, essa redução foi de 27% e de 2010 para 2011 foi de 18.5%. Isso demonstra que a indústria nacional está suprindo a demanda interna, diminuindo a dependência do produto importado. Os principais países de origem das RO importadas pelo Brasil são: Itália, Espanha, Grécia e Turquia (MDIC).

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro 2010, a rocha ornamental aparece como o terceiro bem mineral primário exportado pelo país, em relação à participação percentual no valor total das exportações realizadas Brasil (Figura 14), ficando atrás do ferro e cobre respectivamente. Em 2011, as exportações brasileiras de RO totalizaram 2.190.000,00 (t) e um bilhão de reais em faturamento (Sumário mineral, 2011, DNPM). O Brasil, hoje 2014, é o sétimo maior exportador de RO com 4.4% do mercado, ficando atrás de China (27.3%), Turquia (14.5%), Índia (10.5%), Itália (6.2%), Espanha (5.2%) e Egito (4.5%).

Figura 14 - Participação percentual em valor das RO na exportação nacional de bens minerais.



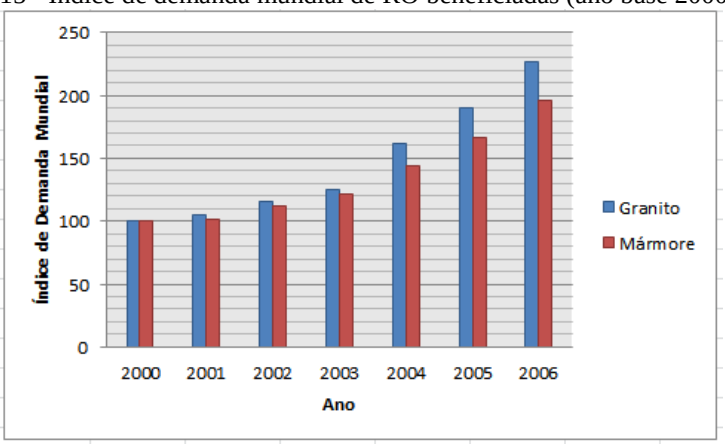
Fonte: Anuário Mineral Brasileiro 2010.

O maior mercado consumidor das RO brasileiras são os EUA, que representam 54% do faturamento total das exportações nacionais. O preço médio do produto nacional exportado fica em (US$ 474.2/t), o maior preço está no produto exportado para o Canadá com valor médio de (US$ 1061.1/t) e o menor preço referente ao produto exportado para a China com valor médio de (US$ 187.8/t). As rochas brutas representam 25% da arrecadação e 55% da massa das exportações, isto porque o produto beneficiado acaba agregando um maior valor.

De acordo com a publicação especializada acessada em 20 de maio de 2013 (http://www.basicsmines.com/dimensionstone), a demanda mundial por chapas de granito e mármore beneficiados praticamente duplicou entre os anos de 2000 e 2006.

O gráfico da Figura 15 apresenta um índice baseado no total de granito e mármore beneficiado que é exportado pelos principais produtores no mundo.

Figura 15 - Índice de demanda mundial de RO beneficiadas (ano base 2000=100).



Fonte: DIMENSION STONES ADVOCATE NEWS. < http://www.basicsmines.com/dimensionstone/>

O crescimento da demanda também se estendeu ao bloco bruto de RO, pois a maioria dos países exportadores que detinham a tecnologia para o beneficiamento em grande escala, não tinham produção para suprir as necessidades do mercado e tiveram que importar a matéria prima (blocos). Esse aumento de interesse no produto bruto incentivou empreendimentos em países com grande potencial para extração de rochas ornamentais como o Brasil, que hoje é um dos principais produtores e exportadores. No entanto, problemas ambientais causados pelo passivo gerado tornaram alguns empreendimentos inviáveis. Apesar dos incentivos temporários do governo para uma produção desordenada e mal planejada (Lei Nº 6373/2012), a busca por novas metodologias que objetivam uma produção mais limpa e otimizada para o setor de RO vem sendo discutida nos últimos anos e é de suma importância econômica, diminuindo custos de lavra e de recuperação ambiental.

3 CARACTERIZAÇÃO ESTRUTURAL DE MACIÇOS ROCHOSOS

A estimativa de descontinuidades dos maciços rochosos é uma tarefa laboriosa. As descontinuidades apresentam características tridimensionais, porém são analisadas geralmente em duas dimensões (afloramentos e frentes de desmonte) ou em uma dimensão (testemunhos de sondagem). Em ambos os casos, acaba-se gerando viés na amostragem. Os afloramentos apresentam informações muito importantes para a caracterização estrutural de maciços rochosos, geralmente utilizam-se os métodos de amostragem como *scanlines* (PRIEST & HUDSON, 1981), *scanlines* circulares (MAULDON et al., 2001), janelas de amostragem (PRIEST, 1993) e testemunhos de sondagens (DEERE, 1963) para a obtenção dos parâmetros de fraturamento.

Para uma boa caracterização do fraturamento de um maciço rochoso, é fundamental uma coleta de dados mais representativa possível. A amostragem correta dos parâmetros de fraturamento produz uma futura estimativa mais fiel às propriedades estatísticas (LONG et al., 1982) da realidade física. Vários métodos são utilizados para analisar o grau de fraturamento de maciços rochosos, entre os mais comuns tem-se a análise de testemunhos de sondagem e imagens dos afloramentos (MAULDON et al., 2001; BARTHÉLÉMY et al., 2009). Após a aquisição dos dados, é efetuada uma análise estatística para definir a distribuição de probabilidade dos parâmetros amostrados e também uma possível correlação entre os parâmetros. O método de amostragem mais utilizado ao longo dos anos tem sido a *scanline* (PRIEST, 2004).

As técnicas de amostragem estão discutidas neste capítulo e ressaltam as deficiências e vantagens de cada método. A proposta de amostragem deste trabalho e o compilamento de parâmetros coletados em campo estão explicados e exemplificados para melhor entendimento do leitor.

3.1 INTRODUÇÃO

O melhor entendimento das propriedades e mecanismos do fraturamento das rochas auxiliam estudos em diversas áreas (mineração, hidrogeologia e indústria civil). Para um trabalho que visa à estimativa de fraturamento de uma determinada área, a obtenção dos parâmetros das descontinuidades (persistência, orientação, espaçamento médio, etc.) de forma correta é essencial para que se tenha estimativas acuradas e precisas. Estudos de Weiss (2008), Manda e Mabee (2010) analisaram os principais métodos de amostragem de

afloramentos comentados no início deste capítulo. A escolha do método de amostragem deste trabalho baseou-se nos estudos anteriores e também na aplicabilidade voltada para a indústria de rochas ornamentais. Apesar da orientação das fraturas serem fundamental para o correto direcionamento da frente de lavra destes depósitos, o grau de fraturamento da área é uma informação mais valiosa, pois a lavra é dinâmica e pode se adequar a orientação das descontinuidades.

3.2 PARÂMETROS DE FRATURAMENTO

Na geoestatística, é comum a utilização de variáveis como a concentração (ppm ou %) para quantificar a presença de um contaminante ou de uma ocorrência mineral num determinado local. As medidas associadas ao grau de fraturamento (descontinuidades) primários são: comprimento do lineamento, atitude (orientação e mergulho) e espaçamento entre descontinuidades. Com esses parâmetros pode se inferir parâmetros secundários como: densidade do fraturamento (número de fraturas por área ou volume), intensidade do fraturamento (linear, por área ou por volume), espaçamento médio entre as fraturas e distribuição do fraturamento. Infelizmente, o grau de fraturamento não pode ser caracterizado por um único parâmetro, porém, a estimativa de todos os parâmetros e seu uso em um modelo geológico e no planejamento de lavra em rochas ornamentais é algo sem sentido, apresentando resultados redundantes ou até controversos. A complexidade inicial está no correto tratamento dos dados iniciais e na escolha do parâmetro mais apropriado para o fim desejado.

3.3 VIÉS DE AMOSTRAGEM

A amostragem de fraturas geralmente apresenta viés associado ao método utilizado. A *scanline* apresenta uma medida pouco representativa, pois é muito sensível à direção escolhida. O comprimento do lineamento é outro parâmetro muito difícil de ser amostrado, pois a cobertura dos afloramentos muitas vezes não possibilita amostrar o comprimento total do lineamento (somente a porção visível). Os principais vieses de amostragem para comprimento dos lineamentos são comentados por Zhang & Einstein (2000) e Terzaghi (1965):

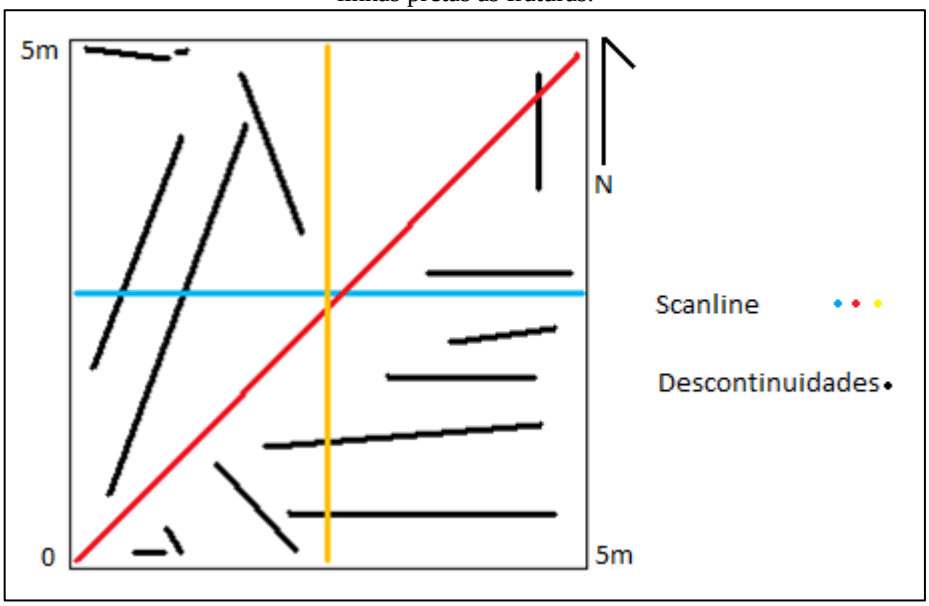
a) viés de orientação - a probabilidade do lineamento aparecer no afloramento depende da orientação relativa entre ele e o afloramento, outro problema relacionado à orientação das fraturas é observado quando a amostragem é feita com *scanlines*, esse método é muito sensível à escolha da orientação da *scanline*, podendo subestimar ou superestimar a frequência do fraturamento em uma determinada área;
b) viés de tamanho - de uma forma geral, fraturas compridas tem maior probabilidade de estarem presentes no afloramento a ser amostrado;
c) viés de truncamento - fraturas com comprimento muito pequeno são difíceis de serem amostradas e geralmente estipula-se um certo limite mínimo de comprimento de fratura para ser amostrado;
d) viés de cobertura - lineamentos muito compridos estendem-se por todo o afloramento e continuam sob a cobertura de solo ou rocha existente no depósito, impedindo uma medida exata, e resultando em uma amostragem errônea.

Embora em alguns casos seja impossível aplicar correções para esses vieses, estudos anteriores criaram técnicas de correções para a maior parte dos problemas relacionados a essas peculiaridades (TERZAGHI, 1965; HUDSON & PRIEST, 1983; LACAZETTE, 1991; NARR, 1996; NIREX, 1997; MAULDON, 1998; BONNET et al., 2001; PÉREZ-CLAROS et al.,2002; RILEY, 2005).

3.4 AMOSTRAGEM POR *SCANLINES*

O método de amostragem por *scanlines* (PRIEST & HUDSON, 1981; BONS et al., 2004) é o principal método de análise de descontinuidades em testemunhos de sondagens e também é muito utilizado em afloramentos por ser de fácil aplicação. Basicamente, realiza-se a observação das descontinuidades no afloramento através de uma linha de amostragem, onde todas as descontinuidades interceptadas pela linha são amostradas. A Figura 16 apresenta três diferentes direções para a *scanline*. Nota-se, que para determinados fraturamentos, dependendo da *scanline* escolhida a representatividade da amostragem será baixa.

Figura 16 - Amostragem por *scanline*. As linhas vermelhas, amarela e azul representam as *scanlines*, as linhas pretas as fraturas.



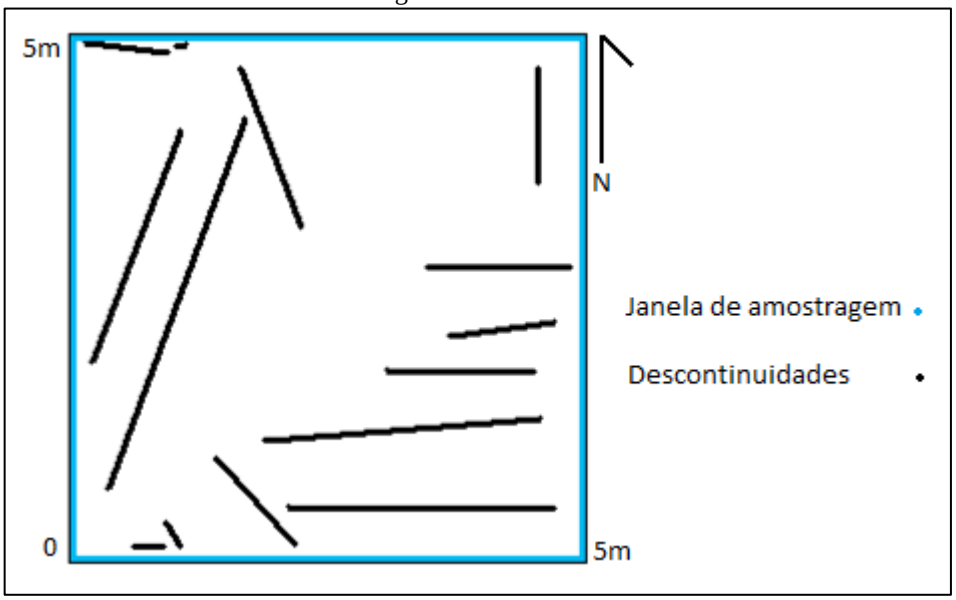
Fonte: MAZZALI

Este método pode apresentar viés causado pela orientação da *scanline*, truncamento das descontinuidades, cobertura de solo ou rocha no afloramento e tamanho das fraturas. Para evitar viés de orientação é comum a utilização de duas *scanlines* perpendiculares entre si nos afloramentos. Esse técnica não pode ser realizada em testemunhos de sondagem. É comum a utilização de modelos matemáticos para realizar ajustes e minimizar as limitações deste método (LA POINTE, 2002).

3.5 JANELAS AMOSTRAIS

A amostragem em janelas (PAHL, 1981; WU & POLLARD, 1995) mede todos os parâmetros das descontinuidades presentes em certa área (Figura 17). Este método é muito usado em sensoriamento remoto onde fotos aéreas ou imagens de satélite da área em estudo apresentam as principais descontinuidades (KOIKE et al., 1995), o que possibilita uma caracterização prévia da área. Este método não evita os vieses causados por cobertura, truncamento e orientação. A utilização de diversas janelas amostrais em uma área melhora o entendimento da continuidade espacial dos parâmetros amostrados, porém existe a dificuldade em conseguir uma distribuição regular das janelas dentro da área em estudo e na escolha do tamanho da janela (representatividade).

Figura 17 - Janela Amostral.

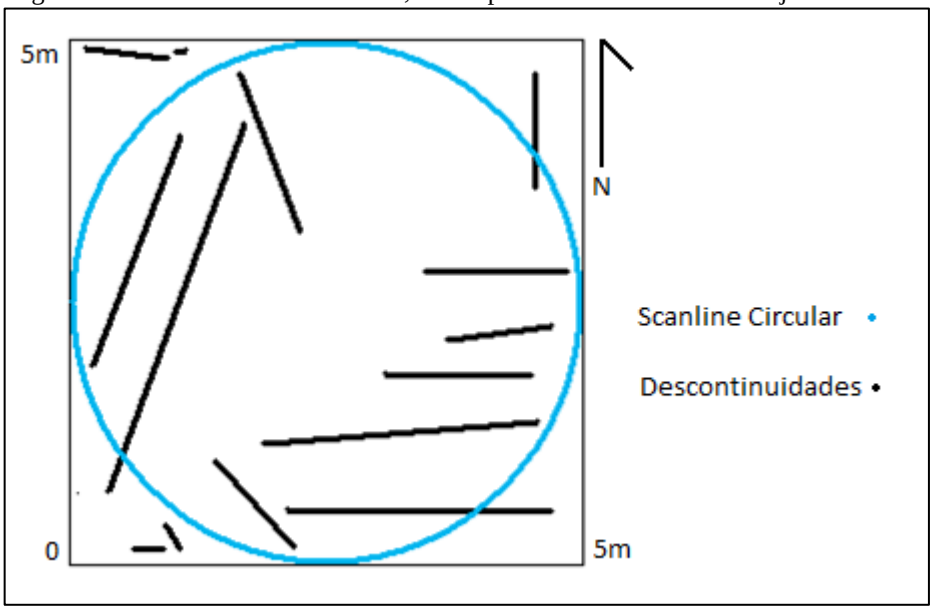


Fonte: MAZZALI

3.6 *SCANLINES* CIRCULARES

Para superar a limitação da orientação escolhida para a *scanline*, utiliza-se *scanline* circular (Figura 18), desta maneira todas as descontinuidades terão a mesma probabilidade de serem amostradas. Este método é comumente utilizado em janelas amostrais (PAHL, 1981), e essa combinação apresentou resultados satisfatórios (LYMAN, 2003). Através da combinação entre essas duas técnicas, Mauldon et al. (2001) estimaram a densidade, intensidade de fraturamento e comprimento médio das descontinuidades baseado nas relações entre as interseções de lineamentos com a *scanline*, os finais de lineamentos presentes dentro das *scanlines* circulares e o raio das *scanlines*. Este método é muito eficiente para certas características de fraturamento e não está sujeito aos vieses de amostragem. Porém, não é possível obter medidas de parâmetros como a orientação das fraturas, sendo essa informação necessária, deve-se recorrer a outros métodos de amostragem.

Figura 18 - *Scanline* circular em azul, linhas pretas são fraturas em uma janela de amostragem.



Fonte: MAZZALI

3.7 CONSIDERAÇÕES

Apesar de diversos estudos compararem os métodos de amostragem (WEISS, 2008; BELAYNEH et al. 2009; MANDA & MABEE, 2010), não é possível dizer qual deles é o melhor e sim qual é o mais apropriado para determinada situação (tipo de pesquisa). De maneira geral, *scanlines* são mais indicadas para estudos de rede de fraturas e modelagem 3D, enquanto, janelas e *scanlines* circulares são mais indicadas para estudos que gerem resultados em 2D (MANDA & MABEE, 2010).

3.8 METODOLOGIA

Como o estudo em questão visa à produção de mapas do fraturamento da área da pedreira de rocha ornamental usando técnicas geoestatísticas em duas dimensões, optou-se por utilizar janelas amostrais. Os dados deste trabalho foram disponibilizados pelo engenheiro Sérgio Kléin que realizou a amostragem em todos os afloramentos presentes na jazida (Figura 19) obtendo, entre outros dados, as coordenadas planares do início e do final de cada descontinuidade.

Figura 19 - Vista de um afloramento com a estação total utilizada para obtenção das coordenadas planares das descontinuidades.

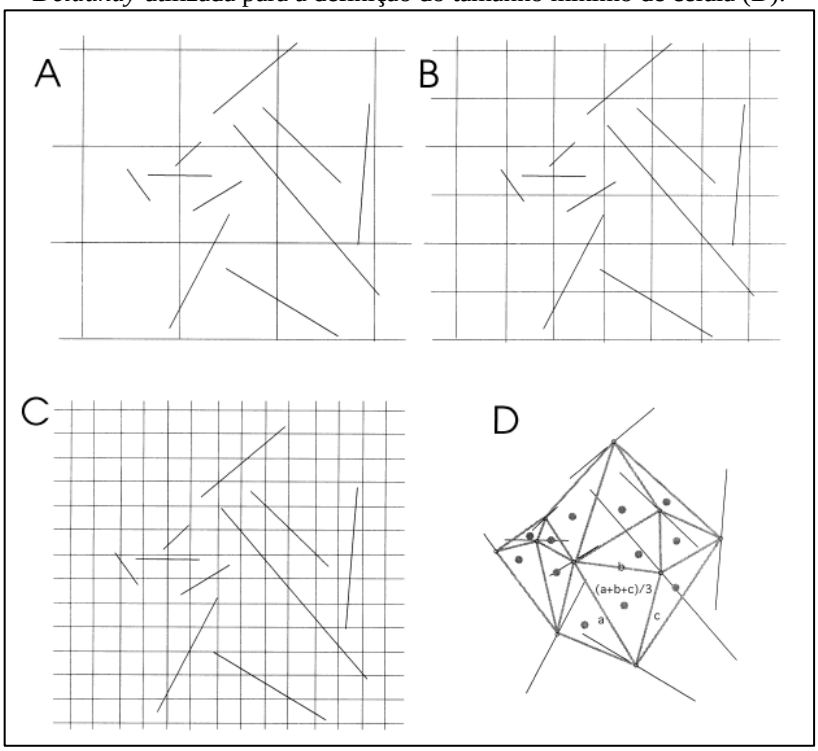
Fonte: Arquivo pessoal de Sérgio Klein.

Estes dados são utilizados no *input* do programa *Lindens* (CASAS et al., 2000), para a análise de densidade de lineamentos e o comprimento de lineamentos na área em estudo. É possível criar uma rede de células retangulares (Figura 20) e obter os valores de comprimento e densidade de fraturas em cada célula.

São consideradas no cálculo dos parâmetros em cada célula todas as descontinuidades com pelo menos uma terminação no interior da célula ou atravessando totalmente a célula. O programa possibilita a criação de redes com diferentes dimensões de células (A, B e C), o limite inferior de dimensão será o resultado apresentado pela média dos lados dos triângulos formados pela triangularização *Delaunay*. A triangularização *Delaunay* (D) apresenta os triângulos formados pelos pontos médios das descontinuidades mais próximas. Para estimar a menor dimensão possível para cada célula, calcula-se a média dos lados dos triângulos. Ex.: ((A+B+C) /3), a média de todos os triângulos presentes será a menor dimensão possível para uma célula naquele conjunto de descontinuidades. A escolha da dimensão da célula leva em consideração, além da distância média entre as descontinuidades, outros parâmetros como o comprimento médio das descontinuidades e a

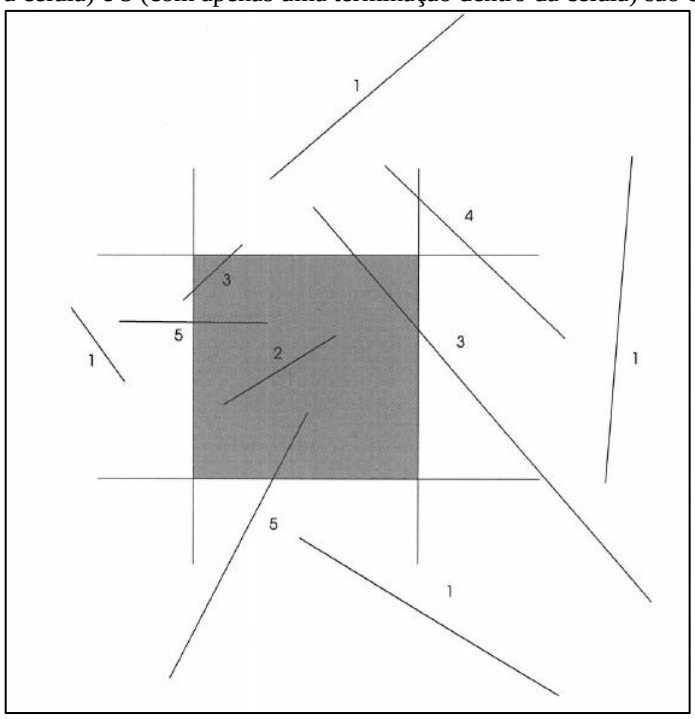
proporção de células com valores de baixa densidade de fraturas ou nenhuma. A Figura 21 ilustra os três tipos de descontinuidades (2, 3 e 5) consideradas no cálculo.

Figura 20 - Três diferentes tamanhos de células (A, B e C) e representação do triangularização *Delaunay* utilizada para a definição do tamanho mínimo de célula (D).



Fonte: CASAS et al. (2000).

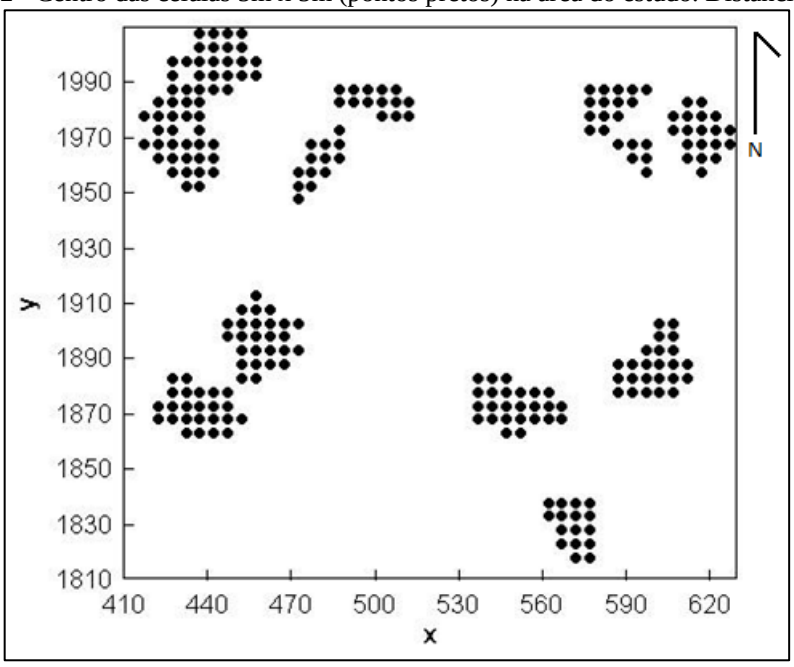
Figura 21 - Descontinuidades utilizadas no cálculo de LF e NF: 2 (com as duas terminações dentro da célula), 3 (atravessando a célula) e 5 (com apenas uma terminação dentro da célula) são consideradas no cálculo.



Fonte: CASAS et al. (2000).

O método utilizado neste trabalho mescla janelas amostrais com *scanlines* retangulares que são na verdade as células criadas no programa *Lindens* (CASAS et al., 2000). Para o cálculo do tamanho mínimo de célula possível, o programa calcula a média das triangularizações *Delaunay*. Dentro dos possíveis resultados, buscou-se adequar o tamanho de célula ao maior bloco usualmente extraído na pedreira, resultando em células de 5m x 5m, totalizando 236 células espalhadas por 11 afloramentos. A Figura 22 apresenta a localização das células espalhadas pelos afloramentos presentes na área em estudo.

Figura 22 - Centro das células 5m x 5m (pontos pretos) na área do estudo. Distâncias em m (X e Y).



Fonte: MAZZALI

3.8.1 Obtenção do índice de fraturamento

Com as informações de densidade e comprimento das descontinuidades presentes em cada célula, obtém-se o número de descontinuidades e o comprimento total das descontinuidades em cada célula. Esses parâmetros são combinados para obter o índice de fraturamento a ser utilizado nas estimativas futuras. Multiplicando-se o número de fraturas (NF) e o comprimento total das fraturas (LF) criou-se o índice (NF x LF).

A utilidade deste índice vem do fato de que o maciço rochoso pode ter muitas, porém, pequenas fraturas ou poucas, porém, grandes fraturas. Em ambos os casos, a qualidade do bloco é ruim. Por outro lado, o produto de NF x LF intrinsecamente aponta tanto o comprimento de fraturas quanto para o número de fraturas. O índice pode indicar uma zona de extração favorável como, também, pode indicar uma zona de baixa recuperação de blocos de

rochas para um dado valor limite máximo de NF x LF (equivalente ao teor *cutoff* limite usado em depósitos minerais de metais).

3.8.2 Abordagem Direta e Indireta

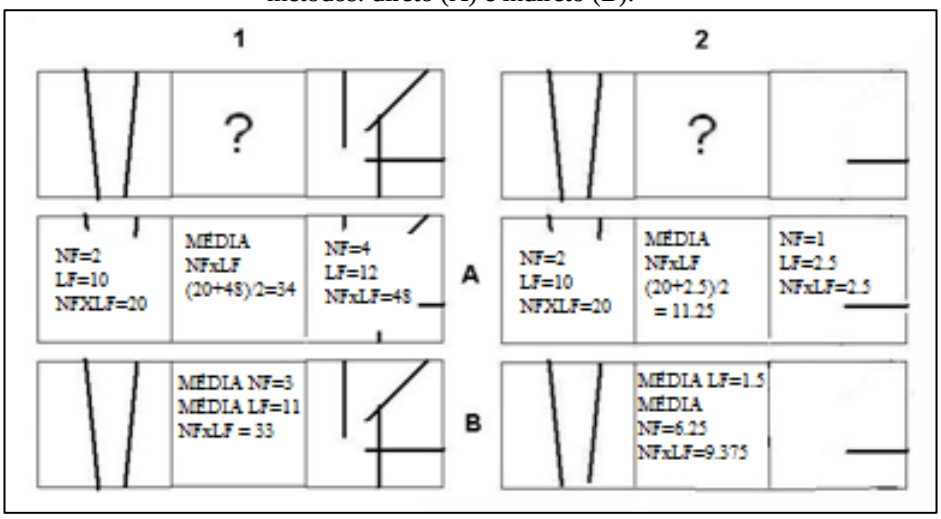
Como o índice estudado é composto pelo produto de duas variáveis (LF e NF), foi analisada a influência que a acumulação do índice anterior, ou posterior à modelagem produz nas estimativas.

A acumulação de variáveis antes da modelagem apresenta resultados diferentes da modelagem das variáveis e posterior multiplicação das variáveis como foi mostrado por trabalhos anteriores (MARCOTTE & BOUCHER, 2001). Por isso, é fundamental analisar o impacto que cada abordagem produz nas estimativas e avaliar a correlação entre o real e o estimado para ambas as abordagens.

O Método A estima diretamente o índice formado por NFxLF usando os dados acumulados transformados. O Método B modela as variáveis NF e LF (indiretamente) separadamente antes de combiná-las no final para formar o índice acumulado em um bloco (depois de ter estimado cada uma individualmente).

A Figura 23 apresenta um esquema demonstrando a consequência de utilizar cada um dos métodos (A e B) ilustrados em duas situações (1 e 2). No exemplo, a célula central é estimada usando os valores das células adjacentes (uma a esquerda e outra a direita). O método direto (A) tende a produzir valores de índice maiores do que o método indireto (B). A magnitude da superestimativa é afetada pelo inverso da variabilidade das variáveis. O impacto nos resultados na situação 1 é menor do que na situação 2.

Figura 23 - Exemplo ilustrando os resultados interpolando o índice combinado NF x LF usando dois métodos: direto (A) e indireto (B).



Fonte: Modificado de KLEIN et al.

Por outro lado, se um dos termos utilizados para derivar o índice acumulado é próximo ou igual ao correspondente da outra célula, o índice resultante acumulado será muito próximo ou até mesmo igual, independentemente do método usado. Este fato pode ser mais bem entendido pela seguinte dedução matemática.

Suponha-se o $\mathbf{I_A}$ sendo calculado pelo método A e $\mathbf{I_B}$ o equivalente usando o método B. Duas células, a primeira e a segunda respectivamente serão usadas para, teoricamente, estimar uma terceira célula não amostrada. Assumindo que se tem para as células os seguintes valores:

Primeira célula: NF = a, LF = b, e NFxLF = a . b

Segunda célula: NF = x, LF = y, e NFxLF = x . y

O índice na célula estimada pode ser calculado usando os dois métodos, como mostrado a seguir:

$$\boldsymbol{I_A} = \frac{\boldsymbol{a.b+x.y}}{\mathbf{2}} \qquad (1)$$

e

$$\boldsymbol{I_B} = \frac{\boldsymbol{(a+x).(b+y)}}{\mathbf{4}} \qquad (2)$$

Se a = x, então:

$$\mathbf{I}_{\boldsymbol{A}} = \frac{\boldsymbol{x.b+x.y}}{\mathbf{2}} \qquad (3)$$

e

$$\boldsymbol{I_{B=}} \frac{(\boldsymbol{x}+\boldsymbol{x}).(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{y})}{\mathbf{4}} = \frac{\mathbf{2}\boldsymbol{x}(\boldsymbol{b}+\boldsymbol{y})}{\mathbf{4}} = \frac{\boldsymbol{xb}+\boldsymbol{xy}}{\mathbf{2}} = \boldsymbol{I_A} \quad (4)$$

No qual irá levar ao mesmo resultado de índice.

A demonstração acima é verdadeira para NF iguais ou LF iguais. Ambas variáveis (***x*** e ***a***) representam NF e (***y*** e ***b***) LF em cada célula. Ambas as abordagens foram utilizadas no estudo de caso para avaliar o impacto nas estimativas e analisar qual método aproxima-se mais dos resultados obtidos *in situ*.

4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo contém o estudo de caso realizado em uma pedreira de rocha ornamental onde foi aplicada a metodologia anteriormente explicada. Uma breve descrição do local do depósito (localização, geologia regional e local) é seguida dos procedimentos de amostragem, da estimativa e das validações efetuadas.

4.1 ACESSIBILIDADE, RECURSOS LOCAIS E FISIOGRAFIA.

Informações relacionadas à acessibilidade, recursos locais e fisiografia do depósito avaliado estão apresentadas a seguir.

4.1.1 Localização e Vias de Acesso

Esse estudo foi efetuado em uma pedreira de rocha ornamental no município de Cachoeira do Sul. Distante aproximadamente 170 km de Porto alegre, a mina extrai blocos de sienito (conhecido comercialmente como sienito piquiri).

4.1.2 Topografia, clima e vegetação.

A região está localizada num planalto onde a presença de ondulações suaves a moderadas é frequente (coxilhas) com cotas não superiores a 500 m, apresenta um clima temperado subtropical (Cfa). O verão apresenta temperaturas altas (40ºC) e inverno rigoroso com temperaturas negativas e ocorrência de geada. As chuvas são regularmente distribuídas durante o ano com precipitações anuais médias de 1500 mm. A vegetação predominante é rasteira com a ocorrência de algumas árvores de maior porte (canela preta, butiá, branquilhos e aroeira).

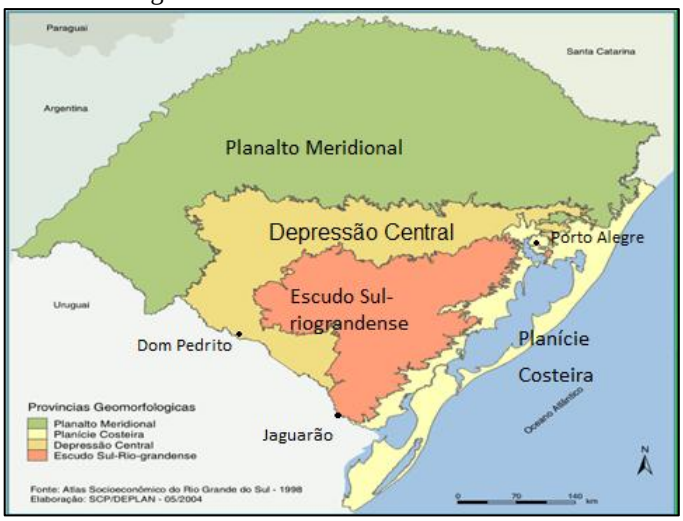
4.2 GEOLOGIA

A descrição geológica relacionada ao depósito avaliado é apresentada seguida da caracterização estrutural da área em estudo.

4.2.1 Geologia Regional

O Sienito Piquiri encontra-se na região Sudeste do Rio Grande do Sul, na região conhecida como Serra do Sudeste. A serra do Sudeste é um planalto composto por ondulações (coxilhas) que chegam a altitudes de 500 metros. A geologia desta área é do período Pré-Cambriano, esta região também é conhecida como Escudo Sul-Rio-Grandense (Figura 24), este escudo tem uma forma triangular onde os vértices estão próximos aos municípios de Porto Alegre, Jaguarão e Dom Pedrito.

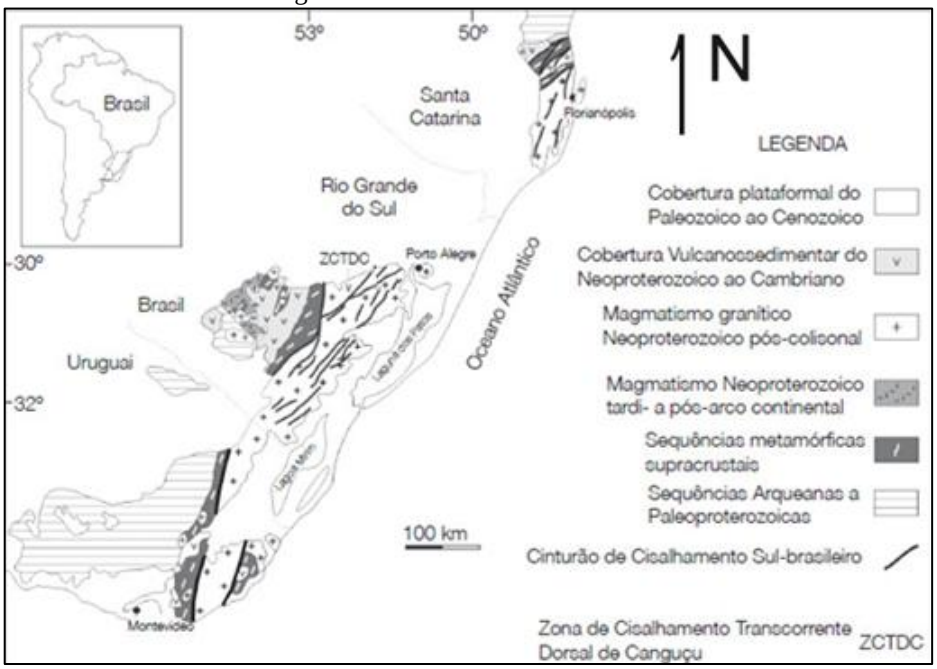
Figura 24 - Escudo Sul-Rio-Grandense.



Fonte: Extraído de LIMEIRA (http://www.fabiolimeira.pro.br/3/post/2013/03/rio-grande-do-sul.html)

Na região sudeste do escudo Sul-Rio-Grandense, encontra-se o Cinturão Dom Feliciano (Figura 25). Este cinturão é composto por rochas granito-gnáissicas deformadas, granitoides profiríticos deformados, granitoides com foliação milonítica e intrusões isotrópicas de composição monzo e sienograníticas. É dividido entre flanco ocidental e zona central, o flanco ocidental corresponde a uma faixa de largura variável, onde conjugam tectonicamente um embasamento Pré-Brasiliano e sequências orogênicas. A Zona Central consiste em uma faixa linear composta por rochas gnáissicas, magmáticas e graníticas.

Figura 25 - Cinturão Dom Feliciano.

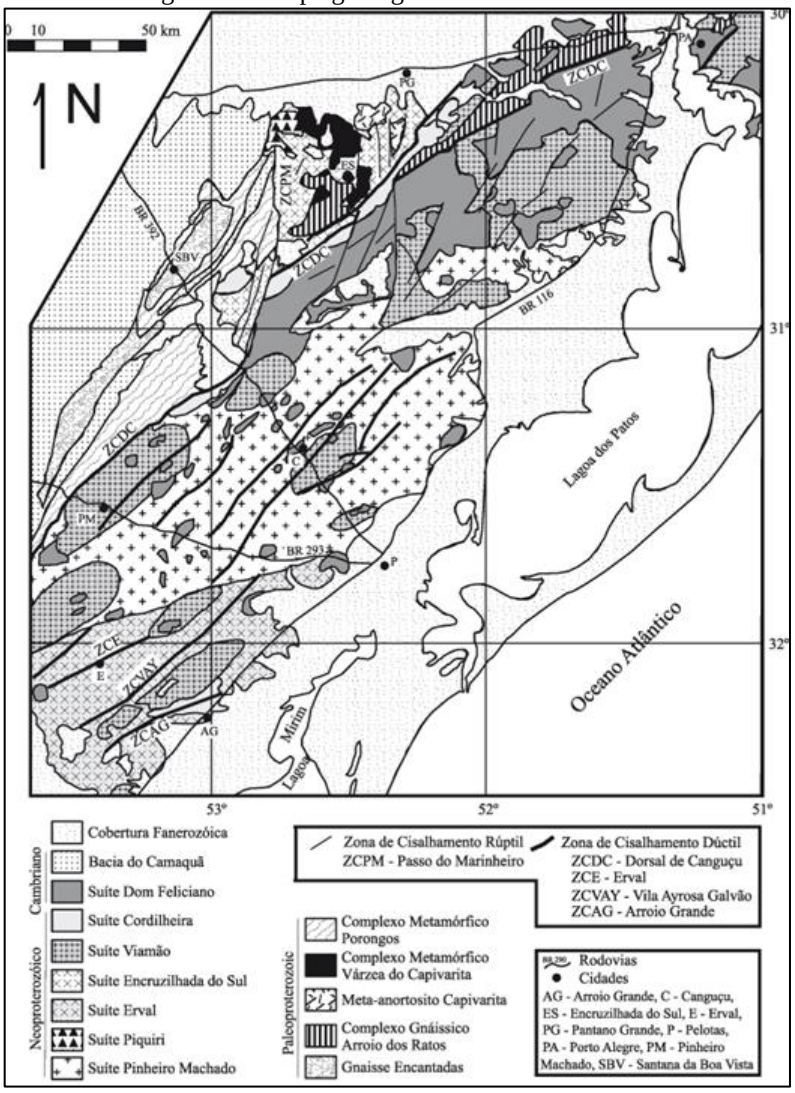


Fonte: Modificado de BITENCOUT & NARDI (2000).

O sienito Piquiri encontra-se na suíte sienítica (Suíte Piquiri). Esta suíte está situada na borda noroeste do Batólito Pelotas que é composto por mais seis suítes graníticas (Pinheiro Machado, Erval, Viamão, Encruzilhada do Sul, Cordilheira e dom Feliciano) (PHILIPP et al., 2003). O Batólito é um segmento do Cinturão Dom Feliciano, e neste cinturão foram observados, no estado dúctil, dois eventos geotectônicos relacionados aos processos orogênicos brasilianos. O primeiro evento ocorreu sob grau metamórfico médio a alto com transporte na direção transversal ao alongamento do cinturão, o segundo ocorreu sob grau metamórfico baixo com transporte na direção longitudinal ao alongamento do cinturão (DI GIORGIO, 2003). O sistema de deformação longitudinal transcorrente de direção NS e NE é muito importante para o estudo.

A zona de deformação NE (Cisalhamento Dorsal de Canguçu) (Figura 26) teve frequentes reativações durante o mesozoico. A zona de deformação NS compreende uma faixa de cisalhamento altamente rúptil pertencente ao sistema Passo dos Marinheiros (FERNANDES & PORCHER, 1999).

Figura 26 - Mapa geológico do Batólito Pelotas.



Fonte: Modificado de PHILIPP & MACHADO (2001)

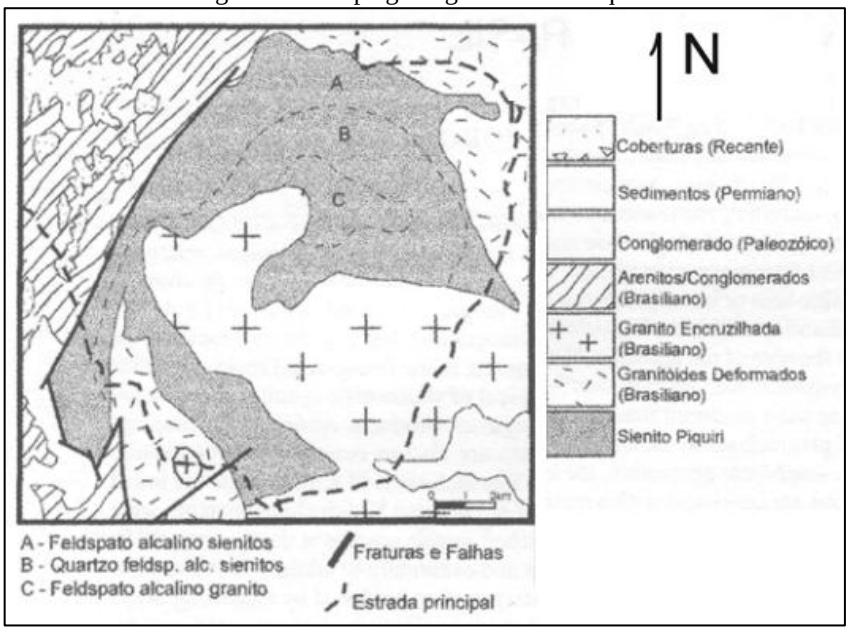
4.2.2 Geologia Local

A Suíte sienítica Piquiri está contida em uma área de 130 km² intrusiva em gnaisses graníticos, metapelíticos, calco-silicatos e também em rochas sedimentares da base da Formação Arroio dos Nobres. Com idade estimada de 600 Ma, o Sienito Piquiri (JOST et al., 1985) causa metamorfismo de contato em suas encaixantes neoproterozóicas (VIEIRA JR. et al., 1989) é intrudido pela Suíte Granítica Encruzilhada do Sul (BITENCOURT et al., 1993). A suíte sienítica tem presente na sua constituição feldspato alcalino sienitos, feldspato alcalino quartzo sienitos e feldspato alcalino granitos (Figura 27), e apresenta uma granulação mais fina nas bordas, sendo no núcleo encontrada a granulação mais grossa.

Suíte Piquiri apresenta foliação de fluxo ígneo marcada pela orientação de forma dos feldspatos, dos minerais máficos e dos enclaves máficos microgranulares, esta orientação

acompanha os contatos externos do corpo (VIEIRA JR. et al., 1989) destacando a presença de uma lineação subvertical.

Figura 27 - Mapa geológico Sienito Piquiri.



Fonte: Modificado de JOST et al.(1985).

Os principais tipos de enclaves observados no Sienito Piquiri são:

a) xenólitos apresentando orientação do fluxo ígneo;
b) autólitos provenientes de fragmentação das margens resfriadas;
c) enclaves máficos microgranulares;

As rochas da Suíte Piquiri apresentam coloração rosa acinzentada, textura variando de equigranular fina a equigranular grossa, sendo que as finas tendem a apresentar estrutura maciça. As bordas desta intrusão apresentam sienitos de textura poiquilítica definida por feldspato alcalino, diopsídio e anfibólios (STABEL et al., 2001). O feldspato alcalino nesta fácies é em geral homogêneo ou contém menos de 25% de pertita fina, ocorre como inclusão em anfibólio, diopsídio e quartzo, o que sugere formação durante todos os estágios de resfriamento do magma. O núcleo da intrusão apresenta predominantemente feldspato alcalino pertítico.

4.2.3 Caracterização Estrutural

O estudo de caracterização estrutural da jazida teve dois objetivos:

a) determinação dos elipsoides de paleotensões;
b) análises dinâmicas, geométricas e cinemáticas das estruturas locais.

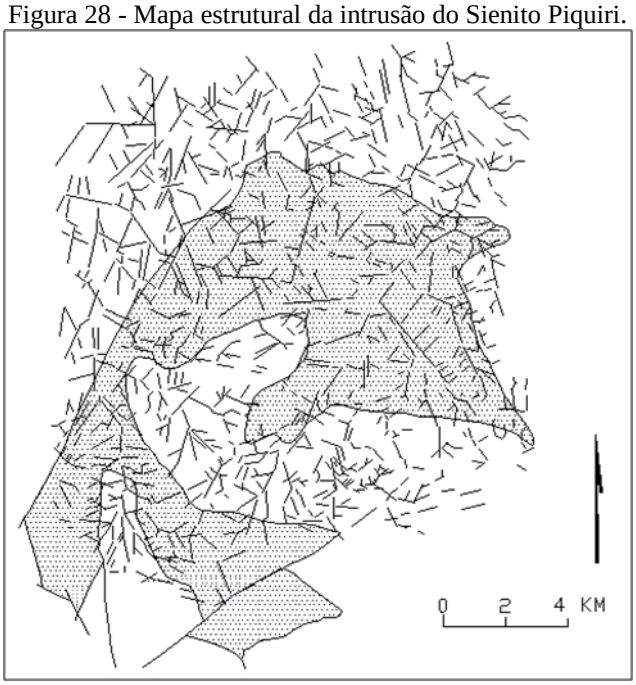
O conhecimento destas estruturas e tensões permite uma melhor orientação da frente de lavra buscando uma otimização do planejamento visando à extração de blocos menos fraturados.

Esse estudo, inicialmente, baseou-se em fotografias aéreas da região em escala 1:25.000. Numa segunda etapa, foram efetuadas visitas no campo onde foram mapeadas as descontinuidades nos afloramentos e nas frentes de lavra. Nesta etapa, 26 dados de "*slickensides*"(ranhuras que comprovam o deslocamento entre blocos) e "*steps*" (pequenos degraus encontrados nas ranhuras de slickensides que demonstram a direção do deslocamento) foram coletados nos planos de falha para a determinação do elipsoide de paleotensões.

Após a análise inicial dos dados, decidiu-se pela separação em dois grupos A e B, visando facilitar a interpretação. Os dados então foram processados com a metodologia dos diedros direitos proposta por Angelier e Mechler (1977). Esse procedimento permite a definição do elipsoide de paleotensões e a consequente cinemática das juntas (DI GIORGIO et al., 2003).

A pedreira de rocha ornamental estudada está totalmente incluída na porção norte da intrusão de Sienito Piquiri, muito próximo ao contato com suas rochas hospedeiras Metamórficas e Plutônicas do período Neoproterozóico (Figura 28). Esta figura é baseada nas fotografias aéreas da região (escala 1:25.000) e nota-se apenas alguns lineamentos do tipo frágil, as falhas e o contato do sienito com as rochas encaixantes.

Figura 28 - Mapa estrutural da intrusão do Sienito Piquiri.



Fonte: Modificado de JOST et al., (1985)

A geologia do sienito Piquiri está relacionada à evolução do escudo Sul-riograndense, a área cratônica situada mais ao sul do estado brasileiro. A configuração final do Batolito Pelotas resulta de três principais ciclos magmáticos. A intrusão de Encruzilhada do Sul, na qual se encontra o sienito Piquiri, foi formada no segundo ciclo magmático referente ao Neoproterozóico tardio (595-580 Ma).

O sienito Piquiri é composto por um sienito holocristalino marrom avermelhado, de textura equigranular, granulometria de fina a grossa, localmente porfirítico e preferencialmente laminado. Minerais essenciais incluem: ortoclásio, microclínio, albita, oligoclásio, augita, egirina, hornblenda e biotita. Minerais acessórios incluem: apatita, zircão, titanita e rutilo.

A intrusão tem forma de ferradura e aproximadamente 120 km^2, mostrando contatos abruptos e verticais com a rocha hospedeira. O contato oeste apresenta falhas mais jovens do que o sienito. Nos limites da intrusão, xenolitos estão amplamente presentes, enquanto a rocha encaixante é finamente cristalizada devido ao metamorfismo de contato.

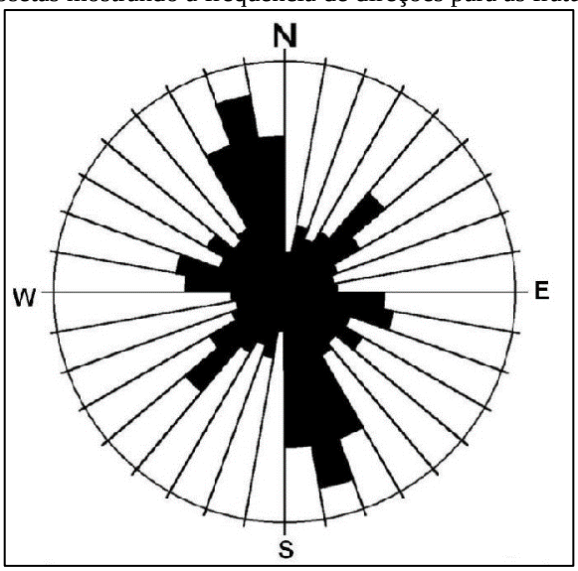
O complexo rochoso em torno da intrusão a E, NE e parcialmente a N, é um corpo de blastomilonitos derivado de gnaisses alterados tectonicamente e texturalmente. Ao S e SE ocorre o complexo granítico de Encruzilhada, que, aparentemente, intrude o sienito Piquiri lateralmente dando a ele um formato de ferradura (JOST et al., 1985).

Considerando os objetivos deste trabalho, a característica mais importante da intrusão está relacionada à sua configuração tectônica. Existem dois tipos de sistemas de

fraturas. O primeiro está relacionado à consolidação magmática e o segundo é devido ao falhamento regional recente (JOST et al. 1985). O primeiro grupo de estruturas compreende fraturas longitudinais, transversais, oblíquas e sub-horizontais. A geometria destas fraturas está relacionada a estruturas subsólidas da intrusão. De fato, laminação e lineação realizam um controle importante durante o resfriamento do magma. Fraturas longitudinais são paralelas à laminação magmática e o padrão resultante dessas fraturas é anular. Fraturas transversais cortam a foliação magmática em ângulos retos mostrando uma geometria radial, enquanto que, as fraturas oblíquas são transversais à laminação. Finalmente, fraturas subparalelas são geneticamente ligadas ao alívio de carga durante o processo de erosão do topo da intrusão. Este último tipo de fraturas não será abordado neste trabalho.

Uma análise preliminar mostra a existência de fraturas que provavelmente poderiam ter sido geradas ou reativadas por processo de falhamento regional. Em uma escala local, os resultados estão condensados na Figura 29 onde está exibido o diagrama sinóptico produzido medindo a orientação de lineações observadas na pedreira. Basicamente o diagrama exibe ao menos três padrões de estruturas subverticais: NNW, NW, NE.

Figura 29 - Diagrama de rosetas mostrando a frequência de direções para as fraturas mapeadas na pedreira.



Fonte: DI GIORGIO et al.

Análises cinemáticas de estruturas resultando da aplicação do método do poliedro (ANGELIER & MECHLER, 1977) mostraram a existência de duas fases distintas de deformação, fase A e B. A primeira fase de deformação tem eixo σ_1 ao longo de NS, enquanto o eixo de tensão correspondente na fase B é perpendicular a deformação da fase A. Ambos

eixos, σ_1 e σ_2 estão no plano horizontal. A natureza da fratura é transcorrente e sua identificação foi obtida pelo método de Anderson (1942) (Tabela 1).

Tabela 1 - Identificação do tipo de fratura: T= fratura de partição; R= fratura de cisalhamento de Riedel; P= fratura de cisalhamento.

Deformação	Tipo de Fratura	Direção
A	T	0^0 e 10^0
A	R	340^0 e 360^0
A	P	310^0 e 330^0
B	T	290^0 e 300^0
B	P	260^0 e 270^0
B	R	270^0 e 290^0

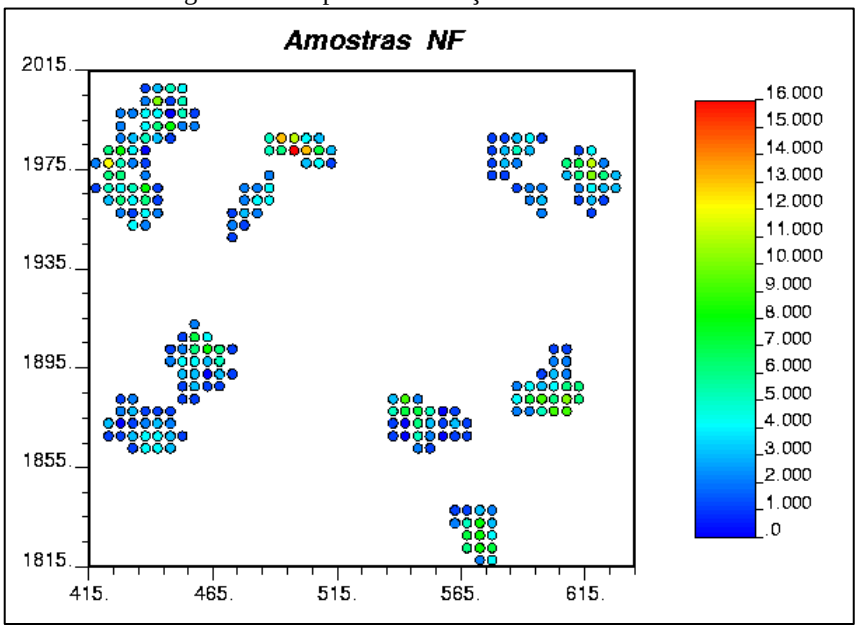
4.3 RECURSO MINERAL E ESTIMATIVA DA RESERVA DE MINÉRIO

Nesta seção está presente toda a análise estatística das variáveis em estudo, o estudo de continuidade espacial, a estimativa dos índices direto e indireto e as respectivas validações.

4.3.1 Localização das Amostras

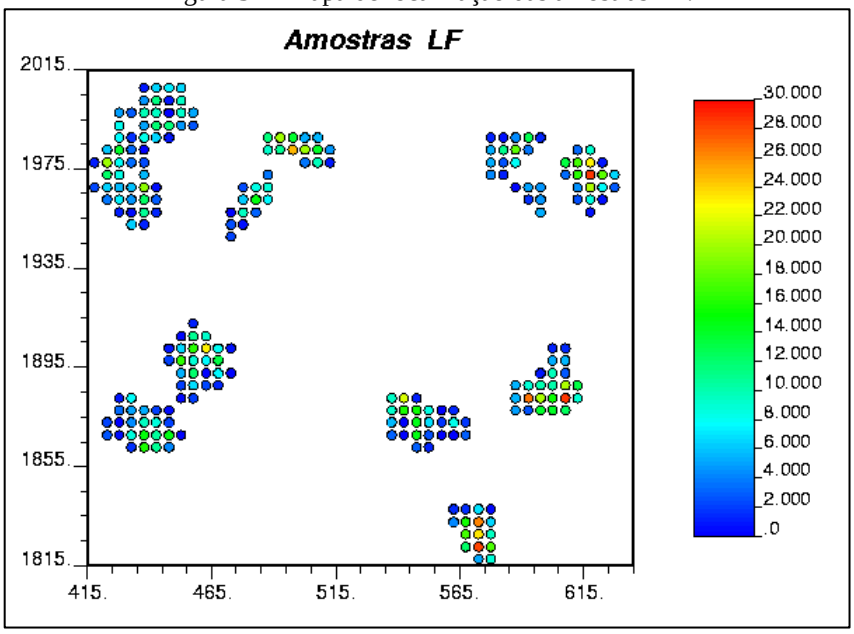
Os mapas abaixo (Figura 30, Figura 31 e Figura 32) apresentam a localização em um sistema de coordenadas local e o valor para cada parâmetro observado durante a amostragem, sendo apresentado NF, LF e o índice já combinado “DIRETO” respectivamente. Nota-se que alguns valores extremos de NF apresentam valores médios de LF, porém no índice DIRETO apresentam valores extremos por ser o produto de ambos. Isso se dá pelo fato de que os traços das fraturas aparecerem agrupados, porém em diferentes tamanhos. Vale lembrar, que está sendo medida a intersecção da fratura com o plano e não a fratura propriamente dita. Um sumário estatístico dos dados (Tabela 2) é apresentado para uma avaliação prévia deste banco de dados.

Figura 30 - Mapa de localização das amostras NF.



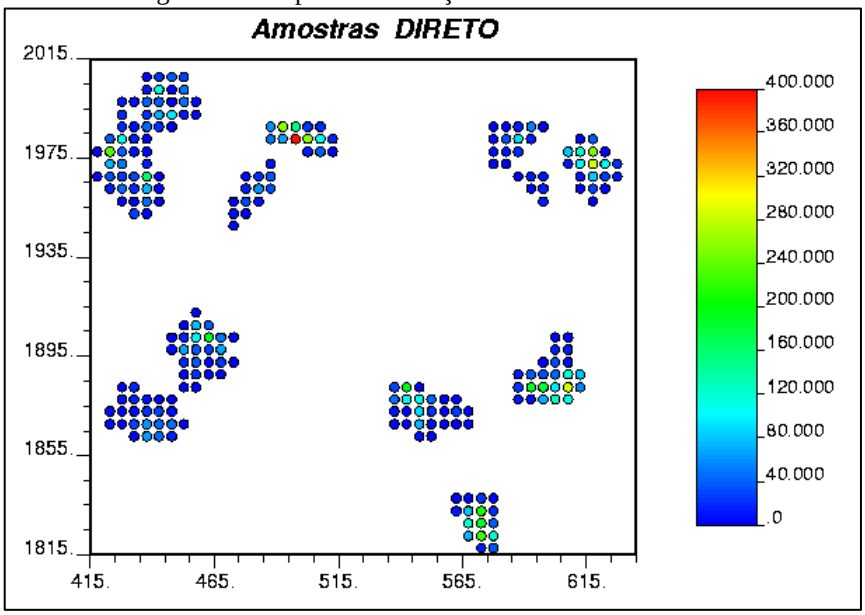
Fonte: MAZZALI

Figura 31 - Mapa de localização das amostras LF.



Fonte: MAZZALI

Figura 32 - Mapa de localização das amostras DIRETO.



Fonte: MAZZALI

Tabela 2 - Sumário estatístico dos dados.

NF	NF	NL	DIRETO
N°	236	236	236
Média	3.44	7.14	39.38
Desvio Padrão	2.7	6.45	60.94
Variância	7.29	41.6	3713.68
Cv	0.79	0.9	1.55
Max	16	26.4	393.6
Q3	5	10.15	45
Mediana	3	5.4	15.1
Q1	1	1.95	2.25
Min	0	0	0

4.3.2 Análise Estatística dos Dados

Nesta seção, a análise univariada, bivariada, verificação da presença de efeito proporcional, classificação de valores extremos, desagrupamento amostral e estudo da continuidade espacial dos fenômenos estão apresentados e comentados.

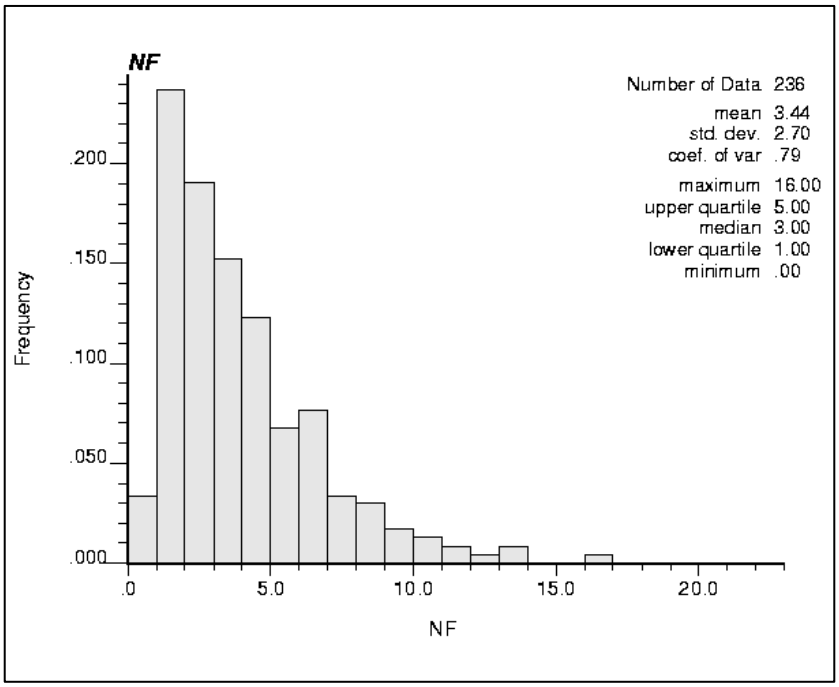
4.3.2.1 Estatística Univariada

Dados organizados conseguem mostrar mais claramente o comportamento das variáveis. Nesta parte do trabalho, cada variável será estudada separadamente, obtendo medidas de estatística descritiva e interpretando o resultado dessa análise.

4.3.2.1.1 Variável NF

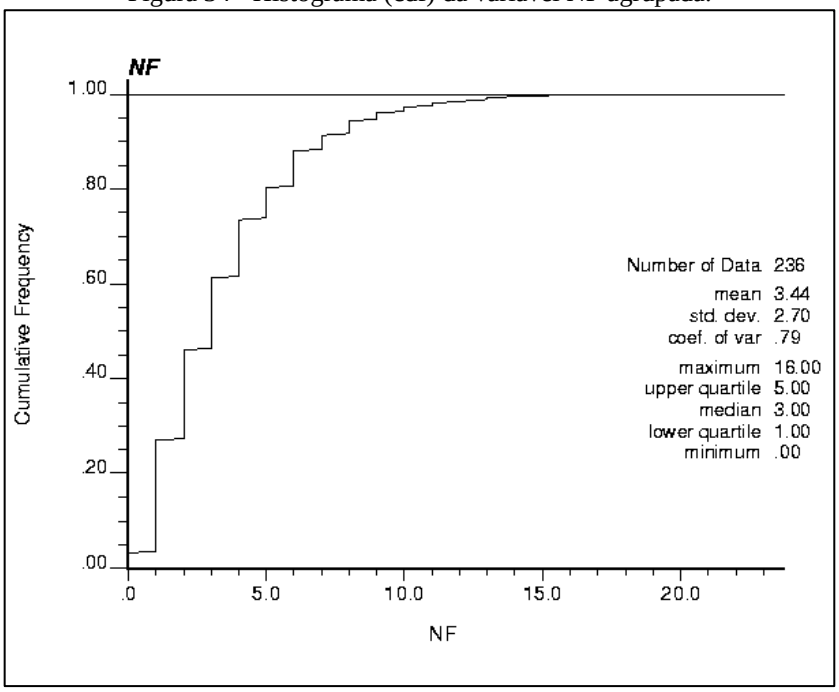
A Figura 33 apresenta o histograma de frequência da variável NF, mostrando uma forma monomodal de assimetria positiva, com coeficiente de variação de 0.79. Presume-se que não teremos muito problemas para realizar estimativa local. O histograma de frequência acumulado (Figura 34) apresenta o formato característico das variáveis discretas, e essa falta de continuidade entre os valores acaba facilitando a visualização e promovendo um melhor entendimento sobre o comportamento dos dados. Nota-se que mais de 60% das células contém poucas fraturas.

Figura 33 - Histograma (pdf) da variável NF agrupada.



Fonte: MAZZALI

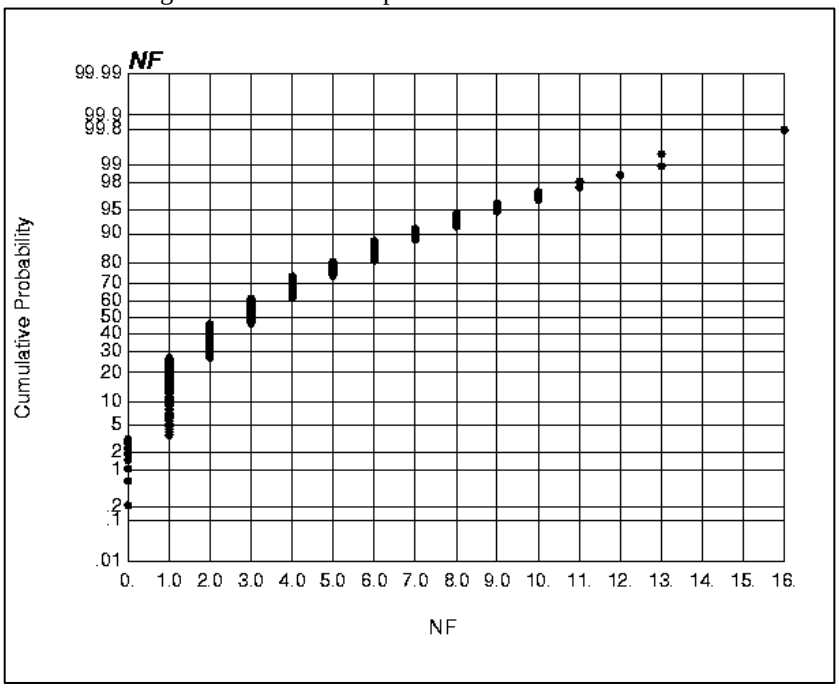
Figura 34 - Histograma (cdf) da variável NF agrupada.



Fonte: MAZZALI

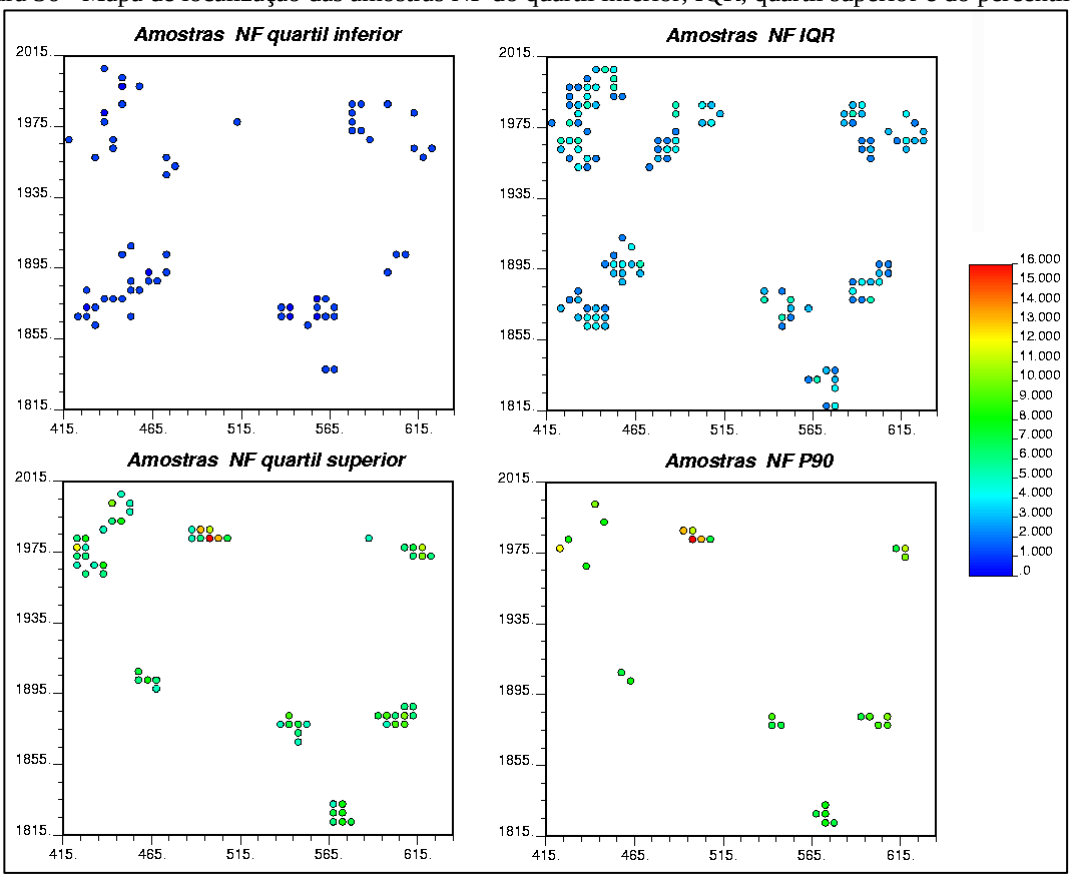
O gráfico de probabilidade acumulada (Figura 35) apresenta possíveis valores extremos destacados do restante dos pontos da distribuição de probabilidade. Esses eram esperados, pois os dados apresentam uma assimetria positiva acentuada como pode ser visto na Figura 33. Estão representados também o quartil inferior, a distância interquartil (IQR), o quartil superior e os dados pertencentes ao percentil 90 através do mapa de localização das amostras pertencentes a estas classes (Figura 36). Através destes mapas, pode-se notar que áreas de valores extremos se encontram preferencialmente no sudeste e no noroeste da jazida.

Figura 35 - Gráfico de probabilidade da variável NF.



Fonte: MAZZALI

Figura 36 - Mapa de localização das amostras NF do quartil inferior, IQR, quartil superior e do percentil 90.



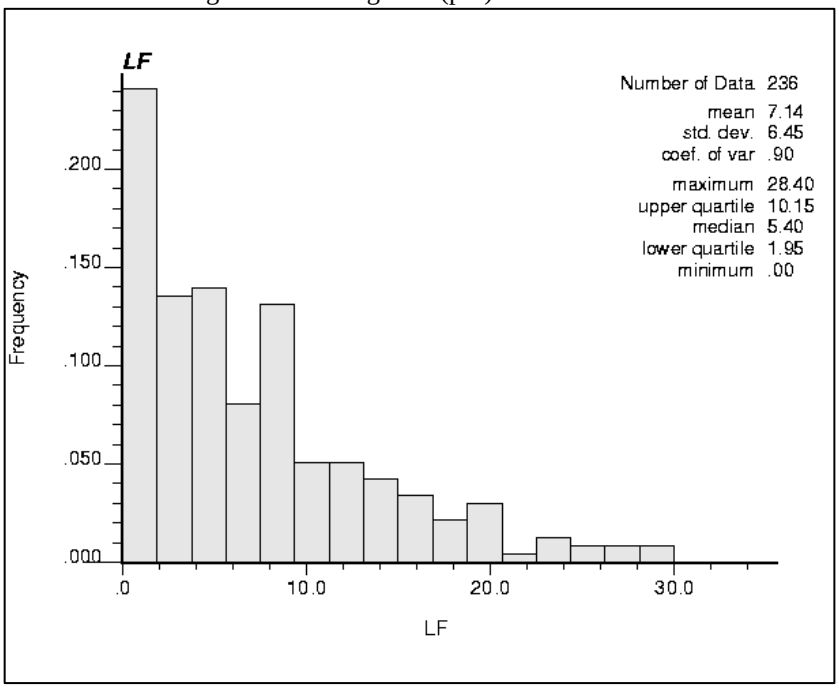
Fonte: MAZZALI

O fenômeno apresenta uma distribuição com alta variabilidade, nota-se que todas as áreas do depósito apresentam células com poucas fraturas assim como células com muitas fraturas, porém o setor noroeste e sudeste concentram o maior número de células pertencentes ao percentil 90, mostrando uma área mais fraturada nessas regiões.

4.3.2.1.2 Variável LF

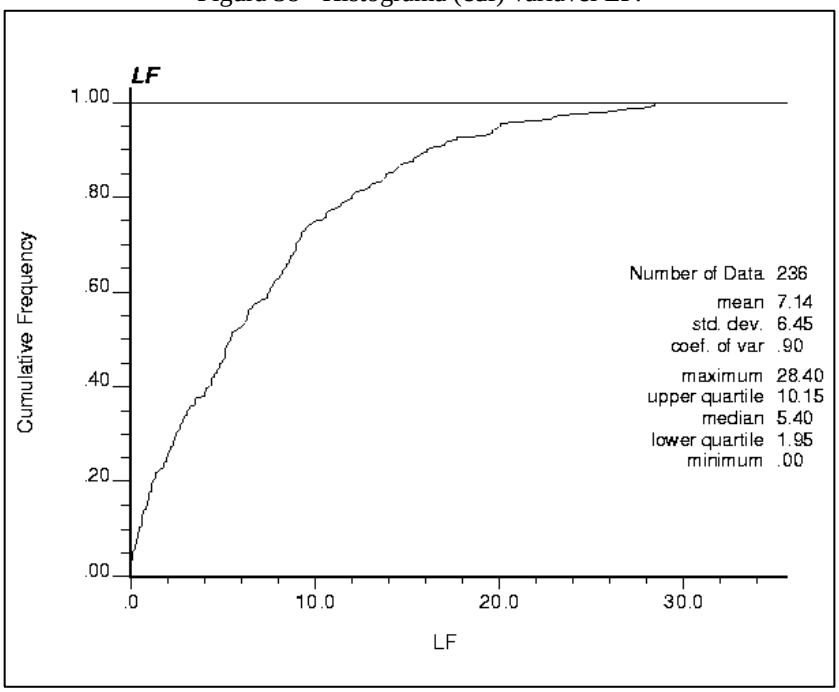
Abaixo, o histograma de frequência da variável LF (Figura 37) apresenta comportamento monomodal, com assimetria positiva e coeficiente de variação médio-alto 0.90, antevê-se que a estimativa local para esse fenômeno pode ser difícil com possíveis erros elevados de interpolação. O histograma acumulado da Figura 38, apresenta uma melhor visualização da distribuição da variável LF e o gráfico de probabilidade acumulada (Figura 39 e Figura 40) mostra a presença de valores extremos, o que está de acordo com o CV destes dados que já chamava a atenção para possíveis valores extremos.

Figura 37 - Histograma (pdf) da variável LF



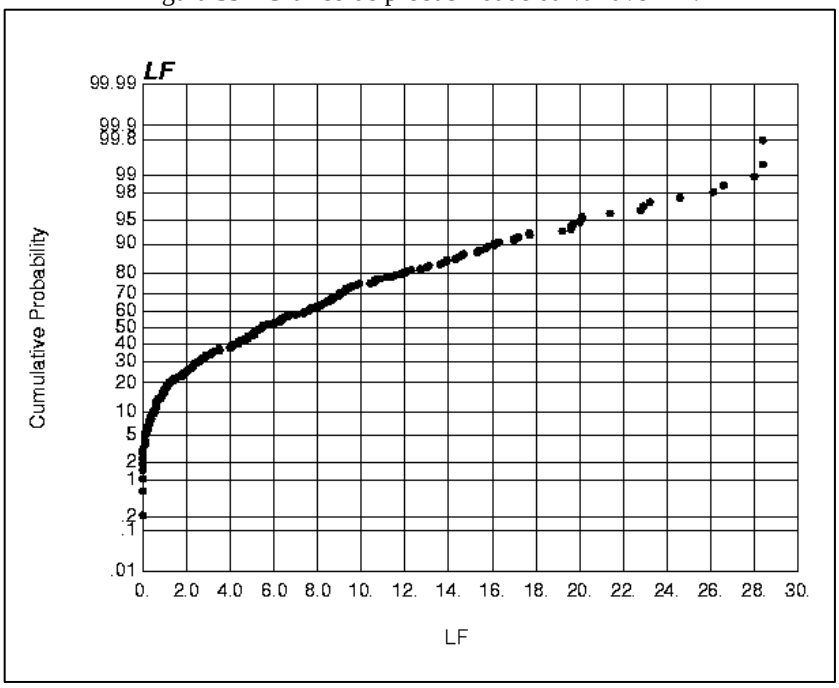
Fonte: MAZZALI

Figura 38 - Histograma (cdf) variável LF.



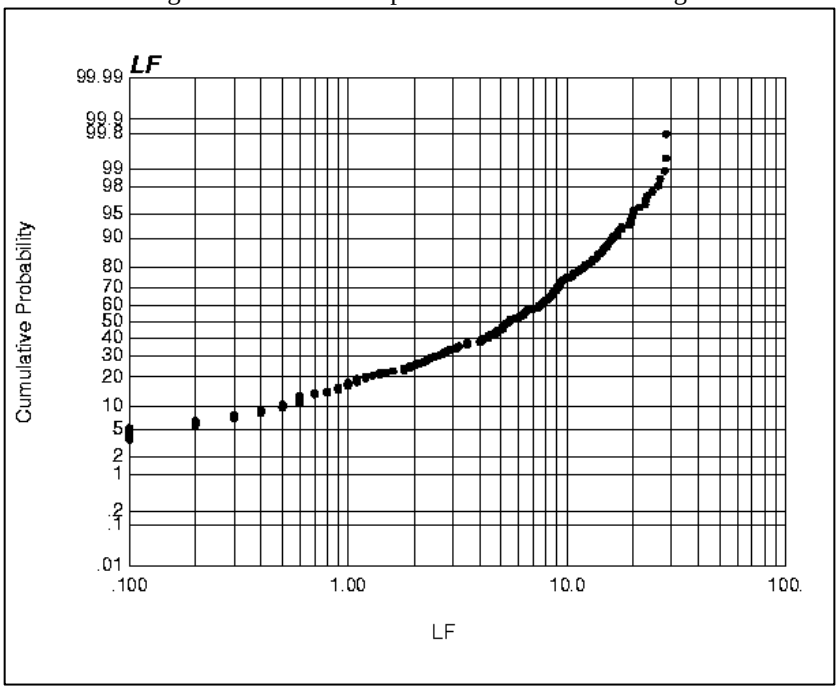
Fonte: MAZZALI

Figura 39 - Gráfico de probabilidade da variável LF.



Fonte: MAZZALI

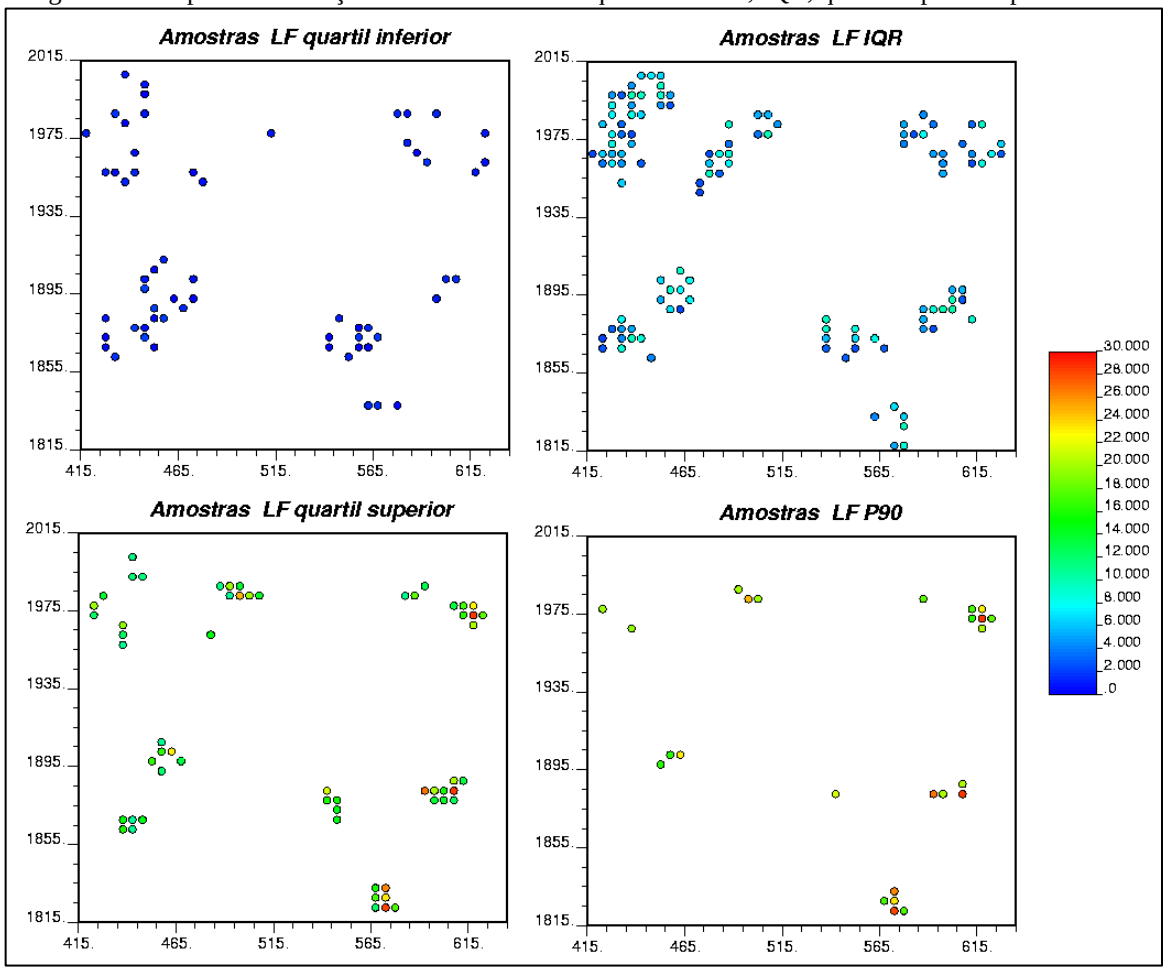
Figura 40 - Gráfico de probabilidade LF escala log.



Fonte: MAZZALI

Na Figura 41, estão representados o quartil inferior, IQR, quartil superior e os dados que pertencem ao percentil 90 através do mapa de localização das amostras pertencentes a estas classes. Nota-se que áreas de valores extremos se encontram preferencialmente no nordeste e no sudeste da jazida, a maioria das células com baixa persistência de fraturas se encontra na parte oeste da jazida.

Figura 41 - Mapa de localização das amostras LF do quartil inferior, IQR, quartil superior e percentil 90.



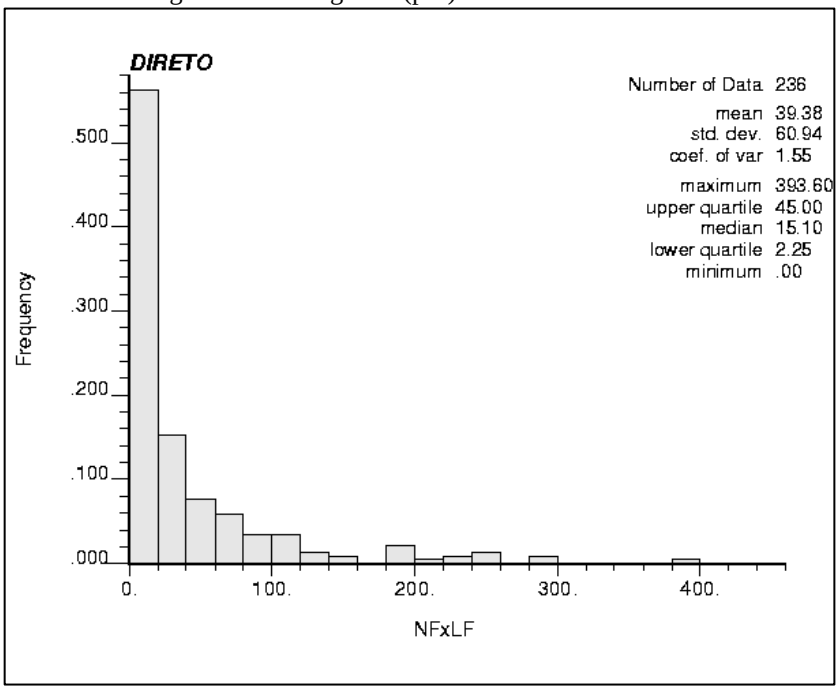
Fonte: MAZZALI

4.3.2.1.3 Variável Direto

As variáveis NF e LF foram combinadas no programa *Excel* e assim gerado uma terceira variável chamada DIRETO que é o produto das duas variáveis. Abaixo apresenta-se a análise estatística para essa nova variável.

O histograma de frequência (Figura 42**)** apresenta comportamento monomodal de assimetria positiva bem acentuada, com coeficiente de variação de 1.55, a média (39.38), bem superior à mediana (15.10) comprova mais uma vez a assimetria positiva da distribuição destes valores.

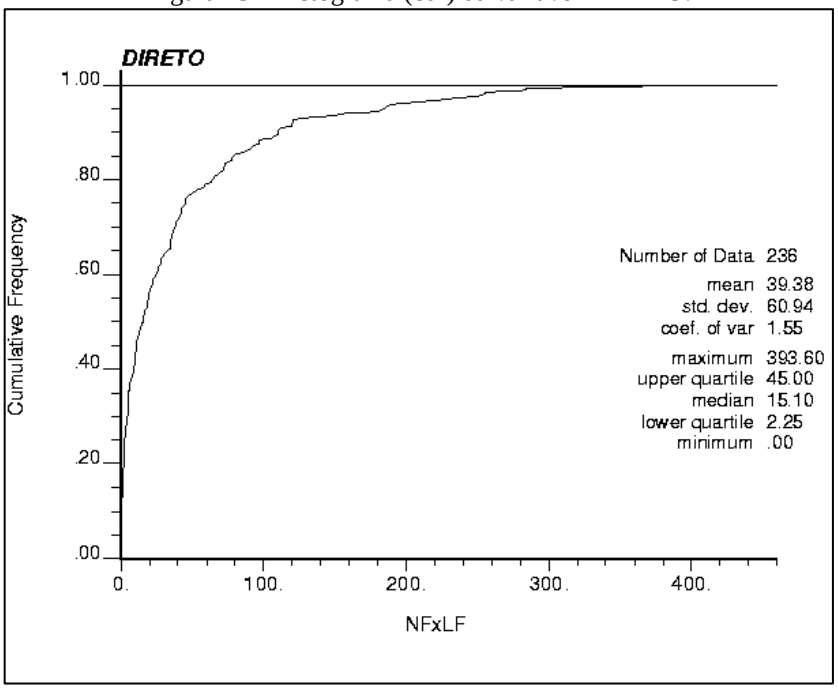
Figura 42 - Histograma (pdf) da variável DIRETO.



Fonte: MAZZALI

O histograma acumulado (Figura 43) apresenta uma distribuição parecida com a da variável LF, proporcionando uma melhor visualização da mediana e também do intervalo entre quartis (IQR).

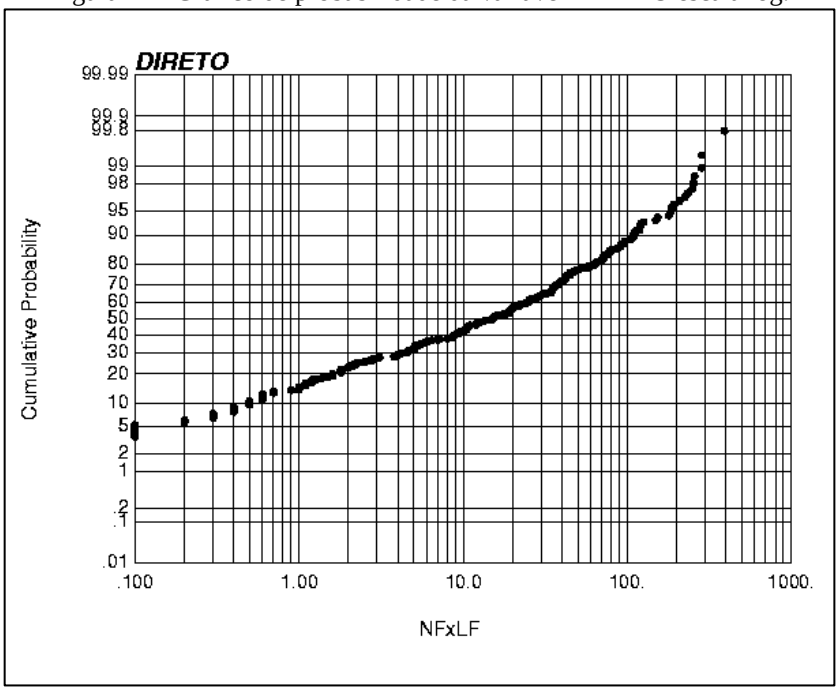
Figura 43 - Histograma (cdf) da variável DIRETO.



Fonte: MAZZALI

A Figura 44 apresenta o gráfico de probabilidade acumulada em escala log-normal adequado à visualização de dados com assimetria positiva muito acentuada, possíveis valores extremos já podem ser visualizados.

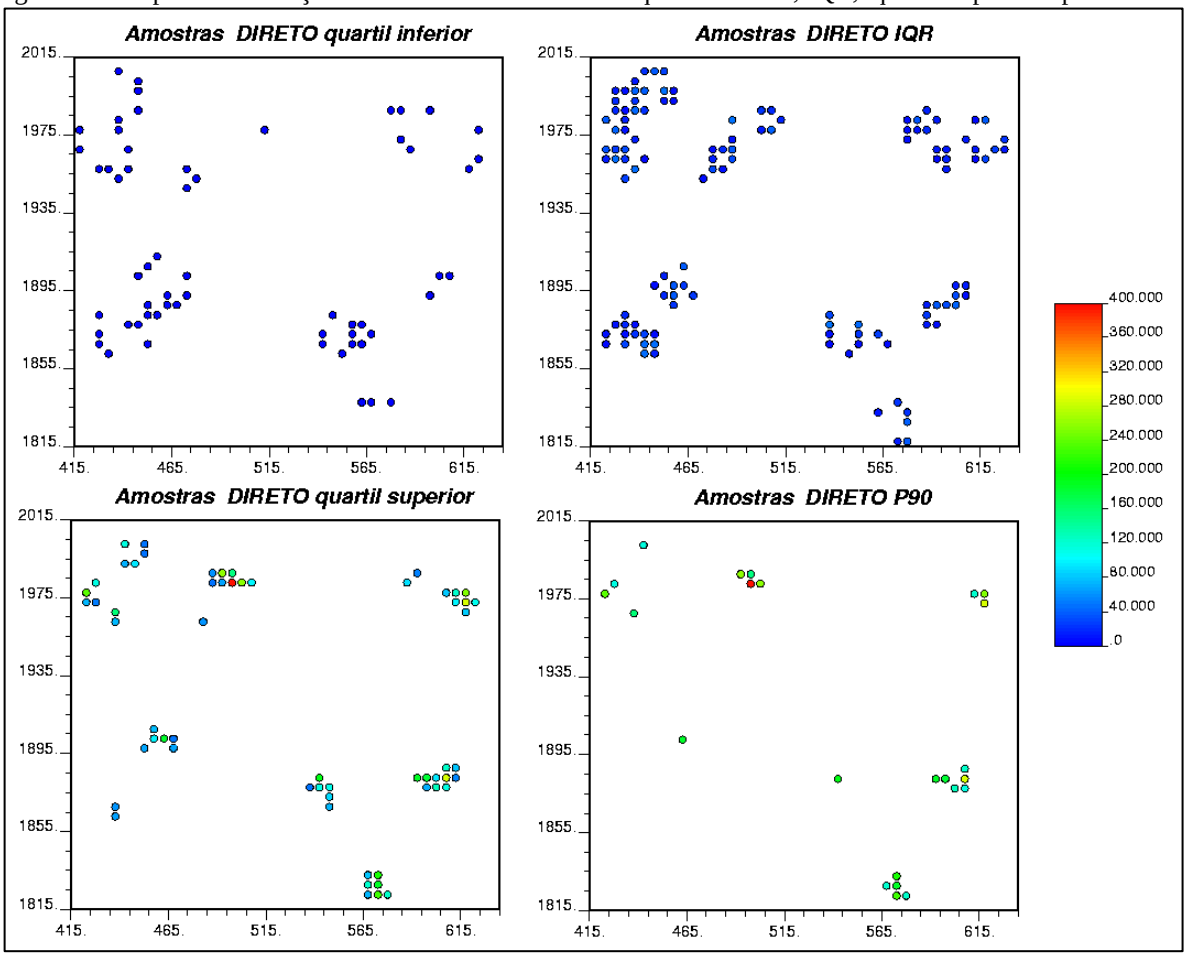
Figura 44 - Gráfico de probabilidade da variável DIRETO escala log.



Fonte: MAZZALI

Estão representados também o quartil inferior, IQR, quartil superior e os dados que pertencem ao percentil 90 através do mapa de localização das amostras (Figura 45**)** pertencentes a estas classes. Nota-se, que áreas de valores extremos, se encontram preferencialmente no sudeste e no noroeste da jazida.

Figura 45 - Mapa de localização das amostras de NFxLF do quartil inferior, IQR, quartil superior e percentil 90.



Fonte: MAZZALI

4.3.2.2 Análise de valores extremos

Os valores extremos são valores que impactam as análises estatísticas e sua interpretação. Eles dificultam o ajuste de modelos matemáticos às distribuições de probabilidade das amostras obtidas e podem com poucos dados, em determinados depósitos, tornar uma ocorrência mineral em um depósito economicamente viável, por isso deve-se efetuar um tratamento especial para esses valores (COSTA, 2003). Algumas alternativas para tratar os valores extremos são:

a) descartar (assumir ser dado errôneo);
b) tratar como sendo dados pertencentes à outra população;
c) assumir um valor teto para o depósito;
d) modificar o dado conforme a vizinhança.

No caso em estudo, as células da variável NF apresentam valores altos como 16 e 13 vistos no gráfico de probabilidade acumulada (Figura 35). Esses dados não serão tratados como valores extremos por serem aceitos como medidas válidas em termos de fraturas e também porque as células vizinhas apresentam valores altos mostrando se tratar de uma zona altamente fraturada.

Algumas células da variável LF apresentaram valores extremos de 28 m de persistência total dos traços, como pode ser visto no gráfico de probabilidade acumulada desta variável (Figura 39). Esses dados também serão mantidos.

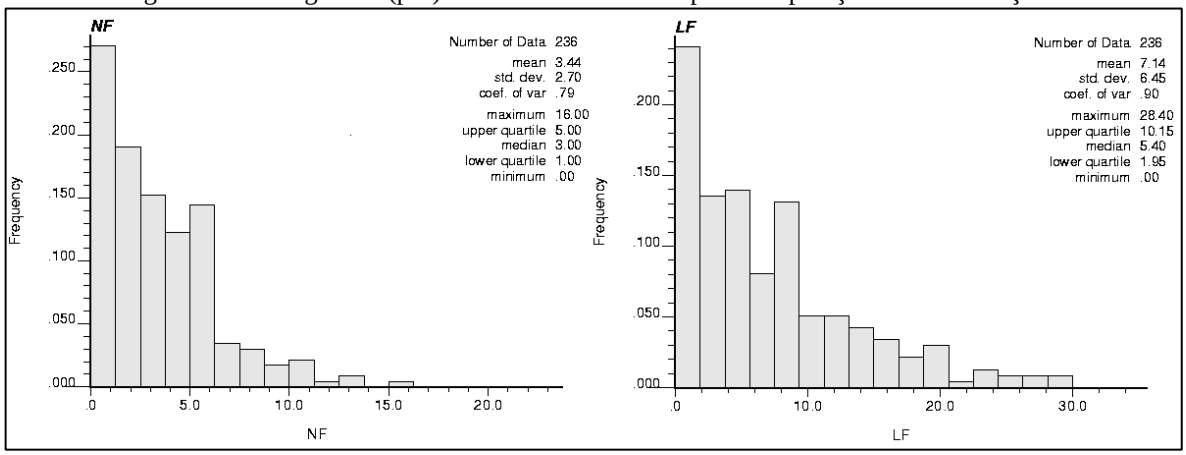
Para a variável DIRETO, foi adotada a mesma medida com os dados combinados, e nenhum valor foi aceito como *outlier*, sendo mantido inalterado o banco de dados para o processo de estimativa. A influência destes valores extremos nos resultado final da krigagem não foi significativa.

4.3.2.3 Estatística Bivariada

Através da estatística univariada que vimos anteriormente, temos uma visão muito limitada se analisarmos um banco de dados com diversas variáveis separadamente. Algumas das características mais importantes e interessantes em um banco de dados multivariado são as relações e as dependências entre as variáveis.

Geralmente, os histogramas de duas variáveis com seus respectivos sumários estatísticos irão revelar grandes diferenças entre as distribuições, porém se as distribuições forem muito similares, este método não será útil em revelar as diferenças sutis. Os histogramas de NF e LF, Figura 46**,** e o sumário estatístico, Tabela 3, estão apresentados abaixo.

Figura 46 - Histogramas (pdf) das variáveis NF e LF para comparação das distribuições.



Fonte: MAZZALI

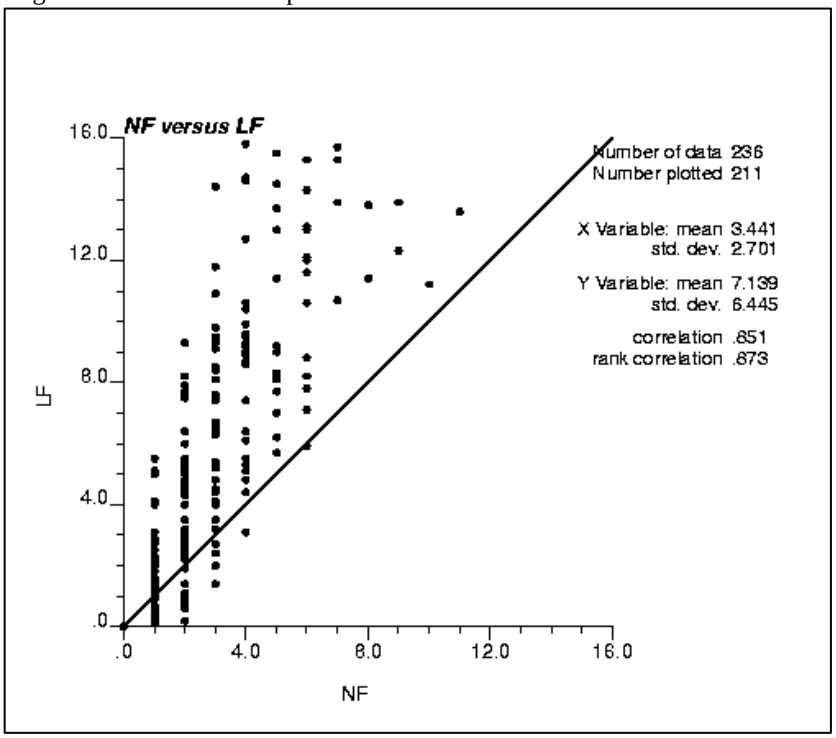
Tabela 3 - Sumário estatístico das duas variáveis, NF e LF.

	NF	**LF**
N°	236	236
Média	3.44	7.14
Desvio Padrão	2.70	6.45
Variância	7.29	41.60
Cv	0.79	0.90
Max	16.00	26.40
Q3	5.0	10.15
Mediana	3.00	5.40
Q1	1.00	1.95
Min	0.00	0.00

Nota-se, que ambos os histogramas apresentam assimetria positiva, quanto aos valores apresentados, uma comparação fica difícil por ser tratar de grandezas diferentes. A variabilidade de ambas as variáveis é similar.

Para visualizar com mais detalhe a dispersão entre as duas variáveis, o gráfico de dispersão abaixo (Figura 47) confronta os valores das duas variáveis no intervalo de valores 0-16.

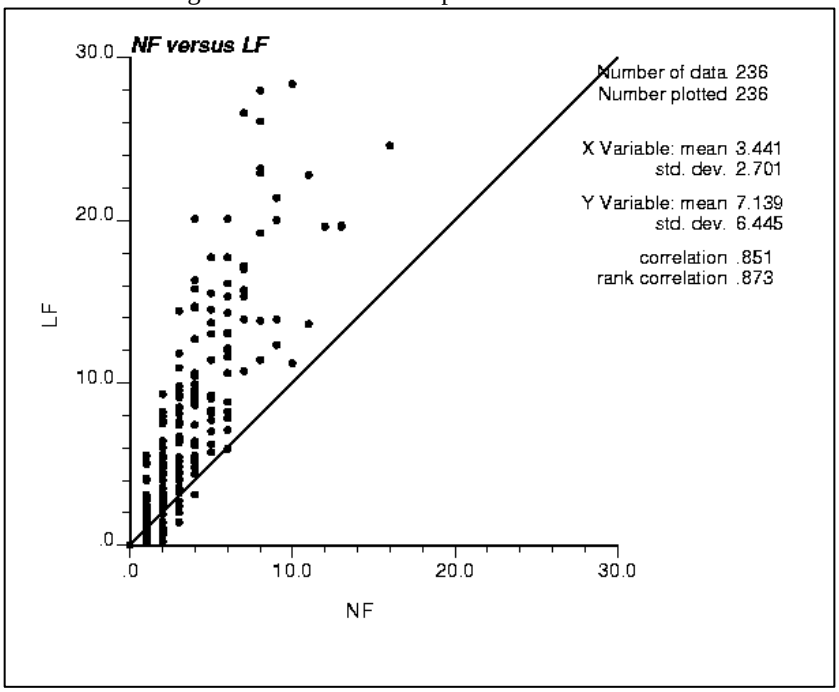
Figura 47 - Gráfico de dispersão entre NF e LF no intervalo de valores 0-16.



Fonte: MAZZALI

O gráfico de dispersão (Figura 48) confronta todos os valores das duas variáveis. No caso em estudo, nota-se que um valor em NF apresenta diversos valores para LF como visto na Figura 48 e Figura 47, uma célula contendo 3 fraturas pode ter a persistência total delas no intervalo de 1 a 14 metros. O coeficiente de correlação é 0.85.

Figura 48 - Gráfico de dispersão entre NF e LF.



Fonte: MAZZALI

4.3.2.4 Desagrupamento das Amostras

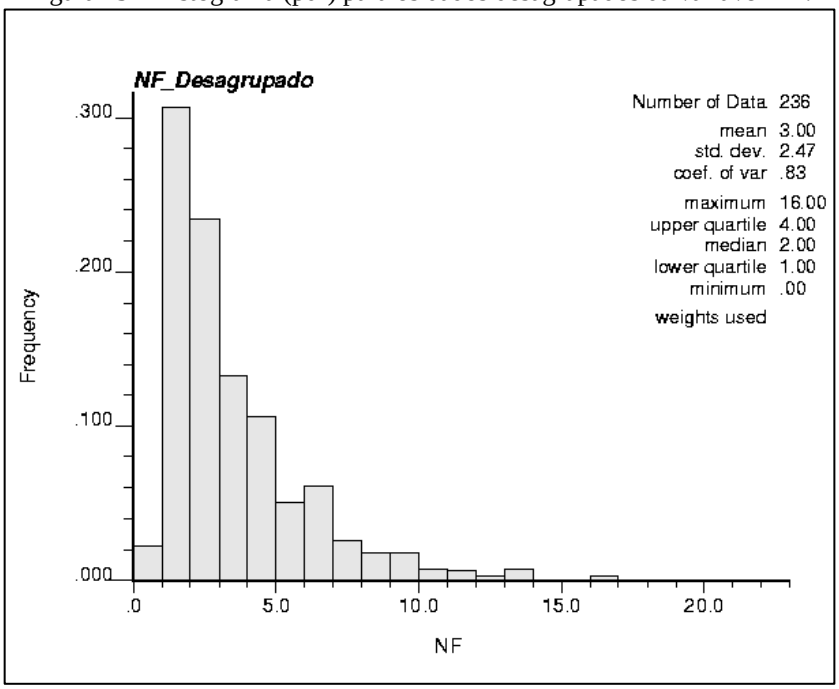
Após uma análise estatística inicial dos dados, geralmente observa-se que a estratégia de amostragem privilegia certas zonas, que dependem do tipo de variável a ser estudada. Por causa desta amostragem preferencial a média dos dados acaba por iludir e não representar o restante da população.

Na mineração e em diversas outras áreas, as estratégias de amostragem muitas vezes situam-se nos setores de maior interesse e com isso acabam induzindo a estatística a resultados não representativos. Algumas técnicas são usadas buscando diminuir o impacto de um adensamento amostral na estatística dos dados. São os chamados métodos de desagrupamento, entre eles está o polígono de influência (GOOVAERTS, 1997). Para cada amostra, é usada a área desse polígono como peso de desagrupamento. Outra técnica é o desagrupamento por células, que utiliza o conceito de janelas móveis para formar uma célula ótima e calcular o número de amostras que se encontra dentro da célula. O peso das amostras dentro da célula será inversamente proporcional ao número de amostras que fazem parte da célula, desta maneira, amostras adensadas receberão um peso pequeno.

O método de desagrupamento utilizado neste trabalho foi o desagrupamento por células, através do programa *Declus* do *software Gslib*®.(DEUTSCH, C.V. & JOURNEL, A.G. 1992)

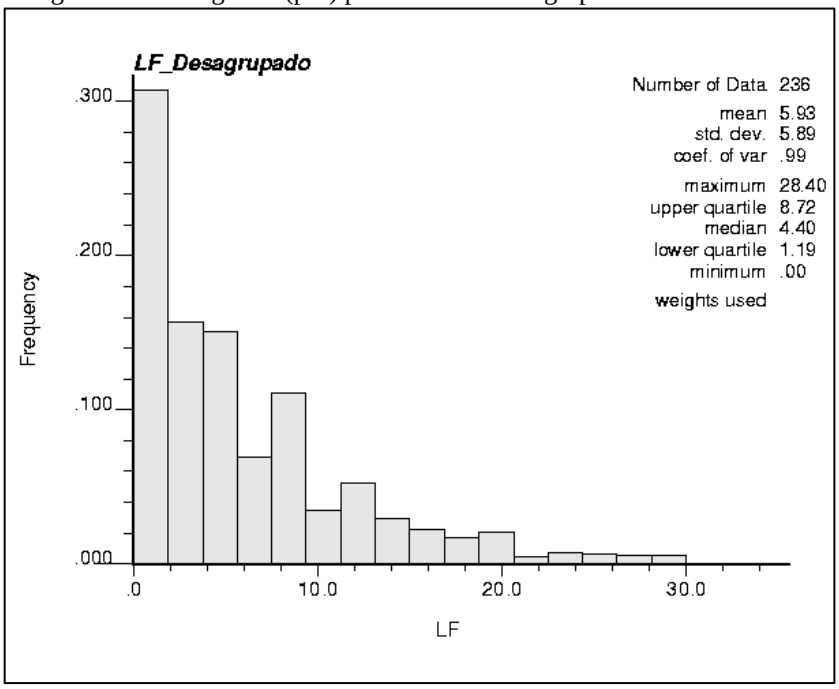
Como a amostragem foi realizada nos afloramentos existentes na área em estudo, produziu-se um agrupamento preferencial da amostragem. O desagrupamento das amostras apresentou diferenças em relação às médias dos dados originais como pode ser visto nos histogramas da Figura 49, Figura 50 e Figura 51. O tamanho de célula utilizado no desagrupamento foi de 15mx15m.

Figura 49 - Histograma (pdf) para os dados desagrupados da variável NF.



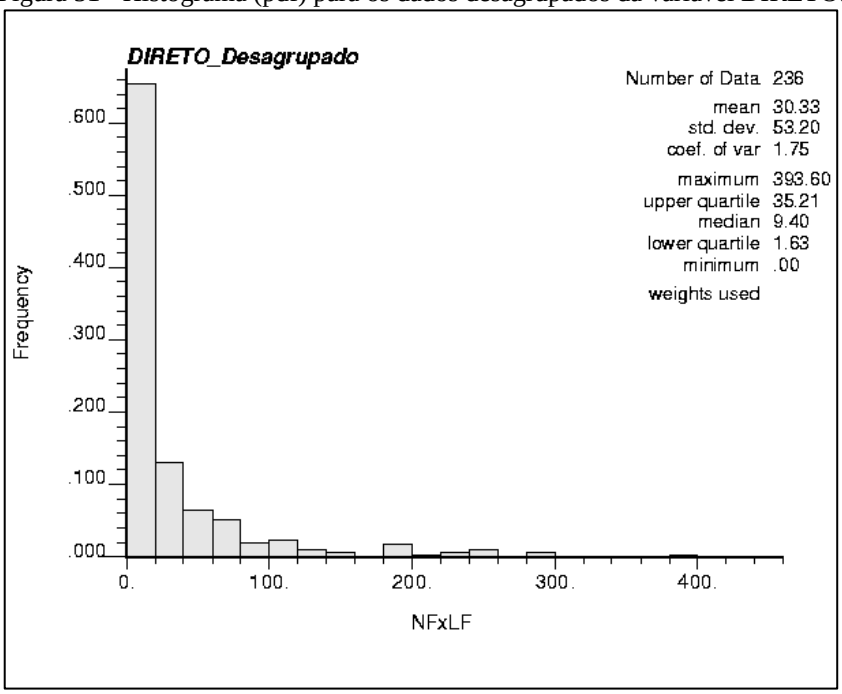
Fonte: MAZZALI

Figura 50 - Histograma (pdf) para os dados desagrupados da variável LF.



Fonte: MAZZALI

Figura 51 - Histograma (pdf) para os dados desagrupados da variável DIRETO.



Fonte: MAZZALI

A Tabela 4 mostra a diferença relativa entre as médias agrupadas e desagrupadas das variáveis em estudo.

Tabela 4 - Diferença entre as médias após o desagrupamento das amostras.

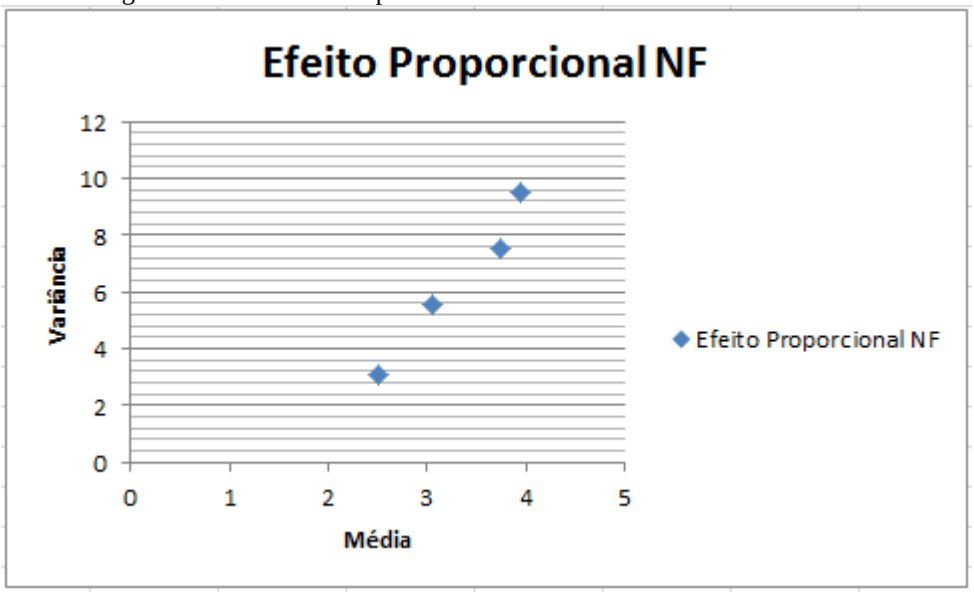
	Agrupado	Desagrupado	Diferença %
Média LF	7.14	5.93	16.9%
Média NF	3.44	3.00	12.8%
Média NF x LF	39.38	30.33	22.9%

4.3.2.5 Efeito Proporcional

Geralmente, a variabilidade local dos dados muda dentro da área estudada, essa característica é chamada heterocedasticidade. O efeito proporcional é uma das formas de se manifestar a heterocedasticidade onde a variância local dos dados está relacionada com a média local. Para distribuições com assimetria positiva, a variância local apresenta valores altos com as médias locais altas. A reciprocidade é verdadeira para distribuições com assimetria negativa, nesse caso alta variância está relacionada com médias baixas (efeito proporcional inverso).

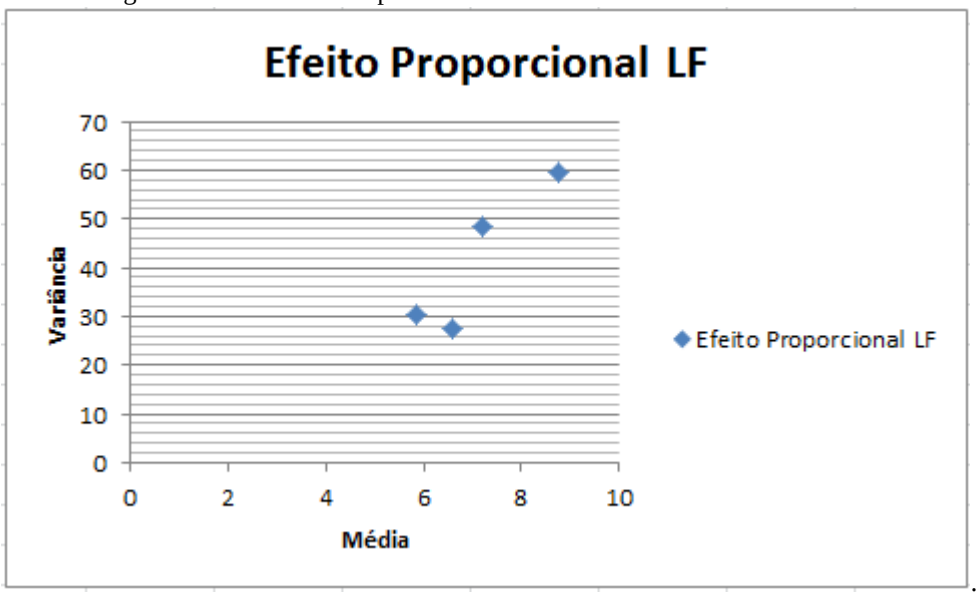
O efeito proporcional pode ser detectado por um gráfico de dispersão entre média local e variância local, calculadas com a técnica de janelas móveis. Neste estudo, as janelas foram dimensionadas com extensão de 105 m em X e 105 m em Y gerando assim quatro janelas. Esta geometria foi utilizada em virtude da distribuição dos afloramentos no depósito que não favorecem um estudo com células menores. Os gráficos da Figura 52, Figura 53 e Figura 54 mostram a presença do efeito proporcional, como já era esperado, pois os dados apresentam uma distribuição assimétrica positiva. Quando uma variável apresenta efeito proporcional e amostragem preferencial nas zonas de alta variabilidade, existe a tendência de gerar variogramas experimentais com alto ruído, prejudicando assim a análise de continuidade espacial deste fenômeno.

Figura 52 - Gráfico de dispersão entre média e variância da variável NF.



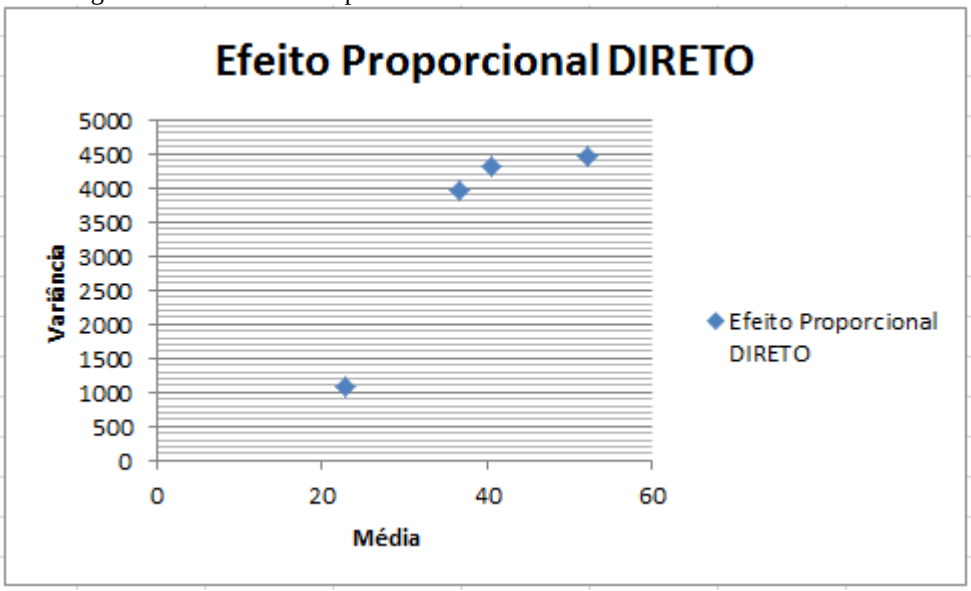
Fonte: MAZZALI

Figura 53 - Gráfico de dispersão entre média e variância da variável LF.



Fonte: MAZZALI

Figura 54 - Gráfico de dispersão entre média e variância da variável DIRETO.



Fonte: MAZZALI

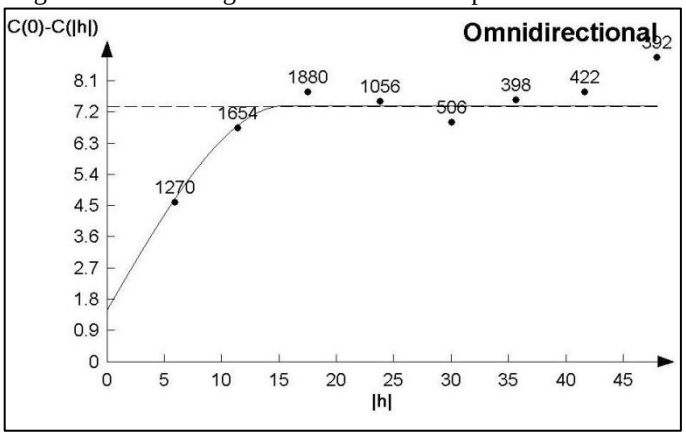
4.3.2.6 Análise da Continuidade Espacial

A continuidade espacial existe na maioria dos fenômenos relacionados a geociências. Essa continuidade é calculada, modelada e usada para realizar a estimativa via krigagem.

A continuidade espacial foi estudada através das medidas de covariância entre as amostras. O *software* utilizado foi o *Variowin*® (PANNATIER, 1996). O cálculo dos oito covariogramas direcionais apresentam os mesmos parâmetros: tolerância angular de 22.5˚, banda horizontal de 3 m, separação do *lag* 6 m, tolerância do *lag* 3 m e direções variando 22.5˚ partindo do azimute 0˚ até azimute 157.5˚, para o covariograma omnidirecional os únicos parâmetros modificados foram a tolerância angular 100˚ e a banda horizontal 400 metros.

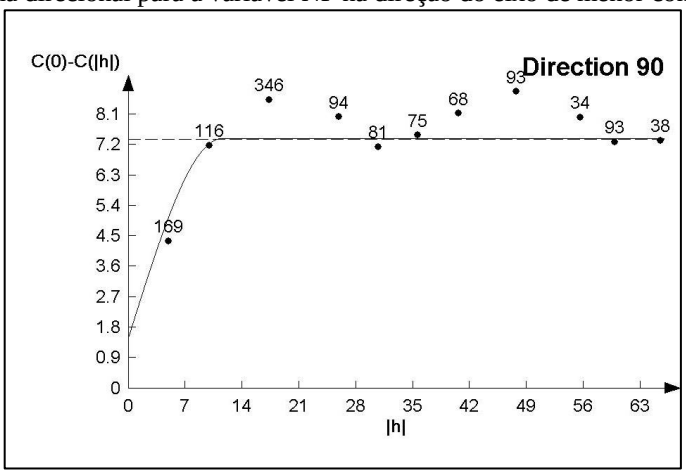
A convenção da orientação do programa *Variowin*® atribui 0˚ para a direção Leste e 90˚ para a direção Sul. Da Figura 55 até a Figura 63, são apresentados os resultados das medidas de covariância omnidirecional e direcional para o menor alcance (NS) e maior (EW), respectivamente. Os resultados mostram que a direção de maior continuidade para todas as variáveis foi o azimute 90˚ e a de menor continuidade o azimute 0˚.

Figura 55 - Covariograma omnidirectional para a variável NF.



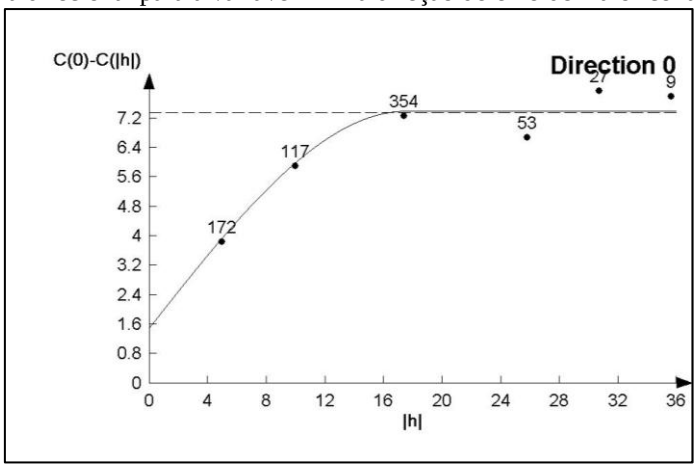
Fonte: MAZZALI

Figura 56 - Covariograma direcional para a variável NF na direção do eixo de menor continuidade espacial (NS).



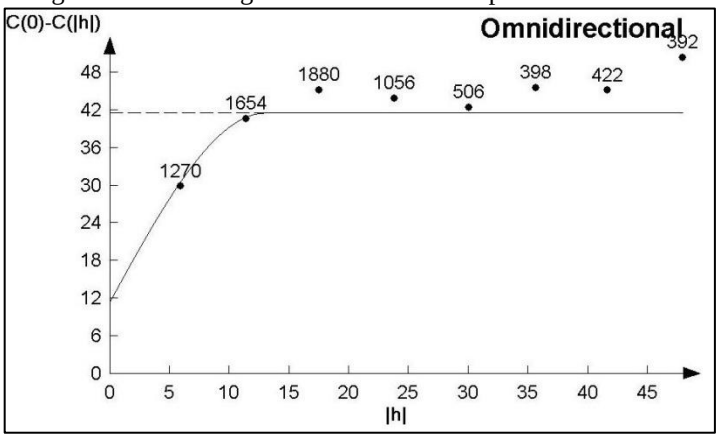
Fonte: MAZZALI

Figura 57 - Covariograma direcional para a variável NF na direção do eixo de maior continuidade espacial (EW).



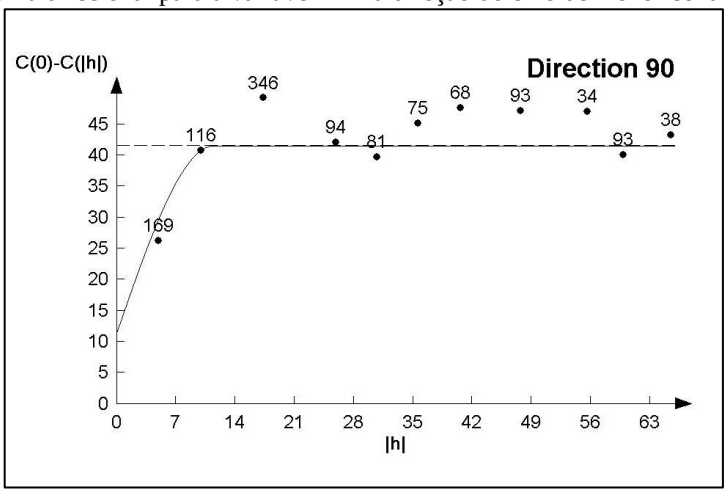
Fonte: MAZZALI

Figura 58 - Covariograma omnidirectional para a variável LF.



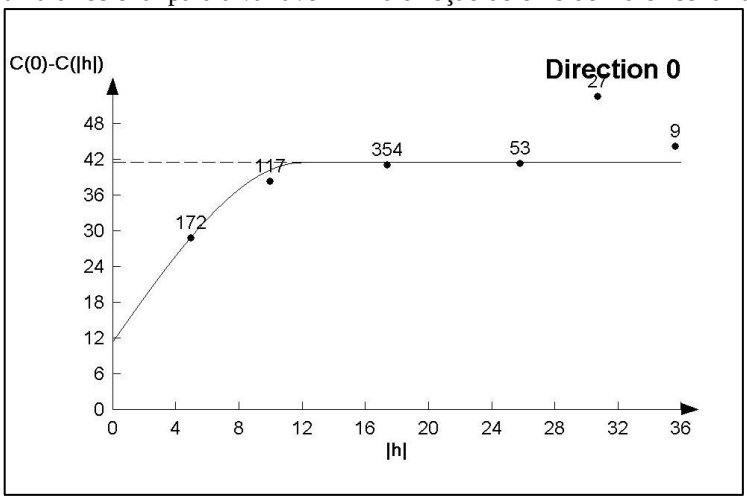
Fonte: MAZZALI

Figura 59 - Covariograma direcional para a variável LF na direção do eixo de menor continuidade espacial (NS).



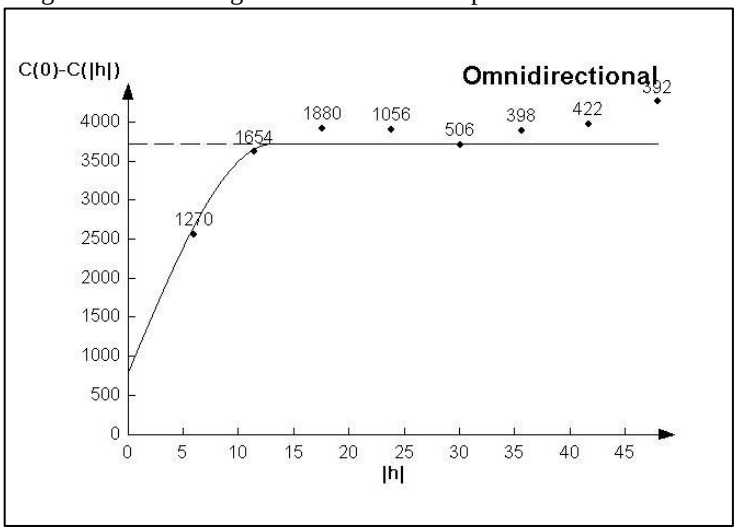
Fonte: MAZZALI

Figura 60 - Covariograma direcional para a variável LF na direção do eixo de maior continuidade espacial (EW).



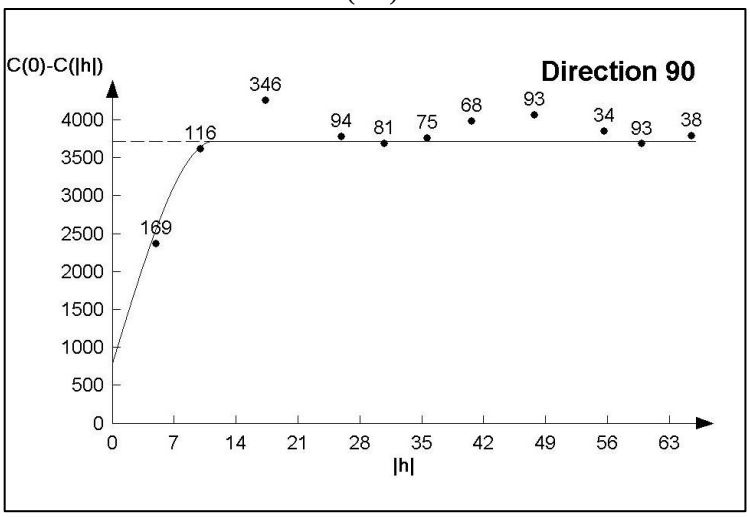
Fonte: MAZZALI

Figura 61 - Covariograma omnidirecional para a variável NFxLF.



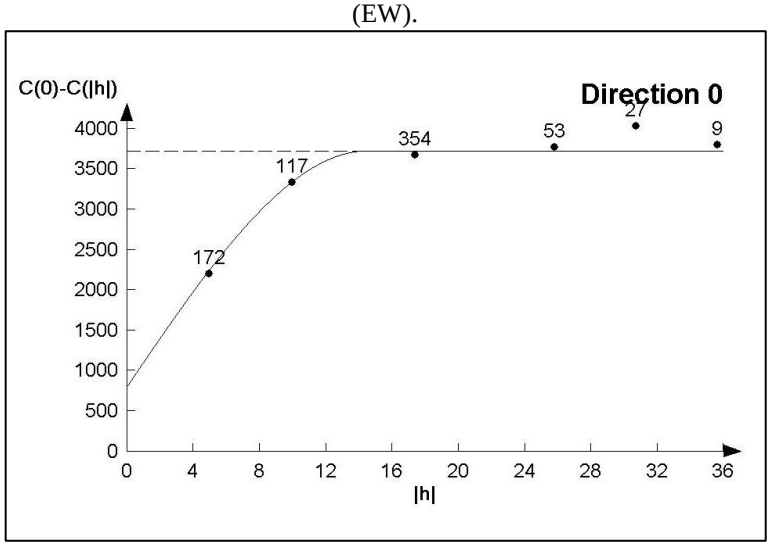
Fonte: MAZZALI

Figura 62 - Covariograma direcional para a variável NFxLF na direção do eixo de menor continuidade espacial (NS).



Fonte: MAZZALI

Figura 63 - Covariograma direcional para a variável NFxLF na direção do eixo de maior continuidade espacial (EW).



Fonte: MAZZALI

4.3.3 Estimativa de Recursos e Reservas

As estimativas foram realizadas através de Krigagem Ordinária (MATHERON, 1963), conhecido como estimador “BLUE” (*Best Linear Unbiased Estimator*). A Krigagem Ordinária é linear porque as suas estimativas são combinações lineares ponderadas dos dados disponíveis, não tem viés, pois o erro médio residual é igual a zero e é melhor porque minimiza a variância dos erros.

Com os modelos de continuidade espacial para cada variável (Tabela 5), realizou-se a estimativa da área em estudo X(415-625) e Y(1815-2025), com células de dimensão (5m x 5m) totalizando 1764 células, 42 em X e 42 em Y.

Tabela 5 - Dados de continuidade espacial.

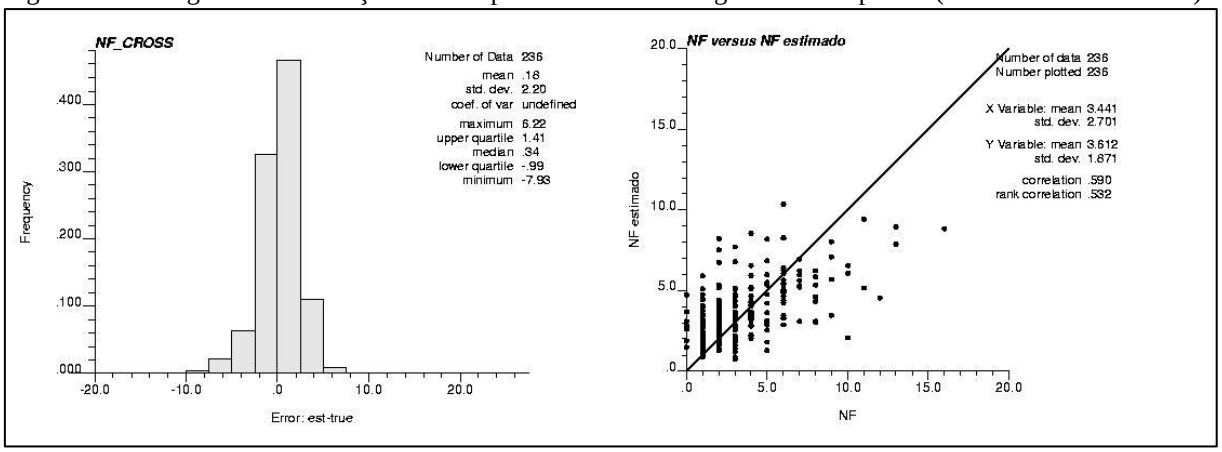
Variável	Efeito Pepita	Contribuição	Modelo	Alcance Máx	Alcance Min
NF	1.5	5.9	1.5+5.9 Sph	17.5	11.5
LF	11.4	30.2	11.4+30.2 Sph	12.0	11.5
NF x LF	800	2930	800+2930 Sph	14.5	11.5

Devido à característica da jazida ser de poucos afloramentos, a amostragem não apresenta um espaçamento regular em toda a área gerando assim um problema para as estimativas. Grandes áreas não amostradas foram estimadas baseadas nos dados distantes. Devido a grande extensão da área coberta, utilizou-se um raio de busca do elisóide de 90 metros na direção de maior continuidade e 70 metros na menor continuidade para todas as variáveis. Buscando reduzir o efeito de suavização da krigagem optou-se por utilizar um

mínimo de 5 e máximo de 9 amostras. Esta configuração apresentou o melhor resultado quando comparado com a média declusterizada das variáveis e também resultou na menor dispersão dos gráficos de validação cruzada.

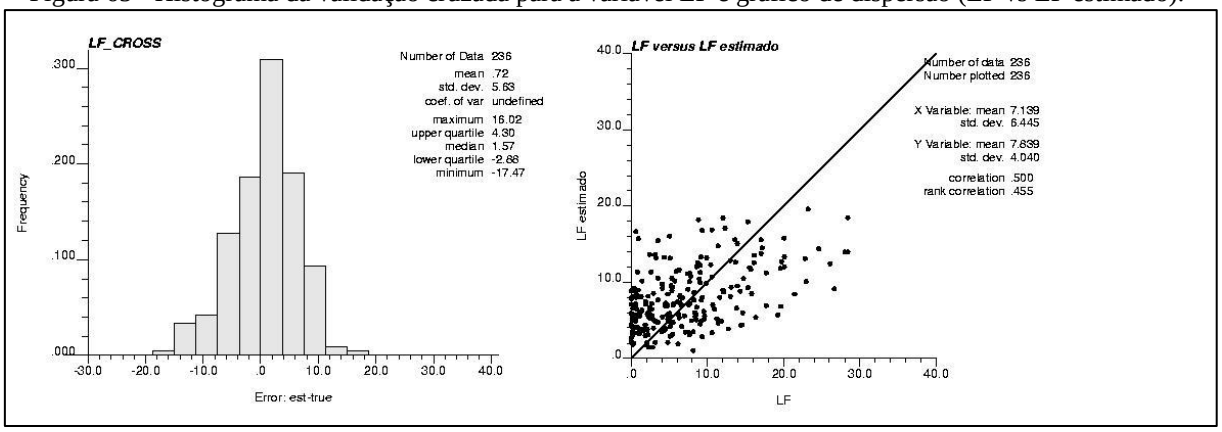
Para validar os parâmetros de krigagem foi efetuada uma validação cruzada (Figura 64, Figura 65 e Figura 66). As figuras apresentam o histograma do erro e o gráfico de dispersão entre as variáveis e as estimativas para as 236 amostras.

Figura 64 - Histograma da validação cruzada para a variável NF e gráfico de dispersão (NF vs NF ESTIMADO).



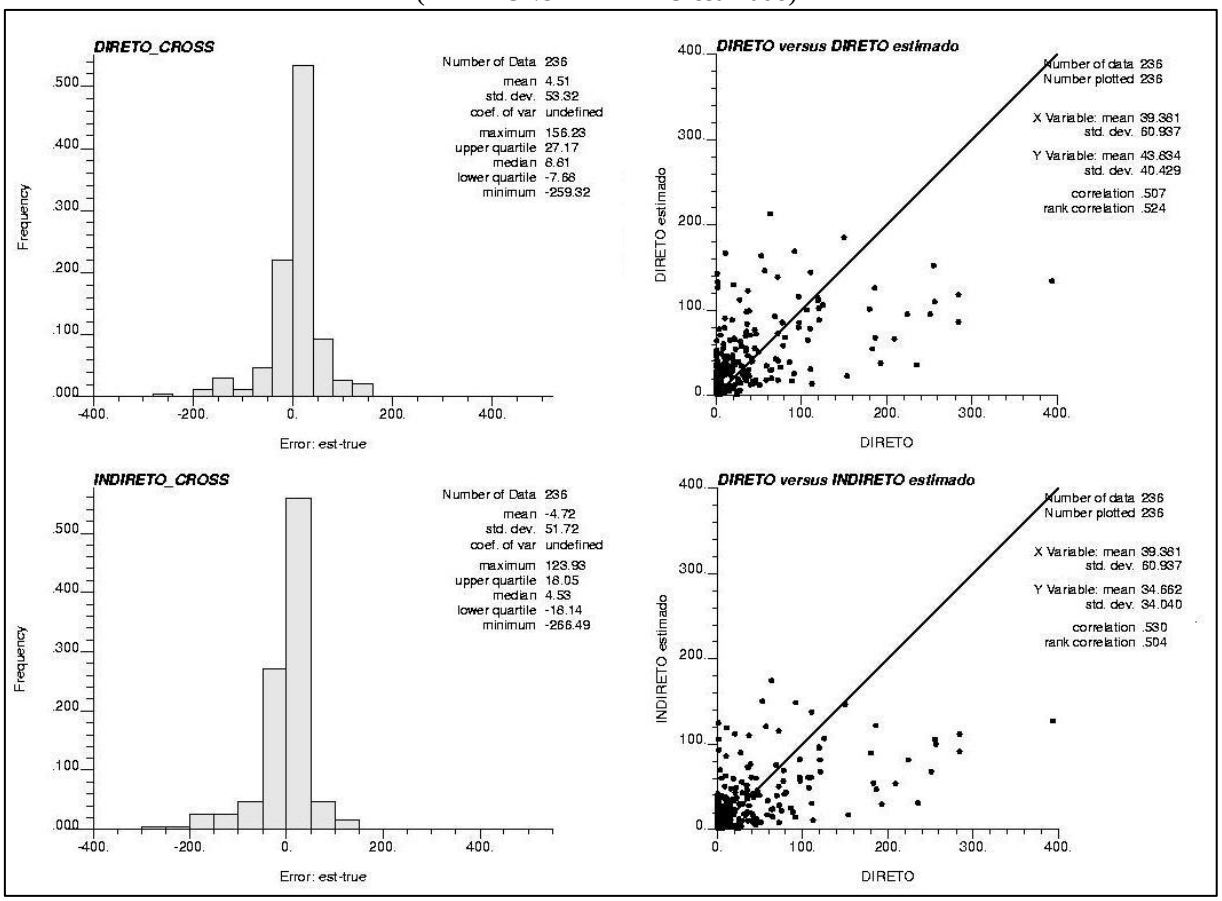
Fonte: MAZZALI

Figura 65 - Histograma da validação cruzada para a variável LF e gráfico de dispersão (LF vs LF estimado).



Fonte: MAZZALI

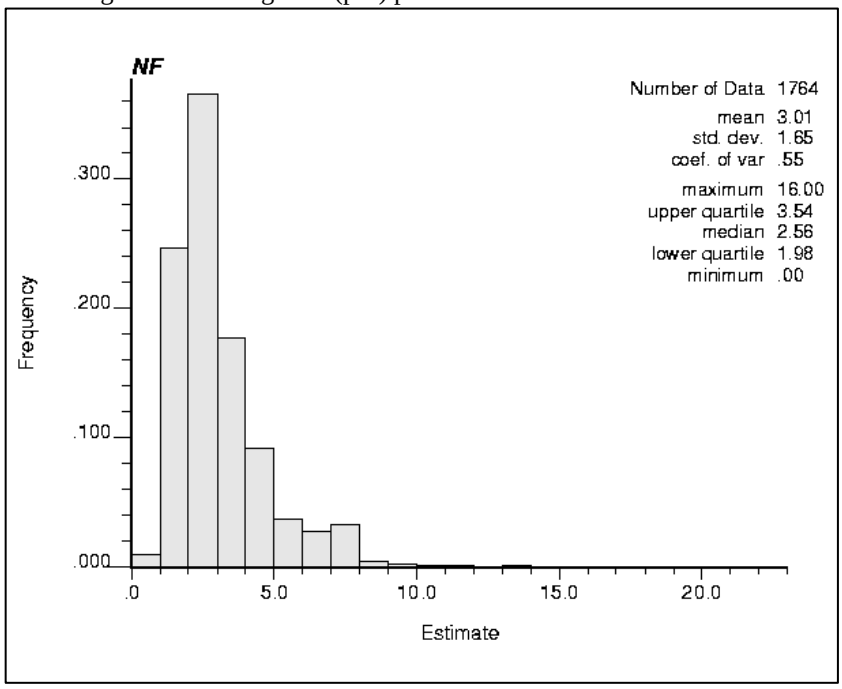
Figura 66 - Histograma da validação cruzada para a variável DIRETO e gráfico de dispersão (DIRETO vs DIRETO estimado) e histograma da validação cruzada para o índice INDIRETO e gráfico de dispersão (DIRETO vs INDIRETO estimado)



Fonte: MAZZALI

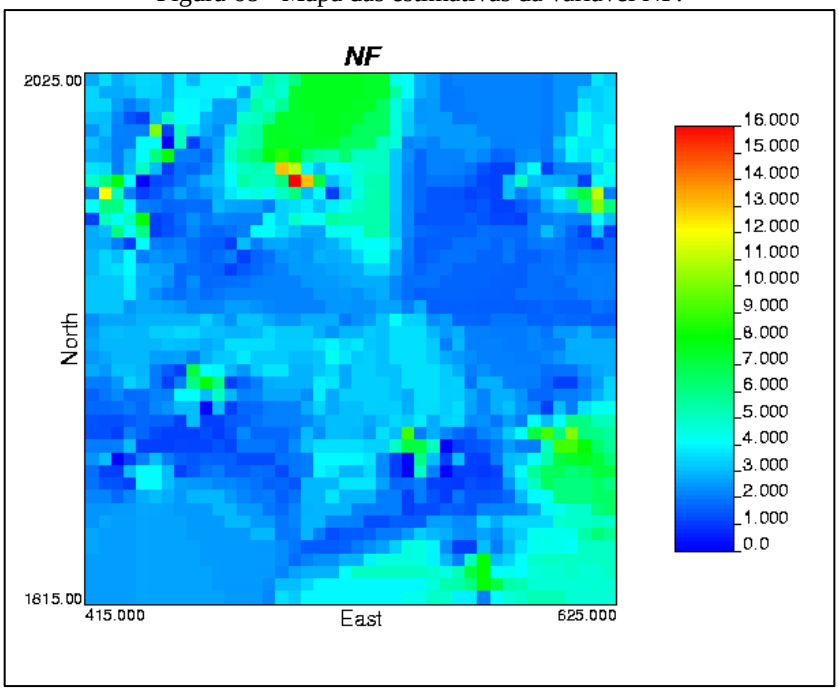
Conforme mostram os histogramas resultantes da análise do erro da validação cruzada, as médias de erro das estimativas ficaram próximas de zero e apresentam uma pequena dispersão para as variáveis NF e LF. Os resultados da validação da variável DIRETO e das estimativas do índice INDIRETO foram os mais prejudicados por causa dos valores extremos e, também, por causa do alto coeficiente de variação das variáveis. Mesmo assim, apresentaram histogramas com dispersão e média aceitáveis. Os gráficos de dispersão apresentam uma correlação média entre os dados e as estimativas devido ao agrupamento dos dados e da alta variabilidade das variáveis. Os resultados obtidos foram satisfatórios e validam os parâmetros de krigagem utilizados. As estimativas estão ilustradas através de histogramas e mapas das estimativas (Figura 67, Figura 68, Figura 69, Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73 e Figura 74).

Figura 67 - Histograma (pdf) para as estimativas da variável NF.



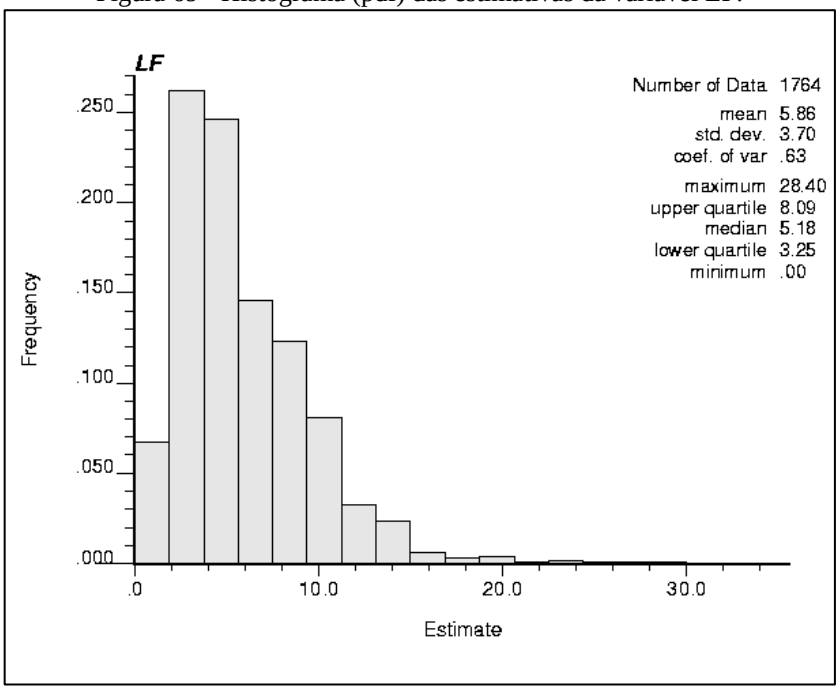
Fonte: MAZZALI

Figura 68 - Mapa das estimativas da variável NF.



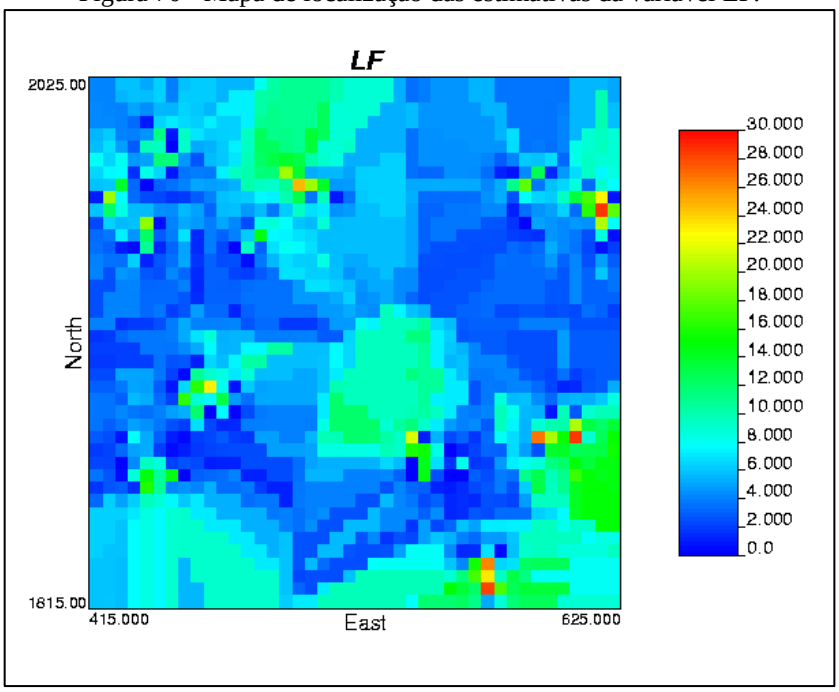
Fonte: MAZZALI

Figura 69 - Histograma (pdf) das estimativas da variável LF.



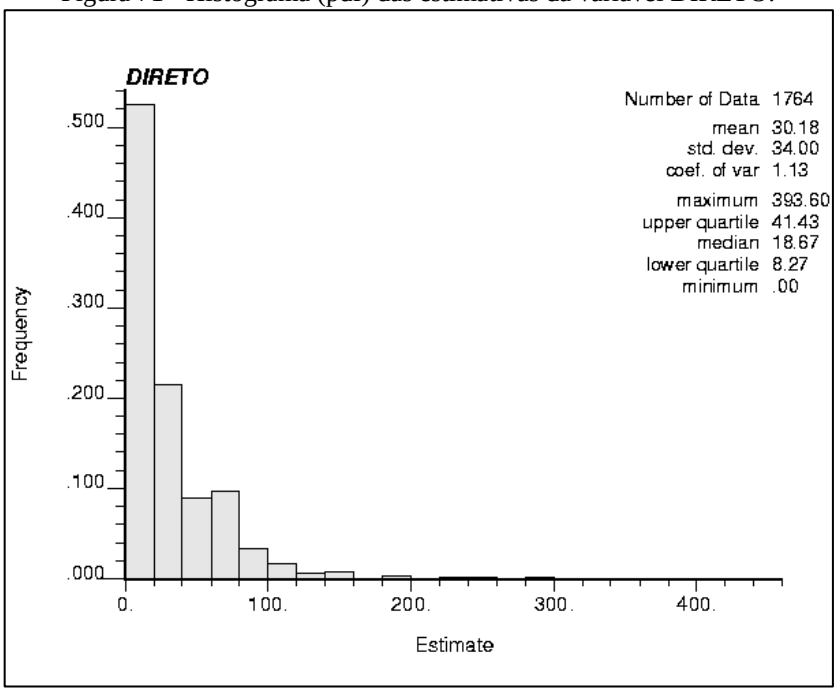
Fonte: MAZZALI

Figura 70 - Mapa de localização das estimativas da variável LF.



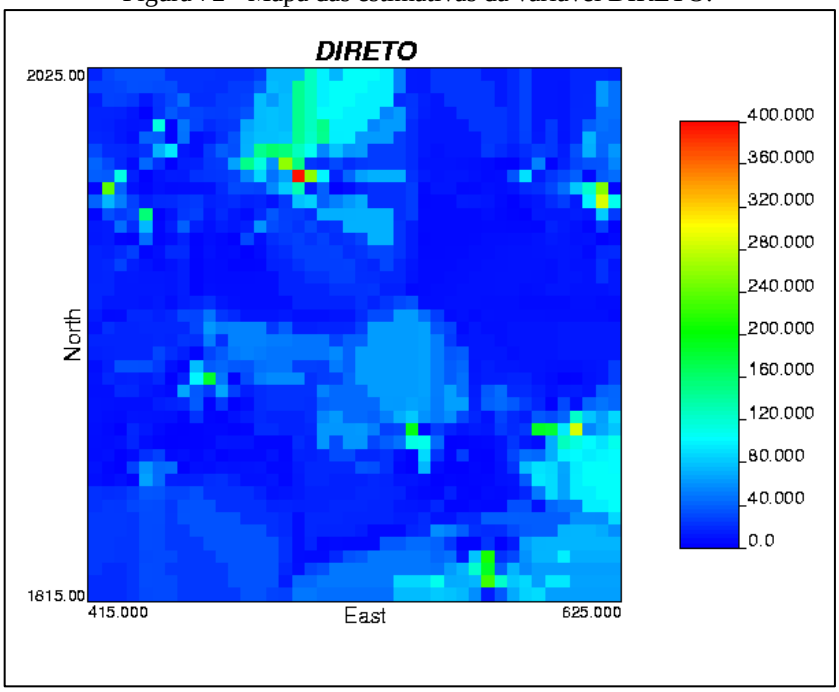
Fonte: MAZZALI

Figura 71 - Histograma (pdf) das estimativas da variável DIRETO.



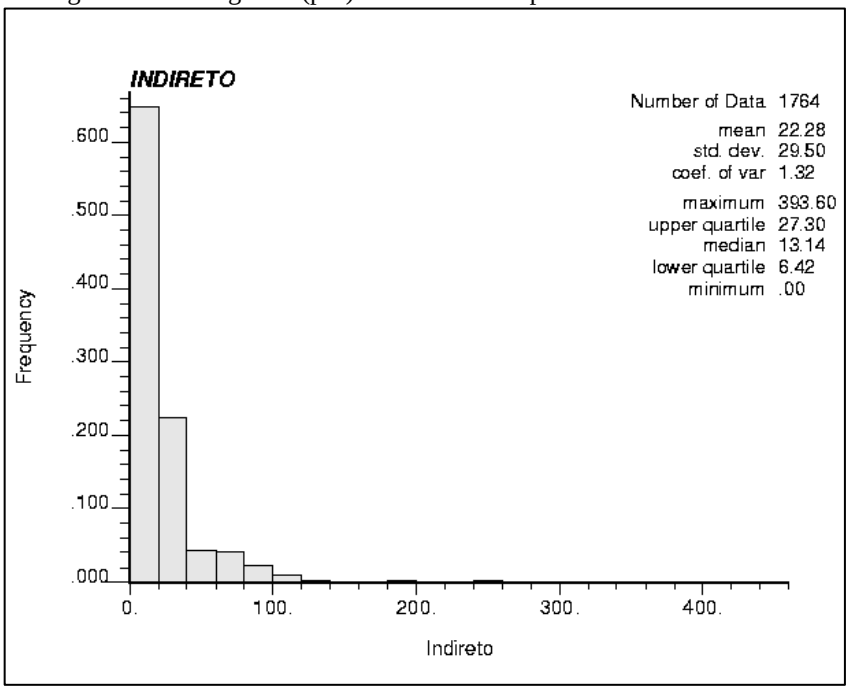
Fonte: MAZZALI

Figura 72 - Mapa das estimativas da variável DIRETO.



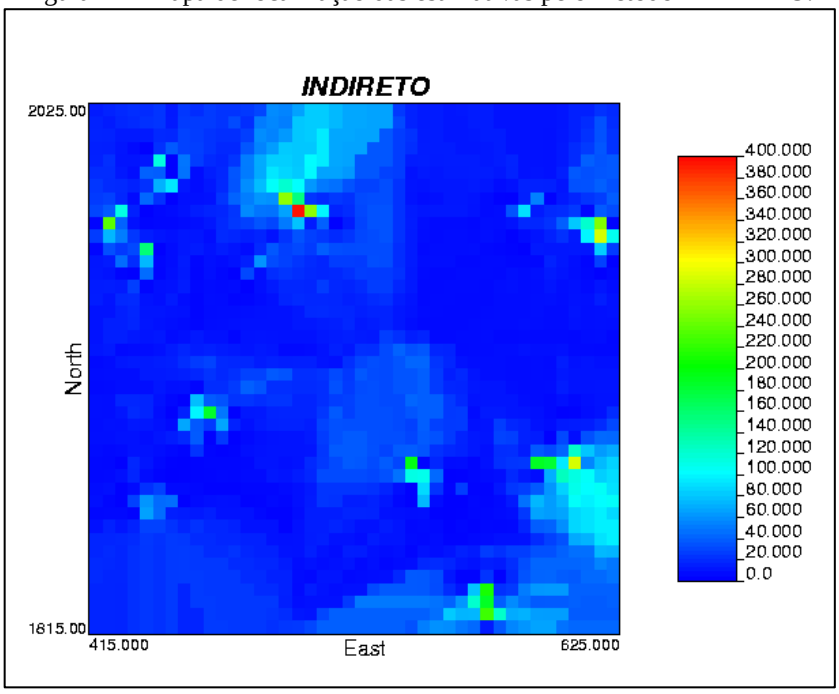
Fonte: MAZZALI

Figura 73 - Histograma (pdf) das estimativas pelo método INDIRETO.



Fonte: MAZZALI

Figura 74 - Mapa de localização das estimativas pelo método INDIRETO.

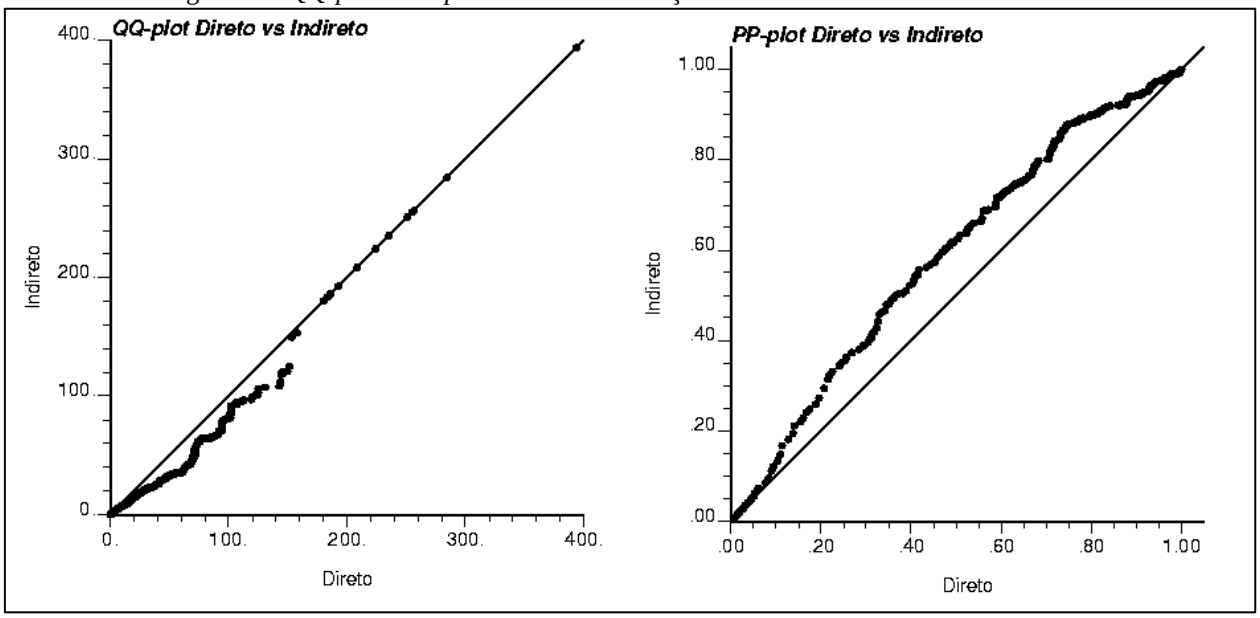


Fonte: MAZZALI

Após a realização das estimativas, uma comparação entre os métodos foi efetuada para avaliar o impacto que cada abordagem provoca na estimativa do índice. São apresentadas abaixo cinco figuras comparando os métodos.

O *qq-plot* e o *pp-plot* (Figura 75) demonstram a tendência do método direto em superestimar em relação ao método indireto. Outra característica importante é que os percentis divergem no intervalo 10-90 (*pp-plot*), uma informação importante, pois o índice de faturamento máximo para proceder a lavra escolhido (20) encontra-se entre a mediana e o P90 onde as curvas são diferentes.

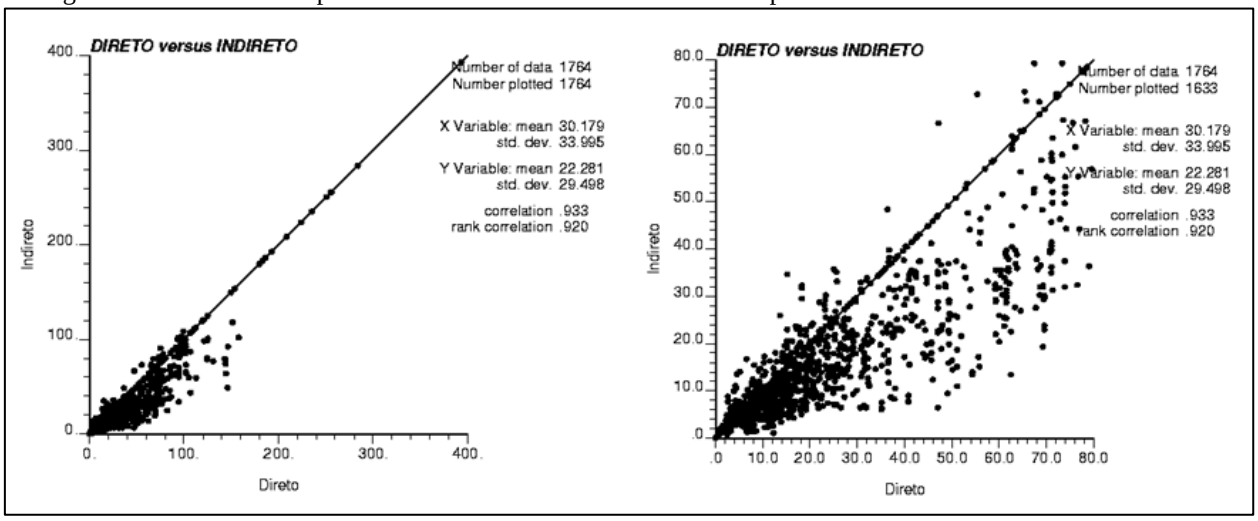
Figura 75 - *QQ-plot* e *PP-plot* entre as distribuições dos métodos Direto e Indireto.



Fonte: MAZZALI

No gráfico de dispersão (Figura 76) nota-se a tendência do método direto em superestimar os índices quando comparado com o método indireto.

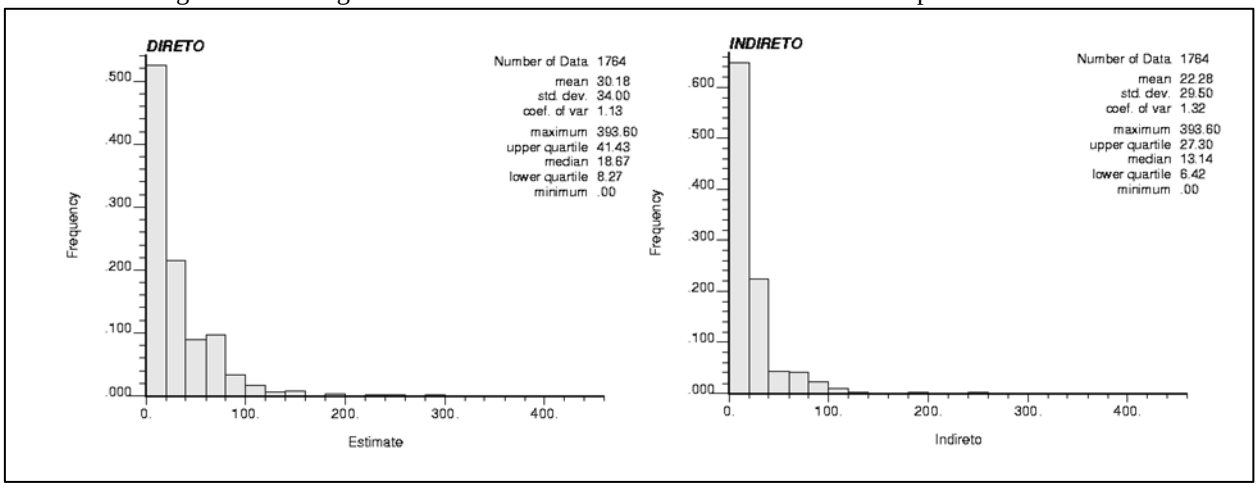
Figura 76 - Gráfico de dispersão entre valores estimados nos blocos pelo método direto e método indireto.



Fonte: MAZZALI

Nota-se, nos histogramas da Figura 77, a maior suavização nos resultados do método indireto, provavelmente causada pelas duas krigagens necessárias para constituir o índice.

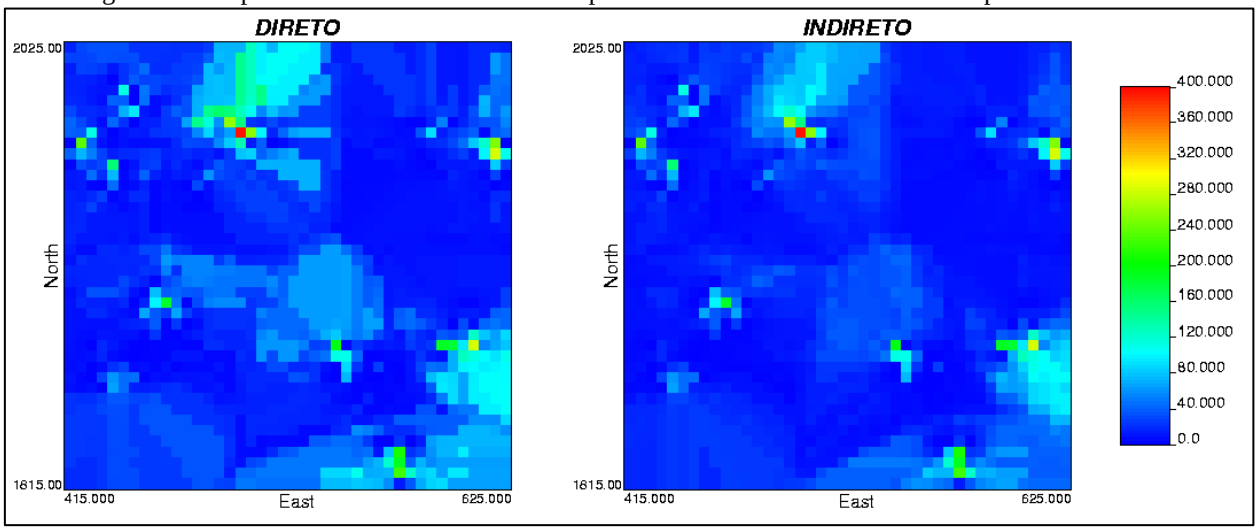
Figura 77 - Histogramas das estimativas do método direto e indireto respectivamente



Fonte: MAZZALI

Os mapas de localização das estimativas (Figura 78) apresentam poucas diferenças através deste *check* visual global. Uma análise mais detalhada da área favorável à lavra deve ser efetuada para evidenciar semelhanças e divergências entre os métodos, dado o nível de detalhe dos mapas.

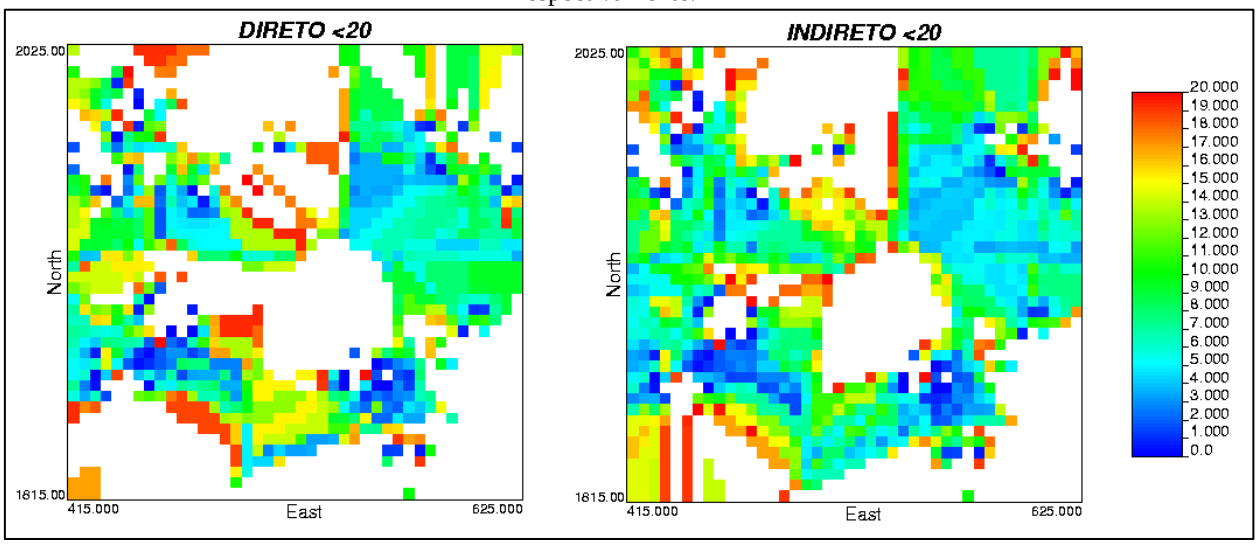
Figura 78 - Mapas de das estimativas do índice para os métodos Direto e Indireto respectivamente.



Fonte: MAZZALI

Os mapas de localização das estimativas com índice inferior a 20, Figura 79, apresentam a área favorável à lavra (IF<20) obtida pelos dois métodos. Nota-se, que uma maior área foi considerada favorável à lavra pelo método indireto e que ambas as abordagens apresentam uma geometria para a área lavrável muito semelhante.

Figura 79 - Mapa de localização das estimativas com índice menor que 20 para os métodos Direto e Indireto, respectivamente.



Fonte: MAZZALI

4.3.4 Validação da Estimativa

Toda a estimativa deve ser validada antes de ser usada para tomada de decisões referentes ao plano de lavra. Para validar as estimativas, partiu-se inicialmente das validações

usuais da geoestatística (comparação das médias globais, análise de deriva e comparação local entre amostras e estimativas). Após foi realizado um truncamento nos valores das estimativas da variável NF para torná-las discretas e analisar o impacto que as estimativas (contínuas) apresentam sobre o índice final. Por último, foi efetuada uma krigagem de indicadores para a variável Direto a fim de comparar o comportamento da estimativa de abordagem linear com a abordagem não linear. Este *check* foi realizado, pois as variáveis NF e LF não apresentam seguramente propriedades aditivas. Para realizar as estimativas, assumiu-se que essas variáveis combinadas poderiam ser tratadas como aditivas e serem combinadas para estimativa de seus momentos estatísticos.

4.3.4.1 Média Global

A Tabela 6 apresenta os valores das médias globais para as duas krigagens e a diferença relativa com a média desagrupada dos dados.

Tabela 6 - Comparação das Médias.

	Desagrupado	**Krigagem**	**Diferença %**
Média LF	5.93	5.86	1.2%
Média NF	3.00	3.01	0.3%
Média NF x LF	30.33	30.18	0.5%

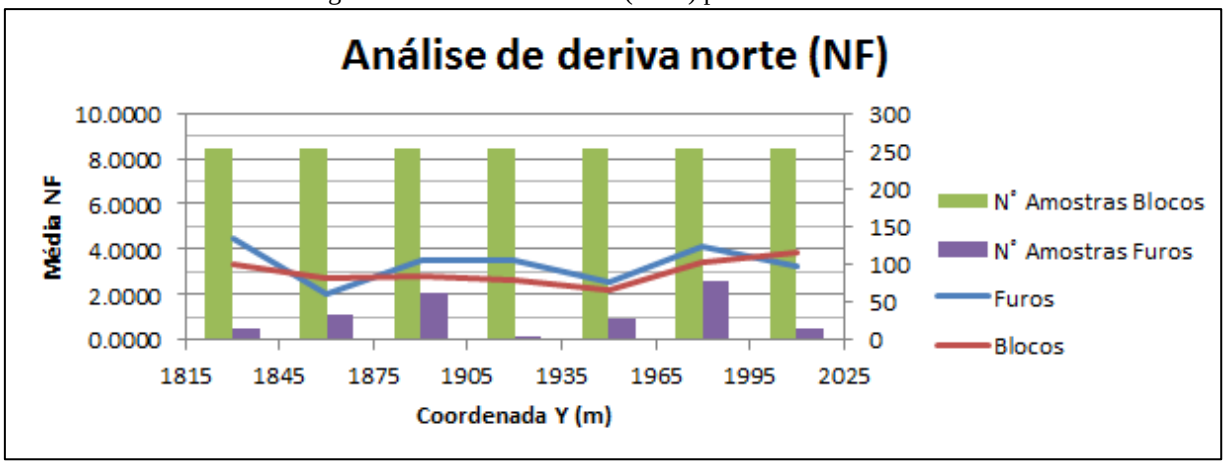
A diferença relativa entre a média global da krigagem e a média global desagrupada para todas as variáveis foi inferior a 2%, o que é satisfatório e valida globalmente o modelo krigado (ausência de viés).

4.3.4.2 Análise de Deriva

Para realizar essa análise, a área da jazida foi dividida em sete fatias de 30 m em X e sete fatias de 30 m em Y. Para cada fatia, foi obtida a média das amostras e das estimativas contidas nesse intervalo (Figura 80, Figura 81, Figura 82, Figura 83, Figura 84 e Figura 85). Devido à amostragem restrita e ao agrupamento dos dados, alguns pontos desta curva apresentam um descolamento acentuado, pois a fatia da análise por vezes contempla poucas amostras. Para melhor apreciação foi plotado junto à análise de deriva um gráfico de barras informando a quantidade de blocos e de amostras usados para cálculo da média em cada ponto da curva. Nota-se, que esses desvios dão-se nos locais onde há poucas amostras. A terceira

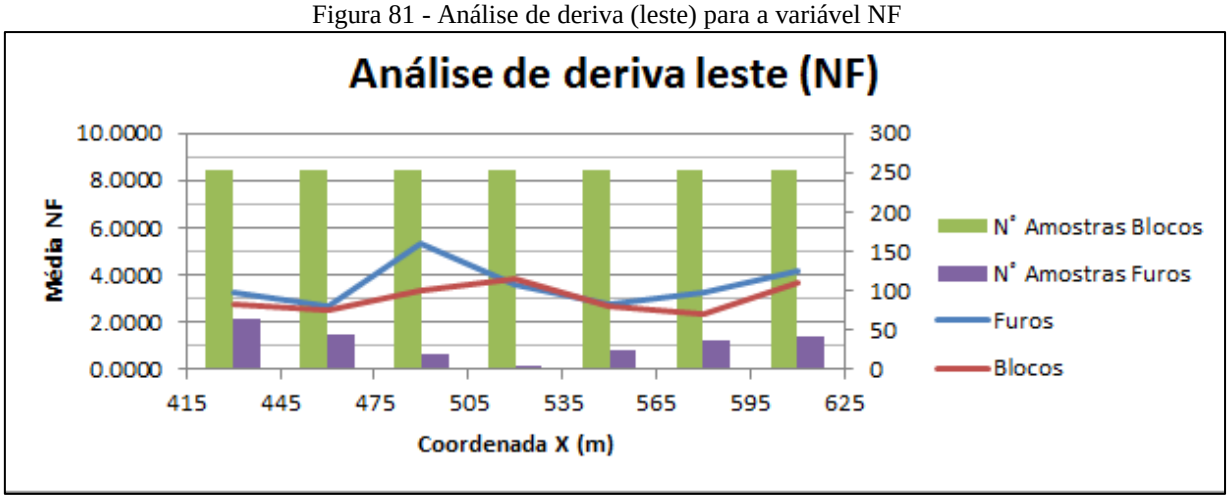
fatia da deriva Leste apresenta um descolamento acentuado da média dos dados em relação à dos blocos para todas as variáveis. Nesse intervalo, existem poucas amostras no setor norte e estas possuem valores extremos.

Figura 80 - Análise de deriva (norte) para a variável NF.



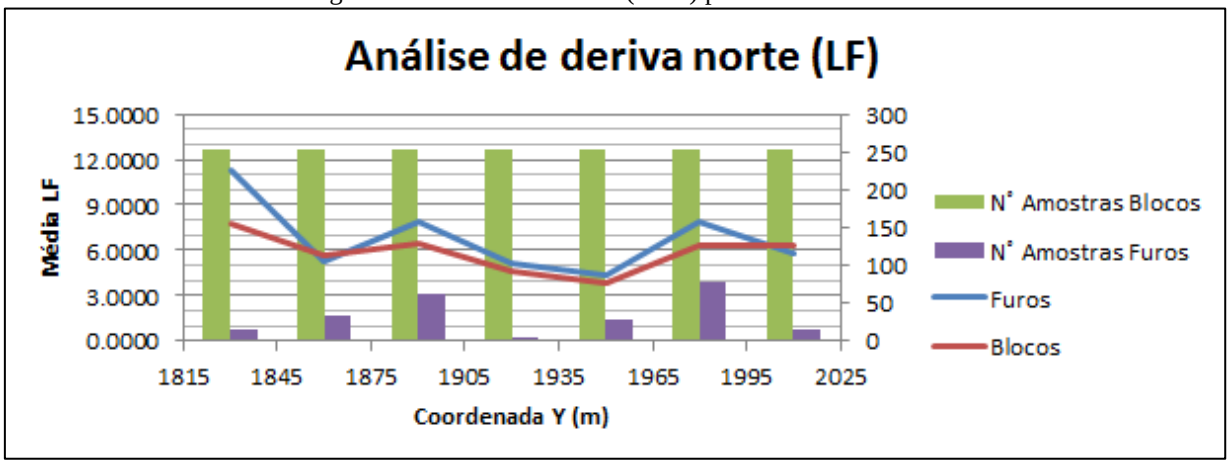
Fonte: MAZZALI

Figura 81 - Análise de deriva (leste) para a variável NF



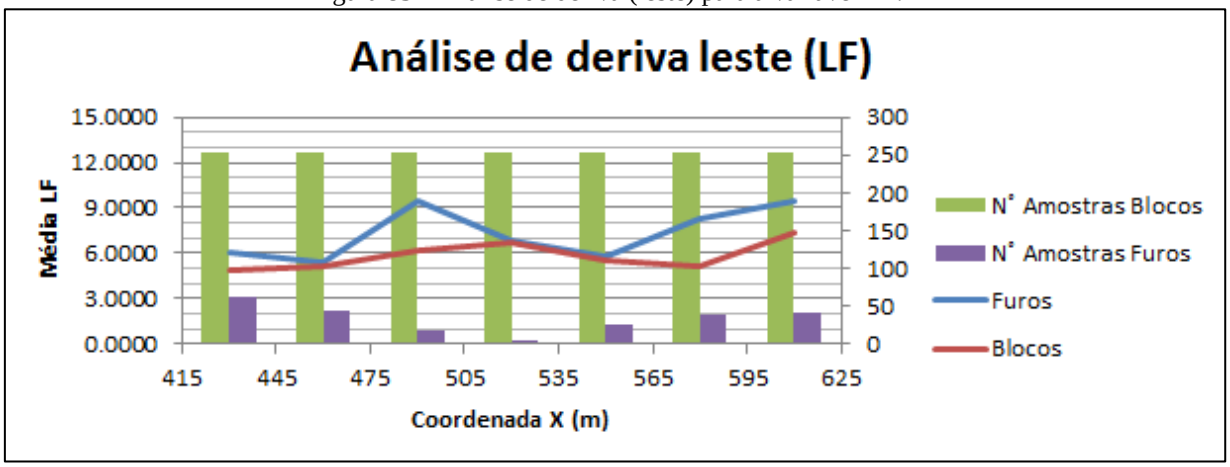
Fonte: MAZZALI

Figura 82 - Análise de deriva (norte) para a variável LF.



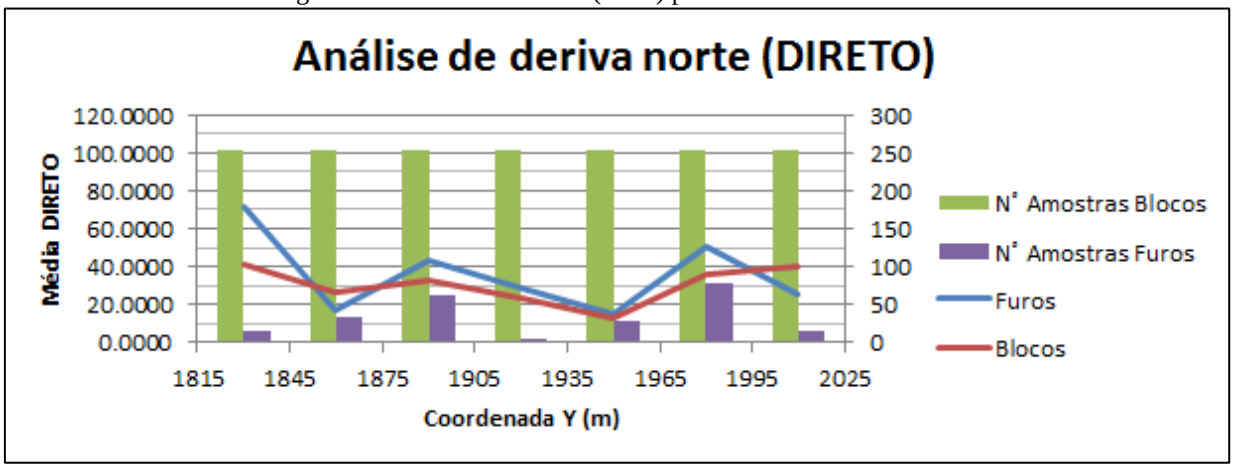
Fonte: MAZZALI

Figura 83 - Análise de deriva (leste) para a variável LF.



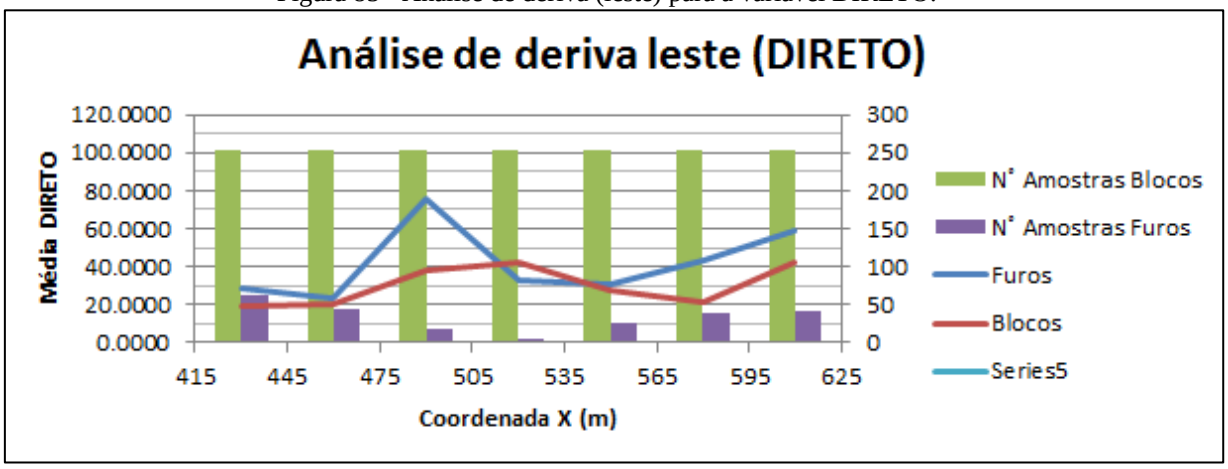
Fonte: MAZZALI

Figura 84 - Análise de deriva (norte) para a variável DIRETO.



Fonte: MAZZALI

Figura 85 - Análise de deriva (leste) para a variável DIRETO.



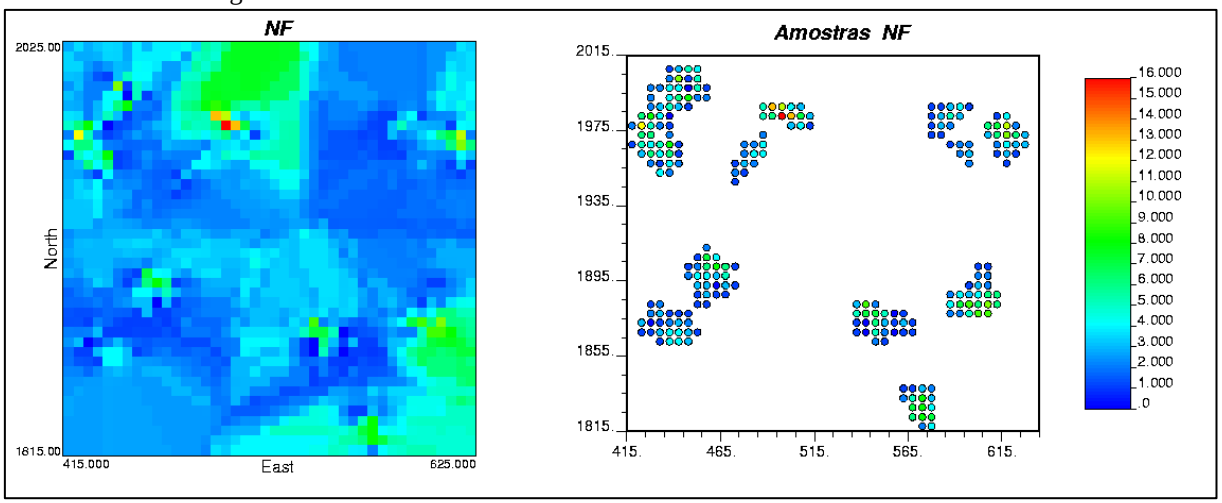
Fonte: MAZZALI

Todas as análises efetuadas validam o modelo estimado, pois apresentam estimativas próximas aos valores amostrados e que acompanham a tendência das amostras.

4.3.4.3 Check Visual

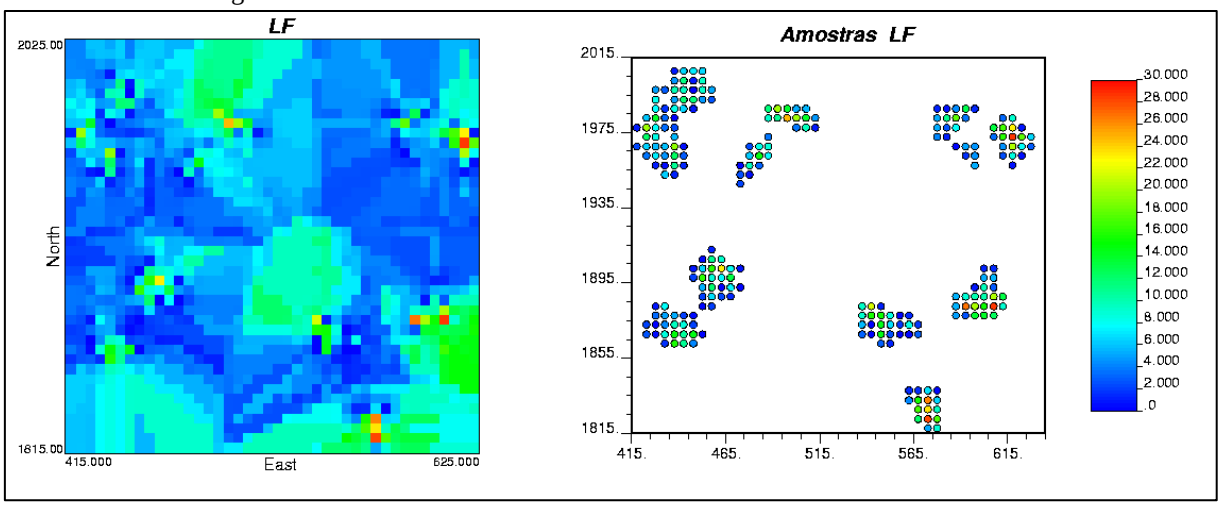
Através da comparação visual entre as estimativas e as amostras pode-se notar que a krigagem atribuiu valores condizentes com a vizinhança amostral, seguindo a tendência dos dados. A Figura 86, a Figura 87, a Figura 88 e a Figura 89 trazem a comparação entre as amostras e as estimativas através da krigagem para as variáveis de interesse.

Figura 86 - *Check* visual entre as estimativas e as amostras da variável NF.



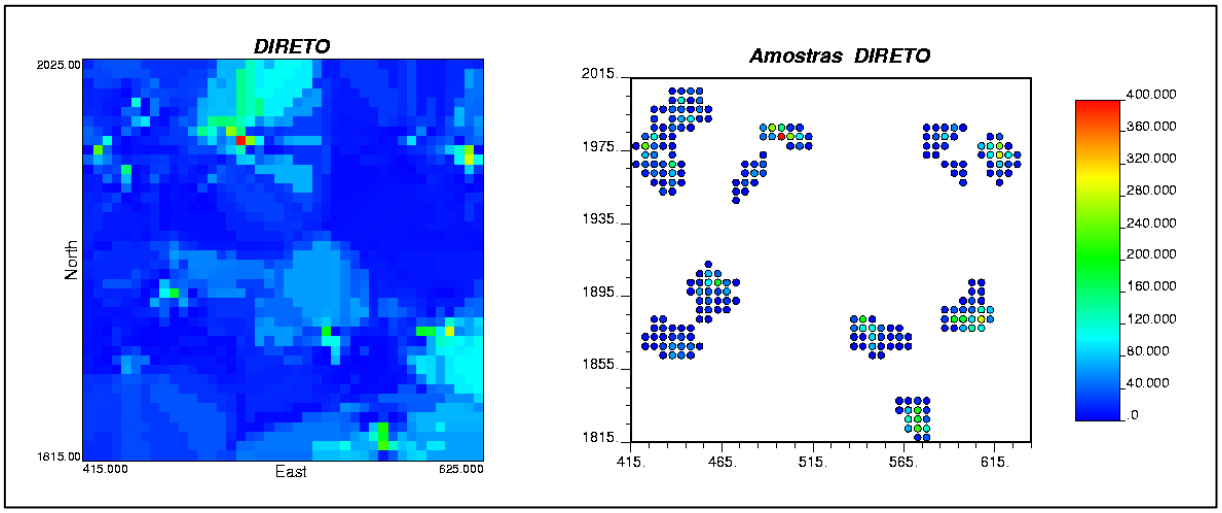
Fonte: MAZZALI

Figura 87 - *Check* visual entre as estimativas e as amostras da variável LF.



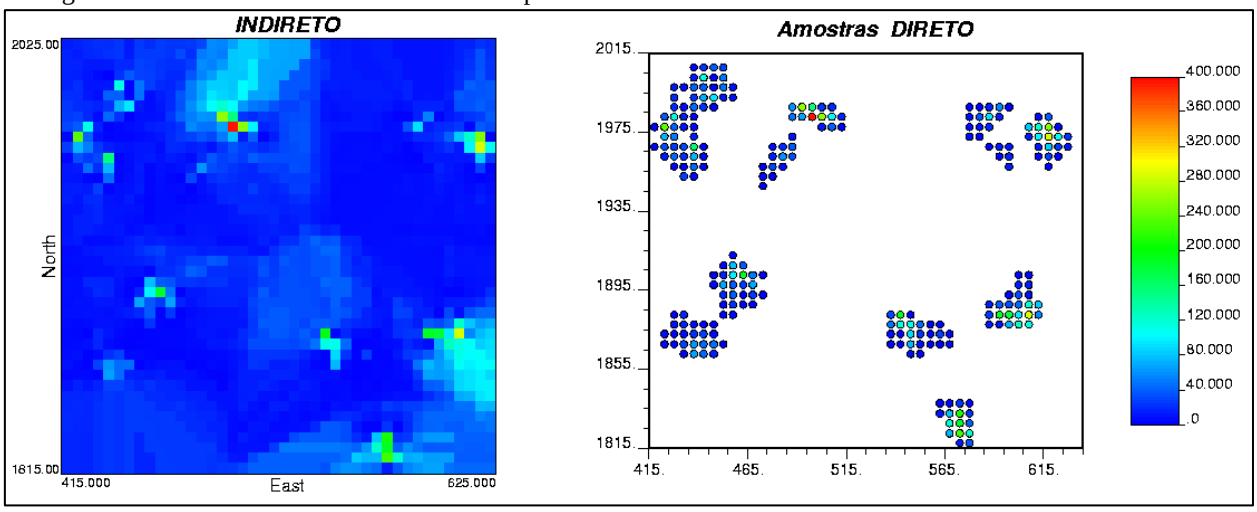
Fonte: MAZZALI

Figura 88 - *Check* visual entre as estimativas e as amostras da variável DIRETO



Fonte: MAZZALI

Figura 89 - *Check* visual entre as estimativas pelo método INDIRETO e as amostras da variável DIRETO.



Fonte: MAZZALI

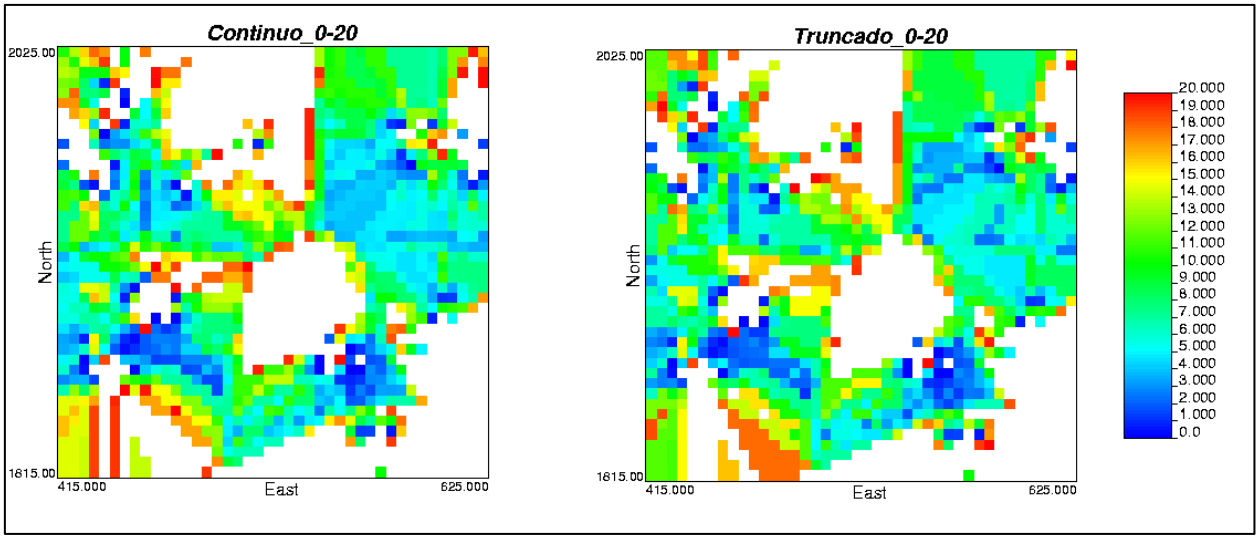
Esta verificação valida todos os modelos de forma satisfatória, assim como valida o índice combinado indireto que apresentou aderência das estimativas com as amostras combinadas NFxLF.

4.3.4.4 Check truncamento

Para a realização do método INDIRETO, foi efetuada a krigagem ordinária da variável NF (discreta) resultando valores contínuos. Buscando analisar o impacto causado por essa abordagem, realizou-se o truncamento nos valores estimados para a variável NF. Por vezes esse arredondamento é de 0.5 tanto para cima como para baixo, o que combinado com um valor elevado da variável LF pode tornar um bloco que inicialmente foi estimado como estéril em minério e vice-versa.

A Figura 90 compara a estimativa da área favorável à lavra pela abordagem indireta, usando dados contínuos e truncados.

Figura 90 - Comparação entre a utilização de dados contínuos *vs* truncados (discretos), para o método INDIRETO.

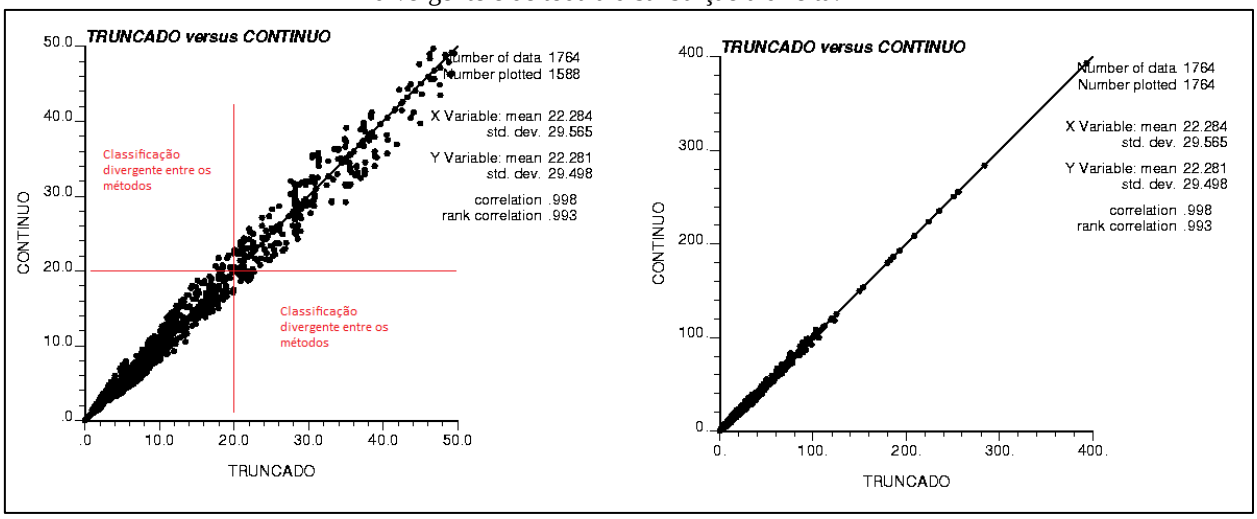


Fonte: MAZZALI

Nota-se, que as diferenças foram insignificantes na área considerada favorável à lavra. Analisando as estatísticas dos dados, nota-se que a recuperação de lavra com os dados truncados aumentou 0.6% elevando a recuperação do método indireto para 65.5%, uma diferença de apenas 11 blocos.

Através do gráfico de dispersão entre as duas abordagens (Figura 91) se vê uma pequena diferença entre os valores das estimativas e que a classificação divergente entre as abordagens é quase inexistente. A parte esquerda da figura mostra em detalhe o impacto na classificação de minério para o *cutoff* de 20. Além de ser uma quantidade baixa de blocos divergentes entre as abordagens, a dispersão em torno da reta x = y é muito pequena. Essa verificação mostra que a aproximação gerada pela krigagem da variável NF tratada como continua mesmo sendo categórica não provocou viés no índice final.

Figura 91 - Gráfico de dispersão entre os índices do método INDIRETO obtidos com dados contínuos *vs* truncados (discretos), visualização dos valores no intervalo de 0-50 a esquerda mostrando a classificação divergente e de toda a distribuição a direita.



Fonte: MAZZALI

4.3.4.5 Krigagem de Indicadores

A krigagem é designada para a estimativa de uma variável Z em qualquer ponto, ou de seu valor médio sobre qualquer suporte. Mas, para várias aplicações o importante é saber a probabilidade de Z(x) exceder um dado valor (CHILÈS & DELFINER, 1999). Esse é o caso neste trabalho, pois a estimativa busca apresentar áreas favoráveis à lavra que são as células com índice de fraturamento menor do que 20 (IF<20).

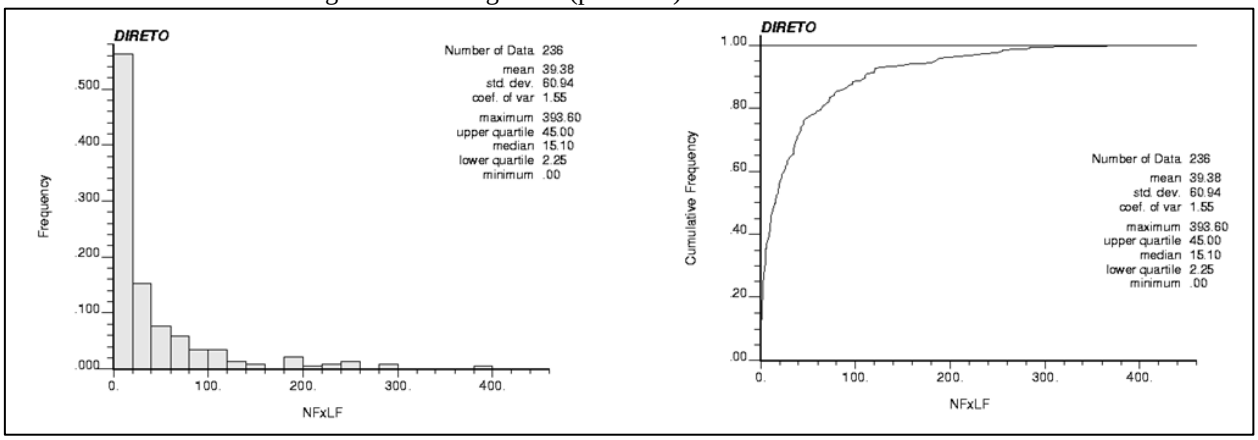
Buscando a abordagem não linear para o estudo, foi realizada a krigagem de indicadores para a variável DIRETO com a seguinte metodologia:

a) análise exploratória dos dados;
b) definição dos K-limiares;
c) variografia dos indicadores para os K-limiares;
d) krigagem dos indicadores (*Full-IK* e *Median IK*);
e) pós processamento – *E-type* – probabilidades e média acima de um dado limiar;
f) resultados e comparação – mapa da área considerada favorável a lavra (IF<20).

4.3.4.6 Definição dos Limiares

Para melhor entendimento da distribuição dos valores da variável Direto, são apresentados os histogramas com a PDF e CDF desta variável **(**Figura 92).

Figura 92 - Histogramas (pdf e cdf) da variável DIRETO.



Fonte: MAZZALI

A distribuição foi discretizada em 10 limiares baseado nos percentis desta distribuição. Foi utilizado o aplicativo *Quantile* do pacote *Gslib*® para discretizar a distribuição nos percentis 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 obtendo o respectivo quantil para cada percentil escolhido (Figura 93).

Figura 93 - Saída do aplicativo *Quantile* com os quantis para os 9 percentis utilizados na discretização da distribuição.

```
Working on Percentiles:

  The 10.0th percentile is        .5000
  The 20.0th percentile is       1.6000
  The 30.0th percentile is       4.2600
  The 40.0th percentile is       8.8000
  The 50.0th percentile is      15.1000
  The 60.0th percentile is      24.4799
  The 70.0th percentile is      37.7599
  The 80.0th percentile is      64.0197
  The 90.0th percentile is     110.3499

Working on Quantiles:

  The cdf corresponding to      20.0000 is   .5643

QUANTILE Version: 1.000 Finished

Stop - Program terminated.
```

Fonte: MAZZALI

Após, partiu-se para a variografia dos limiares através do *software SGeMS*® utilizando a opção "*indicator variogram*". Para o estudo, foram calculados valores dos

variogramas experimentais para 20 *lags* com separação de 6 m e tolerância de 3 m. Os parâmetros de direção, tolerância angular e largura de banda horizontal utilizados para o cálculo dos variogramas dos indicadores estão apresentados na Tabela 7 abaixo, sendo o valor do *cutoff* a única alteração entre os percentis:

Tabela 7 - Parâmetros de variografia dos indicadores (ex: percentil 10).

Direção Az	Mergulho	Tolerância angular	Largura de Banda horizontal	Tipo de medida	Cutoff
0	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
22.5	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
45	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
67.5	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
90	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
112.5	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
135	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
157.5	0	22.5	3m	indicator variogram	0.5
0	0	100	2000m	indicator variogram	0.5

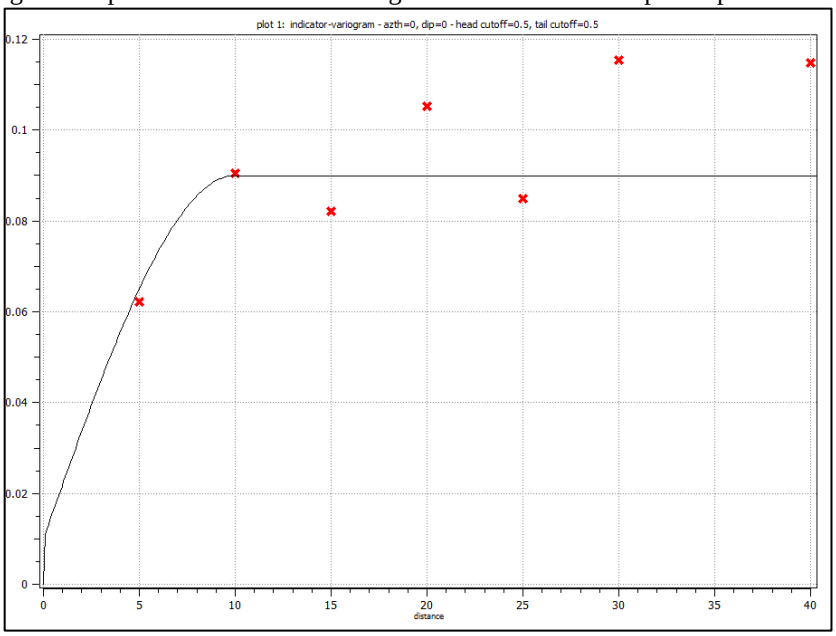
Através desse estudo obtiveram-se os modelos para todos os percentis conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8 - Modelos variográficos dos indicadores.

Percentil	Modelo	Efeito Pepita	Contribuição	Alcance Máximo	Alcance Mínimo	Direção	Variância
10	Esférico	0.01	0.08	10.5	6.25	Az 0	0.09
20	Esférico	0.03	0.13	11.25	7.5	Az 0	0.16
30	Esférico	0.03	0.18	10	8.8	Az 0	0.21
40	Esférico	0.02	0.22	11.5	8.2	Az 0	0.24
50	Esférico	0.02	0.23	10.5	8	Az 0	0.25
60	Esférico	0.03	0.21	9.5	7.5	Az 0	0.24
70	Esférico	0.02	0.19	8	7.5	Az 90	0.21
80	Esférico	0.02	0.14	8	7.5	Az 90	0.16
90	Esférico	0.02	0.07	5.5	5.5	Az 90	0.09

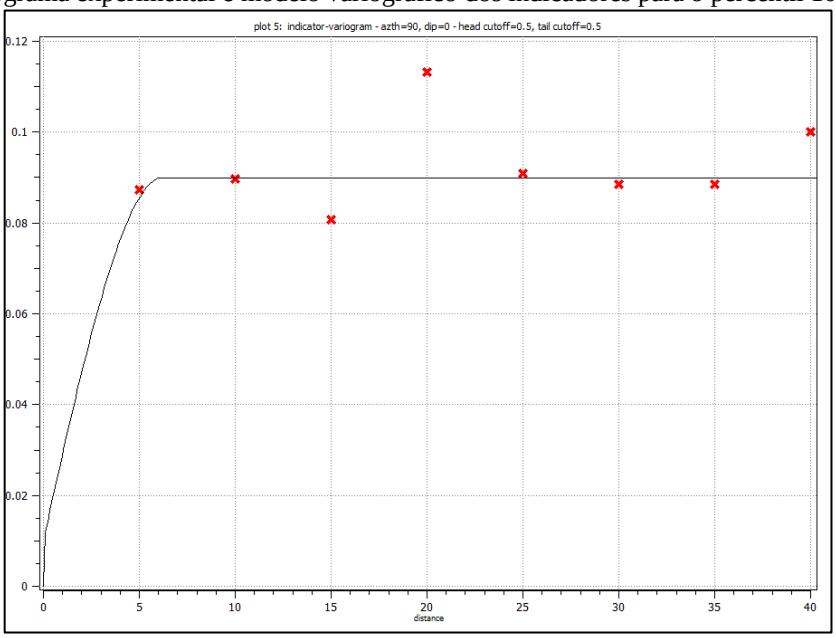
Com os modelos variográficos para todos os percentis, realizou-se a krigagem dos indicadores (*Full-Ik ou MIK- Multiple Indicator Kriging*) assim como também foi realizada a krigagem dos indicadores usando o modelo variográfico da mediana (*Median-Ik*). Os variogramas experimentais e modelos variográficos para todos os indicadores estão representados graficamente abaixo (da Figura 94 até a Figura 111).

Figura 94 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 10, direção Az 0°.



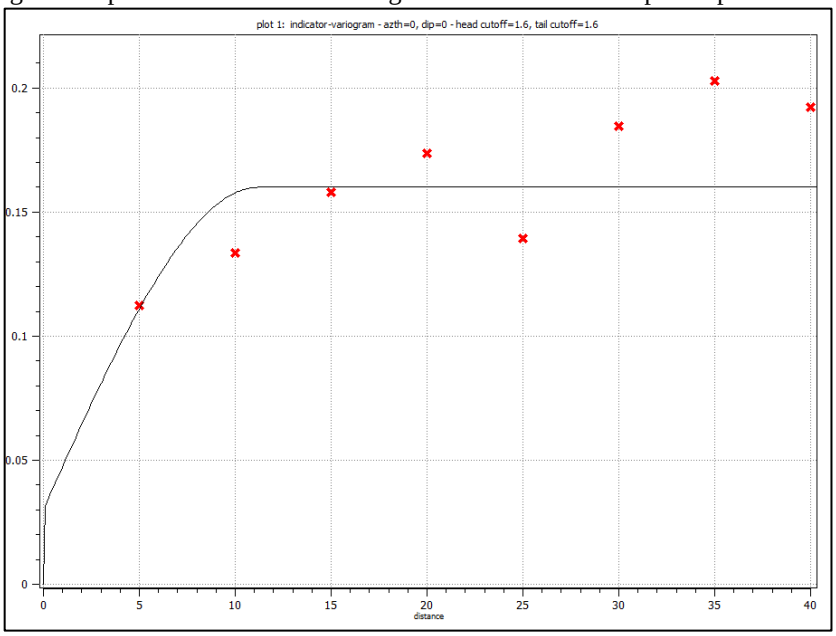
Fonte: MAZZALI

Figura 95 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 10, direção Az 90°.



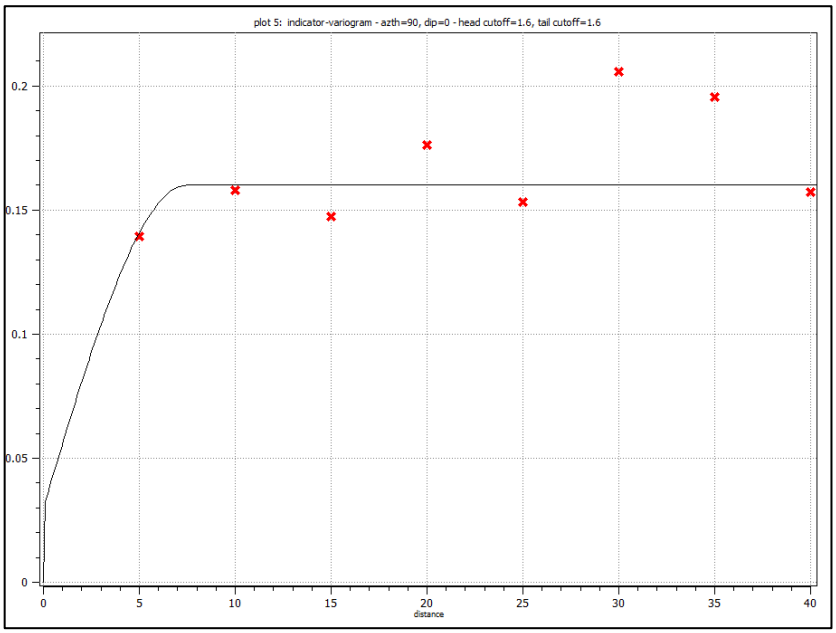
Fonte: MAZZALI

Figura 96 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 20, direção Az 0°.



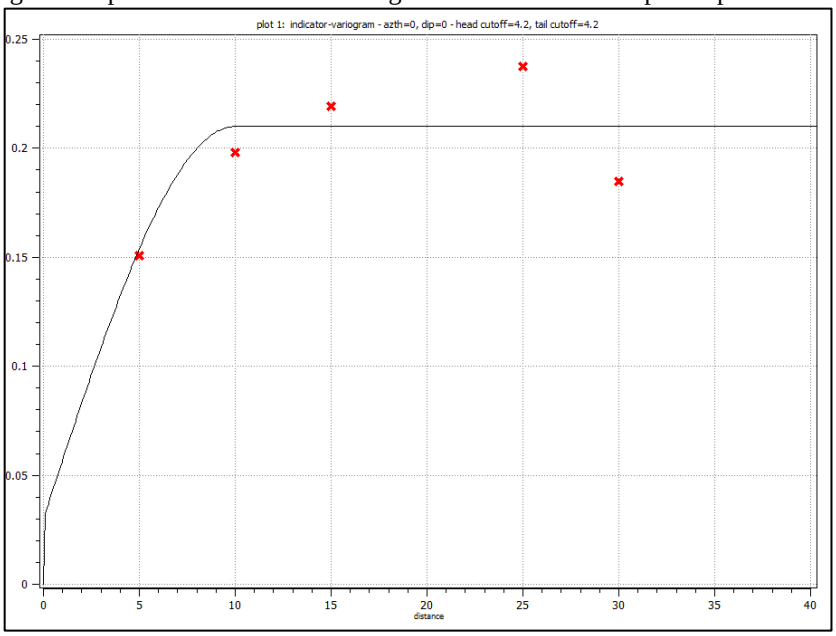
Fonte: MAZZALI

Figura 97 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 20, direção Az 90°.



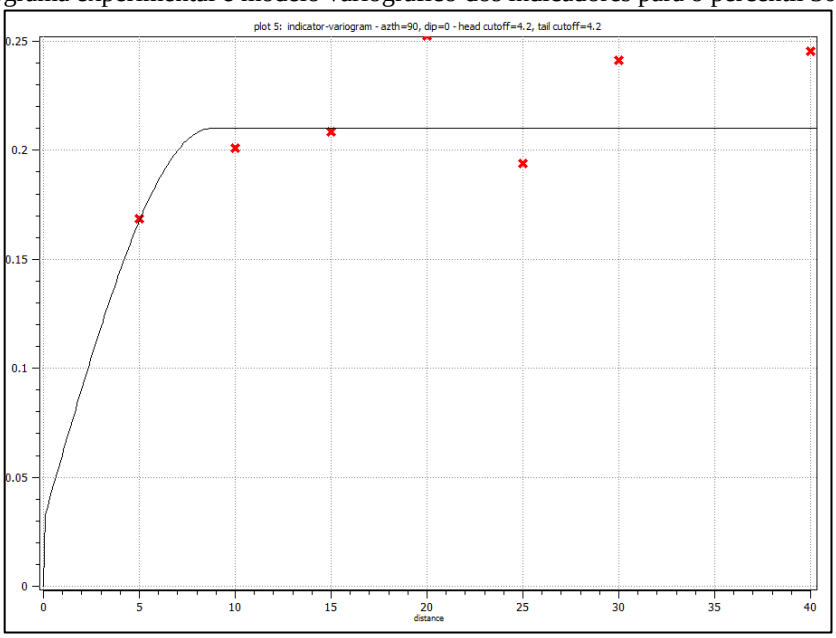
Fonte: MAZZALI

Figura 98 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 30, direção Az 0°.



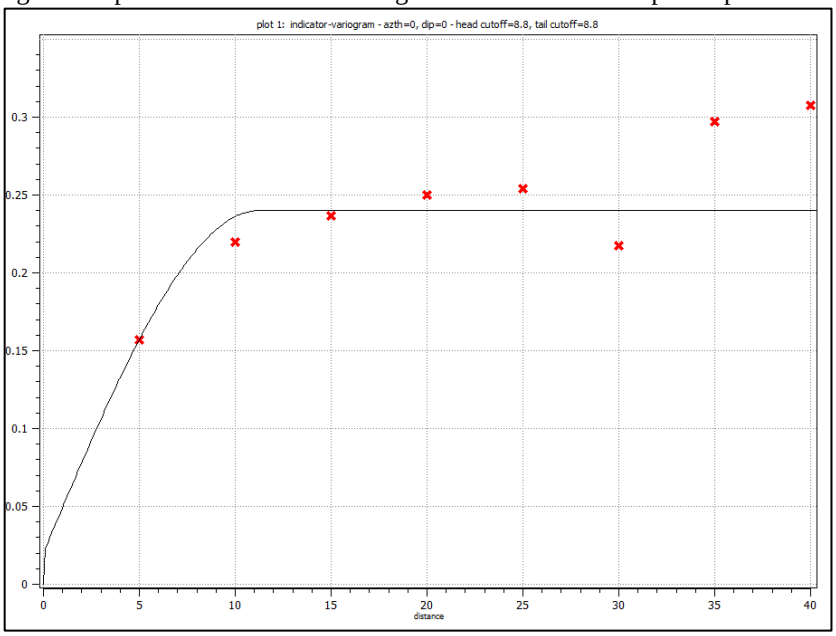
Fonte: MAZZALI

Figura 99 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 30, direção Az 90°.



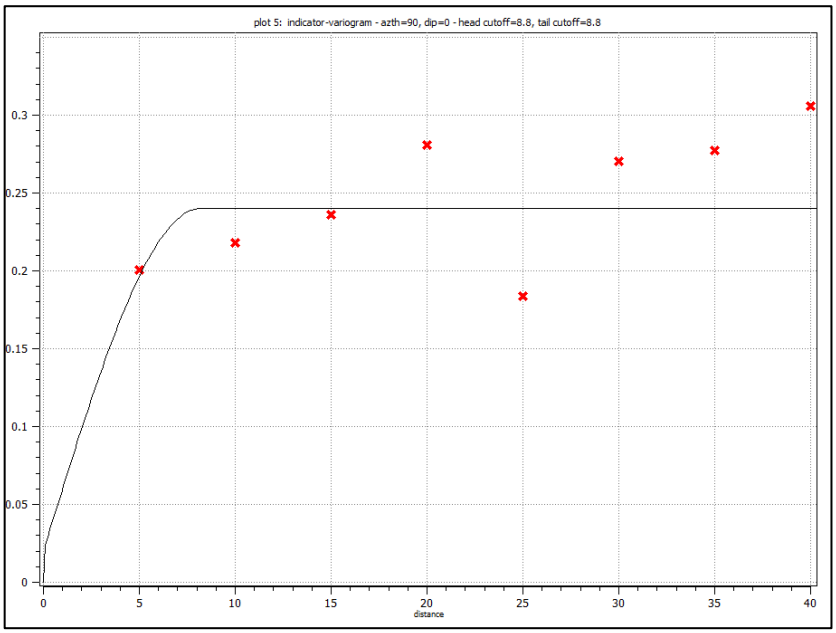
Fonte: MAZZALI

Figura 100 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 40, direção Az 0º.



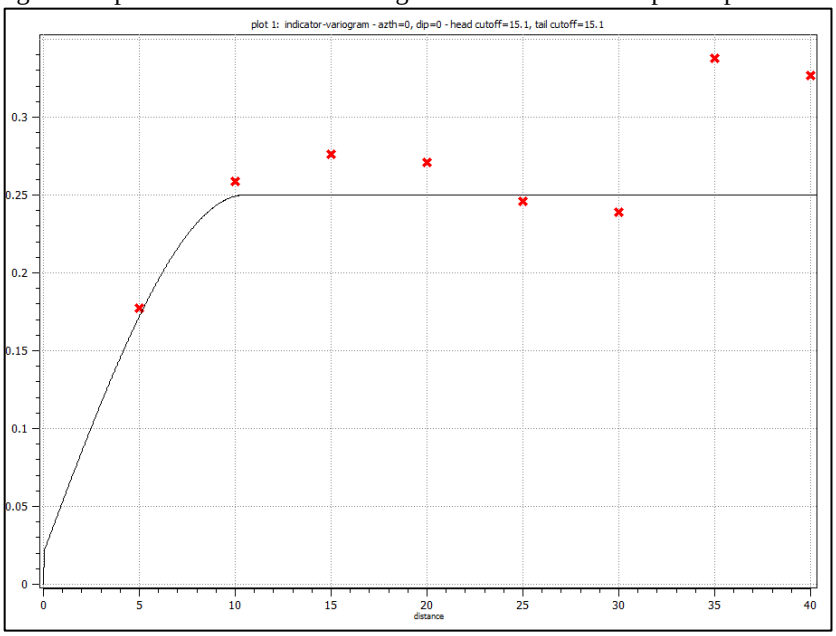
Fonte: MAZZALI

Figura 101 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 40, direção Az 90º.



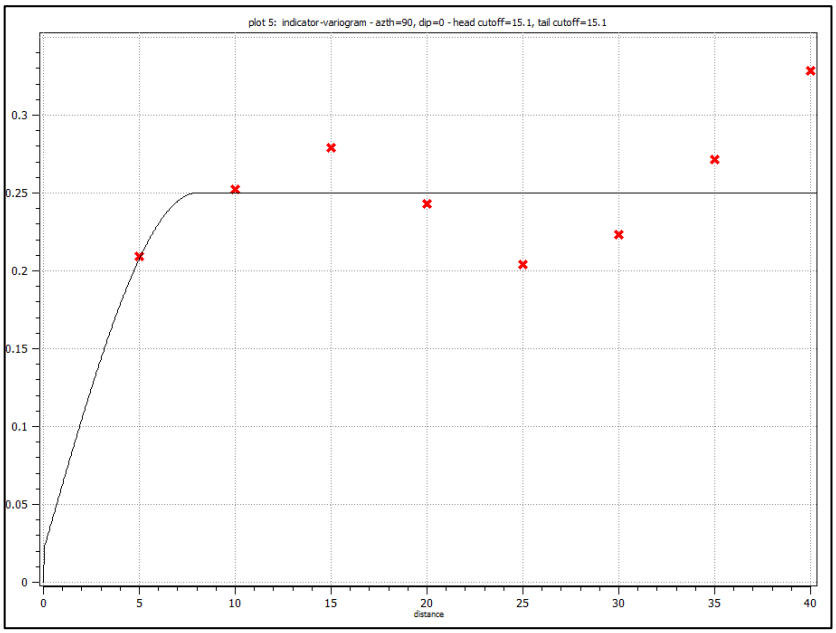
Fonte: MAZZALI

Figura 102 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 50, direção Az 0º.



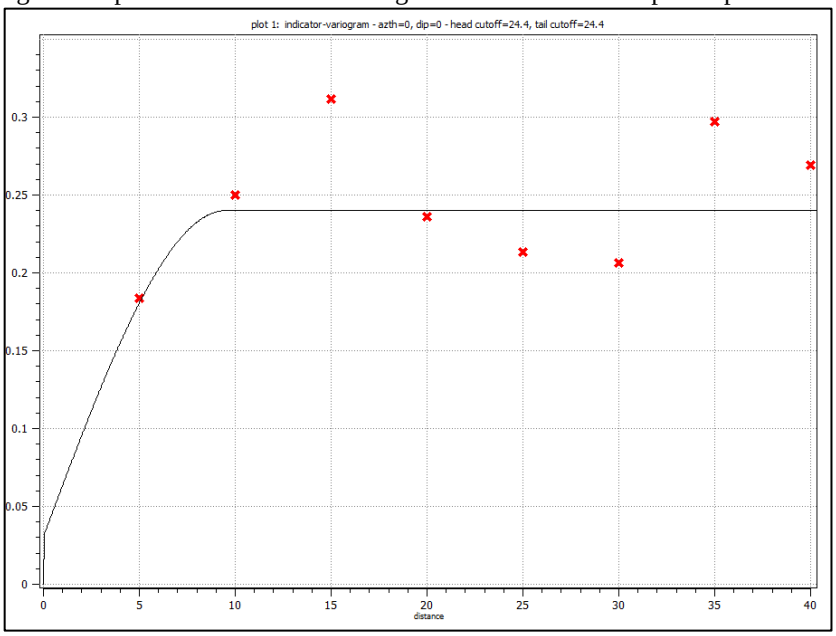
Fonte: MAZZALI

Figura 103 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 50, direção Az 90º.



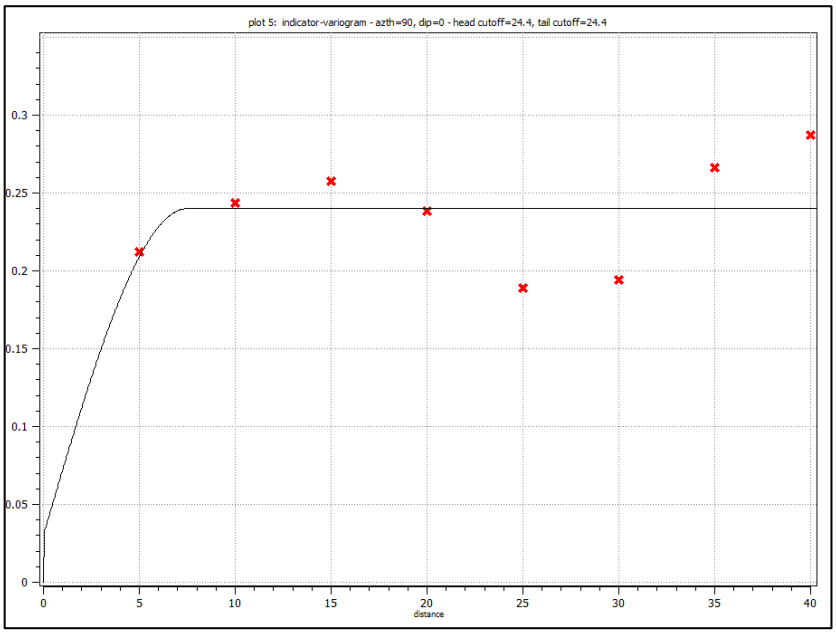
Fonte: MAZZALI

Figura 104 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 60, direção Az 0º.



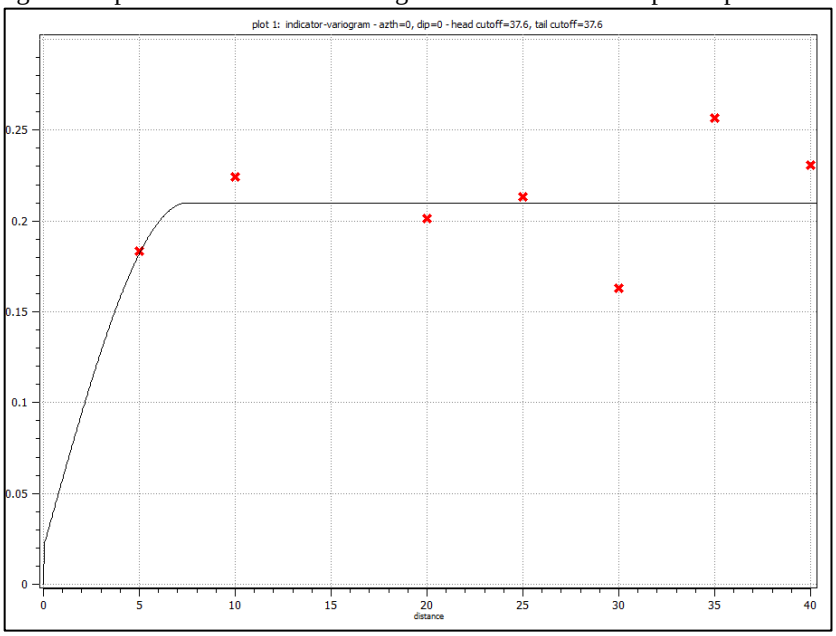
Fonte: MAZZALI

Figura 105 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 60, direção Az 90º.



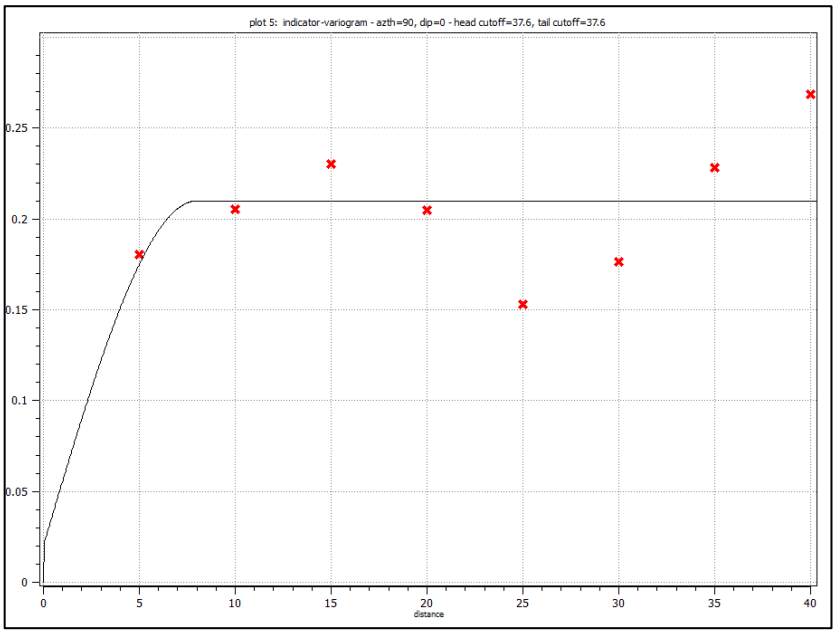
Fonte: MAZZALI

Figura 106 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 70, direção Az 0º.



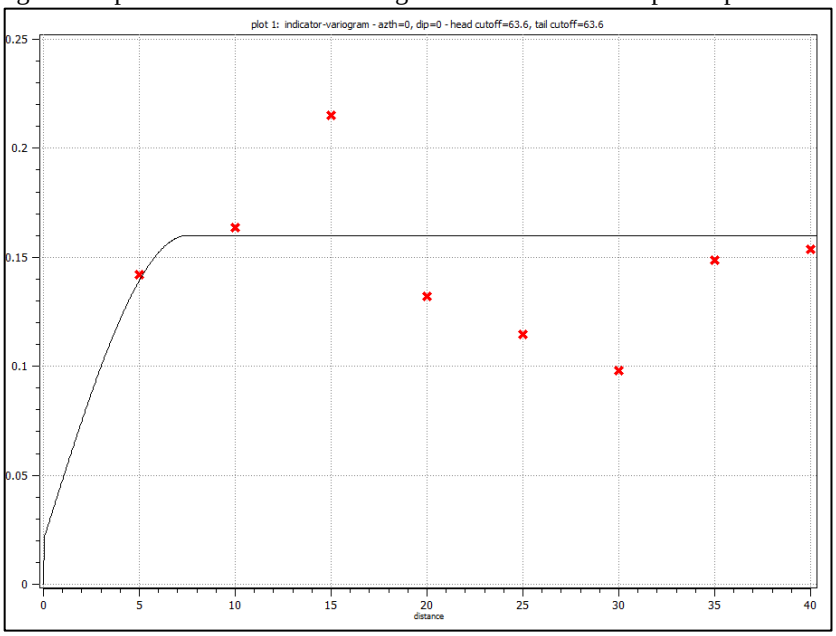
Fonte: MAZZALI

Figura 107 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 70, direção Az 90º.



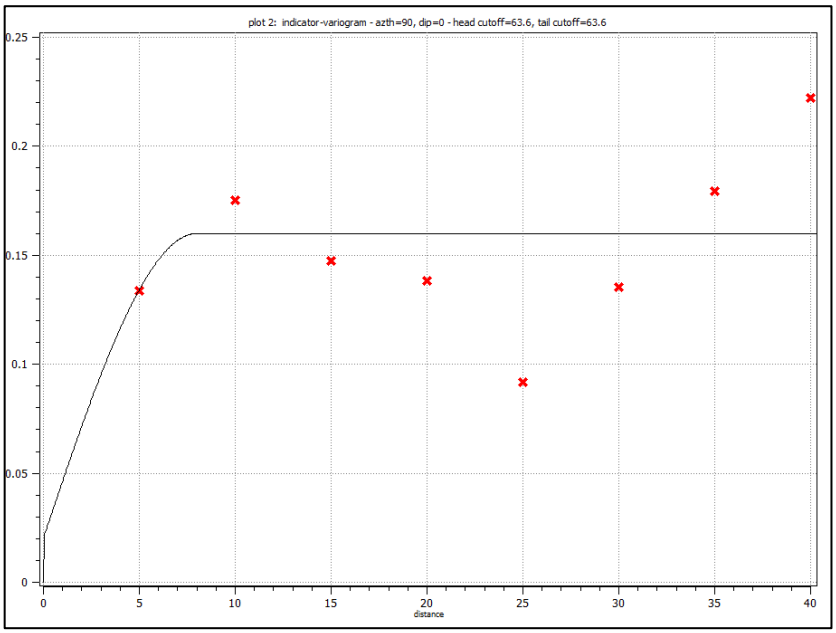
Fonte: MAZZALI

Figura 108 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 80, direção Az 0º.



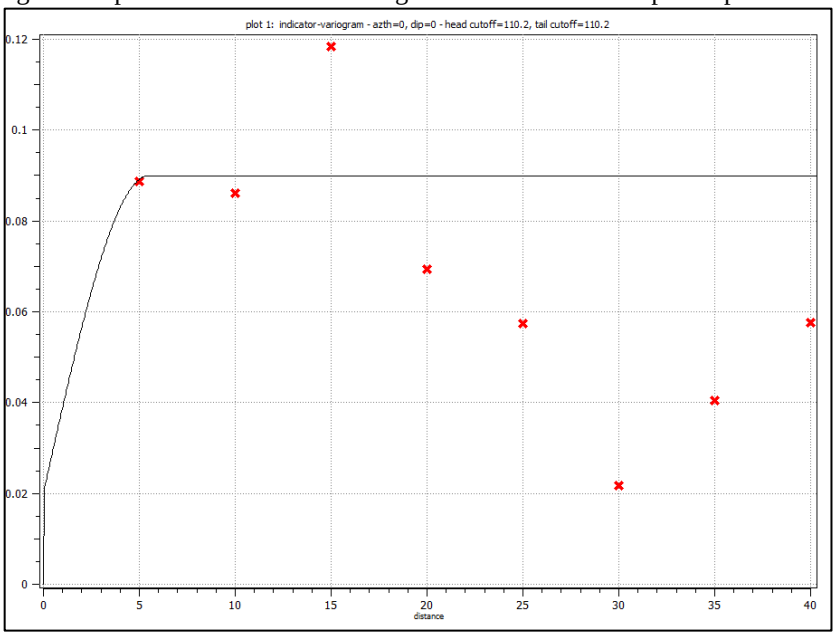
Fonte: MAZZALI

Figura 109 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 80, direção Az 90º.



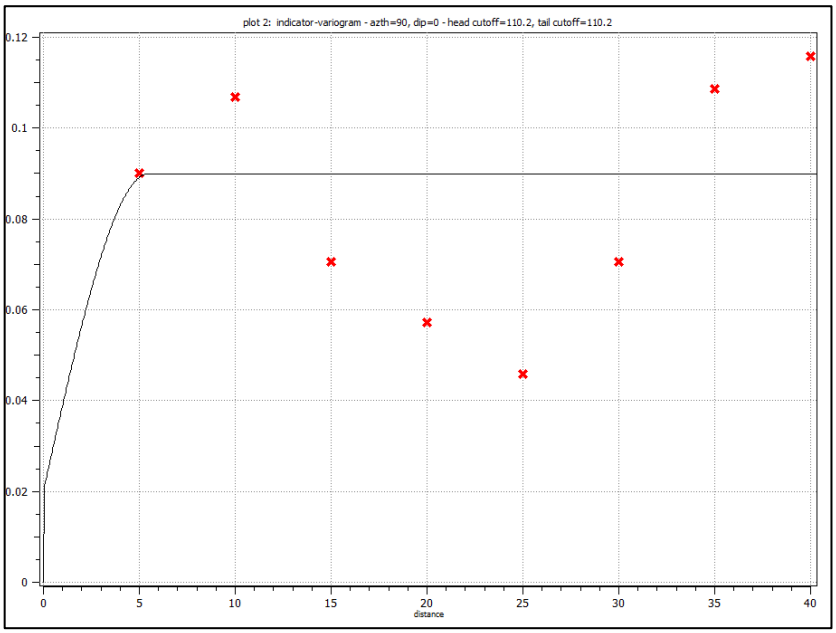
Fonte: MAZZALI

Figura 110 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 90, direção Az 0º.



Fonte: MAZZALI

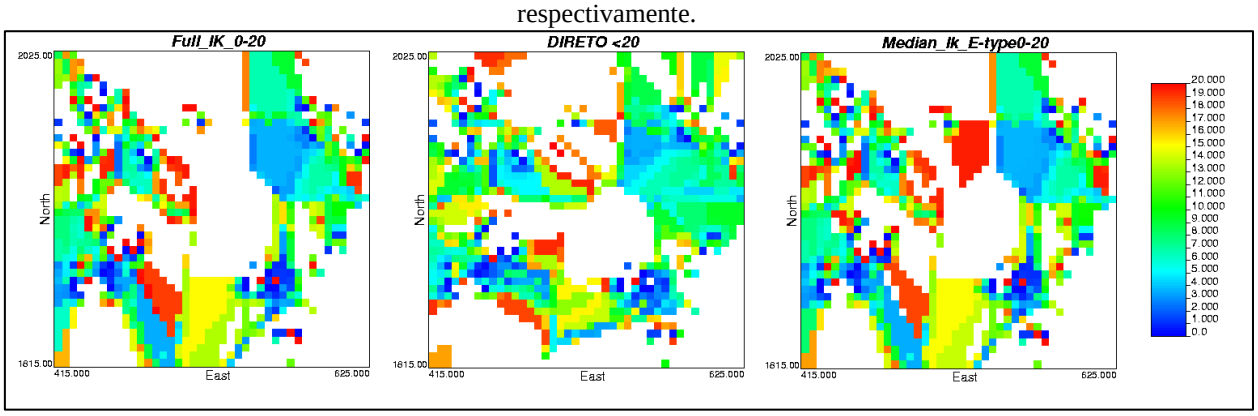
Figura 111 - Variograma experimental e modelo variográfico dos indicadores para o percentil 90, direção Az 90º.



Fonte: MAZZALI

Ambos os resultados foram pós processados para a obtenção do *E-type* e plotados para comparação com as estimativas da abordagem linear da krigagem do índice DIRETO (Figura 112).

Figura 112 - Mapas de localização da área favorável à lavra pelos métodos *Full-Ik*, *KO* Direto e *Median Ik* respectivamente.

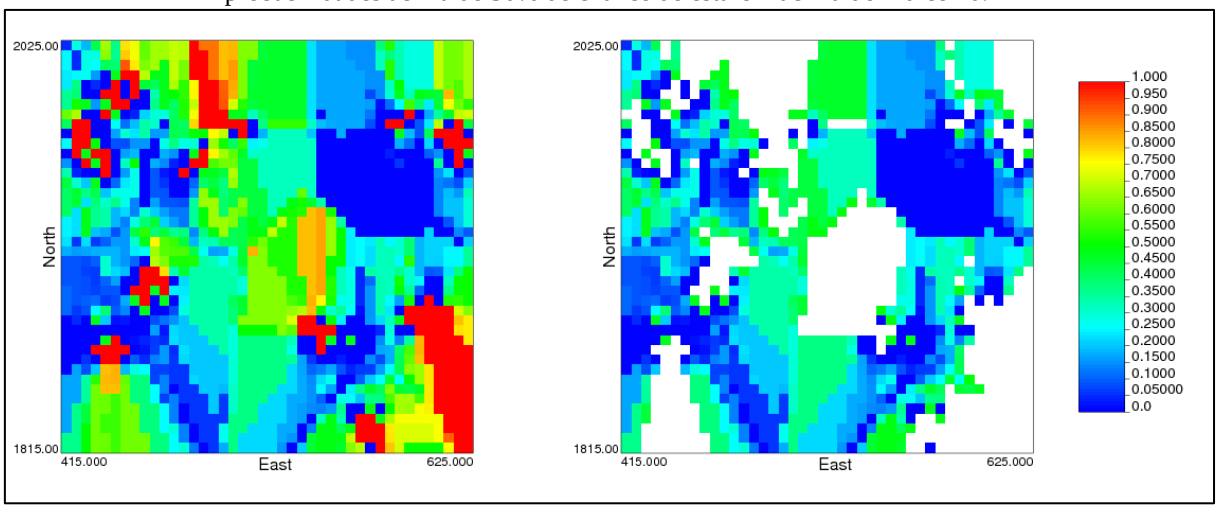


Fonte: MAZZALI

Visualmente, a krigagem dos indicadores foi honrada pela abordagem inicial deste trabalho. Nota-se, que a abordagem através de indicadores foi um pouco mais otimista na estimativa do setor central-sul da área estimada. Esse *check* valida o modelo inicial mostrando coerência entre as estimativas lineares e não lineares, sendo assim pode-se assumir uma aditividade intrínseca para o índice de fraturamento em estudo.

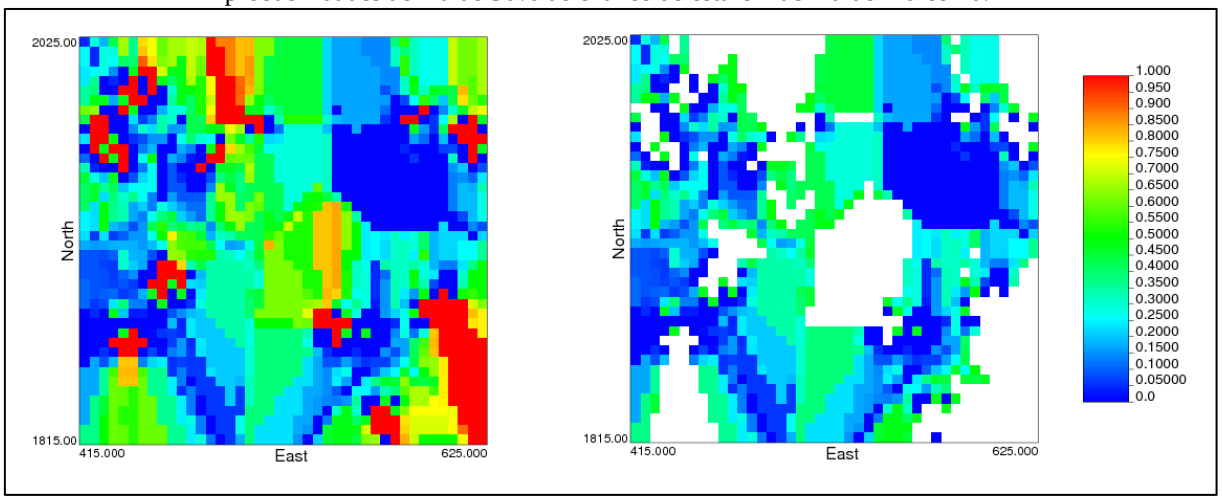
Outra validação realizada foi a visualização dos mapas de probabilidades gerados através do pós-processamento dos dados da krigagem dos indicadores. A krigagem dos indicadores fornece outras valiosas informações sobre as estimativas realizadas (percentil correspondente ao *cutoff*, probabilidade da estimativa estar acima do *cutoff* e variância condicional), essas informações são mais importantes do que apenas a média (*E-type*) que também pode ser obtida no pós-processamento. Abaixo (Figura 113 e Figura 114) os mapas de probabilidade da variável DIRETO estar acima do índice 20, obtidos através da krigagem dos indicadores.

Figura 113 - Mapas de probabilidade obtidos por MIK (*multiple indicator kriging*) para a variável DIRETO. O mapa à esquerda apresenta todas as probabilidades, o mapa à direita apresenta em branco os blocos com probabilidades acima de 50% de chance de estarem acima do índice 20.



Fonte: MAZZALI

Figura 114 - Mapas de probabilidade obtidos por krigagem dos indicadores da mediana para a variável DIRETO. O mapa à esquerda apresenta todas as probabilidades, o mapa à direita apresenta em branco os blocos com probabilidades acima de 50% de chance de estarem acima do índice 20.



Fonte: MAZZALI

Através dos mapas acima nota-se que as estimativas lineares foram muito parecidas com as apresentadas pelos métodos não lineares. Zonas com baixa probabilidade (50%) de exceder o índice estipulado (IF $\leq$ 20) acompanham os padrões vistos nos mapas de área lavrável (Figura 79) obtidos através da krigagem linear, o que valida o nosso modelo. Os blocos na região sul nos mapas de probabilidade apresentam uma diferença em relação a figura 79 pois estão no limiar dos 50% de probabilidade de exceder o indice estipulado.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente capítulo apresenta as conclusões referentes aos objetivos estipulados no capítulo 1, que foram obtidas principalmente através da avaliação dos resultados apresentados no estudo de caso, onde foi aplicada a metodologia proposta no terceiro capítulo. Primeiramente, foi efetuada uma breve retomada dos objetivos e resultados desta dissertação através de uma recapitulação, trazendo os pontos mais importantes de cada capítulo.

5.1 RECAPITULAÇÃO

Para um melhor entendimento das conclusões aqui apresentadas, obtidas com a avaliação dos resultados mostrados no capítulo 4 desta dissertação, os capítulos anteriores foram fundamentais. Neles, se apresentam a contextualização de RO, revisão bibliográfica e metodologia com a sua aplicação em um estudo de caso.

5.1.1 Capítulo 1

Apresenta o problema, a meta, os objetivos específicos e a estruturação do trabalho. Este capítulo introduz a caracterização e quantificação de fraturamento através de parâmetros amostrais e índices de fraturamento, resume a importância das rochas ornamentais na mineração atualmente e relaciona o planejamento de lavra de rochas ornamentais ao tema da dissertação.

5.1.2 Capítulo 2

Conceitualiza e apresenta as principais rochas ornamentais e suas aplicações mais frequentes. Ainda, este capítulo revisa os métodos de lavra e de beneficiamento aplicados às rochas ornamentais e por fim apresenta o panorama econômico nacional e internacional das rochas ornamentais.

5.1.3 Capítulo 3

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica, trazendo peculiaridades, problemas e soluções encontradas nos principais trabalhos anteriores relacionados a índice de fraturamento

e predição de fraturas. Neste capítulo, também está presente a teoria e metodologia utilizada para a formulação do índice proposto.

5.1.4 Capítulo 4

Este capítulo demostra, através de um estudo de caso, numa pedreira de rochas ornamentais, a aplicação do índice de fraturamento proposto nesta dissertação. Uma completa análise dos resultados obtidos está ilustrada e comentada, buscou-se identificar as deficiências e vantagens do índice proposto e desta nova metodologia empregada à predição de fraturas.

5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS VERSUS RESULTADOS OBTIDOS

Esta dissertação tem como meta o desenvolvimento de uma metodologia de mapeamento de fraturas para auxiliar na lavra de rochas ornamentais através de um modelo geoestatístico bidimensional das fraturas. Neste modelo, está contida a estimativa do grau de fraturamento da área estudada, baseada em um parâmetro de quantificação de fraturas. Esta nova metodologia com o emprego do novo índice de fraturas, deveria levar a resultados que não apresentassem as deficiências de estudos anteriores. Para atingir a meta, foi proposta uma alteração na forma de amostragem dos parâmetros de quantificação de fraturas e uma combinação destes parâmetros para a formulação de um índice de fraturamento que fosse mais representativo da qualidade do maciço para planejamento de lavra. A combinação de parâmetros resultou num novo índice de fraturamento que é o produto entre os comprimentos das fraturas e a quantidade de fraturas contidas em uma célula quadrada de amostragem. Os resultados obtidos no estudo de caso comprovam a eficiência deste novo índice e da metodologia proposta que atingiram os objetivos de forma muito satisfatória.

Os objetivos específicos estipulados no capítulo 1 desta dissertação foram:

a) estudar a formulação do índice apropriado de fraturamento para auxílio à lavra em rochas ornamentais;
b) verificar a aplicabilidade e viabilidade da metodologia ao cenário atual da indústria de RO;
c) verificar se existe correlação entre o resultado de recuperação de lavra apresentado pelo índice com a recuperação real de lavra de RO;

d) avaliar a estimativa do grau de fraturamento do maciço rochoso através de um novo índice composto;
e) estudar a qualidade e a representatividade dos mapas zonais indicativos gerados para otimizar o planejamento de lavra em RO.

A aplicabilidade econômica do índice está apresentada no capítulo 2, onde os cenários econômicos nacionais e internacionais mostraram a importância deste minério e, inclusive, a sua representatividade no PIB mineral nacional. A ausência de estudos que usam a geostatística como base para a predição de fraturas foi evidenciada através do baixo investimento em pesquisa mineral das indústrias de RO relatado pelos principais órgãos reguladores.

Os estudos sobre o índice e sua formulação estão demonstrados no capítulo 3. Este capítulo expõe as singularidades que os parâmetros de fraturamento apresentam através de referências aos estudos anteriormente efetuados neste campo. As deficiências e vantagens das metodologias desenvolvidas foram explicitadas e relacionadas à nova metodologia proposta por este estudo, onde se verificou a robustez e eficiência da construção deste novo índice. Foi exemplificada a formulação do índice através de memória de cálculo e ilustrações baseadas em parâmetros reais e aplicáveis ao estudo de caso efetuado no capítulo 4, comprovando a aplicabilidade em situações diárias enfrentadas na lavra de RO.

A análise da qualidade dos modelos criados e a verificação da correlação entre os resultados de recuperação de lavra expostos pelo índice e os apresentados pela indústria atualmente, está contida no capítulo 4. Para isso, utilizaram-se valores reais de recuperação de da pedreira em estudo, durante sua fase inicial de lavra contra os valores de saída das estimativas realizadas. Os resultados apresentam uma correlação positiva forte com a realidade em relação às taxas recuperação e a localização de área lavrável. Mostra uma coerência de proporção e localização da área lavrável, confirmando que a qualidade e representatividade dos modelos criados foram muito satisfatórias para ambas as abordagens (Direta e Indireta). Quanto ao estudo de caso ainda conclui-se que:

a) a interpolação de dados discretos como variáveis contínuas (variável NF) não apresentou viés e também não provocou uma classificação errônea significativa;
b) a utilização da metodologia de interpolação linear não apresentou viés quando comparada com a prática não linear que é mais indicada para essa situação. A vantagem da metodologia linear é sua simplicidade e facilidade de

implementação, a comparação entre os mapas de área lavrável obtidos por krigagem de indicadores para o *cutoff* estipulado no estudo e os mapas resultantes da krigagem ordinária da variável em forma contínua, demonstram os mesmos padrões de fraturamento e aproximadamente a mesma proporção;

c) as abordagens Direta e Indireta apresentaram diferenças quanto a proporção de área lavrável. O índice indireto acabou estimando um maior número de blocos dado a dupla suavização que este método sofre por demandar dois processos de krigagem. Porém, toda a área lavrável excedente que esta abordagem apresentou em relação à abordagem Direta, está estimada com valores de índices muito próximos do *cutoff* estipulado, o que abona esta pequena discrepância entre as abordagens, mostrando que apesar de ser mais otimista quanto ao potencial de extração da jazida, a técnica não apresenta estimativas errôneas quanto ao grau de fraturamento. As taxas de recuperação de ambas as abordagens apresentaram valores muito próximos às taxas obtidas *in situ* no caso do Sienito Piquiri, sendo o índice Direto o que atingiu a taxa de recuperação mais próxima da real;

d) o índice (número de fraturas x comprimento de fraturas) medido em célula retangular representa um índice alternativo de fraturamento para ser aplicado no planejamento de pedreiras de rochas ornamentais. A representatividade deste índice vem do fato de que o maciço rochoso pode ter muitas, porém, pequenas fraturas ou poucas, porém, grandes fraturas. Em ambos os casos, a qualidade do bloco é ruim. Por outro lado, o produto de NF x LF intrinsecamente aponta tanto o comprimento de fraturas quanto o número de fraturas;

e) a estimativa gerada por ambas as metodologias gerou mapas indicativos de fraturamento que honram os dados amostrais, além de representar globalmente a média dos dados;

f) o planejamento de lavra em rochas ornamentais pode ser beneficiado por mapas zonais de fraturamento. Outros fatores, além do grau de fraturamento, devem ser levados em conta na hora de tomar decisões sobre onde iniciar a lavra ou como seguir um sequenciamento. Entre eles a orientação das fraturas, relevo e cobertura existente sobre o maciço. A frente de lavra é algo dinâmico e este índice pode indicar zonas preferenciais de extração ao planejamento ajudando a criar um sequenciamento prévio para o depósito.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Finalizando a dissertação seguem algumas recomendações para trabalhos futuros na área de predição de fraturas.

a) Efetuar o estudo em um depósito na sua fase inicial e comparar os resultados obtidos pela lavra com os estimados. O depósito estudado por essa dissertação não forneceu relatórios de recuperação de lavra suficientes pois teve
b) Utilizar outros algorítimos geoestatísticos como simulação geoestatística e geostatística multivariada para analisar o fraturamento de uma área.
c) Incoporar no estudo outros parâmetros como: direção e mergulho de cada lineamento. Associar todos os parâmetros de maneira a obter uma rede de fraturas que forneça informações que possibilitem uma avaliação em 3D da qualidade de cada bloco.
d) Locar os pontos centrais de cada lineamento através de geoestatística de múltiplos pontos, baseando-se nos padrões disposição das fraturas amostradas. O estudo desta dissertação apresentou uma estimativa de fraturamento dentro de uma célula, porém não pode indicar a localização das possíveis fraturas. A localização das fraturas é importante para o melhor aproveitamento das jazidas, portanto trabalhos futuros voltados para esse objetivo contribuirão de forma substancial para a otimização da lavra onde a caracterização estrutural é importante.

REFERÊNCIAS

ANGELIER, J., MECHLER, P. Sur une méthode graphique de recherché des contraintes principales également utilizable en tectonique et en sismologie: la méthode des diédres droits. **Bulletin Societée Géologique**, France, v.7, n. 6, p. 1309-1318, 1977.

ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO 2010. Brasília: DNPM, v.35, 2011. Disponível em: < http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=2005>. Acessado em: 20 dezembro 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ROCHAS ORNAMENTAIS – ABIROCHAS. **Balanço da Produção Mundial e do Comércio Internacional de Rochas Ornamentais em 2011.** Belo Horizonte: Abirochas, 2012.8 p. Informe ABIROCHAS 11/2012. Disponível em: <http://www.ivolution.com.br/news/upload_pdf/11364/Informe_11_2012.pdf>. Acessado em: 12 setembro 2012.

BONS, P. D. et al. Melt extraction and accumulation from partially molten rocks, **Lithos**, v. 78, p. 25-42, 2004.

BONNET, E. et al. Scaling of fracture systems in geological media, **Reviews of Geophysics**, v. 39, p. 347-383, 2001.

BARTHÉLÉMY, J.-F.; GUITON, M. L. E.; DANIEL, J.-M. Estimates of Fracture Density and Uncertainties from Well Data, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 46, n.n3, p. 590-603, 2009.

BELAYNEH, M. W. et al. Comparison of deterministic with stochastic fracture models in water-flooding numerical simulations, **AAPG Bulletin**, v. 93, p. 1633-1648, 2009.

BITENCOURT, M.F. et al. Reavaliação preliminar das relações estratigráficas do complexo granítico Encruzilhada (CGE), RS. In: PRIMER SIMPÓSIO INTERNATIONAL DEL NEOPROTEROZOICO-CAMBRICO DE LA CUENCA DEL PLATAN, 1., 1993, Uruguay. **Resumenes extensos**, tomo II, 1993.

CHIODI FILHO, C. Aspectos técnicos e econômicos do setor de rochas ornamentais. Rio de Janeiro: CNPq/CETEM, 1995.

CASAS, A. M. et al. LINDENS: A program for lineament length and density analysis, **Computers & Geosciences**, v. 26, p. 1011-1022, 2000.

COSTA, J.F. Reducing the Impact of Outliers in Ore Reserves Estimation, **Mathematical Geology**, v. 35, n. 3, p. 323-345, 2003.

CHILÈS, J.P.; DELFINER, P. **Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty.** New York: Wiley- Interscience Publication, 1999. 695p.

DEERE, D.U. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes, Felsmechanik und Ingenieurgeologie, **Rock Mechanics and Engineering Geology**, v. 1, n. 1, p. 16-22, 1963.

DEERE, V.A.; Howie, R.A.; Zussman, J. **Rock forming Minerals** - London: Longman, Green and Co Ltd, 1964. v. 5, Non-Silicates. 372 p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. Disponível em: <http://www.dnpm.gov.br/conteudo.asp?IDSecao=68&IDPagina=64 >. Acessado em 17 abril 2012.

DEPARTMENT OF NATURAL RESOURCES. **IGWS Economic Resources**. Disponível em: <http://www.iowadnr.gov/Environment/GeologyMapping/EconomicResources.aspx>. Acessado em: 25 janeiro 2014.

DEUTSCH, C.V. & JOURNEL, A.G. 1992. GSLIB: Geostatistical Software Library and User´s Guide, Oxford University Press, New York, 340 p.

DI GIORGIO, D. et al. Análise estrutural no planejamento de lavra de rocha ornamental **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 56, n. 3, p. 175-179, 2003.

DIMENSION STONES ADVOCATE NEWS. **Basicsmines**. Disponível em: <http://www.basicsmines.com/dimensionstone/>. Acessado em 25 setembro 2012 e 20 maio 2013.

DVERSTORP, B.; ANDERSSON, J. Application of the discrete fracture network concept with field data: Possibilities of model calibration and validation, **Water Resources Research**, v. 25, n. 3, p. 540-550, 1989.

FERNANDES, L. A. D.; PORCHER, C. C. **Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil – PLGB**, Projeto Pedro Osório Folha Pedro Osório SH.22-Y- C Estado do Rio Grande do Sul Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, p. 57-67. 1999

GEOSCIENCE NEWS AND INFORMATION. **Rocks: Igneous, Metamorphic and Sedimentary**. Disponível em: < http://geology.com/rocks/ >. Acessado em: 02 novembro 2012.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p.

GROSS, J. M. A importância da pesquisa geológica no segmento de rochas ornamentais. **Egatea Revista da Escola de Engenharia**. Porto Alegre, RS, v. especial, p. 140-144, 1996.

HUDSON, J. A.; PRIEST, S. D., Discontinuity frequency in rock masses, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts**, v. 20, p. 73-89, 1983.

KOPPE, J.C., 1992. A lavra de Rocha Ornamental. **Egatea Revista da Escola de Engenharia**, Porto Alegre, v. 20, n. 1, p. 23-29, 1992.

KOPPE, J.C., 2013. Comunicação pessoal.

KOIKE, K.; NAGANO, S.; OHMI, M., Lineament analysis of satellite images using a segment tracing algorithm 1564 Fracture Network Characterization (STA), **Computers and Geosciences**, v. 21, p. 1091-1104, 1995

JOST, H. et al. Geologia estrutura, petrografia e petrologia do Sienito Piquiri (Proterozóico Superior), Rio Grande do Sul. SBG, In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2., Florianópolis, **Anais**..., p. 63-81, 1985.

LA POINTE P. R.; HUDSON J. A. Characterization and interpretation of rock mass jointing patterns. **Geological Society of America**, Special Paper 199, B. Series, 1985.

LA POINTE, P. R. Derivation of parent population statistics from trace length measurements of fractal populations, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 39, p. 381-388, 2002.

LIMEIRA, F. **Geografia Professor Fabio Limeira**. Disponível em: <http://www.fabiolimeira.pro.br/3/post/2013/03/rio-grande-do-sul.html>. Acessado em: 02 novembro 2012.

LONG, J. C. S. et al. Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, **Water Resources Research**, v. 18, p. 645-658, 1982.

LACAZETTE, A. A new stereographic technique for the reduction of scanline survey data of geologic features, **Computers and Geosciences**, v. 17, p. 445-463, 1991.

LYMAN, G. J. Rock fracture mean trace length estimation and confidence interval calculation using maximum likelihood methods, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 40, p. 825-832, 2003

MATTA, P. M. **Indústria de Rochas Ornamentais Rejeitos x Produção Limpa**. Salvador: Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM/BA, 2003. Disponível em:< http://www.dnpm.gov.br/mostra_arquivo.asp?IDBancoArquivoArquivo=2055>. Acessado em 25 março 2014.

MAULDON, M.; DUNNE W.M.; ROHRBAUGH JR. M. B. Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces, **Journal of Structural Geology**, v. 23, p. 247-258, 2001.

MAULDON, M. Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows, **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 31, p. 201-216, 1998.

MANDA, A. K.; MABEE, S. B. Comparison of three fracture sampling methods for layered rocks, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 47, p. 218-226, 2010.

MARCOTTE, D.; BOUCHER, A. The estimation of Mineralized Veins: A Comparative Study of Direct and Indirect Approaches, **Exploration and Mining Geology**, v.10, n. 3, p. 235-242, 2001.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963.

MINISTÉRIO DE DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR – MDIC. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/> Acessado em: 20 dezembro 2012.

NARR, W. Estimating average fracture spacing in subsurface rock, **AAPG Bulletin**, v. 80, n. 10, p. 1565-1585, 1996.

NATURAL STONE INDUSTRY MAGAZINE OF THE WORLD. **Litosonline**. Disponível em:< http://litosonline.com/ >. Acessado em 24 janeiro 2013.

NIREX, Evaluation of heterogeneity and scaling of fractures in the Borrowdale Volcanic Group in the Sellafield area, Harwell, UK: **Nirex Report SA/97/028**, 1997. 141 p.

PANNATIER, Y. **Variowin**: Software for Spatial Data Analysis in 2D. New York: Springer. 1996. 90 p.

PARKER, J. Everybody Goes Underground Eventually, **Aggregate Manager**, n. 6, p. 30-35, 1996.

PRIEST, S. D; HUDSON, J. A. Discontinuity Spacings in Rock, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 13, p. 135-148, 1976.

_____. Estimating discontinuity spacing and trace length using scanline surveys, **International Journal of Rock Mechanics and Mining**, v. 18, p. 183-197, 1981.

_____. **Discontinuity analysis for rock engineering**. London: Chapman & Hall, 1993. 473 p.

_____. Determination of discontinuity size distributions from scanline data, **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 37, p. 347-368, 2004.

PÉREZ-CLAROS, J. A.; PALMQVIST, P.; OLÓRIZ, F. First and second orders of suture complexity in ammonites: A new methodological approach using fractal analysis, **Mathematical Geology**, v. 34, p. 323-343, 2002.

PAHL, P.J. Estimating the mean length of discontinuity traces, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts**, v. 18, 221-228, 1981.

PHILIPP, R. P.; MACHADO, R. Suítes Graníticas do Batólito Pelotas no Rio Grande do Sul: petrografia, tectônica e aspectos petrogenéticos, **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 3, p. 257-266, 2001.

PHILIPP, R.P.; NARDI, L.V.S.; BITENCOURT, M.F. Estratigrafia das Rochas Plutônicas: revisão e comentátios. In: ENCONTRO SOBRE ESTRATIGRAFIA DO RIO GRANDE DO SUL: ESCUDO E BACIAS, 1., 2003, Porto Alegre. **Anais**... p.95-98.

POLICENTER. **Produtos para Marmoraria, Corte e Polimento.** Disponível em: <http://policenter.wordpress.com/>. Acessado em 27 dezembro 2012.

QUIGLEY, P.; McSWINEY, S. Measurement and Analysis of Rock Mass Fractures and their Applications in Civil. In: PAPER PRESENTED TO THE GEOTECHNICAL SOCIETY OF THE INSTITUTE OF ENGINEERS OF IRELAND, 1996. The Institute Of Engineers of Ireland, Geotechnical Society Engineering 24p.

RIO DE JANEIRO. Lei Nº 6373/2012, de 28 de dezembro de 2012. Diário Oficial do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/f25571cac4a61011032564fe0052c89c/16434a65e8803d0b83257af60058956b?OpenDocument#_Section5>. Acessado em: 01 março 2013.

TERZAGHI, R.D. Sources of error in joint surveys, **Geotechnique**, v. 15, 287-304, 1965.

RILEY, M. S. Fracture trace length and number distributions from fracture mapping, **Journal of Geophysical Research**, v. 110, 16 p., 2005.

SRIVASTAVA, R.; FRYKMAN, P.; JENSEN, M. Geostatistical simulation of fracture networks. In: Leuangthong, O; Deutsch, C.V. (Eds.), **Geostatistics Banff 2004 of Quantitative Geology and Geostatistics**. Netherland: Springer, 2005. v. 14, p. 295-304.

STABEL, L. Z.; NARDI, L. V. S.; CID, J. P. Química Mineral e Evolução Petrológica do Sienito Piquiri Magmatismo Shoshonítico, Neoproterozóico, Pós-Colisional no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 2 p. 211-222, 2001.

SUMÁRIO MINERAL 2011. Brasília: DNPM, v. 31, 2012. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=6350 > Acessado em: 27 março 2013.

SUMÁRIO MINERAL 2012. Brasília: DNPM, v. 32, 2012. Disponível em: <https://sistemas.dnpm.gov.br/publicacao/mostra_imagem.asp?IDBancoArquivoArquivo=7366>. Acessado em: 27 março 2013.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE SANTA CRUZ. **Blog Oficial do Curso de Engenharia Civil.** Disponível em: <http://engenhariacivildauesc.blogspot.com.br/2010/11/historia-da-resistencia-dos-materiais_04.html>. Acessado em: 01 novembro 2012.

UNIVERSITY OF MARYLAND PHYSICS EDUCATION RESEARCH GROUP. **Alternative Homework Assignment**: The Great Pyramid at Giza. Disponível em: <http://www.physics.umd.edu/perg/abp/aha/pyramid.htm>. Acessado em: 01 novembro 2012.

VIRUETE, J.E. et al. Two-dimensional geostatistical modeling and prediction of the fracture system in the Albala Granitic Pluton, **Journal of Structural Geology**, v. 23, p. 2011-2023, 2001.

VIEIRA Jr. N. et al. Enclaves microgranulares do Maciço de Piquiri - RS. **Acta Geológica Leopoldensia**, v. 29, p. 185-206, 1989.

ZHANG, L.; EINSTEIN H. H., Estimating the intensity of rock discontinuities, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 37, p. 819-837, 2000.

WEISS, M. Techniques for estimating fracture size: A comparison of methods, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 45, p. 460-466, 2008

WU, H.; POLLARD, D.D. An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness, **Journal of Structural Geology**, v. 17, p. 887-905, 1995.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

ANG, A.H-S.; TANG, W.H. **Probability Concepts in Engineering Planning and Design**. New York: John Wiley, 1975.

BAECHER, G.B. Progressively censored sampling of rock joint traces. **Mathematical Geology**, v. 12, p. 33-40, 1980.

BAECHER, G.B.; LANNEY, N.A. Trace length biases in joint surveys. In: PROCEEDINGS OF THE 19th US SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, 19., 1978, Lake Tahoe. **Proceedings**… Lake Tahoe, Nevada: Mackay School of Mines, 1978. p. 56-65.

BARTON, N.; QUADROS E. F. de. Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 34, 1997.

BECKER, A., GROSS, M.R. Mechanism for joint saturation in mechanically layered rocks: an example from southern Israel. **Tectonophysics**, n. 257, 223-237, 1996

BILLAUX, D., CHILES, J. P., HESTIR, K., LONG, J. Three dimensional statistical modelling of a fractured rock mass: An example from the Fanay-Augeres mine. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts**, v. 26, p. 281-299, 1989.

BORGES, P. et al. Contribuição do sensoriamento remoto na delimitação e mapeamento geológico do Cerro Chato, SW do Escudo Sul-Rio-Grandense. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais**… Florianópolis: INPE, 2007, p. 1975-1978.

BOUR, O. et al. A statistical model for fracture network geometry, with validation on a multiscale mapping of joint network (Hornelen Basin, Norway), **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. ETG4-1-ETG4-12, 2002.

CALL, R. D.; SAVELY, J. P.; NICHOLAS, D. E. Estimation of joint set characteristics from surface mapping data. In: Hustrulid, W. A. (ed.). **Monograph on Rock Mechanics Applications in Mining**. New York: AIME, 1976. p. 65-73.

CROW, I. L.; SHIMIZU, K. **Statistics**: Textbooks and monographs. New York: Marcel Dekker, 1988. Vol. 88

CRUDEN, D. M. Describing the size of discontinuities, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences Geomechanical Abstracts**, v. 14, p. 133-137, 1977.

DARCEL, C.; BOUR, O.; DAVY, P. Stereological analysis of fractal fracture networks, **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 1-14, 2003.

DAVIS, G.H.; REYNOLDS, S.J. **Structural Geology of Rocks and Regions**. New: York John Wiley, 1996. p. 724-726.

DAVY, P. On the frequency-length distribution of the San Andreas fault system, **Journal of Geophysical Research**, v. 98, p. 12,141–12,151, 1993.

DE ROO, J. A. The Elura Ag-Pb-Zn Mine in Australia: Ore genesis in a slate belt by synodeformational metasomatism along hydrothermal fault conduits. **Economic Geology**, v. 84, p. 256-278, 1989.

DERSHOWITZ, W.S.; EINSTEIN, H.H. Characterizing rock joint geometry with joint system models, **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 21, p. 21-51, 1988.

EINSTEIN, H. H.; BAECHER, G. B., Probabilistic and statistical methods in engineering geology, **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 16, p. 39-72, 1983.

FELLER, W. **An Introduction to Probability Theory and its Applications**. 2nd ed. New York: Wiley, 1971.

FLORISBAL, L. M. et al. Geoquímica das Rochas Máficas Toleíticas da Suíte Pós-Colisional Paulo Lopes, Neoproterozóico do Sul do Brasil. **Pesquisas em Geociências,** Porto Alegre, v. 32, n. 2, p. 69-79, 2005.

FOUCHÉ, O.; DIEBOLT, J. Describing the geometry of 3-D fracture systems by correcting for linear sampling bias, **Mathematical Geology**, v. 36, p. 33-63, 2004.

GUERRIERO, V. et al. Improved statistical multiscale analysis of fractured reservoir analogues, **Tectonophysics**, v. 504, p. 14-24, 2011.

HUDSON, J. A.; PRIEST, S. D. Discontinuity frequency in rock masses, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts**, v. 20, p. 73-89, 1983.

JACKSON, C. P.; HOCH, A. R.; TODMAN, S. Self-consistency of heterogeneous continuum porous medium representation of fractured medium, **Water Resources Research**, v. 36, p. 189-202, 2000.

JING, L.; STEPHANSSON, O. The basics of fracture system characterization: Field mapping and stochastic simulations: **Developments in Geotechnical Engineering**, v. 85, p. 147-177, 2007.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining Geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 600p.

KENDALL, M. G.; MORAN, P. A. P. Geometrical probability, **Griffin's Statistical Monographs and Courses**, v. 10, p. 86-89, 1963.

_____; STUART, A. **The advanced theory of statistics**. New York: Hafner, 1973.

KLEIN, S. L. et al. Índice Alternativo de Densidade de Fraturas para o Planejamento de Pedreiras de Rochas Ornamentais. In: VII Congresso Brasileiro de Mina a Céu Aberto & VII Congresso Brasileiro de Mina Subterrânea e Workshop Economia Mineral: Recursos e Reservas, 7. 2012, Belo Horizonte. **Anais eletrônicos**…Disponível em: <http://www.cbmina.org.br/media/palestra_7/T42.pdf>. Acessado em: 13 outubro 2012.

KULATILAKE, P.H.S.W.; WU, T.H. The density of discontinuity traces in sampling windows. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts**, n. 21, 345-347. 1984a.

_____; _____. Estimation of mean trace length of discontinuities. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, n. 17, 215-232. 1984b.

KUBACKOVA, L. Derivation of parent population statistics from trace length measurements of fractal populations, **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 39, p. 381-388, 2002.

_____; KUBACEK, L., KUKUBA, J. **Probability and statistics in geodesy and geophysics**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

_____; HUDSON, J. A. Characterization and interpretation of rock mass joint patterns: **Geological Society of America Special Paper**, v. 199, p. 37, 1985.

LASLETT, G.M. Censoring and edge effects in areal and line transect sampling of rock joint traces. **Mathematical Geology**, v. 14, n.2, p. 125-139, 1982.

LAUBACH, S. E. Practical approaches to identifying sealed and open fractures, **AAPG Bulletin**, v. 87, n. 4, p. 561-579, 2003.

LAUBACH, S. E.; OLSON, J. E.; GROSS, M. R. Mechanical and fracture stratigraphy, **AAPG Bulletin**, v. 93, p. 1413-1426, 2009.

MAULDON, M. Intersection probabilities of impersistent joints. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanical Abstracts**, v. 31, p. 107-115, 1994.

_____; Estimating mean fracture trace length and density from observations in convex windows: **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 31, p. 201-216, 1998.

_____; DUNNE, W.M.; ROHRBAUGH JR., M. B. Circular scanlines and circular windows: new tools for characterizing the geometry of fracture traces, **Journal of Structural Geology**, v. 23, p. 247-258, 2001.

_____; MAULDON, J.G. Fracture sampling on a cylinder: from scanlines to boreholes and tunnels. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 30, p. 129-144, 1997.

NELSON, R. A. **Geologic analysis of naturally fractured reservoirs**. Houston: Gulf Professional Publishing, 2001. 332 p.

NEUMAN, S. P. Trends, prospects and challenges in quantifying flow and transport through fractured rocks, **Hydrogeology Journal**, v. 13, p. 124-147, 2005.

_____. Multiscale relationship between fracture length, aperture, density and permeability: **Geophysical Research Letters**, v. 35, p. 1-6. 2008

OLSON, J. E. Sublinear scaling of fracture aperture versus length: An exception or the rule?, **Journal of Geophysical Research (American Geophysical Union),** v. 108, n. B9, p. 2413, 2003.

_____; SCHULTZ, R. A. Comment on “A note on the scaling relations for opening mode fractures in rock” by C.H. Schultz: **Journal of Structural Geology**, v. 33, p. 1523-1524, 2011.

ORTEGA, O. J.; MARRETT, R. A.; LAUBACH, S. E. A scale-independent approach to fracture intensity and average spacing measurement, **AAPG Bulletin**, v. 90, p. 193-208, 2006.

ODA, M. Modern developments in rock structure characterization. In: Hudson, J.A. (Ed.), **Comprehensive Rock Engineering**. New York: Pergamon Press, 1993. v. 1, p. 185-200.

PICKERING, G. Determination of discontinuity size distributions from scanline data, **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 37, p. 347-368, 2004.

_____. BULL, J. M.; SANDERSON, D. J. Sampling power-law distributions, **Tectonophysics**, v. 248, p. 1-20, 1995.

POLLARD, D.D; AYDIN, A. Progress in understanding jointing over the past century. **Geological Society of America Bulletin**, v. 100, p. 1181-1204, 1988.

RENSHAW, C. E.; DADAKIS, J. S.; BROWN, S. R. Measuring fracture apertures: A comparison of methods, **Geophysical Research Letters**, v. 27, p. 289-292, 2000.

_____; POLLARD, D. Numerical simulation of fracture set formation: a fracture mechanics model consistent with experimental observations. **Journal of Geophysical Research**, v. 99. N. 9, p. 9359-9372, 1994.

ROHRBAUGH, M. B. JR.; DUNNE, W.M.; MAULDON, M. Estimating fracture trace intensity, density and mean length using circular scan lines and windows, **AAPG Bulletin**, v. 86, n.12, p. 2089-2104, 2002.

ROY, A. et al. Fractal characterization of fracture networks: An improved box-counting technique, **Journal of Geophysical Research**, v. 112, 9 p., 2007.

SCHOLZ, C. H. A note on the scaling relations for opening mode fractures in rock, **Journal of Structural Geology**, v. 32, p. 1485-1487, 2010.

STOYAN, D.; KENDALL, W.S.; MECKE, J. **Stochastic Geometry and its Applications**, 2nd ed. New York: John Wiley, 1995.

TÓTH, T. M. Determination of geometric parameters of fracture networks using 1-D data, **Journal of Structural Geology**, v. 32, p. 1271-1278, 2010.

_____; VASS, I. Relationship between the geometric parameters of rock fractures, the size of percolation clusters and REV, **Mathematical Geosciences**, v. 43, p. 75-97, 2011.

TOUBLANC, A. et al. Ekofisk field: Fracture permeability evaluation and implementation in the flow model, **Petroleum Geoscience**, v. 11, p. 321–330, 2005.

VILLAESCUSA, E.; BROWN, E.T. Maximum Likelihood estimation of joint size from trace length measurements. **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 25, p. 67-87, 1992.

WARBURTON, P.M. A stereological interpretation of joint trace data. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, v. 17, 181-190, 1980a

_____. Stereological interpretation of joint trace data: influences of joint shape and implications for geological surveys. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts**, v.17, p. 305-316. 1980b.

WEIBEL, E. R. **Stereological methods**. London: Academic Press, 1980.

ZHANG, L.; EINSTEIN H. H. Estimating the mean trace length of rock discontinuities, **Rock Mechanics and Rock Engineering**, v. 31, n. 4, p. 217-235, 1998.

ZEEB, C., D. et al. Fracture flow modelling based on satellite images of the Wajid sandstone, Saudi Arabia: **Hydrogeology Journal**, v. 18, p. 1699-1712, 2010.