

**QUALIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DA  
BARRAGEM DO  
CASTANHÃO-CE, UTILIZANDO A ANÁLISE  
VARIOGRÁFICA DO RQD, RECUPERAÇÃO E  
ENSAIO DE PERDA DE ÁGUA**

---

---

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAIBA**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA - CAMPUS II**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA DE MINAS**

**EDSON NEVES DOS SANTOS**

---

**QUALIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DA BARRAGEM DO  
CASTANHÃO-CE UTILIZANDO A ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO RQD,  
RECUPERAÇÃO E ENSAIO DE PERDA DE ÁGUA**

**CAMPINA GRANDE - PB**

**1999**

---

**EDSON NEVES DOS SANTOS**

**QUALIFICAÇÃO DO MACIÇO ROCHOSO DA BARRAGEM DO CASTANHÃO -  
CE, UTILIZANDO A ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO RQD, RECUPERAÇÃO E  
ENSAIO DE PERDA DE ÁGUA.**

*Dissertação de Mestrado apresentada a  
Coordenação do curso de Pós-Graduação  
em Engenharia de Minas,  
Universidade Federal da Paraíba,  
como parte das exigências para obtenção  
do Grau de Mestre*

Área de Concentração: **GEOLOGIA DE MINAS**

Orientador : **TUMKUR RAJARAO GOPINATH**

Campina Grande / PB  
1999



S237q Santos, Edson Neves dos.  
Qualificação do maciço rochoso da barragem do Castanhão - CE, utilizando a análise variográfica do RQD, recuperação e ensaio de perda de água / Edson Neves dos Santos. - Campina Grande, 1999.  
104 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas) - Universidade Federal da Paraíba, Centro de Ciências e Tecnologia, 1999.  
"Orientação : Prof. Dr. Tumkur Rajarao Gopinath".  
Referências.

1. Maciço Rochoso - Barragem do Castanhão (CE). 2. Análise Variográfica - RQD. 3. Perda de Água - Recuperação e Ensaio. 4. Dissertação - Engenharia de Minas. I. Gopinath, Tumkur Rajarao. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina Grande (PB). III. Título

CDU 622.033(813.1)(043)



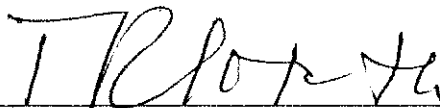
**PARECER DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
DO ALUNO EDSON NEVES DOS SANTOS**

**TÍTULO:** "Qualificação do Maciço Rochoso da Barragem do Castanhão-CE, utilizando a análise variográfica do RQD, Recuperação e Ensaio de Perda d'água"

Aprovado em 16/12/1999

COMISSÃO EXAMINADORA:

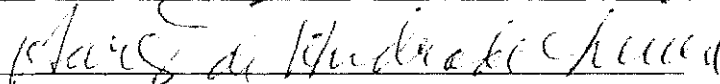
Dr. Tumkur Rajarao Gopinath



Dr. Nick Barton



Dr. Aarão de Andrade Lima



Campina Grande, dezembro de 1999

## DEDICATÓRIA

Esta tese é dedicada a DEUS o supremo criador do universo, a minha mãe Elvira Neves dos Santos ( in memorian ), e a minha esposa Adriana Paula Dutra de Menezes Santos.

## AGRADECIMENTOS

A DEUS, por me conceder a sabedoria, o bom senso e a força necessária para suplantar todas as dificuldades encontradas.

Ao meu orientador, Professor Tumkur Rajarao Gopinath, Ph.D., pela sabedoria, simplicidade, dedicação e objetividade de suas orientações que foram de primordial importância no desenvolvimento desta dissertação.

Ao Departamento de Mineração e Geologia, nas pessoas do coordenador de mestrado, Professor Tumkur Rajarao Gopinath, do Chefe do departamento, Professor Aarão de Andrade Lima, do Vice-chefe do departamento, Professor João Ramos e as secretária pela maneira sempre prestativa e cordial que nos atenderam.

A CAPES, pelo incentivo concedido através da concessão da bolsa de estudo e auxílio à pesquisa, sem qual não teria conseguido alcançar o objetivo final.

A GEONORTE, na pessoa de seu Gerente Comercial Eng. Marcos Aurélio que nos forneceu as informações e dados preliminares para o desenvolvimentos de nossa dissertação.

Ao Geólogo Sérgio, pelas suas informações e experiência vividas trabalhando com fundação de barragens e especificamente com a barragem do Castanhão.

Aos colegas do curso de Engenharia de Minas, que direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação.

Ao Prof. Tumkur Rajarao Gopinath, Prof. Aarão de Andrade Lima e o Prof. Nick Barton, por aceitarem o convite formulado com o objetivo de compor a banca examinadora quando da apresentação desta dissertação, como também pela valiosa contribuição para o enriquecimento e aprimoramento final deste trabalho.

Por fim, quero também agradecer aquelas pessoas, que de uma forma direta ou indireta, participaram deste trabalho e que não tiveram seus nomes mencionados, nosso sincero agradecimento e que Deus na sua suprema bondade recompense a todos.

## RESUMO

SANTOS, Edson Neves Dos. Qualificação do Maciço Rochoso da Barragem do Castanhão-Ce, Utilizando a Análise Variográfica da Recuperação, RQD e Ensaio de Perda D'água. Campina Grande - PB, 1999. 102 p. (Dissertação) Mestrado em Engenharia de Minas. Universidade Federal da Paraíba.

O maciço rochoso onde será assente a barragem do castanhão, é um composto de rochas metamórficas pré-cambrianas entrecortadas por intrusões ígneas. Esta formação de rochas é representado por três unidades básicas individualizadas a saber: complexo gnáissico-migmatítico, grupo ceará e cobertura coluvioeluviais. Com o objetivo de analisar e qualificar este complexo rochoso através dos dados amostrais colhidos da Recuperação, RQD e Ensaio de perda d'água, foram utilizadas as técnicas de geoestatística com suas ferramentas. O modelamento de variogramas foram feitos considerando os valores encontrados através da sondagem rotativa para as respectivas variáveis. O estudo variográfico revelou a presença de estrutura com alcances variando de 35m ( recuperação ), 60 m ( rqd) e 170 m ( ensaio de perda d'água ). Na validação cruzada dos dados observou-se que a média estimada ficou muito próxima a média amostral, isto para todas as variáveis analisadas, entretanto a diferença entre as variâncias observadas e estimadas atingiu um valor significativo para todas as variáveis analisadas. É importante observar na análise variográfica no que diz respeito a homogeneidade do maciço rochoso, que foram analisadas várias direções e ângulos de tolerâncias, no entanto o comportamento variográfico permaneceu inalterado. Este fenômeno só é alterado quando da mudança das distâncias entre pares de amostras, isto nos fornece subsídios para considerar a área em estudo

como portadora de fenômeno regionalizado isotrópico, em outras palavras significa dizer que a variável em estudo não depende da direção.

É importante fazer uma observação principalmente com relação variável ensaio de perda d'água ( vazão ). Nesta análise se trabalhou com todos os dados amostrais colhidos em campo, no entanto é possível observar que existem em alguns trechos de furos onde a absorção foi extremamente alta, ou seja, aconteceu absorção com vazão total da bomba, isto implica dizer que estes valores puxaram para cima a média amostral, no entanto isto só é observado em alguns furos, ou mais precisamente em alguns trechos de furos. Não se conseguiu um variograma que mostrasse uma estrutura bem definida desta variável (perda d'água), isto porque não é uma variável que reflete completamente um fenômeno natural e cujos valores poderão ser influenciados por erros experimentais.

## ABSTRACT

SANTOS, Edson Neves dos. Qualificação do Maciço Rochoso da Barragem do Castanhão-Ce, Utilizando a Análise Variográfica da Recuperação, RQD e Ensaio de Perda D'água. Campina Grande - PB, 1999. 102 p. ( Dissertação ) Mestrado em Engenharia de Minas. Universidade federal da Paraíba.

The rock massif on which the Castanhão dam is being built is composed of Precambrian metamorphics and intrusive rocks. This formation is represented by three stratigraphic units and they are gneissic-migmatitic complex, Ceará Group and quaternary sediments.

Geostatistical techniques were utilized to analyze and characterize this rocky complex from the data obtained from the samples such as recovery, RQD, and water loss tests. Variogram modeling of these three variables was carried out considering the values determined through the rotating drill holes. Variographic analysis showed the presence of a good structure with sample range varying from 35 m for recovery, 60 m for RQD and 170 m for water loss. In the cross validation of the data it was observed that the estimated mean is very close to sample mean for all three variables, but the difference between the observed and estimated variances remained very high. It is worthy to making some observations regarding the variographic analysis and the homogeneity of the rock massif, in other words the variograms were elaborated for different directions and angle of tolerances without any significant changes in the variogram structure. The variogram structure tend to change when the sample pair distances was varied. This lead to the conclusion that the rock massif is isotropic when these variables are considered or the behavior of the variables do not depend on the direction in the study area.

An important point is worth noting about the water loss test or the variable "vazão". In this work all the data collected were used in the analysis and in some places, in some bore holes, water absorption was very high. This resulted in the average water loss apparently very high, when in reality it is not so. The variogram of this variable did not show a very good structure compared to other two variables for the reason that the water loss in the rock is not purely a natural phenomenon. It is possible that a considerable amount of error can be introduced during this test resulting in unrealistic data



## SUMÁRIO

	Página
DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTO.....	ii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	2
1.1 - Geologia e Localização Regional.....	5
1.2 - Objetivos.....	9
1.3 - Justificativa.....	10
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	12
3. LOCALIZAÇÃO E PLANEJAMENTO DA MALHA DE FURAÇÃO.....	16
3.1 - Área de Sondagem.....	16
3.2 - Amostragem.....	19
3.3 - Sondagem Percussiva.....	20
3.4 - Sondagem Mista.....	26
3.5 - Ensaio de Perda d'água.....	26
3.6 - Demonstrativo dos Intervalos Amostrados.....	28
4. MODELAMENTO DOS VARIOGRAMAS.....	40
4.1 - Generalidades.....	40
4.2 - Modelamento dos Variogramas das Variáveis em Estudo.....	45

5. SIGNIFICADOS DAS VARIÁVEIS.....	47
5.1 - Recuperação.....	47
5.2 - RQD.....	48
5.3 - Ensaio de Perda d'água.....	50
6. ANÁLISE VARIOGRÁFICA DAS VARIÁVEIS.....	51
6.1 - Variável Recuperação.....	51
6.2 - Variável RQD.....	63
6.3 - Variável Ensaio de Perda d'água.....	75
7. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	86
7.1 - Recuperação.....	86
7.2 - RQD.....	87
7.3 - Ensaio de Perda d'água.....	89
8. CONCLUSÕES.....	91
9. BIBLIOGRAFIA.....	94
10. ANEXOS.....	98
10.1 - Resultados da Variável Recuperação.....	99
10.2 - Resultados da Variável RQD.....	100
10.3 - Resultados da Variável Ensaio de Perda d'água.....	101
10.4 - Conceitos Básicos usados na dissertação.....	102
10.5 - Equipamento Básico para Ensaio de Perda d'água.....	104

## FIGURAS

	Página
FIGURA 01 - Mapa de localização da barragem do castanhão.....	7
FIGURA 02 - Mapa Geológico da área.....	8
FIGURA 03 - Locação dos furos de sondagens.....	17
FIGURA 04 - Locação Geográfica dos testemunhos.....	18
FIGURA 05 - Furo de sondagem SM1.....	28
FIGURA 06 - Furo de sondagem SM2.....	29
FIGURA 07 - Furo de sondagem SM3.....	30
FIGURA 08 - Furo de sondagem SM5.....	31
FIGURA 09 - Furo de sondagem SM6.....	32
FIGURA 10 - Furo de sondagem SM6A.....	33
FIGURA 11 - Furo de sondagem SM7.....	34
FIGURA 12 - Furo de sondagem SM8.....	35

FIGURA.13 - Furo de sondagem SM9.....	36
FIGURA 14 - Furo de sondagem SM18.....	37
FIGURA 15 - Furo de sondagem SM20A.....	38
FIGURA 16 - Furo de sondagem SM21.....	39
FIGURA 17 - Modelo transicional.....	44
FIGURA 18 - Histograma de frequência simples - Recuperação ( V1 ).....	52
FIGURA 19 - Curva de probabilidade normal - Recuperação ( V1 ).....	53
FIGURA 20 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 13,00 m - Variável Recuperação ( V1 ).....	59
FIGURA 21 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 27,32 m - Variável Recuperação ( V1 ).....	60
FIGURA 22 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 30,00 m - Variável Recuperação ( V1 ).....	61
FIGURA 23 - Variograma teórico - Variável Recuperação ( V1 ).....	62
FIGURA 24 - Histograma de frequência simples - Variável RQD ( V2 ).....	65
FIGURA 25 - Curva de probabilidade normal - Variável RQD ( V2 ).....	66
FIGURA 26 - Variograma de amostras com distância entre pares de 19,65 m - Variável RQD ( V2 ).....	72

FIGURA 27 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 28,50 m - Variável RQD ( V2 ).....	73
FIGURA 28 - Variograma teórico - Variável RQD ( V2 ).....	74
FIGURA 29 - Histograma de frequência simples - Variável vazão ( V3 ).....	76
FIGURA 30 - Curva de probabilidade normal - Variável vazão ( V3 ).....	77
FIGURA 31 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 13,00 m - Variável Vazão ( V3 ).....	82
FIGURA 32 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 43,90 m - Variável Vazão ( V3 ).....	83
FIGURA 33 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 45,00 m - Variável Vazão ( V3 ).....	84
FIGURA 34 - Variograma teórico - Variável Vazão ( V3 ).....	85
FIGURA 35 - Esquema de montagem para ensaio de perda d'água.....	104

## LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 01 - Variáveis com suas respectivas localizações tab 1.....	21
TABELA 02 - Variáveis com suas respectivas localizações tab 2.....	22
TABELA 03 - Variáveis com suas respectivas localizações tab 3.....	23
TABELA 04 - Variáveis com suas respectivas localizações tab 4	24
TABELA 05 - Variáveis com suas respectivas localizações tab 5.....	25
TABELA 06 - Relação entre o RQD e a qualidade da rocha.....	49
TABELA 07 - Parâmetros da estatística básica - Recuperação.....	54
TABELA 08 - Parâmetros de variograma - Dir.00 <sup>0</sup> - Recuperação.....	55
TABELA 09 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados - Dir. 00 <sup>0</sup> - Recuperação.....	55
TABELA 10 - Parâmetros de variograma - Dir.45 <sup>0</sup> - Recuperação.....	56
TABELA 11 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados - Dir. 45 <sup>0</sup> - Recuperação.....	56
TABELA 12 - Parâmetros de variograma - Dir. 90 <sup>0</sup> - Recuperação.....	57

TABELA 13 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados - Dir. 90 <sup>0</sup> - Recuperação.....	57
TABELA 14 - Parâmetros da estatística básica - RQD.....	64
TABELA 15 - Parâmetros de variograma - Dir. 00 <sup>0</sup> - RQD.....	68
TABELA 16 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados - Dir. 00 <sup>0</sup> - RQD.....	68
TABELA 17 - Parâmetros de variograma - Dir. 90 <sup>0</sup> - RQD.....	69
TABELA 18 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados - Dir. 90 <sup>0</sup> - RQD.....	69
TABELA 19 - Parâmetros de variograma - Dir. 45 <sup>0</sup> - RQD.....	70
TABELA 20 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados - Dir. 45 <sup>0</sup> - RQD.....	70
TABELA 21 - Parâmetros da estatística básica - Vazão.....	78
TABELA 22 - Parâmetros de variograma - Dir. 00 <sup>0</sup> - Vazão.....	79
TABELA 23 - Parâmetros estatístico da validação dos dados - Dir. 00 <sup>0</sup> - Vazão.....	79
TABELA 24 - Parâmetros de variograma - Dir. 90 <sup>0</sup> - Vazão.....	80
TABELA 25 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados - Dir. 90 <sup>0</sup> - Vazão.....	80
TABELA 26 - Resultados da variável Recuperação.....	99

TABELA 27 - Resultados da variável RQD.....	100
TABELA 28 - Resultados da variável Vazão.....	101



## 1. INTRODUÇÃO

As preocupações com a exiguidade dos recursos hídricos foram despertadas no Brasil, no tempo do Império, quando D. João VI determinou que se estudasse a possibilidade da transposição das águas do rio São Francisco para bacias carentes situadas ao norte de seu curso. Porém, somente após o advento da República, em 1909, com a criação da IOCS - Inspetoria de Obras Contra as Secas, foram iniciados os estudos sobre o Nordeste semi-árido, caracterizado por repetidos e prolongados períodos de estiagem, além de ser acometido, ciclicamente devido ao regime hidrológico crítico dos seus rios, de caráter torrencial e interminente, que dependem das precipitações pluviométricas irregulares - por grande cheias de resultados desastrosos para as comunidades situadas às margens desses cursos d'água.

A história da açudagem no Nordeste está ligada diretamente às ações da "Inspetoria", sucedida pelo DNOCS. Na área mais crítica do semi-árido, identificada como aquela delimitada pela isoieta de 600mm, o DNOCS construiu 303 açudes públicos, dos quais 76 no Estado do Ceará, que acumulam cerca de 2,3 bilhões de metros cúbicos d'água.

O Rio Jaguaribe, o principal rio cearense, que tem o seu curso integralmente inserido no estado, é um rio intermitente, com grande variabilidade dos deflúvios, escoando, apenas, no período das chuvas, ou seja, 3 a 4 meses por ano. Em 1980, o Jaguaribe foi perenizado, após a instalação de uma válvula dispersora no Açude Orós, atualmente o maior reservatório construído no Ceará (capacidade igual a 2,1 bilhões de metros cúbicos d'água).

A Bacia Hidrográfica do Rio Jaguaribe domina a metade do território cearense, com área de 72.000 km<sup>2</sup>, e seus recursos hídricos se constituem a maior fonte de desenvolvimento econômico e social do Vale. A gestão racional destes recursos será determinante para minorar os efeitos dos longos períodos de

aridez que, periodicamente se estabelecem e inibem o desenvolvimento dos meios de produção, contribuindo, conseqüentemente, para o agravamento do quadro de miséria a que está submetido o rurícola jaguaribano.

Por outro lado, é no Baixo Vale, onde se concentram 90% das terras irrigáveis da bacia, e onde enchentes periódicas atingem milhares de pessoas, acentuando ainda mais os prejuízos econômicos e traumas sociais.

É neste contexto que se insere o Projeto Açude Públicos Castanhão, com seu aproveitamento contribuindo para o desenvolvimento sustentável da região. Os primeiros estudos topográficos e geológicos sobre a Barragem do Castanhão datam de 1910, quando o engenheiro americano Roderic Crandall, contratado pela antigo IOCS, se instalou numa caverna na região denominada "Boqueirão do Cunha", com o objetivo de escolher o melhor local para a construção de um açude. A barragem teve a sua execução postergada durante anos, vindo os seus estudos a serem retomados pelo extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento - DNOS, em setembro de 1987, quando foi contratado o Consórcio Hidroservice/Noronha, para elaboração dos estudos básicos, anteprojeto, projeto básico e projeto executivo. Embora, inicialmente, houvesse previsão de recursos para a obra, no orçamento, os órgãos de defesa do meio ambiente impediram o início dos trabalhos.

As diversas controvérsias e discussões sobre o Açude Castanhão tiveram início quando da elaboração de seu projeto básico. Mesmo tendo sido analisado tecnicamente no plano estadual de recursos hídricos, elaborado pelo governo do Ceará, a longa polêmica girou em torno da implantação de um reservatório que introduzirá modificações no meio ambiente como resultante das alterações dos meios físicos, biótico, social econômico e cultural das áreas afetadas, modificações estas que apresentam aspectos positivos e negativos, evidenciados por um balanço positivo dos saldos ambientais nos inúmeros grandes reservatórios já construídos no Nordeste, pelo DNOCS.

O projeto executivo, elaborado pelo Consórcio Hidroservice/Noronha, é relativamente simples e consta das seguintes estruturas básicas:

- Uma Barragem de Terra Homogênea, com trecho em enrocamento, altura máxima de 60,00m, acima da fundação e comprimento total de 7,8km, incluindo os 9 ( nove ) diques de fechamento das selas topográficas. O maciço principal terá comprimento de 3,45km na cota 111,00 e cujo volume de aterro compactado será de 7.728.800m<sup>3</sup>. O reservatório formado abrangerá uma área de 325 km<sup>2</sup> e terá comprimento máximo de 48km, quando atingir o nível máximo normal (cota 100,00 ). Nesta cota o volume útil será de 4,2 bilhões de m<sup>3</sup> d'água. Para a cheia decamilenar o volume a ser atingido é de 6,7 bilhões de m<sup>3</sup> d'água ( cota 106,00 )
- Uma tomada d'água tipo torre-galeria, que funcionará como desvio durante a construção, com comprimento de 178m e altura de 64,5m. A galeria envelopada de concreto será constituída de duas tubulações de aço de 3,70m com redução para 2,50m de diâmetro. Serão instalada quatro válvulas dispersoras de 1.500mm de diâmetro
- Um vertedouro em concreto, terminando em salto esquí, com extensão de 153,00m na cota 95,00 e contendo 12 ( doze ) comportas de segmento acionadas através de cilindros hidráulicos.
- Um dique fusível de 750m de comprimento e altura máxima de 5,00m
- Uma Usina Hidrelétrica de 22,5Mw de potência instalada.

## 1.1 GEOLOGIA E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

A Barragem do Castanhão e o seu reservatório situam-se no Estado do Ceará, abrangendo os municípios de Alto Santo, Jaguaretama, Jaguaribara e Jaguaribe. O eixo do maciço principal está sendo construído no leito do rio Jaguaribe, aproximadamente a 5,7km Sudoeste do povoado de Castanhão, na região denominada Boqueirão da Cunha, município de Alto Santo. O acesso à obra é feito por estrada pavimentada ( BR - 116 ), distante 253km de Fortaleza (Figura. 01)

A geologia regional é composta por rochas metamórficas precambrianas entrecortadas por intrusões ígneas de rochas básicas e ácidas. Esta associação de rochas é representada por unidades individualizadas, a saber:

- COMPLEXO GNÁISSICO - MIGMATÍTICO ( Complexo nordestino ) (Pci).

Este complexo representa áreas essencialmente gnáissicas e magmáticas, com núcleos de gnaisses ortoderivados e outros gnaisses derivados, e intercalados de anfibólitos, xistos, quartzitos e corpos ultrabásicos. Esta unidade é a de maior extensão superficial, que juntamente com outras áreas pré-cambrianas, encontra-se posicionada como substrato das sequências supracrustais.

- GRUPO CEARÁ ( Pce ).

O posicionamento desta unidade na coluna estratigráfica, dar-se acima do Complexo Nordeste. Na maioria das regiões é difícil a identificação de um contato com as rochas subjacentes, devido aos processos de

migmatização e a atuação de uma intensa tectônica rígida. Em geral, seu contato com a unidade inferior é aparentemente concordante, marcado em sua maioria por grandes falhamentos.

Os dados geocronológicos disponíveis para esta unidade e sua posição estratigráfica em relação ao Complexo Nordestino conduzem ao seu posicionamento no Pré-Cambriano Superior.

O grupo Ceará caracteriza-se por um conjunto parametamórfico, litologicamente representado por quartzitos, filitos, gnaisses, anfibólitos, quartzitos, calcários cristalinos e calcossilicáticas.

- COBERTURA COLUVIOELUVIAIS ( TQc )

As coberturas sedimentares apresentam-se em formas de empraçamento aluvial e capeamento coluviais. Os depósitos aluviais estão restritos a calha principal dos rios e riachos e são representados por pacotes de areia fina, média e grossa, de cores variadas, incluindo cascalhos com tamanho até matacão e argila com matéria orgânica em decomposição.

Os capeamentos coluviais, são sedimentos argilosos e arenosos, de tons alaranjados onde localmente apresentam cascalhos laterizados na base. Apresentam-se em formas de pequenas mesetas com bordas dissecadas e contorno irregular. Representa entretanto, uma elevação em relação ao substrato, com espessura média em torno de 15 metros.

Estudos realizados na Barragem do Castanhão, fornecem dados suficientes e necessários para realizar interpretações sobre o comportamento do maciço rochoso, utilizando o método geoestatístico desenvolvido por Matheron em 1957 à 1962 e que constitui um critério científico e moderno de interpretação e estudo da maior parte dos fenômenos naturais. Desta forma, a teoria das variáveis regionalizadas, é também aplicada em outras áreas, fora do âmbito mineiro.

## BRASIL

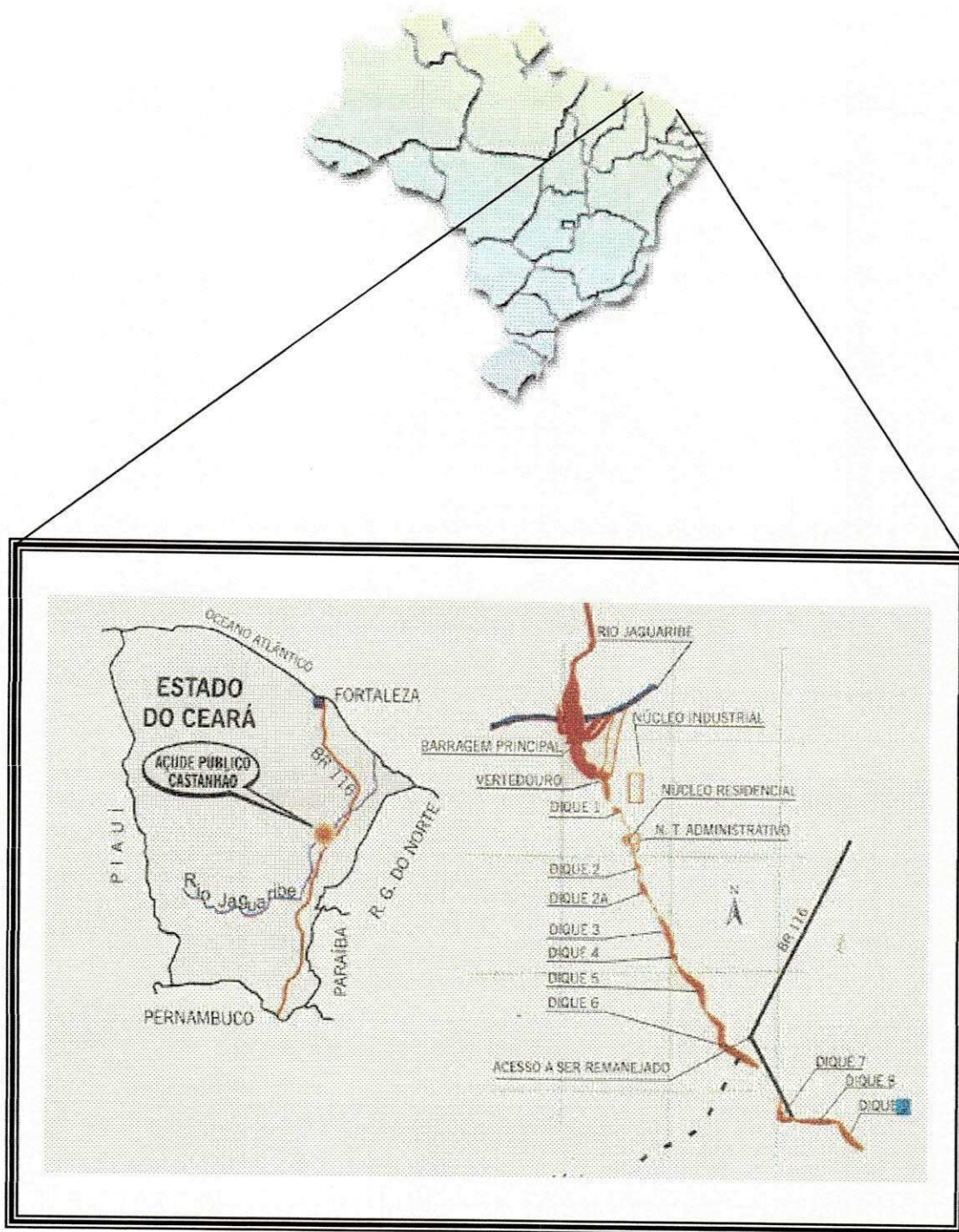
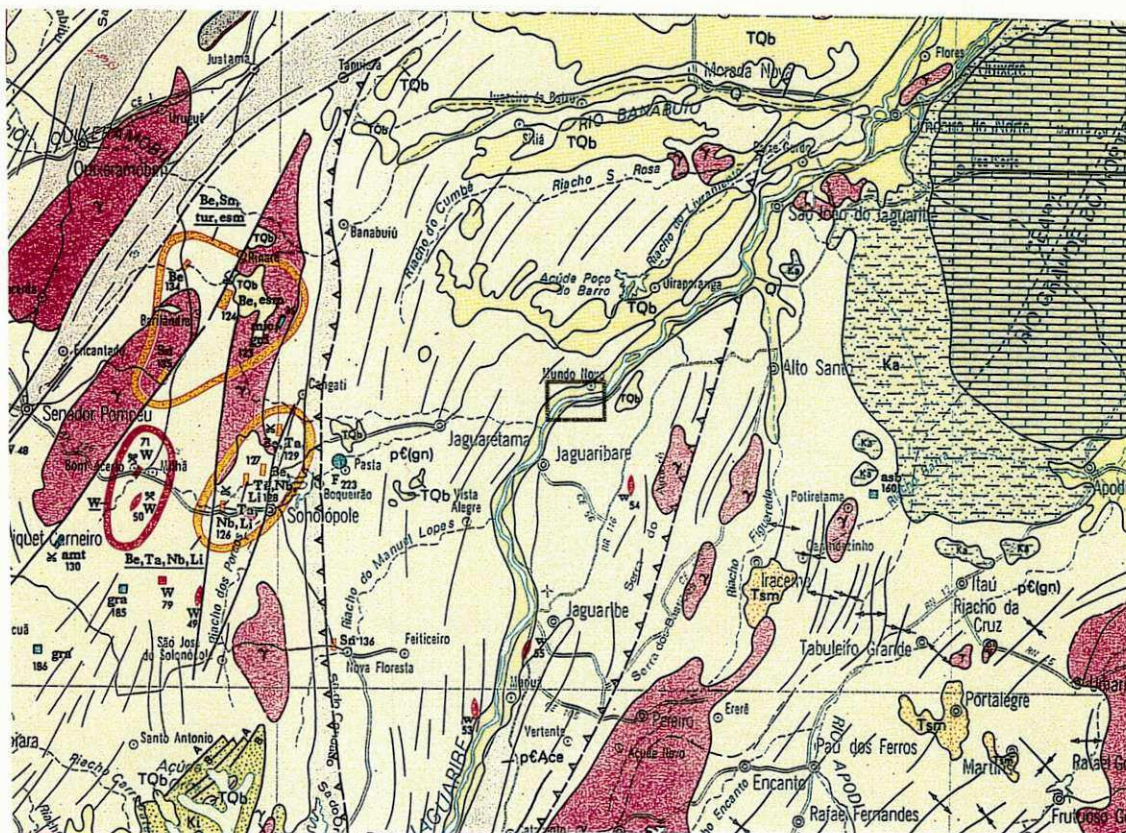


FIGURA 1 - Mapa de localização da Barragem do Castanhão












ESCALA 1 : 1.000.000

FIGURA 2 - Mapa geológico da área ( folha SB.24 - jaguaribe-1974 )

LEGENDA

- |   |   |   |                  |
|---|---|---|------------------|
|  | Aluviões, dunas e areias  |  | Área da Barragem |
|  | Formação Jandaira: Calcário e calcários margosos.                   |   |                  |
|  | Formação Açú: Arenitos, argilitos e folhelhos.                      |   |                  |
|  | $\gamma$ ( Granitos )   |   |                  |
|  | p∈Ace: Grupo Ceará ( filitos, sericitaxistos e calcário critalino ) |   |                  |
|  | TQb: Grupo Barreiras ( argilas variegadas, arenitos e cascalhos )   |   |                  |

## 1.2 OBJETIVOS

- Analisar os dados obtidos de sondagem rotativa e ensaio de perda d'água através da geoestatística.
- Pesquisar a variabilidade espacial dos dados e elaborar variogramas para definir a estrutura variográfica do maciço rochoso.
- Caracterizar o maciço rochoso com os dados geoestatísticos, com o objetivos de servir como parâmetro de comparação em relação a outros resultados obtidos ou trabalhos realizados.
- Validar os dados obtidos através de krigagem



### 1.3 JUSTIFICATIVA

- Um dos pontos principais considerados quando da proposta deste trabalho, diz respeito principalmente, ao próprio conceito no qual a geoestatística está inserido, ou seja a teoria das variáveis regionalizadas, em outras palavras uma função que varia de um lugar a outro no espaço com uma aparência de continuidade, ou seja são variáveis cujos valores estão relacionados de algum modo com a posição espacial que ocupam. Diante desta caracterização, podemos afirmar que todos os dados amostrais deste trabalho estão inseridos neste conceito.
- A geoestatística, é um critério científico, moderno de interpretação e estudo da maior parte dos fenômenos naturais, se enquadrando desta forma aos parâmetros existente e observados no maciço da barragem do castanhão.
- Conseguir resultados, os quais venham servir de referencial para qualificação do maciço rochoso, e conseqüentemente auxiliar no processo de vedação do mesmo.
- A seqüência dos trabalhos de injeção de cimento através de uma cortina de impermeabilização, consiste na perfuração e lavagem dos furos, na realização de ensaios de perda d'água sob pressão e na execução da injeção

propriamente dita. De um modo geral, os projetos admitem a divisão da cortina em subtrechos com profundidade e inclinação dos furos, espaçamento entre os mesmos e números de linhas de injeção, variando em função do comportamento hidrogeotécnico das rochas. Desta forma, a ocorrência de regiões com altas permeabilidades sugerem uma cortina de furos com espaçamento reduzido e em mais de uma linha de injeção. Contudo a partir da estimativa de dados proporcionada pelo estudo geoestatístico, consegue-se suplantando parte das dificuldades de execução como também ter um posicionamento concreto com relação a previsão de uma ou mais linhas de injeção, constituída se for o caso de furos primários, secundários, terciários e se necessário furos adicionais.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A Geoestatística é uma ciência relativamente recente e sua teoria foi desenvolvida por um engenheiro francês George Matheron, entre 1957 e 1962 a partir da teoria das distribuições e pelos trabalhos empíricos de avaliação de depósitos minerais desenvolvidos por D. G. Krige ( 1954 ) na África do Sul. Refere-se a aplicação da teoria das variáveis regionalizadas na resolução de problemas de estimação com um alto grau de precisão na geologia e na mineração, utilizando algumas ferramentas básicas como o variograma e a krigagem. Os primeiros trabalhos que fundamentaram a geoestatística estão expressos em dois volumes *Traité de Geoestatistics*, por Matheron ( 1962, 1963 ). Carlier ( 1964 ), Serra ( 1967 ) e Marechal ( 1970 ) estão entre os primeiros a aplicar a geoestatística para resolver problemas referentes a mineração na comunidade acadêmica.

O primeiro livro texto publicado em Russo foi no ano de 1968 ( segundo M. David, 1977 ) e só após nove anos surgiu o primeiro livro em inglês, publicado em 1977 por M. David. Todas as técnicas de geoestatística e suas aplicações são bem detalhadas no livro de Isaaks e Srivastava ( 1989 ). A utilização da geoestatística em projetos minerais, atribuem-se a diversos autores como A. Journel e Ch. Huijbregts ( 1974 ), em uma jazida de chumbo-zinco de Salafossa, com o objetivo de demonstrar a importância do variograma como ferramenta auxiliar na caracterização de certas feições geológicas de um depósito mineral. Ajustes de modelos teóricos a variogramas experimentais em teores de óleo em areia betuminosas foi demonstrado por P. A. Dowd em 1977, caracterizados ou não pela presença de patamar e pelo comportamento na origem a partir dos dados experimentais. Os modelos escolhidos para o ajuste ficou entre o modelo esférico e o exponencial, onde a partir das propriedades teóricas dos mesmos optou-se pelo variograma esférico na confecção do variograma teórico.

A Journel e Ch. Huijbregts ( 1978 ), descreveram num estudo de anisotropia em jazidas de ferro do tipo itabirítico na Mauritânia-Libéria-Guiné ( Africa Ocidental) como a estatística elementar pode refletir a existência de populações diferentes e mostrar como o variograma pode refletir as hipóteses geológicas existentes. Clark ( 1979 ), construiu variogramas experimentais em distintas direções para a análise da anisotropia e ajuste de modelos lineares, numa jazida estratiforme de ferro. Trata-se de um problema em duas dimensões e pede-se construir variogramas em distintas direções. Em um outro exemplo, em um veio de cassiterita, Clark mostrou a importância do intervalo de amostragem na interpretação dos variogramas experimentais.

O assunto de obter medidas práticas de incerteza a partir de variância de Krigagem é amplamente discutido nos trabalhos de Crozel e David, 1985; Buxton, 1989; Dowd, 1989. A variância de Krigagem é função de configuração de amostras e o variograma, respectivamente. A única relação entre variância de Krigagem e os dados observa-se no variograma cuja natureza é mais global do que local na sua definição( Henley, 1987 ).

É conhecido de que as informações geológicas não são muito precisas devido problemas inerentes. Segundo Bardossy et al ( 1989 ) a combinação de informação geológica imprecisa com os resultados de krigagem resultam em uma estimação da reserva mais aceitável e se encaixa bem as condições geológicas observadas. O método de estimação de reservas sofrem bastante por influência de controle geológicos. No caso de ouro de origem epitermal o sistema de falhamentos e fraturas controladores de depósitos produzem redução de teor no sentido perpendicular a falha e com o teor sendo constante ao longo da falha (Champigny e Armstrong, 1989 ). Com o objetivo de achar um método de krigagem aplicável para esta situação Champigny e Armstrong analisaram quatro métodos de krigagem: (1) estimador de krigagem ordinária, (2) krigagem ordinária estimador com domínio delimitador, (3) krigagem lognormal com estimativa na direção da falha através dos modelos esféricos paralela a falha, e (4) krigagem lognormal com estimador na direção da falha através de variograma linear perpendicular a falha e modelo de variograma esférico paralelo a falha. Entre os

quatro métodos, o de krigagem ordinária e krigagem lognormal oferecem melhor estimativa de teor amostral de ouro de origem epitermal.

Os dados heteroscedásticos nos quais as amostras tendem a se agrupar preferencialmente nas áreas de teores altos, os variogramas tradicionais não são adequados para caracterizar a continuidade espacial ( Srivastava e Parker, 1989 ). No seu lugar variogramas relativos produzem resultados interpretáveis e exatos. Ainda nesses casos o variograma relativo é mais apropriado devido o cálculo de medida de dispersão e a variância obtida diretamente dos valores amostrais.

Souza ( 1990 ) mostra que o variograma é usado para descrever uma correlação espacial entre teores ( ou uma outra característica como a espessura de minério ) em um depósito mineral. Segundo Garcia ( 1988 ) o variograma é uma ferramenta matemática que permite estudar a dispersão natural das variáveis regionalizadas e que em nosso caso representa o grau de continuidade da mineralização. Segundo Nery ( 1996 ), a geoestatística é um ramo da ciência que estuda os fenômenos espaciais ou temporais com algum grau de correlação. Sendo uma ferramenta auxiliar das geociências, permite tornar a geologia mais objetiva e analítica. Ainda segundo Nery, a geoestatística oferece duas vantagens sobre os métodos convencionais, o de se obter melhor os resultados possíveis de informações a partir das amostras disponíveis e o de permitir avaliar o nível de confiança da estimativa.

Diversos fatores geológicos governam um depósito mineral e tem papel importante no cálculo e/ou estimativa de reserva. O critério de classificação de reserva mineral baseada na variância de krigagem não leva em consideração o risco envolvido na interpretação geológica de limites de jazida minerais ( Amorim e Ribeiro, 1996 ). O trabalho de Amorim e Ribeiro apresenta uma técnica simples através de krigagem indicador ("Indicator Kriging") que permite adquirir um "Risk Index" ( indicador de risco ) baseada na distribuição de amostras bem como características geométricas de jazida mineral. O indicador de risco pode ser aplicado na classificação de reserva mineira e oferece o apoio as decisões práticas para minimizar o risco envolvido na interpretação geológica errônea. A variância de krigagem como um indicador de incerteza em relação ao valor

estimado não é reconhecida amplamente. Isso porque primeiro, a variância de krigagem para blocos não é independente e não há como integrar os dois. A variância de krigagem é independente do valor que está sendo estimado. Para solucionar em parte este problema Adisoma e Hester (1996 ) elaborou uma técnica chamada "Jack-Knife Block Kriging". A técnica permite introduzir um novo estimador "Jack Knife" de krigagem e utilizando a variância de "Jack Knife" poderá ser calculada um intervalo de confiança para estimativa de teor-reserva (reserve-grade estimate). A variância de "Jack Knife" representa a verdadeira variabilidade dos dados e ainda o método define o nível de confiança para estimação global de reservas.



### **3. LOCALIZAÇÃO E PLANEJAMENTO DA MALHA DE FURAÇÃO**

O plano de sondagem, tem por objetivos: identificar o topo rochoso no leito do rio jaguaribe, para verificação de possíveis ocorrências de depressões localizadas, denominada de "Páleo Canal"; mapeamento e identificação das características de aluvião; determinar a natureza da rocha de fundação, para uma revisão nos critérios de projeto, no trecho do rio.

#### **3.1 - ÁREA DE SONDAAGEM**

Os furos de sondagens foram realizados ao longo do leito do rio jaguaribe, onde será assente o corpo do barramento, na sua maior largura, entre as estacas 95 e 120, em 5 linhas paralelas ao eixo da barragem, espaçadas em 70,00 metros, distando do mesmo 210,00 metros para montante e 140,00 metros para jusante (Fig. 03 ).

O pacote aluvionar que ocorre no leito do rio jaguaribe é composto, predominantemente por areia, com granulometria variando de fina à média, e sua porção superior apresenta-se extremamente inconsolidada, passando de pouco compacta a compacta nos trechos de maior profundidade, com espessura média de aproximadamente 6,00 metros. A profundidade do topo rochoso é bastante variável. Os furos localizados no leito do rio, apresentam profundidades variando entre 2,40 à 6,77 metros, muitas vezes em função dos diversos bancos de areia formados ao longo do rio, como também por apresentar-se ondulada, com depressões que variam de centímetros a metros ( Fig. 04 )

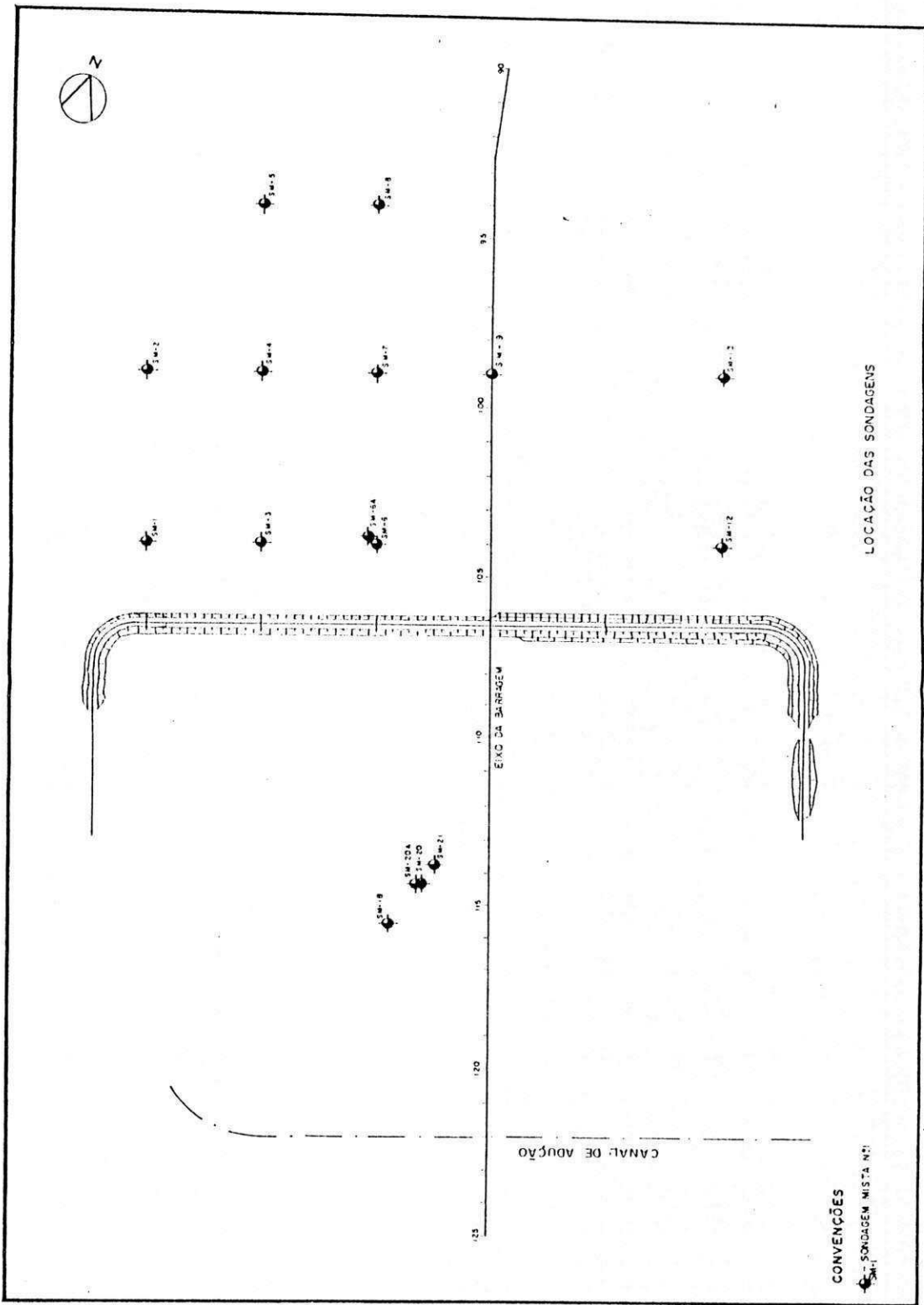


FIGURA 3 - Locação dos furos de sondagem



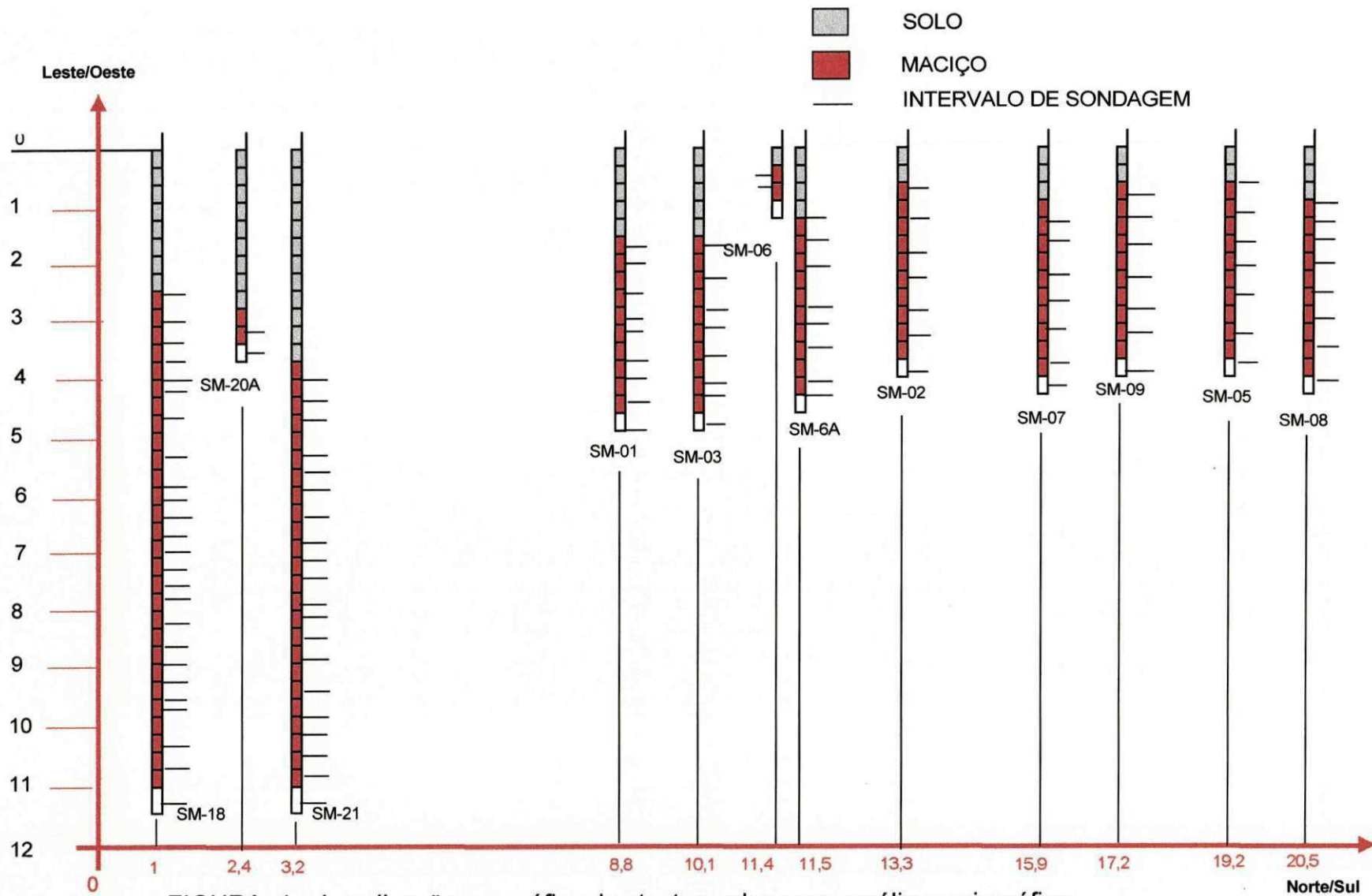


FIGURA 4 - Localização geográfica dos testemunhos para análise variográfica.  
Escala vertical 1 : 300 - Escala horizontal 1 : 2.000

Os furos executados na margem esquerda, apresentaram as menores profundidades, variando entre 0,31 m ( SM-4 ), e 0,72 m ( SPA-8 ), onde é possível observar vários afloramentos de rochas. As sondagens realizadas na região do "Paléo Canal" identificaram o topo rochoso a profundidade de 10,27 metros no furo SP-37, locado a 210 metros à montante, 30,40 metros no interior do referido canal e 20,62 metros no furo SP-55, locado a jusante, 165 metros da linha do eixo. Foi evidenciado o prolongamento do páleo canal, que sobe para montante e aprofunda-se para jusante. Os prolongamentos das linhas de montante e jusante, em direção a área do páleo canal identificaram uma camada aluvionar de maior espessura, variando de 10,22 metros à 20,62. Abaixo da camada aluvionar encontra-se uma rocha gnáissica, com recuperação de testemunhos variando de 8,75% à 100%. A mesma mostra-se bastante fraturada nos primeiros metros da superfície, passando a sã em profundidades superiores a 6,00 metros.

Foram considerados como amostras, 96 intervalos dos testemunhos recuperados dos vários furos de sondagens. Cada intervalo desses 96, foi analisado considerando as variáveis Recuperação, RQD e Ensaio de perda d'água.

### 3.2 - AMOSTRAGEM

Todos os dados utilizados neste trabalho foram conseguidos a partir dos resultados obtidos das análise de testemunho ( Tab. 1 ). Os dados referente as variáveis Recuperação e RQD estão diretamente associados pois a coleta e cálculo dos respectivos dados foram realizados sempre nos mesmos intervalos (1,0 a 1,5 m) das respectivas manobras. Ressaltar-se que por se tratar das variáveis Recuperação e RQD, o suporte primário para os dados foi sempre o

produto rochoso recuperado resultantes das manobras realizadas com a sonda rotativa. Além da coleta in loco dos testemunhos recuperados, foi feita uma descrição para classificar o testemunho com relação ao tipo de rocha, grau de alteração, consistência, e grau de fraturamento. Com relação a variável ensaio de perda d'água, todos os dados que seriam utilizados nos cálculos posteriores, foram obtidos por meio dos ensaios de perda d'água, em trechos ensaiados de 3.00 em 3.00 metros em cinco estágios de pressões e cada estágio realizavam-se cinco leitura a cada 2 minutos para se obter a absorção ocorrida.

### 3.3 - SONDAGEM A PERCUSSÃO X ENSAIO DE PENETRAÇÃO(SPT)

Iniciadas a perfuração com uso de trado concha ou espiral até o nível d'água ou material impenetrável. Nesse trecho os furos passaram a ser revestidos e prosseguidos com lavagem até ser atingido o material impenetrável.

Para extração das amostras foi utilizado o amostrador padrão e na maioria das vezes foram coletadas através da lavagem, as mesmas foram acondicionadas em sacos plásticos, catalogadas e caracterizadas em laboratório.

Durante a cravação do amostrador, o qual era cravado no terreno por meio de golpes de um martelo de 65 kg, com altura de 75 cm, foram registrados os números de golpes necessários para a penetração de cada 15 cm no terreno, até um total de 45 cm, denominado de Standard Penetration Test ( SPT ).

TABELA 1 - Variáveis observadas e estimadas com suas respectivas localizações

V1 : Recuperação - (%)

V2 : RQD - (%)

V3 : Ensaio de perda d'água - L/MIN

TRECHO ENSAIADO (M)	AMOSTRA Nº	NORTE/ SUL(M)	LESTE/ OESTE (M)	V1 (RECUPERAÇÃO) - %		V2 (RQD) - %		V3 (PERDA D'ÁGUA) - L/MIN	
				OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA
<b>FURO DE SONDAÇÃO SM - 1</b>									
5.65 A 6.45	01	176	6.45	22	92	0	40	29.6	17.5
6.45 A 7.95	02	176	7.95	100	70	81	20	29.6	15.5
7.95 A 8.95	03	176	8.95	95	76	45	30	9.8	17.4
8.95 A 9.95	04	176	9.95	95	77	20	33	9.8	12.8
9.95 A 11.15	05	176	11.15	69	83	38	27	9.8	8.4
11.15 A 12.45	06	176	12.45	75	75	13	32	0.3	7.0
12.45 A 13.75	07	176	13.75	80	84	9	34	0.3	4.3
13.75 A 14.75	08	176	14.75	99	79	21	29	0.3	3.8
<b>FURO DE SONDAÇÃO SM - 2</b>									
2.40 A 3.90	09	266	3.90	51	72	7	20	3.3	6.7
3.90 A 5.40	10	266	5.40	63	68	7	20	3.3	5.4
5.40 A 6.90	11	266	6.90	73	69	8	20	4.0	5.1
6.90 A 8.40	12	266	8.40	64	75	19	23	4.0	5.4
8.40 A 9.90	13	266	9.90	86	73	21	23	6.5	4.9
9.90 A 11.40	14	266	11.40	88	74	15	22	6.5	5.4
<b>FURO DE SONDAÇÃO SM - 3</b>									
5.43 A 6.51	15	202	6.51	99	89	92	43	17.2	18.3
6.51 A 8.01	16	202	8.01	95	94	12	60	17.2	17.5
8.01 A 9.51	17	202	9.51	90	94	68	45	21.2	15.3
9.51 A 11.01	18	202	11.01	85	94	31	50	21.2	12.9
11.01 A 12.51	19	202	12.51	98	92	52	44	6.9	13.3
12.51 A 14.01	20	202	14.01	92	95	69	42	6.9	10.1
14.01 A 14.43	21	202	14.43	100	92	38	46	6.9	9.8

TABELA 2 - Variáveis observadas e estimadas com suas respectivas localizações

V1 : Recuperação - (%)

V2 : RQD - (%)

V3 : Ensaio de perda d'água - L/MIN

TRECHO ENSAIADO (M)	AMOSTRA Nº	NORTE/ SUL(M)	LESTE/ OESTE (M)	V1 (RECUPERAÇÃO) - %		V2 (RQD) - %		V3 (PERDA D'ÁGUA) - L/MIN	
				OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 5</b>									
2.30 A 3.80	22	384	3.80	8	23	0	3	2.7	1.6
3.80 A 5.30	23	384	5.30	12	24	0	9	2.7	1.3
5.30 A 6.80	24	384	6.80	16	25	0	9	0.3	1.3
6.80 A 8.30	25	384	8.30	28	26	0	8	0.3	0.8
8.30 A 9.80	26	384	9.80	28	30	0	8	0.1	0.5
9.80 A 11.40	27	384	11.40	37	32	0	11	0.1	0.5
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 6</b>									
1.50 A 2.10				93	0				
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 6A</b>									
4.10 A 4.70	28	230	4.70	83	95	0	57	69.9	36.7
4.70 A 6.20	29	230	6.20	100	90	60	47	69.9	31.2
6.20 A 7.70	30	230	7.70	94	92	69	47	6.3	36.7
7.70 A 9.20	31	230	9.20	89	94	64	46	6.3	22.7
9.20 A 10.70	32	230	10.70	95	93	63	48	6.3	16.6
10.70 A 12.20	33	230	12.20	97	93	47	49	11.3	12.6
12.20 A 13.10	34	230	13.20	95	94	44	53	11.3	11.8
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 7</b>									
3.87 A 5.37	35	318	5.37	80	96	80	51	16.1	10.6
5.37 A 6.87	36	318	6.87	99	92	58	59	16.1	9.9
6.87 A 8.37	37	318	8.37	98	95	73	55	6.1	10.8
8.37 A 9.87	38	318	9.37	98	96	51	56	6.1	8.7
9.87 A 11.37	39	318	11.37	100	96	31	59	6.7	7.5
11.37 A 12.87	40	318	12.87	100	97	63	54	6.7	7.0

TABELA 3 - Variáveis observadas e estimadas com suas respectivas localizações

V1 : Recuperação - (%)

V2 : RQD - (%)

V3 : Ensaio de perda d'água - L/MIN

TRECHO ENSAIADO ( M )	AMOSTRA Nº	NORTE/ SUL(M)	LESTE/ OESTE (M)	V1 ( RECUPERAÇÃO ) - %		V2 ( RQD ) - %		V3 ( PERDA D'ÁGUA )-L/MIN	
				OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 8</b>									
3.08 A 4.08	41	410	4.08	70		12		1.3	1.5
4.08 A 5.08	42	410	5.08	79		22		1.3	1.5
5.08 A 6.58	43	410	6.58	59		22		1.6	1.5
6.58 A 8.08	44	410	8.08	71		11		1.6	1.7
8.08 A 9.08	45	410	9.08	90		25		1.6	1.9
9.08 A 10.58	46	410	10.58	84	79	33	18	2.6	1.8
10.58 A 12.08	47	410	12.08	94	75	43	17	2.6	1.9
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 9</b>									
2.88 A 4.00	48	358	4.00	15	85	0	36	5.6	2.7
4.00 A 5.50	49	358	5.50	90	65	57	28	5.6	2.2
5.50 A 7.00	50	358	7.00	96	75	61	28	0.0	2.6
7.00 A 8.50	51	358	8.50	100	80	55	29	0.0	1.3
8.50 A 10.00	52	358	10.00	96	83	33	32	0.0	0.7
10.00 A 11.64	53	358	11.64	93	83	41	30	0.0	0.5

TABELA 4 - Variáveis observadas e estimadas com suas respectivas localizações

V1 : Recuperação - (%)

V2 : RQD - (%)

V3 : Ensaio de perda d'água - L/MIN

TRECHO ENSAIADO (M)	AMOSTRA Nº	NORTE/ SUL(M)	LESTE/ OESTE (M)	V1 (RECUPERAÇÃO) - %		V2 (RQD) - %		V3 (PERDA D'ÁGUA) - L/MIN	
				OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA
<b>FURO DE SONDA GEM SM - 18</b>									
7.50 A 9.00	54	20	9.00	69	81	15	21	84.1	81.7
9.00 A 10.00	55	20	10.00	91	74	40	17	84.1	81.5
10.00 A 11.00	56	20	11.00	92	74	65	13	78.5	82.4
11.00 A 12.00	57	20	12.00	80	74	14	20	78.5	82.2
12.00 A 12.50	58	20	12.50	72	75	0	21	78.5	82.8
12.50 A 14.00	59	20	14.00	60	73	0	20	86.7	83.1
14.00 A 15.50	60	20	15.50	59	73	11	22	86.7	84.6
15.50 A 17.00	61	20	17.00	62	76	13	29	87.9	85.1
17.00 A 18.00	62	20	18.00	79	76	13	40	87.9	84.9
18.00 A 19.20	63	20	19.20	83	83	38	47	87.9	83.0
19.20 A 19.90	64	20	19.90	85	85	43	48	79.8	83.6
19.90 A 20.80	65	20	20.80	98	88	98	45	79.8	81.9
20.80 A 21.80	66	20	21.80	98	92	42	58	79.8	79.4
21.80 A 22.70	67	20	22.70	99	95	85	54	78.6	77.4
22.70 A 23.20	68	20	23.20	98	95	83	54	78.6	76.3
23.20 A 24.70	69	20	24.70	97	97	46	61	78.6	71.9
24.70 A 26.20	70	20	26.20	96	98	57	50	61.8	72.6
26.20 A 27.20	71	20	27.20	99	98	23	56	61.8	71.7
27.20 A 28.20	72	20	28.20	100	98	53	45	61.8	73.6
28.20 A 29.10	73	20	29.10	96	98	53	36	80.8	72.0
29.10 A 29.65	74	20	29.65	100	97	22	40	80.8	73.7
29.65 A 31.05	75	20	31.05	99	97	53	36	80.8	75.1
31.05 A 32.55	76	20	32.55	100	96	31	38	76.1	76.8
32.55 A 34.00	77	20	34.00	92	99	9	41	76.1	76.7

TABELA 5 - Variáveis observadas e estimadas com suas respectivas localizações

V1 : Recuperação - (%)

V2 : RQD - (%)

V3 : Ensaio de perda d'água - L/MIN

TRECHO ENSAIADO ( M )	AMOSTRA Nº	NORTE/ SUL(M)	LESTE/ OESTE (M)	V1 ( RECUPERAÇÃO ) - %		V2 ( RQD ) - %		V3 ( PERDA D'ÁGUA ) - L/MIN	
				OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA	OBSERVADA	ESTIMADA
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 21</b>									
12.40 A 13.70	78	64	13.70	71	92	11	64	6.1	4.6
13.70 A 14.30	79	64	14.30	81	89	28	62	6.1	4.5
14.30 A 15.80	80	64	15.80	97	90	97	53	6.1	3.4
15.80 A 16.95	81	64	16.95	97	93	67	58	1.8	3.3
16.95 A 17.50	82	64	17.50	100	93	60	59	1.8	2.7
17.50 A 18.95	83	64	18.95	99	97	77	63	1.8	2.3
18.95 A 20.10	84	64	20.10	100	98	54	67	0.0	3.2
20.10 A 21.50	85	64	21.50	98	99	49	61	0.0	3.6
21.50 A 22.30	86	64	22.30	100	99	92	48	0.0	4.8
22.33 A 23.53	87	64	23.53	100	98	61	47	13.6	3.4
23.53 A 24.35	88	64	24.35	98	98	33	45	13.6	3.3
24.35 A 25.55	89	64	25.55	98	94	46	41	0.0	5.0
25.55 A 26.95	90	64	26.95	100	92	11	39	0.0	2.9
26.95 A 28.25	91	64	28.25	97	87	18	27	0.0	1.9
28.25 A 29.50	92	64	29.50	89	84	33	17	0.0	1.0
29.50 A 30.50	93	64	30.50	55	88	33	16	0.0	0.9
30.50 A 31.50	94	64	31.50	94	77	0	20	1.0	0.6
31.50 A 32.80	95	64	32.80	61	84	0	20	1.0	0.8
32.80 A 34.00	96	64	34.00	83	77	0	20	1.0	0.8
<b>FURO DE SONDAGEM SM - 20A</b>									
9.45 A 10.75				45	17				



### 3.4 - SONDAGEM MISTA.

Na execução das sondagens mistas a perfuração foi iniciada por processo à percussão e seguida por processo rotativo.

A sonda utilizada foi uma MACH-920 da maquesonda, de avanço manual. A perfuração foi executada com cora NX ( diâmetro externo 75,3mm ) acoplada a um barrilete duplo.

Para cada operação do barrilete foram registrados a porcentagem de recuperação e o número de peças, bem como o RQD ("Rock Quality Designation").

A sondagem SM-6A, ao lado da SM-6 foi totalmente executada com rotativa. As sondagens SM-4, SM-12, SM-13 e SM-20 foram executadas à percussão e não foram prosseguidas com rotativa ( Fig. 3 e 4 ).

As sondagens SM-18 e SM-20A foram posicionadas em locais onde já existia barramento construído e foram executadas com rotativa.

### 3.5 - ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA

Nos trechos perfurados em rocha foram realizados ensaios de perda d'água "LUGEON". Os ensaios foram realizados de acordo com os procedimentos recomendados pela ABGE (Boletim 02 - 1975).

Os ensaios foram realizados em cinco estágios de pressão, e são eles:

- Primeiro estágio: 0,15 kg/cm<sup>2</sup>;  
Segundo estágio: Pressão Intermediária =  $P_{max}/2$ ;  
Terceiro estágio: Pressão Máxima;  
Quarto estágio: Igual ao segundo estágio;  
Quinto estágio: 0,15 kg/cm<sup>2</sup>.

A pressão máxima foi calculada a partir da profundidade do obturador do trecho ensaiado pela seguinte expressão:

$$P_{max} = 0,15 \text{ (kg/cm}^2 \times \text{m)} \times \text{profundidade do obturador em metros}$$

O valor da pressão mínima e da pressão máxima corresponde a 0,15 kg/cm<sup>2</sup> foi determinado pelo DNCOS.

A execução dos ensaios foi feita de forma ascendente via de regra a cada 3,00 metros, sendo o trecho inferior efetuado com obturação simples e os demais com obturação dupla.

Os furos ensaiados foram SM-01, SM-02, SM-03, SM-05, SM-06, SM-07, SM-08, SM-09, SM-18, SM-21 ( Figuras 3 e 4 ).

Na sondagem SM-06, no trecho de 4,10 a 7,10m e para a sondagem SM-18, nas quais todos os trechos ensaiados apresentaram valores de Carga Efetiva (CE) negativos, sendo responsável por essa incongruência o fato das baixas pressões atuantes estarem contidas na margem de erro dos instrumentos de medidas utilizados. Por esse motivo, recomenda-se considerar, nesses casos, as perdas d'água específica e os coeficientes de permeabilidades como indeterminados.

Os dados obtidos sobre recuperação e  $r_{qd}$  nos testemunhos, vazão nos ensaios de perda d'água, encontram-se nas tabelas 1 a 5 e figuras de números 5 ao 16.

## 3.6 - DEMONSTRATIVO DOS INTERVALOS DE SONDAGEM

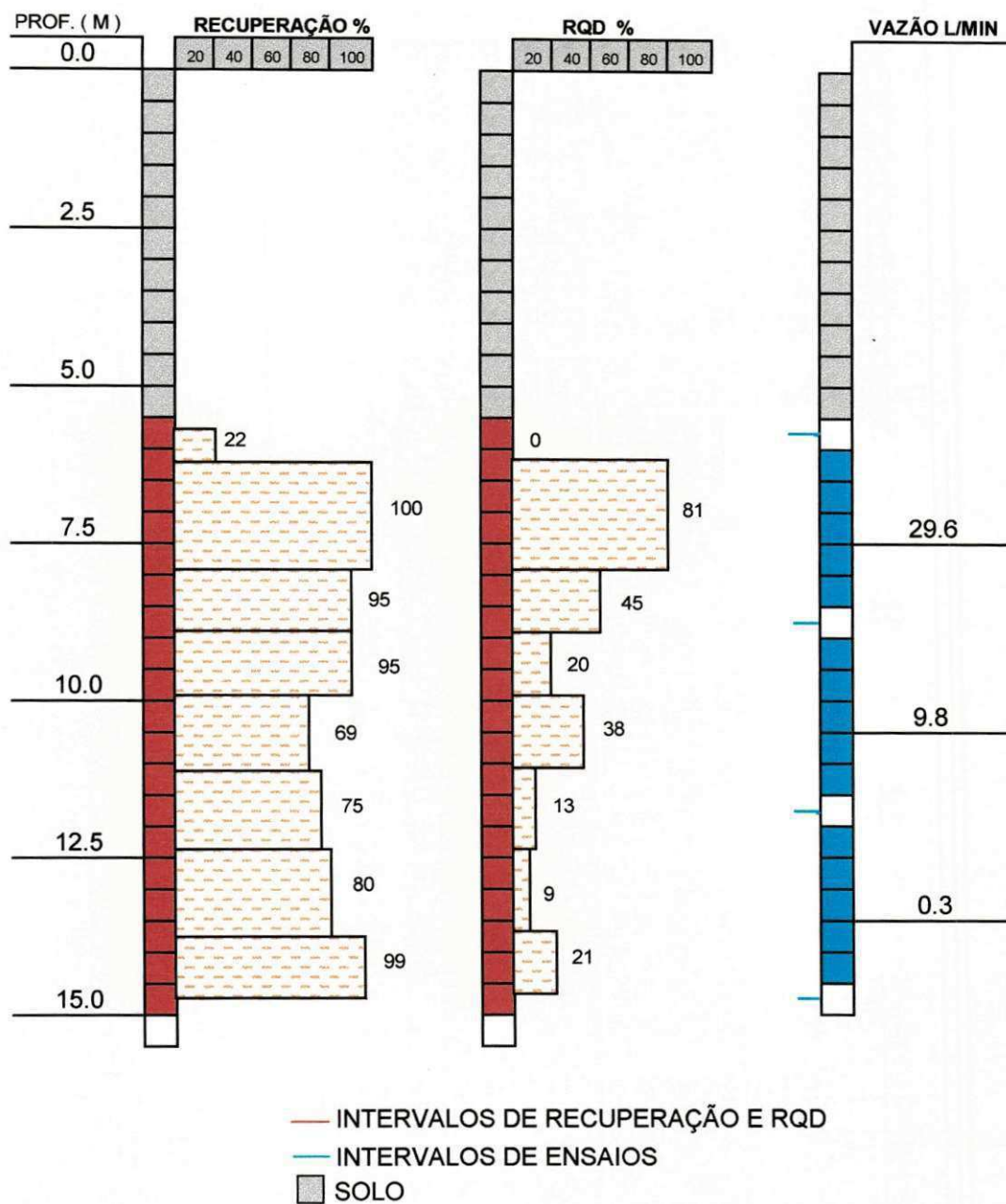


FIGURA 5 - Furo de sondagem sm1, mostrando variação vertical das variáveis

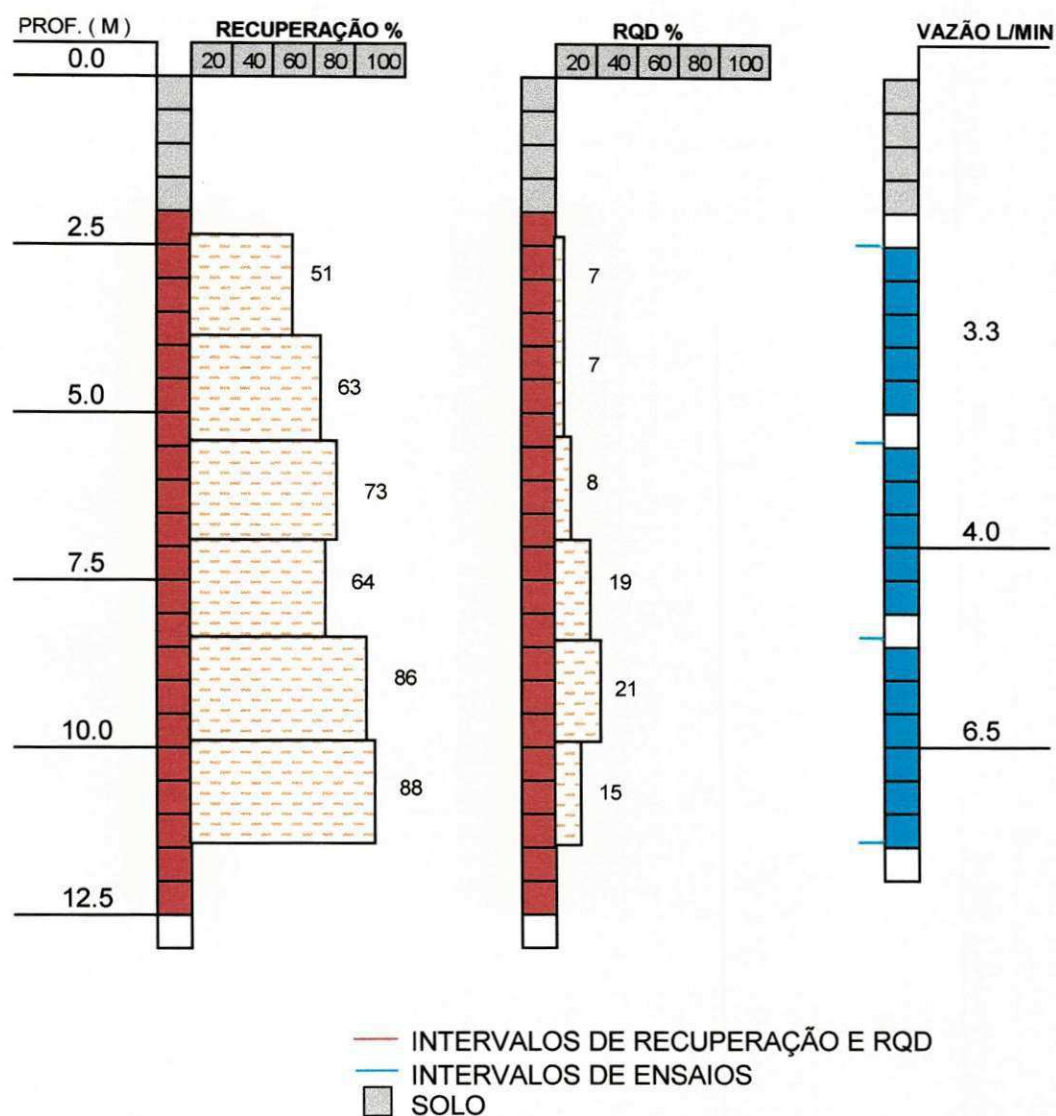


FIGURA 6 - Furo de sondagem sm2, mostrando variação vertical das variáveis

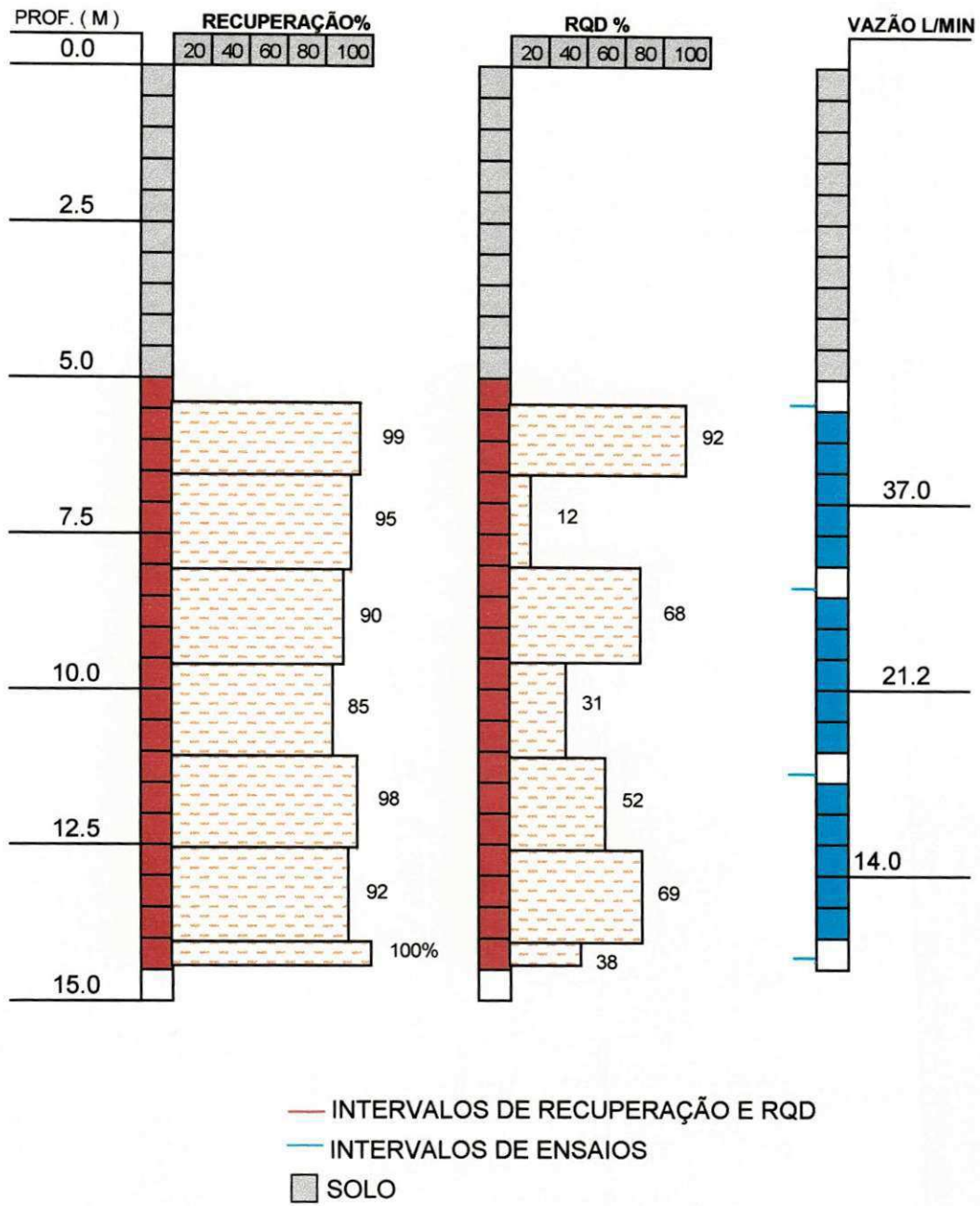


FIGURA 7 - Furo de sondagem sm3, mostrando variação vertical das variáveis

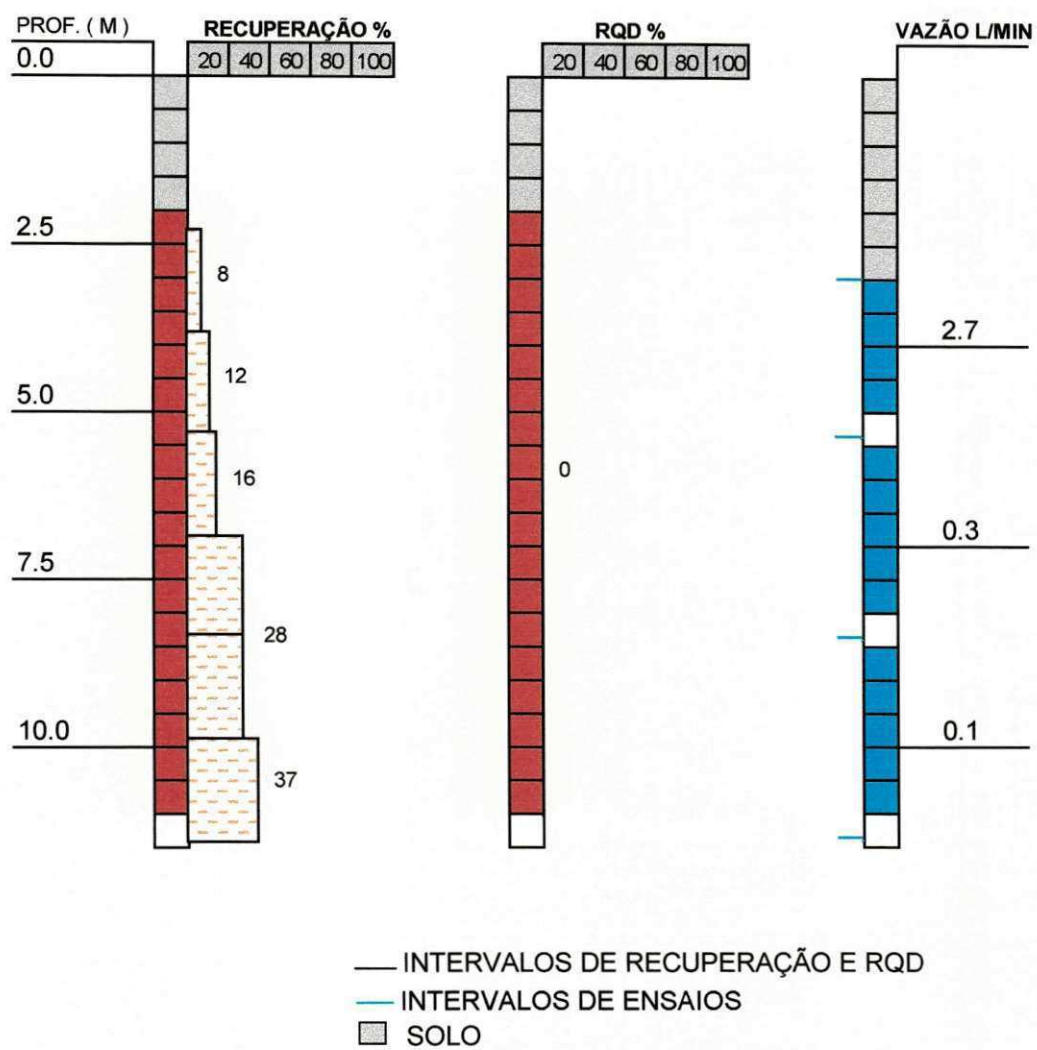


FIGURA 8 - Furo de sondagem sm5, mostrando variação vertical das variáveis

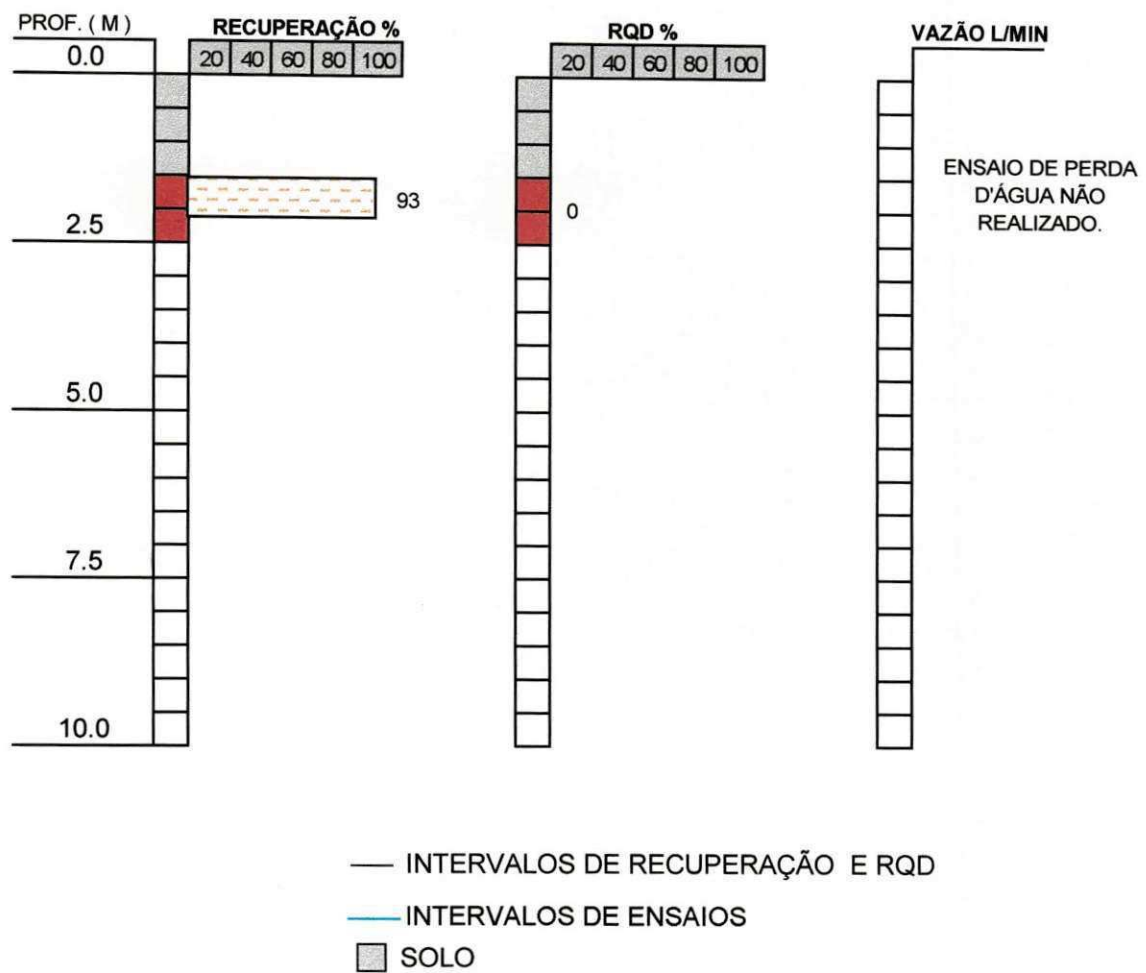


FIGURA 9 - Furo de sondagem sm6, mostrando variação vertical das variáveis



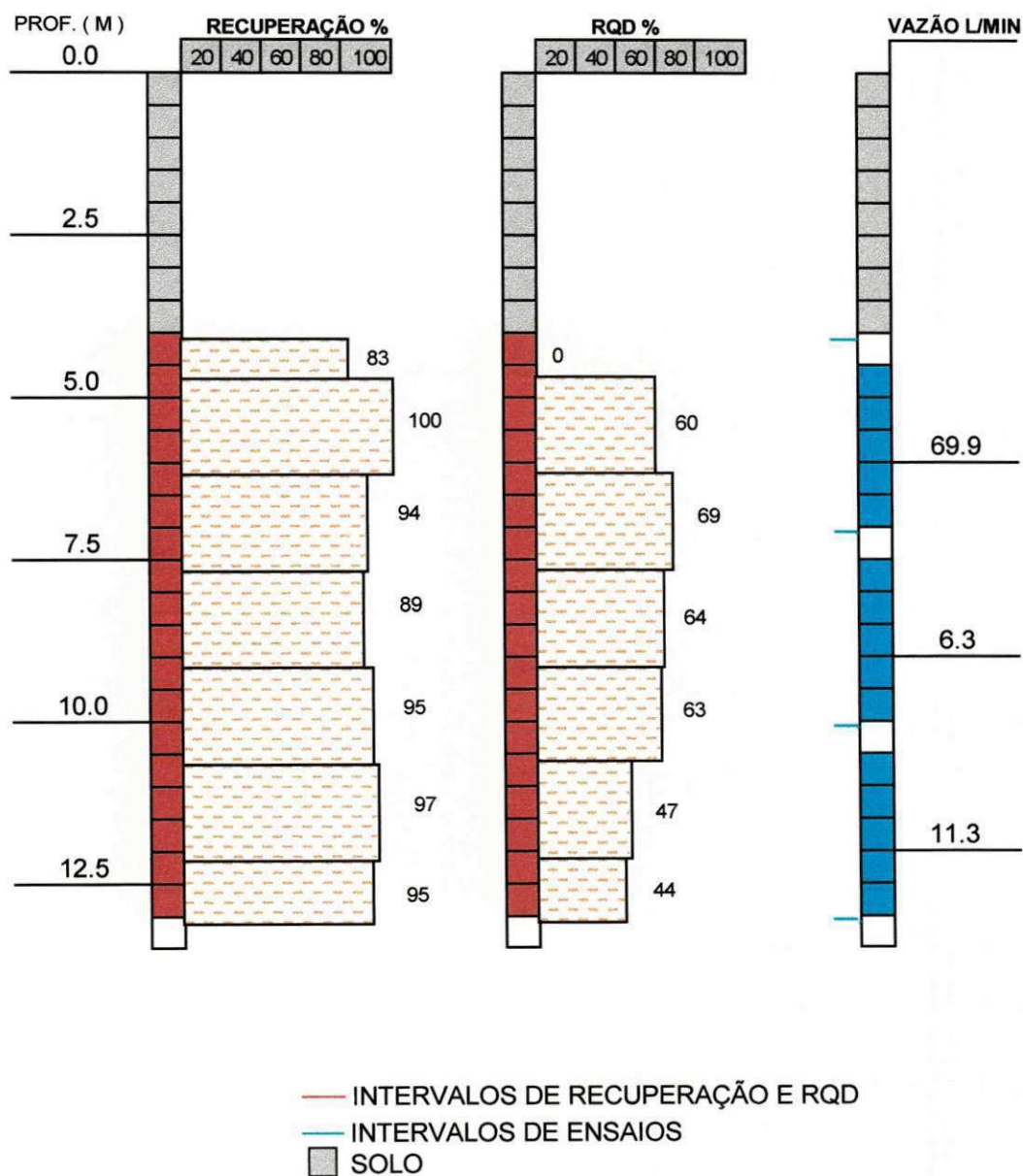


FIGURA 10 - Furo de sondagem sm6A, mostrando variação vertical das variáveis



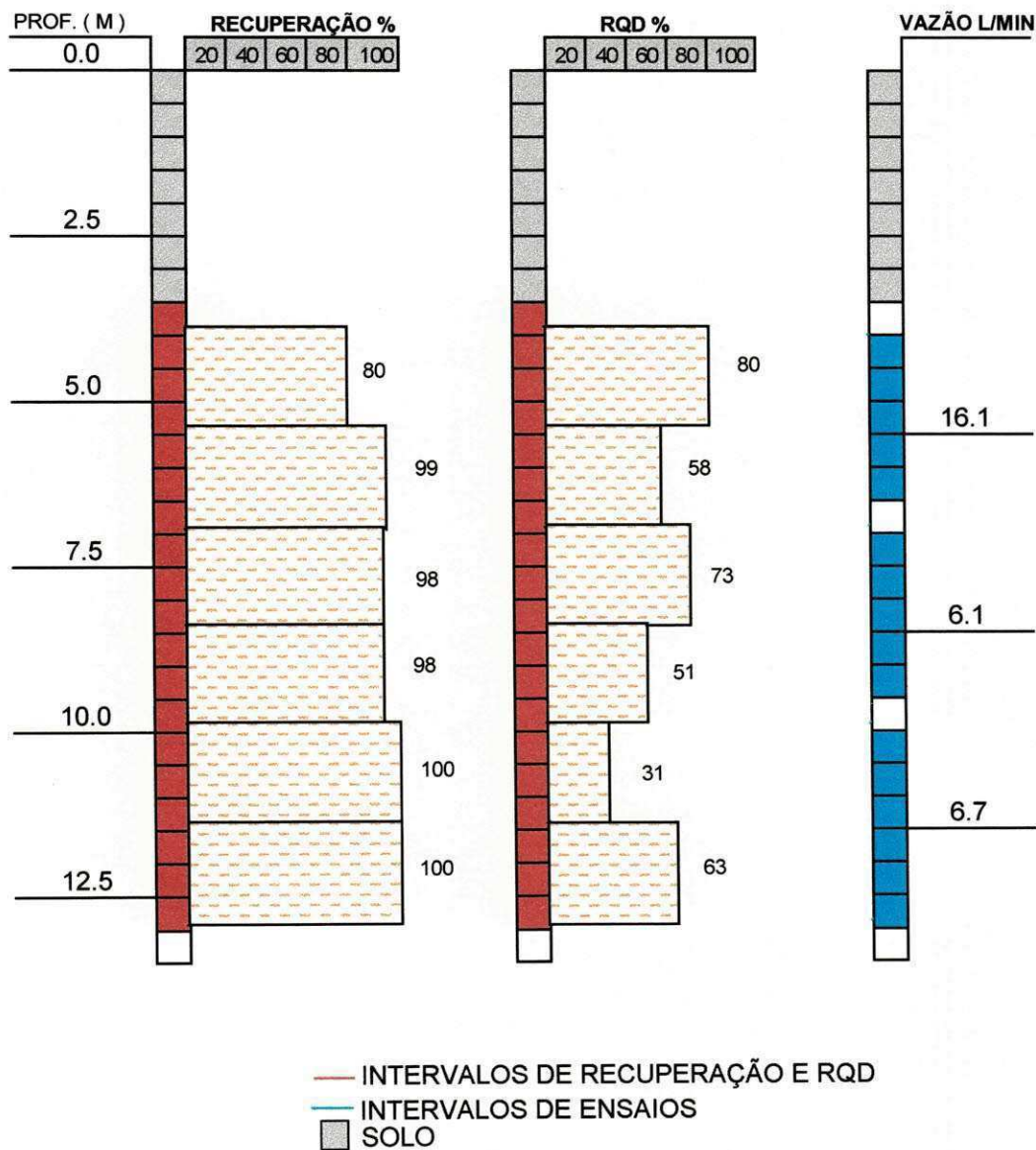


FIGURA 11 - Furo de sondagem sm7, mostrando variação vertical das variáveis

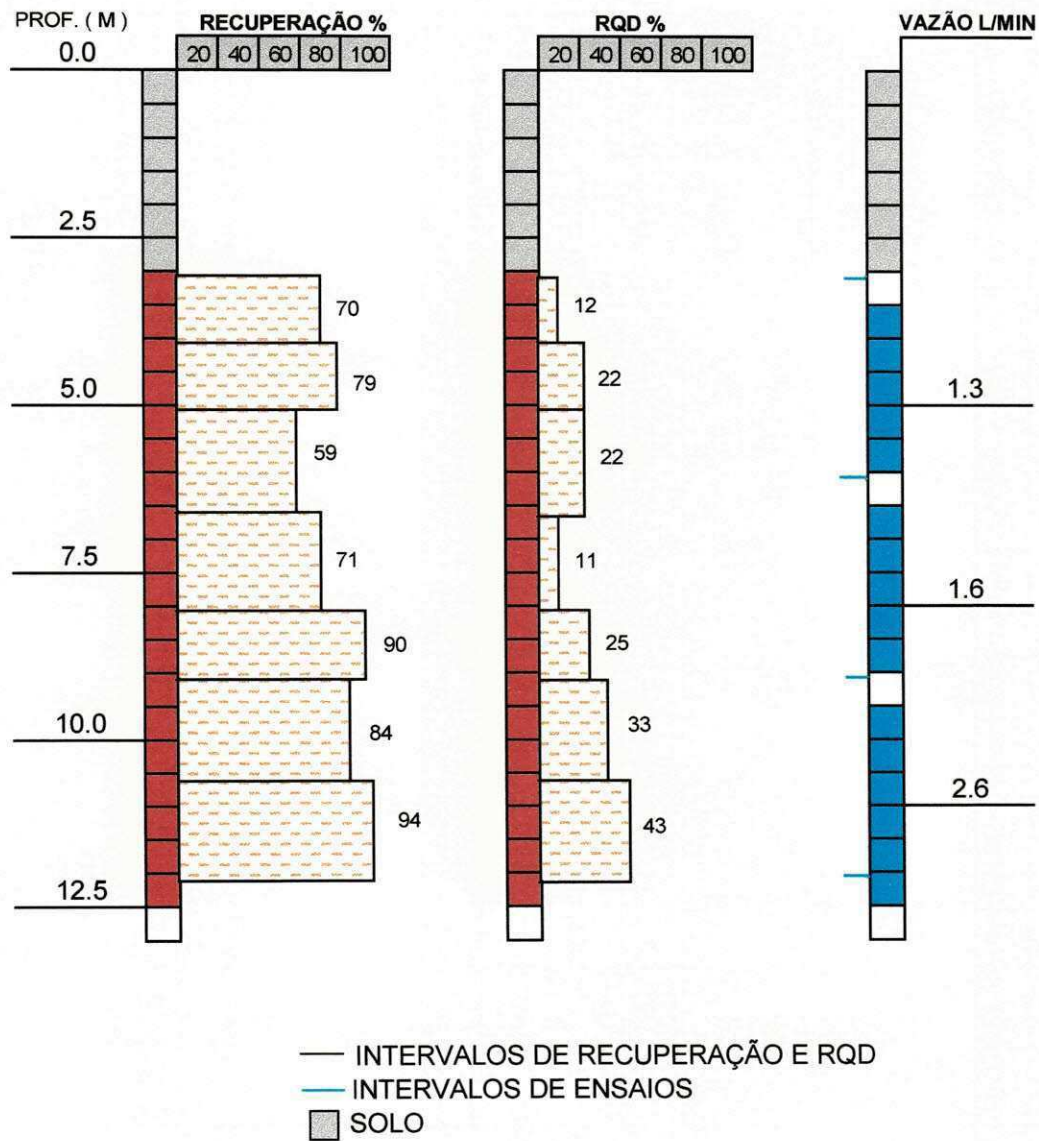


FIGURA 12 - Furo de sondagem sm8, mostrando variação vertical das variáveis

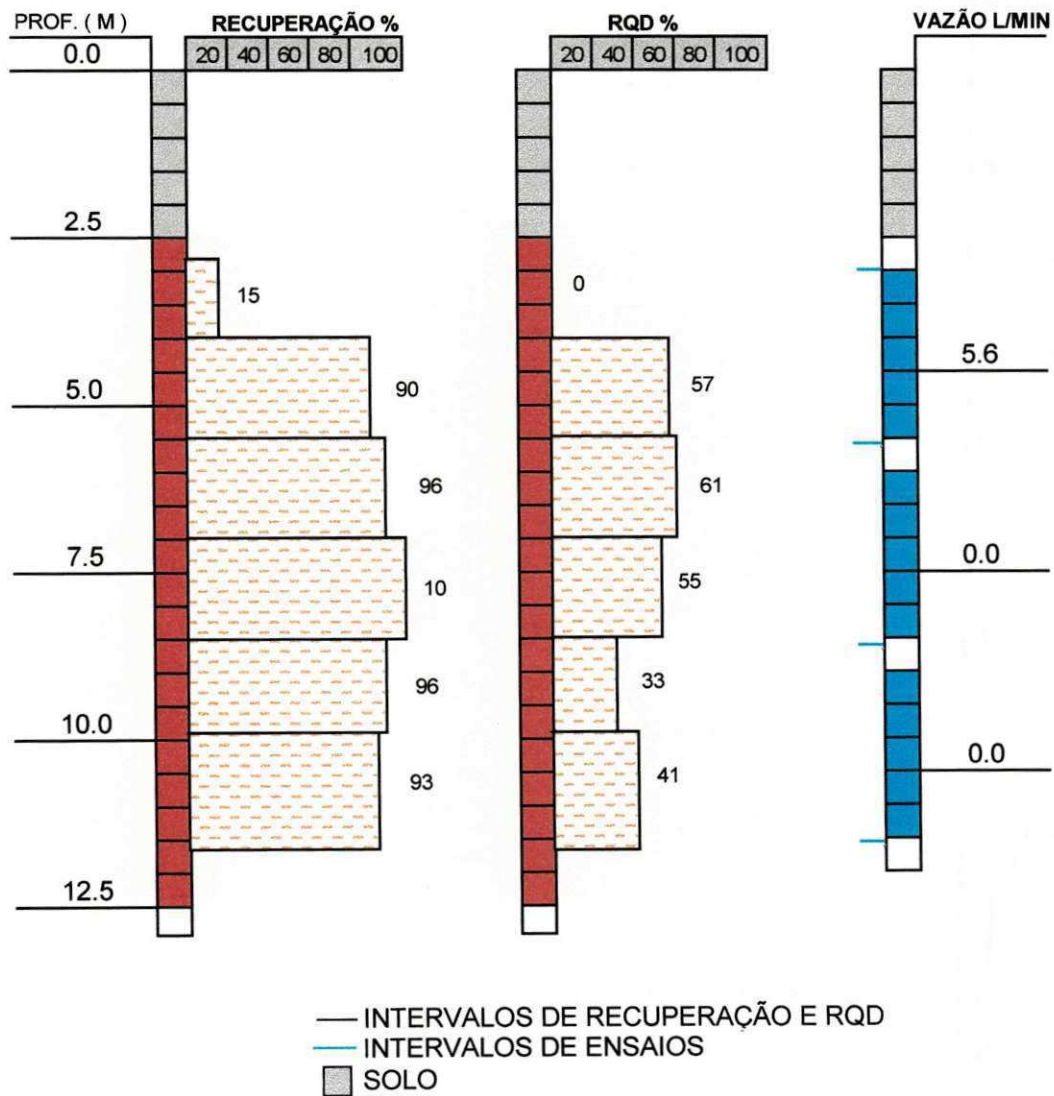


FIGURA 13 - Furo de sondagem sm9, mostrando variação vertical das variáveis

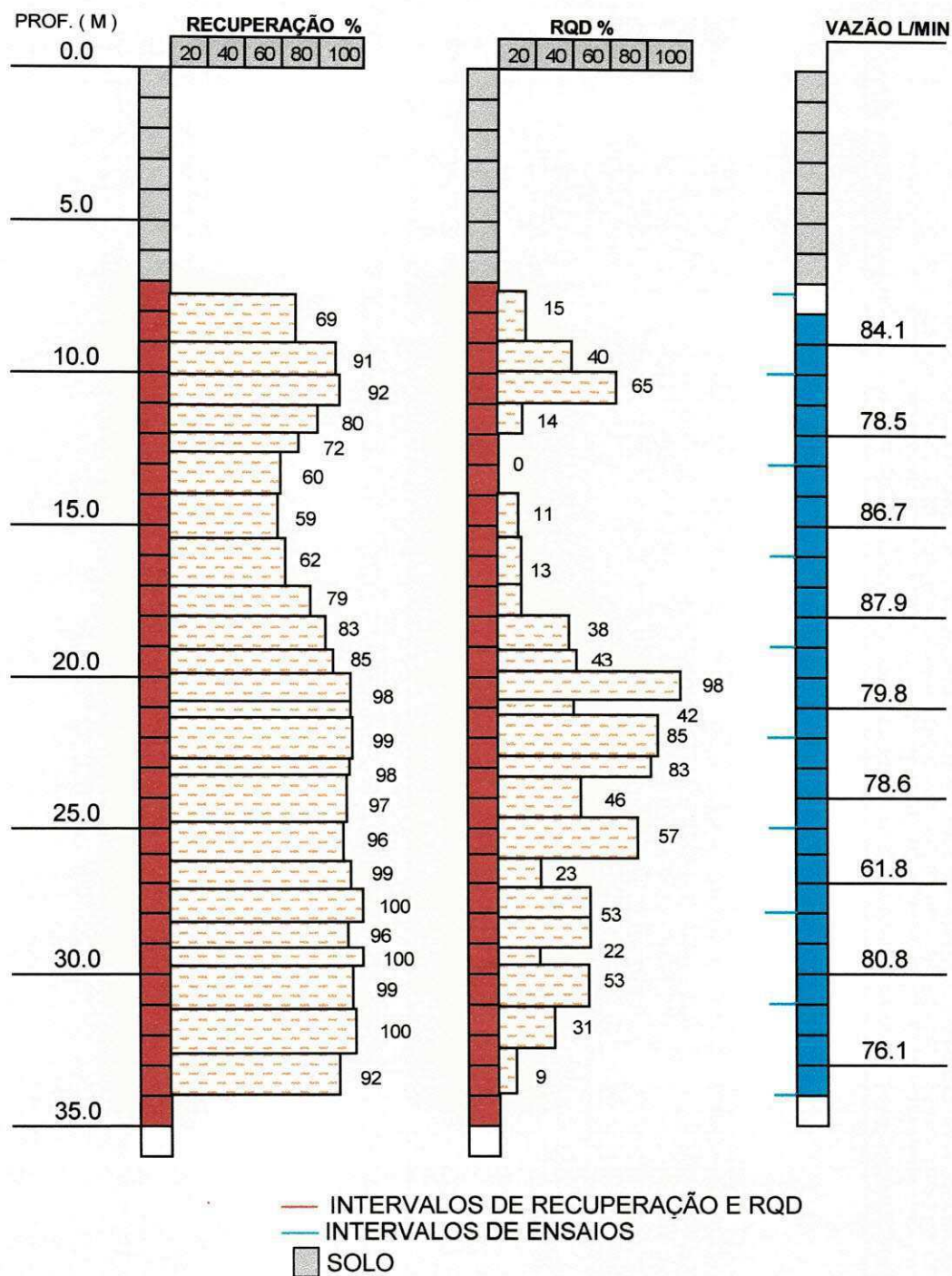


FIGURA 14 - Furo de sondagem sm18, mostrando variação vertical das variáveis



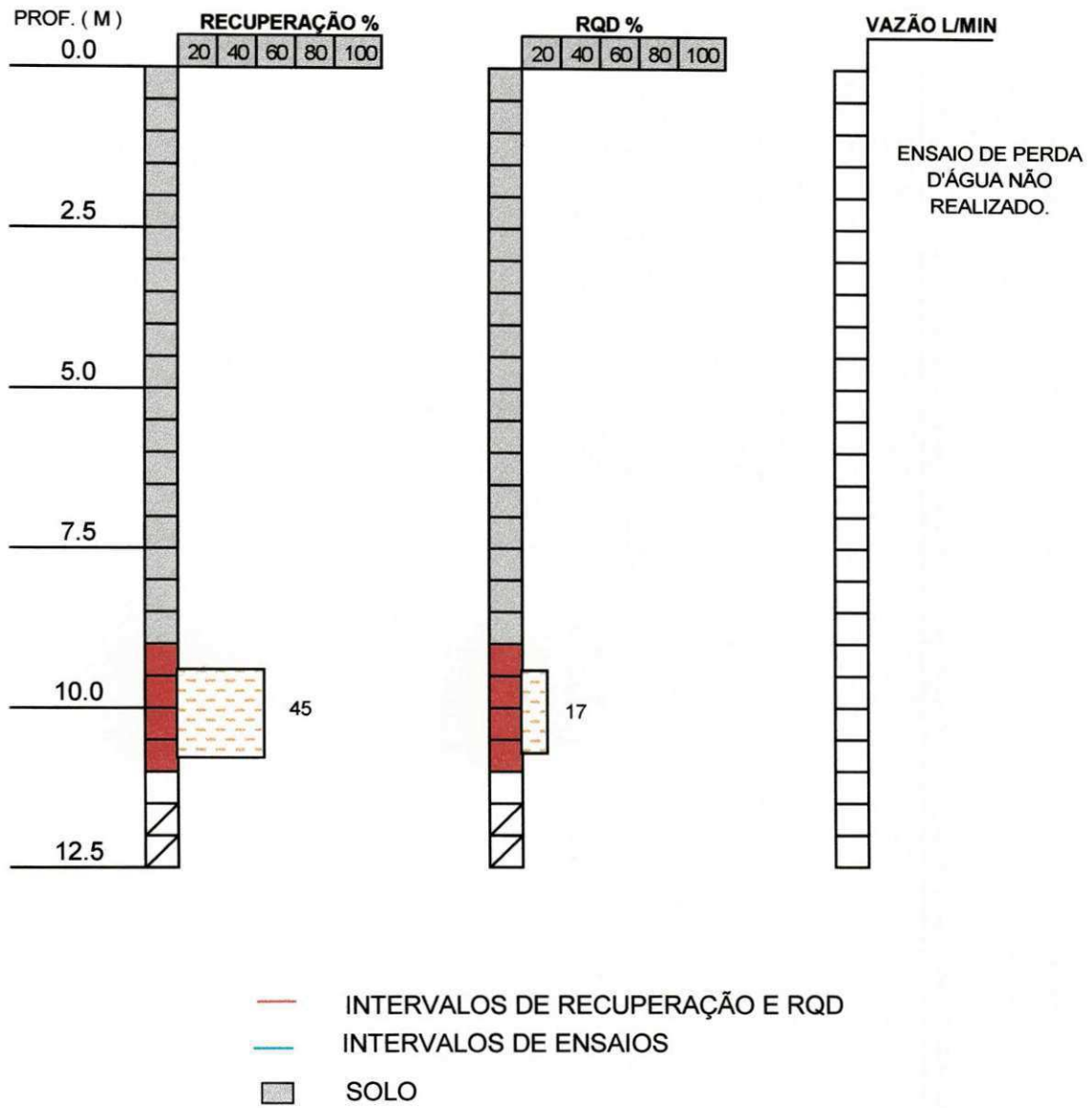


FIGURA 15 - Furo de sondagem sm20A, mostrando variação vertical das variáveis

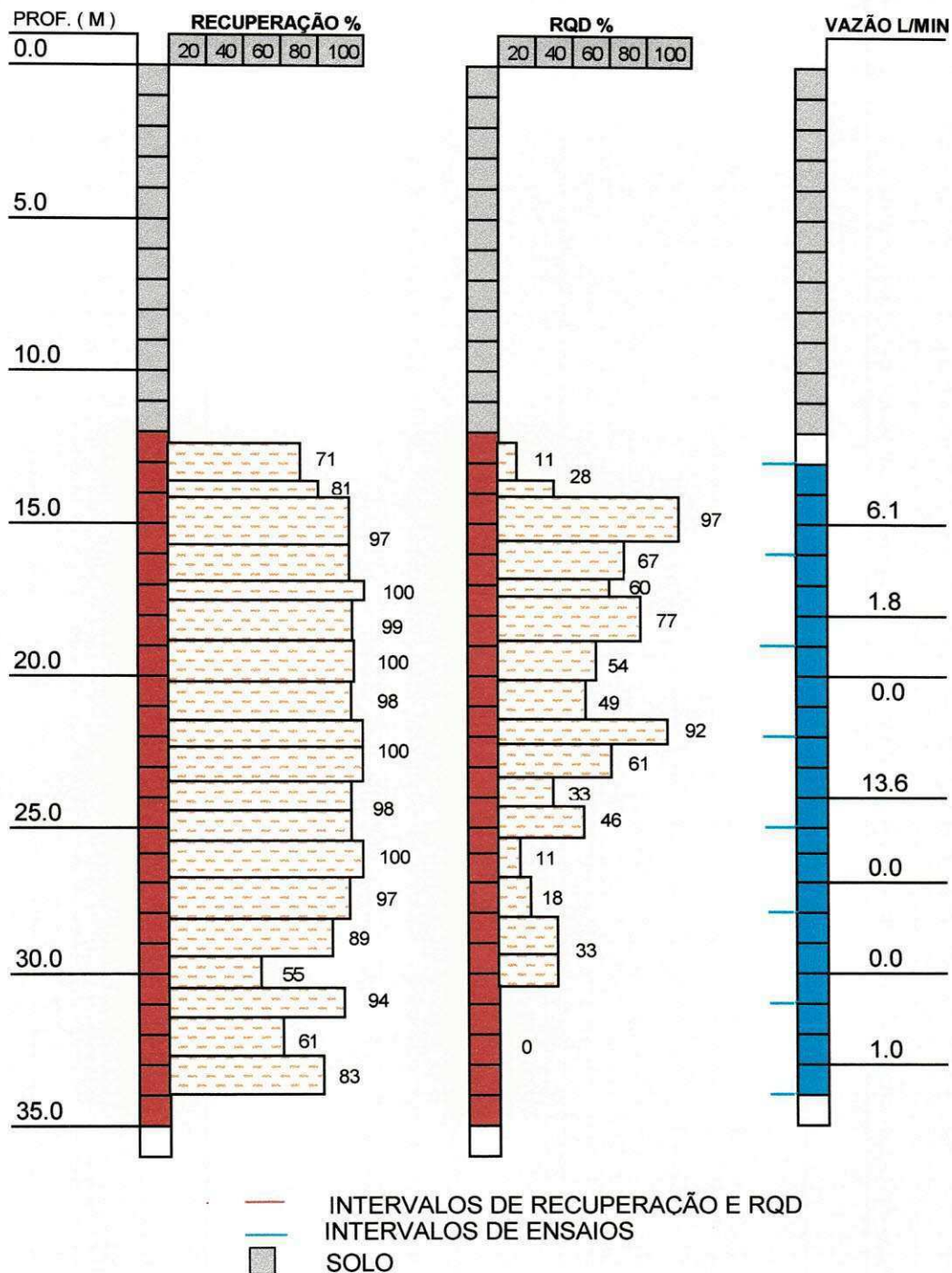


FIGURA 16 - Furo de sondagem sm21, mostrando variação vertical das variáveis

## 4. MODELAMENTO DOS VARIOGRAMAS

### 4.1 - GENERALIDADE

O comportamento de uma variável no campo espacial, se traduz como uma característica de fundamental importância na análise estrutural evidenciada pela geoestatística. Deste modo, o estudo fundamental da variabilidade espacial nos fornecerá subsídios suficientes para um planejamento dentro dos parâmetros de ações e confiabilidade que permitam a análise e quantificação de riscos com relação as avaliações realizadas.

A geoestatística possui como suporte básico, a teoria da variáveis regionalizadas, ou seja, entende-se como variáveis regionalizadas, uma função que varia de um lugar a outro no espaço, demonstrando uma certa aparência de continuidade. Em outras palavras podemos dizer que são variáveis cujos valores estão relacionados de algum modo com a posição espacial que ocupam. As características básicas das variáveis regionalizadas são a aleatoriedade e a espacialidade. Na aleatoriedade podemos observar que os valores numéricos podem variar de um ponto a outro no espaço sem a existência de uma dependência entre si. Já a espacialidade apesar de variar bastante dentro do espaço, os valores numéricos observados não são inteiramente independentes.

As variáveis regionalizadas ( V.R. ) são dotadas de determinadas características qualitativas estreitamente ligadas a estrutura do fenômeno natural que elas representam. Entre essas características podemos destacar, a localização, continuidade e anisotropia. Desta forma a teoria da variáveis regionalizadas, é também aplicada em muitas outras áreas fora do raio de ação da

mineração (Isaaks e Srivastava, 1989 e Journel e Huijbregts, 1978; Guerreiro, 1984).

Quando se fala da localização, diz-se que a V.R. somente toma seus valores importantes no campo geométrico em que foi definida, ou seja, no espaço geométrico em que foi definida, ou seja, no espaço geométrico onde a variável é susceptível de tomar valores definidos e no interior do qual será estudada sua variação. A V.R. que se apresenta com uma continuidade mais ou menos estável em sua variação espacial, pode ser expressa através de uma flutuação mais ou menos importante entre os valores vizinhos. Esta flutuação reflete por outro lado o grau de dependência ou independência que existe entre um valor e outro. Existem casos onde os valores representativos das características não possuem nenhuma dependência entre eles, ou seja, são totalmente independente, expressando com isto uma disposição ao acaso, neste caso estaríamos tratando com uma variável aleatória. O estudo desta continuidade nos leva a considerar a variável aleatória como um caso particular de variável regionalizada. Em relação a anisotropia, estamos nos referindo a uma propriedade ou característica essencial da V.R. que vai privilegiar uma direção ao longo da qual os valores não variam de forma significativa, em quanto que isto acontece ao longo de outra direção.

Levando em consideração que os fenômenos naturais não podem ser tratados como fenômenos aleatórios, surgiu a necessidade de se encontrar novas ferramentas matemáticas que permitam estudar de um modo sintético as duas características essenciais das V.R., quais sejam, aspectos aleatórios e aspectos espaciais.

Deste modo a geoestatística se propõe estudar dois objetivos principais. Em primeiro lugar a geoestatística deve ser capaz de extrair da aparente desordem dos dados disponíveis, uma imagem da variabilidade dos mesmos, e uma medida da correlação existente entre os valores tomados em dois pontos do espaço. Este é o objetivo da análise estrutural e se consegue através do Variograma. Em segundo lugar a geoestatística deve também ser capaz de medir a precisão de toda predição ou estimativa feita através de dados fragmentados, ou



seja, há necessidade de uma teoria de estimativa. Isto é feito através da Krigagem. (Guereiro, 1984).

Com os dados representativos das variáveis regionalizadas, a geoestatística, através da função denominada variograma, descreve a correlação espacial em evidência. Desta forma pode-se dizer que o variograma mede a correlação espacial entre as amostras contínuas de uma variável regionalizada. Em geral o variograma é uma função crescente de  $h$ , visto que os valores tomados entre dois pontos diferentes, são em média, tanto mais diferentes quanto mais afastados estejam um do outro. Deste modo o variograma dá sentido preciso à noção tradicional de zona de influência de uma amostra. O crescimento mais ou menos rápido do variograma representam, com efeito, a maneira mais ou menos rápida com a qual é diminuída a influência de uma amostra sobre as zonas mais afastadas de uma área analisada.

Neste trabalho, o cálculo do variograma é realizado a partir de amostras de sondagens, como também dos resultados in loco dos ensaios de perda de água. Existem três tipos básicos de variogramas: O observado ou experimental, é aquele obtido a partir do conjunto de amostras derivadas da amostragem realizada, logo podemos concluir que é o único conhecido. O variograma verdadeiro que é o variograma representativo na realidade da área estudada, é importante salienta que é sempre desconhecido, e o variograma teórico, que na realidade é um variograma de referência. Desta forma o objetivo fundamental de um estudo estrutural ou variográfico, é estudar qual o variograma teórico que melhor se ajuste ao variograma experimental, de tal modo que a partir deste modelo teórico, possam ser feitas inferências em relação ao variograma verdadeiro.

Por definição o variograma de uma variável qualquer tem por expressão:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n(h)} \sum [x(z_i) - x(z_i + h)]^2$$

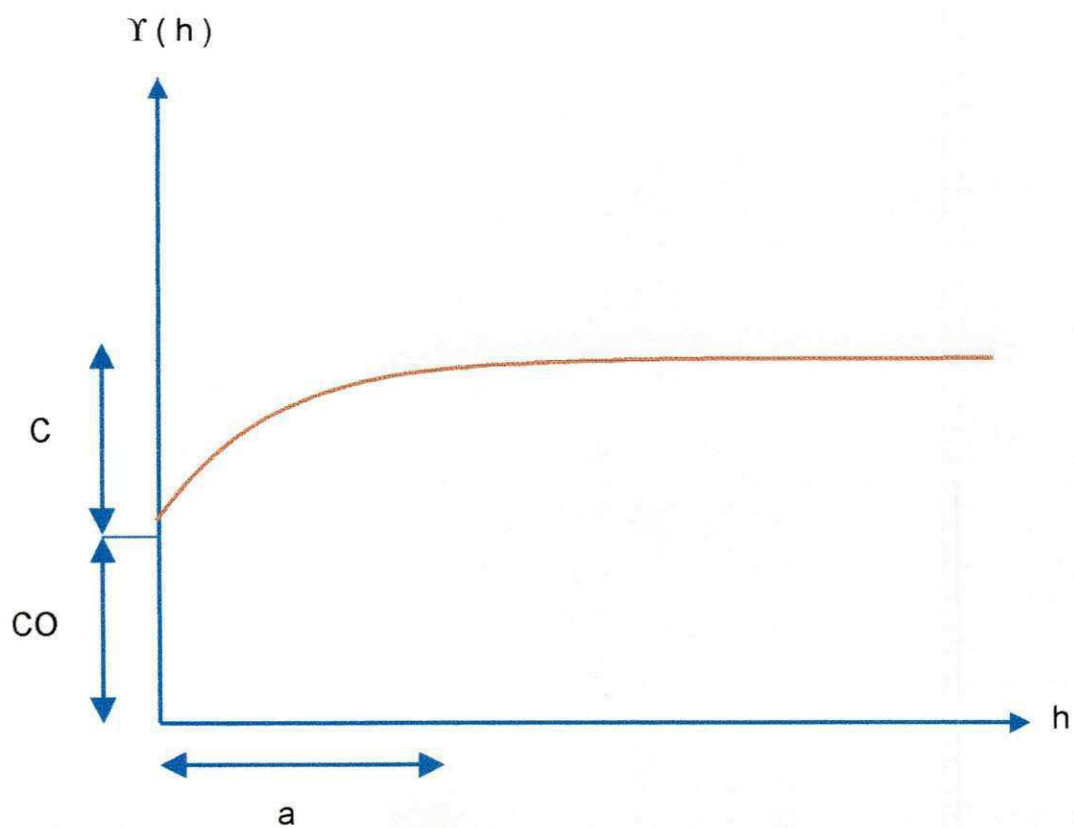
onde,

- $n(h)$  total de números de pares separados por uma distância de vetor  $h$
- $x(z_i)$  é a variável regionalizada.
- $x(z_i + h)$  é o valor da variável no ponto  $z_i + h$
- $2\gamma(h)$  é a variância.

A notação  $2\gamma(h)$  é usada para definir o variograma. Uma distinção deve ser feita na diferenciação de variogramas: o variograma é denotado por  $2\gamma(h)$ , e o semi-variograma por  $\gamma(h)$ , sendo este mais popularmente conhecido como variograma. O acompanhamento destas duas classificações nesta tese se dará na forma comumente utilizada, ou seja o valor  $\gamma(h)$  para definir o variograma

Os modelos teóricos mais práticos que se utilizam na confecção de variogramas são os variogramas esféricos, variograma exponencial e variograma de gauss. O variograma esférico é caracterizado por apresentar feições transitórias, apresentando um crescimento rápido na origem, onde os valores da variável em estudo apresentam correlacionados mesmo sendo independente (Fig.17). O variograma de gauss e o exponencial possuem a característica principal de alcançar seu patamar assintoticamente.

As variáveis regionalizadas deixam refletir determinados caracteres estruturais que são característicos dos modelos transicionais, entre eles podemos destacar: efeito pepita (nugget), a variância de dispersão, o patamar (sill) e o alcance (range). O efeito pepita representa as variações locais ou a variabilidade microscópica, aparecendo sempre na origem com uma descontinuidade. A variância de dispersão representa as diferenças espaciais entre os valores de uma



ONDE :

$C$  : Variância de Dispersão

$CO$  : Efeito Pepita

$C + CO$  : Patamar

$A$  : Alcance

FIGURA - 17 - Modelo transicional de um variograma esférico

variável tomada em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores. O patamar marca o valor da variância total da variável em estudo. O alcance corresponde a zona de influência de uma amostra. Ele marca a distância a partir da qual a variável em estudo não tem mais influência sobre o ponto vizinho. Iniciando assim a zona de pura aleatoriedade.

Nos dados obtidos através dos testemunhos de sondagem, selecionou-se as variáveis que seriam objetos deste estudo. Todos os intervalos de furos de sondagens amostradas e avaliadas foram localizadas em relação as coordenadas geográficas para a análise espacial. As variáveis Recuperação e RQD (rock quality designation) são determinadas em porcentagem enquanto que a Vazão é dada em litros por minutos.

Os dados referente a cada variável considerada, foram utilizados para elaborar uma planilha contendo suas coordenadas geográficas com seus respectivos valores, servindo esta como suporte para execução do programa "Geoestatistical Environmental Assessment Software" (GEO - EAS). O citado programa é uma coleção interativa de ferramenta de software contendo treze programas, desenvolvidos por Englund e Sparks ( 1988 ) para efetuar análise geoestatística em duas dimensões de dados distribuídos espacialmente e contornos de mapas de krigagem.

## 4.2 - MODELAMENTO DOS VARIOGRAMAS DAS VARIÁVEIS

A confecção dos variogramas se procede com a elaboração de variogramas médios, dependendo da natureza do mesmo, varia-se a distância entre os pares de amostras, direção do variograma e o ângulo de tolerância para conseguir um modelo apropriado. O variograma esférico é o modelo escolhido para confeccionar a estrutura das variáveis em estudo e associa-las na classificação do maciço

rochoso, por apresentar modelos transicionais com patamar, variância de dispersão, efeito pepita e alcance. Durante a confecção do variograma teórico foram realizados os seguintes procedimentos: a partir dos três primeiros pontos do variograma experimental estabeleceu-se uma tangente a curva média original, assim obtendo o valor de efeito pepita no variograma. O segundo procedimento, foi para verificar a estabilização do variograma no seu patamar, onde a fórmula matemática  $C_0 + C$  fornece o valor do patamar. No cálculo do alcance utilizou-se a expressão matemática  $h = 2/3 a$ , onde  $h$  é o valor anterior a interseção da tangente no patamar.

O modelamento dos variogramas das variáveis cujas amostras foram retiradas do maciço rochoso foi realizado considerando três tipos de dados obtidos principalmente da área central da barragem, ou mais precisamente nas proximidades do paléo canal:

- a. Os dados resultantes dos cálculos da Recuperação.
- b. Os dados resultantes dos cálculos do RQD ( Rock Quality Designation )
- c. Os dados da vazão resultante dos ensaios de Perda D'água.

## 5. SIGNIFICADO DAS VARIÁVEIS

### 5.1 - RECUPERAÇÃO ( SONDAGEM ROTATIVA )

Sondagem rotativa constitui um dos mais importantes e eficazes meios para a exploração de subsuperfície. Essas sondagens permitem a extração de amostras das rochas de grandes profundidades, e o estudo detalhado desse material recuperado. Em resumo, uma broca de aço com inscrustações de diamante e wídia ( liga de carbono e tungstênio ) é unida a tubos, que, por rotação, avançam no subsolo. O diâmetro de cada perfuração pode ser de 2.1/8, 1.5/8, 1.1/8 e 7/8 de polegadas, os quais são conhecidos na prática pela simbologia de NX, BX, AX e EX, respectivamente. A profundidade e a distância entre cada furo dependem da altura da barragem e das condições geológicas locais. Após a perfuração, coleta-se o testemunho da rocha, do qual é feita uma descrição petrográfica. Deve-se anotar a porcentagem de recuperação dos testemunhos e executar os ensaios de perda d'água. Entende-se por recuperação de testemunho a relação entre o comprimento do trecho perfurado e o comprimento de amostras contínuas.

A sondagem rotativa atingem geralmente algumas dezenas de metros de profundidade e fornecem através da rocha recuperada dados como: espessura do solo, tipos e espessuras das rochas do subsolo, existência ou não de fraturas e dobras, dados de porosidade e permeabilidade, grau de alteração das rochas, etc.

Por razões técnicas da sondagem e pela constituição física das rochas, quase nunca se consegue tirar testemunho com comprimento igual ao de avanço do cabeçote. O testemunho em recuperação é desgastado pelo próprio barrilete, pode ser triturado em parte dissolvido pela água, de maneira que as partes gastas

vão ser incorporadas a água. Importante, como foi colocado anteriormente, é a porcentagem de recuperação dos testemunhos ou amostras da sondagem, que é a relação entre o número de metros perfurados e o número de metros recuperados ou amostrados. Existe uma relação entre a porcentagem de recuperação e o estado de alteração da rocha. Isso significa que rochas inalteradas fornecem uma recuperação de 95% a 100%; rochas muito alteradas ou fraturadas fornecem uma recuperação em torno de 50%. Entre elas, pode-se estabelecer uma escala completa de proporcionalidade.

## 5.2 - ROCK QUALITY DESIGNATION ( RQD )

Em 1964, Deere propôs um índice quantitativo para classificar o maciço rochoso baseado na recuperação do conteúdo perfurado. Segundo Deere, o RQD é definido como sendo o percentual de peças intactas recuperada de 100mm de comprimento ou maior, dividido pelo comprimento total do furo, assim temos:

$$\text{RQD ( \% )} = 100 \times \frac{\text{Testemunho maior do que 100mm}}{\text{Comprimento total do furo}}$$

O RQD é determinado por meio da utilização da rocha recuperado normalmente coletado por intermédio de um barrilete que pode ser; simples, duplo e duplo livres. Os simples constam de um tubo cilíndrico oco, onde o testemunho penetra e fica preso por molas em bisel. A água passa através do testemunho e sai por fora da coroa, e o barrilete gira juntamente com a haste. Há desgaste mecânico pelo giro do barrilete e ocorre desgaste mecânico e de dissolução pela



água que passa através do testemunho. Os barriletes duplos possuem dois tubos concêntricos, evitando o desgaste pela água, porém continua o desgaste mecânico, porque os dois tubos giram com a haste. Os duplos livres possuem dois tubos concêntricos com rolamentos de mancais deixando parado o tubo interno que guarda o testemunho. Assim os barriletes duplos evitam todos os tipos de desgaste.

Deere sugeriu a seguinte relação entre o valor numérico do RQD e a qualidade da rocha para a engenharia, observada na tabela 6.

Tabela 6 - Relação entre o percentual calculado e a qualidade da rocha

RQD	ROCK QUALITY
<25%	Very Poor
25 - 50%	Poor
50 - 75%	Fair
75 - 90%	Good
90 - 100%	Very Good

Como o objetivo primordial deste estudo visa oferecer subsídios que sirvam como suporte ou parâmetro de comparação para um conhecimento mais detalhado do maciço rochoso da barragem do castanhão, achou-se por bem escolher a variável RQD, em função da disponibilidade de dados apresentados. É importante frisar que além do rqd, utilizou-se também os dados resultantes da recuperação como também os dados referente aos ensaios de perda d'água.



### 5.3 - ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA

Desde Maurice Lugeon ( 1930 ), é tradição efetuar nos furos de reconhecimento, bem como nos furos de injeção, ensaios d'água sob pressão, por trechos. Esses ensaios são bastantes conhecidos e consistem em se medir a vazão d'água que penetra no maciço, através de um trecho de furo em geral de cinco metros, sob certa pressão -  $10 \text{ kg/cm}^2$  no chamado ensaio Lugeon. A quantidade d'água injetada é considerada em termos de absorção avaliada em litros por minuto, por metro de furo, chamada Unidade Lugeon. Essa medição permite a aplicação da Regra Lugeon, um maciço é considerado estanque e não será injetado, se absorver menos de uma Unidade Lugeon, e é considerado permeável e deverá ser injetado se absorver mais de uma Unidade Lugeon.

Em geral, os projetos de execução de cortina de impermeabilização determinam a realização obrigatória de ensaios de perda d'água em todos os furos primários e em subtrechos consecutivos de 3,00 m ( às vezes 5,00 m ) de extensão, sendo opcionais nos furos de ordem posterior. A maioria deles aconselham que tais ensaios sejam realizados nos mesmos trechos onde se dará a injeção, objetivando individualizar os trechos críticos que indiquem absorções elevadas, além de possibilitar uma análise posterior da eficiência da injeção, através da comparação dos resultados da perda d'água específica antes e depois da mesma.

Os ensaios de perda d'água sob pressão são amplamente utilizados em campanhas de investigações geológico-geotécnicas, sendo sua metodologia bastante difundida no meio técnico (Vitor de Melo - 1969). Tais ensaios consistem basicamente na injeção de água sob pressão num trecho da rocha isolado por obturadores e na medida da vazão em função da pressão aplicada.

## 6. ANÁLISE VARIOGRÁFICA

### 6.1. ANÁLISE VARIOGRÁFICA DA VARIÁVEL RECUPERAÇÃO ( V1 )

Foram utilizadas na análise estatística 96 amostras, e constatou-se que a média do percentual de recuperação foi de 82,65%, uma média considerada boa, levando em consideração que o início da testemunhagem acontece em uma zona do maciço rochoso exposta ao intemperismo e também onde está localizada a zona menos consolidada da rocha. Com esta média foi obtida uma variância de 518,92 ( Tab. 7 ). O coeficiente de variação obtido foi de 27,55%, demonstrando uma pequena variação na distribuição da variável recuperação.

Com relação ao histograma de frequência, o mesmo evidencia dois pontos principais dos valores observados onde a frequência mostra uma distribuição bimodal; com a assimetria negativa ( -1,76 ), ou seja pode-se observar a maior frequência dos dados ou recuperação altos e uma menor frequência de valores baixos ( Fig.18. ) e a curtose de valor 5,47, caracterizando como leptocúrtica (curtose maior que 3) (Tab. 7). Observando a curva de probabilidade normal; podemos notar a concentração ou agrupamento das amostras entre o intervalo de 10 a 95, demonstrando desta forma, a distribuição log-normal da variável recuperação (Fig.19).

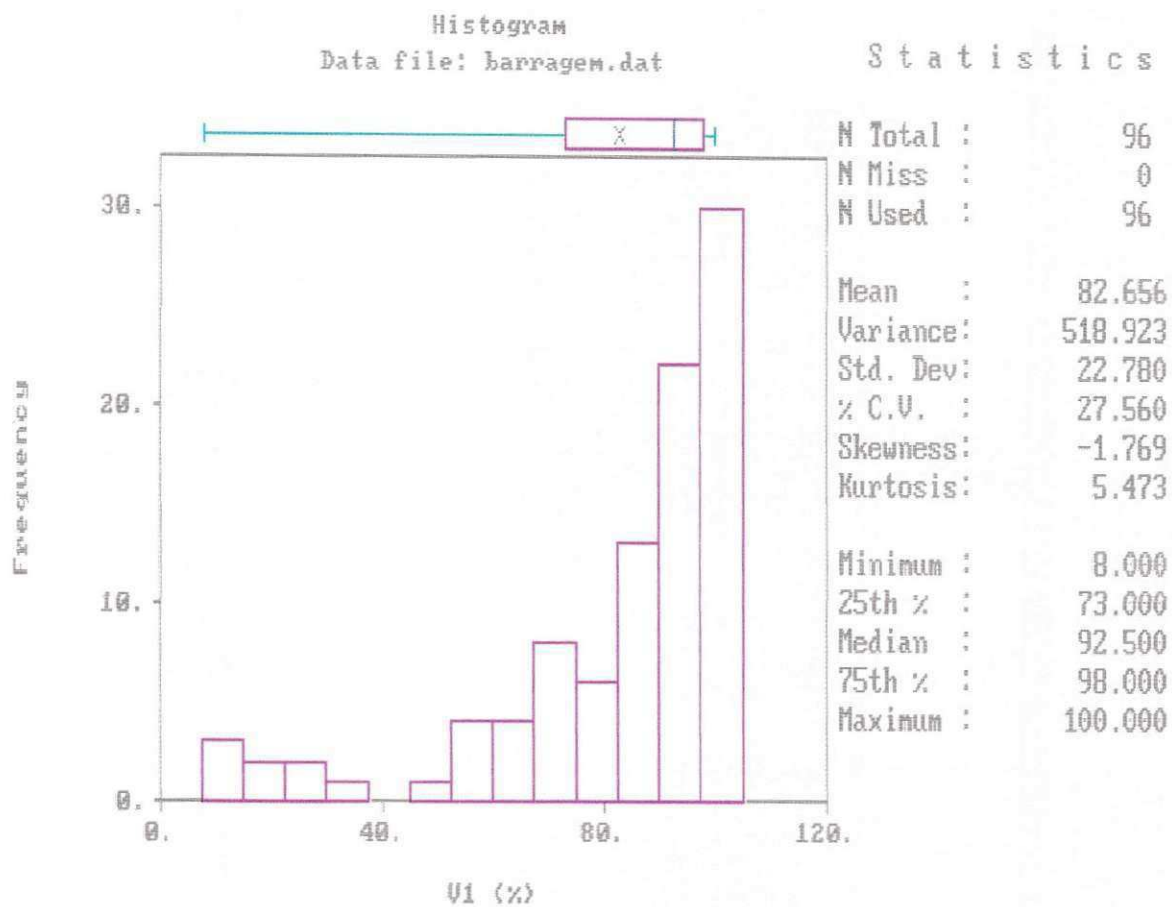


FIGURA 18 - Histograma de frequência simples - Recuperação ( V1 )

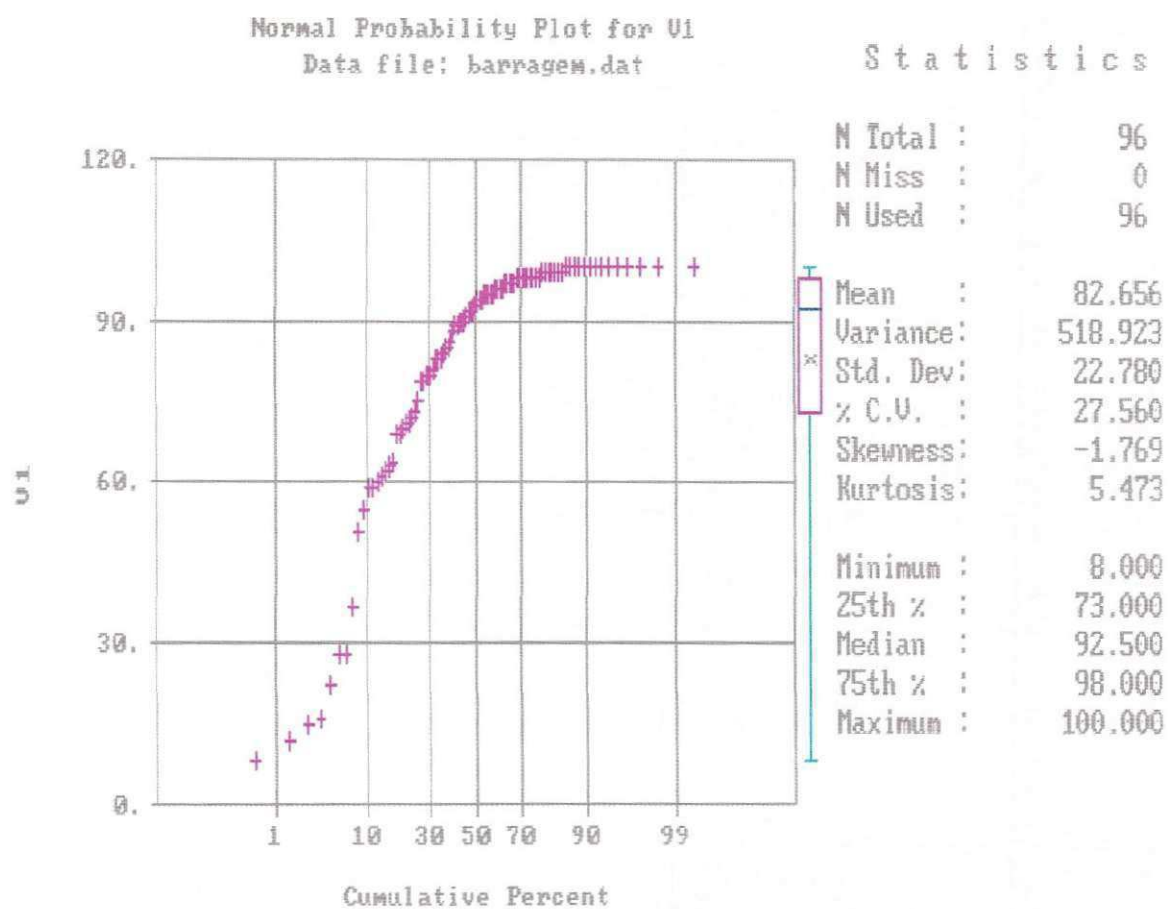


FIGURA 19 - Curva de probabilidade normal - Recuperação (V1)

TABELA 7 - Parâmetros da estatística básica - Variável Recuperação

%	MÉDIA	VARIÂNCIA	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	ASSIMETRA	CURTOSE	NÚMERO DE AMOSTRA
8/100	82,65	518,92	27,56	-1,76	5,47	96

Após a obtenção do histograma, curva de probabilidade normal e os demais resultados iniciais, iniciou-se a elaboração do primeiro variograma experimental com direção  $00^{\circ}$  e ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$  e com a distância entre os pares de amostras definidos em 13,00 e 19,65 m, objetivando observar o comportamento do variograma médio e a presença de estrutura. Observou-se nestes primeiros variogramas, a presença de uma estrutura pouco definida, sem nos proporcionar subsídios estruturais para uma análise mais precisa do variograma, desta forma tratou-se de trabalhar variando direções, ângulos de tolerância e distâncias entre pares de amostras ( Fig. 20 e 22 ). Após muitas tentativas selecionou-se a direção  $00^{\circ}$  com um ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$  ( Fig. 21 ) e procurou-se uma melhor distância entre pares de amostras, de modo que o variograma obtido venha apresentar indícios de uma estrutura evidente.

No sentido de obter uma melhor evidencia estrutural demonstrada pelo variograma experimental, confeccionou-se o mesmo com ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$ , direção de  $0^{\circ}$  e distância entre pares de amostras de 25,67 m. ( Fig. 21 ). Com esta distância conseguiu-se utilizar a maior quantidade de pares de amostras (4.560 ) e o variograma começa a demonstrar presença de uma estrutura. Mesmo considerando este avanço como uma melhora significativa do variograma, não se pode inicialmente aceitá-lo como um variograma definitivo e que traduza toda nossa expectativa em termos estruturais ( Fig. 21 ). No cálculo do alcance o resultado encontrado foi igual a 55 m e a tangente resultante dos primeiros pontos indicam um efeito pepita 150 e a variância de dispersão 250 ( Tab. 8 ). Com esses valores tentou-se ajustar um variograma teórico a partir da estrutura encontrada utilizando os valores de alcance, efeito pepita e variância de dispersão.

TABELA 8 - Parâmetros de variograma - Recuperação

Direção : 00<sup>0</sup>

Tolerância : 90<sup>0</sup>

Distância entre pares de amostras (h)	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito pepita relativo
13,00 m	100	240	20	0,41
19,65 m	100	250	20	0,20
25,67 m	150	300	55	0,50
27,32 m	150	250	35	0,60
30,00 m	150	300	20	0,50

TABELA 9 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ("cross validation")

Direção : 00<sup>0</sup>

Tolerância : 90<sup>0</sup>

Distância entre pares de amostras (h)	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância: Erro	Média de Variância de Krigagem
13,00 m	82,65	518,92	83,03	318,89	0,37	222,01	0,51
19,65 m	82,65	518,92	83,04	320,04	0,38	221,71	0,54
25,67 m	82,65	518,92	82,93	291,38	0,28	229,52	0,19
27,32 m	82,65	518,92	82,92	301,36	0,26	227,10	0,26
30,00 m	82,65	518,92	82,99	312,93	0,33	222,30	0,62

TABELA 10 - Parâmetros de variograma :

Direção : 45°  
Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras ( h )	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito pepita relativo
13,00 m	100	240	20	0,41
19,65 m	150	250	40	0,60
25,67 m	150	300	45	0,50
27,32 m	150	250	35	0,60
30,00 m	120	300	18	0,40

TABELA 11 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ( "cross validation" )

Direção : 45°  
Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras ( h )	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância : Erro	Média de Variância de Krigagem
13,00 m	82,65	518,92	83,03	318,97	0,37	222,01	0,51
19,65 m	82,65	518,92	82,91	297,56	0,25	228,01	0,22
25,67 m	82,65	518,92	82,93	299,63	0,27	227,70	0,25
27,32 m	82,65	518,92	82,92	301,36	0,26	227,10	0,26
30,00 m	82,65	518,92	83,05	320,76	0,39	221,11	0,72



TABELA 12 - Parâmetros de variograma - Recuperação

Direção : 90°

Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras ( h )	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito pepita relativo
13,00 m	100	240	20	0,41
19,65 m	100	300	30	0,33
25,67 m	150	300	65	0,50
27,32 m	150	250	35	0,60
30,00 m	150	300	20	0,50

TABELA 13 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ( "cross validation" )

Direção : 90°

Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras ( h )	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância : Erro	Média de Variância de Krigagem
13,00 m	82,65	518,92	83,03	318,89	0,37	222,01	0,51
19,65 m	82,65	518,92	83,02	323,28	0,37	224,10	0,44
25,67 m	82,65	518,92	82,94	284,93	0,28	231,04	0,15
27,32 m	82,65	518,92	82,92	301,36	0,26	227,10	0,26
30,00 m	82,65	518,92	82,99	312,93	0,33	222,30	0,62



O variograma teórico referente a distância entre pares de 25,67 m foi analisado pela validação cruzada dos dados observados. Os valores encontrados na validação são a média estimada de 82,93 e variância de 291,38, desta forma podemos observar uma aproximação muito grande no diz respeito a média amostral 82,65 e da média estimada 82,93 ( Tab. 9 ). No que diz respeito a variância estimada ( 291,38 ) ficou bem abaixo da variância amostral ( 518,92 ). A diferença entre as médias dos percentuais de recuperação observados e estimados é representada pela média do erro de 0,28 e a variância do erro que alcançou 229,52 (Tab. 9). Conhecidos estes valores, examinou-se a possibilidade de utilizar uma terceira distância entre pares de amostras no sentido de diminuir a variância do erro, pois sabe-se que para um modelo teórico de variograma seja aceitável é necessário diminuir a variância do erro e aproximá-lo quanto mais possível à média de variância de krigagem. A possibilidade da aproximação dessas duas variáveis demonstra que está sendo conseguido um modelo teórico adequado.

No terceiro variograma experimental em evidência, foi mantido o mesmo número de amostras utilizadas no variograma anterior, a direção e o ângulo de tolerância constantes, variando somente a distância entre os pares de amostras. O variograma demonstra a presença de uma estrutura muito semelhante ao anterior ( 25,67 m ) só que muito mais uniforme, cujos resultados levam a concluir que esta nova estrutura com a distância de pares de 27,32 m (Fig. 23) é relativamente melhor que  $h = 25,67$  m (Fig. 22). O variograma teórico calculado a partir desse modelo tem efeito pepita de 150, variância de dispersão de 250 e o alcance de 35 m. A média estimada de 82,92 é muito próxima ou praticamente a mesma da média amostral 82,65 e a variância estimada e a variância do erro diminuíram para 0,26 e 227,10 respectivamente (Tab. 9). É notável que a média da krigagem de 0,26 é maior que a do variograma anterior 0,19, contudo a diferença entre a variância do erro e a média de variância de krigagem reduziu-se, sendo assim um bom indicativo para a escolha final do variograma.

Como é possível perceber, utilizou-se varias alternativas de variogramas objetivando alcançar aquele modelo que apresentasse melhor estrutura, tentando

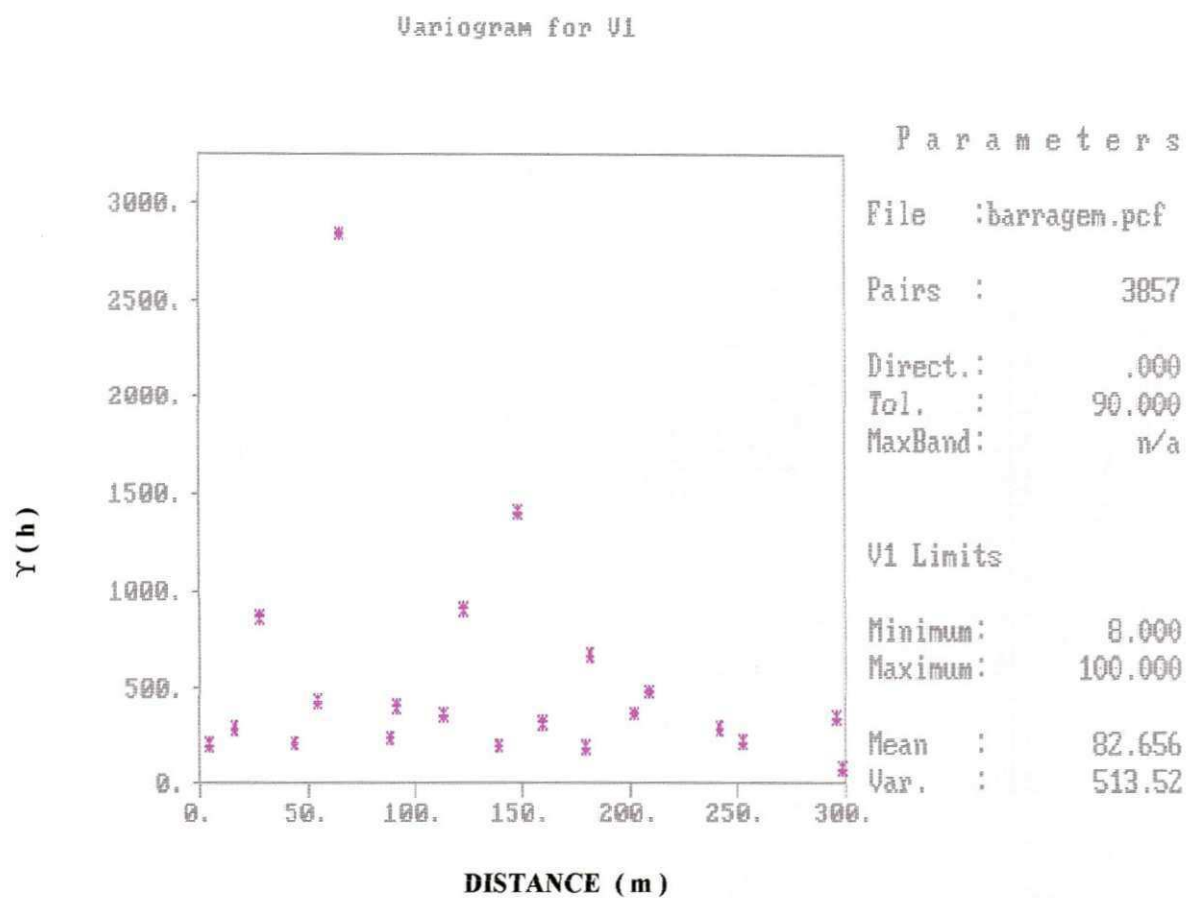


FIGURA 20 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 13,00m - Recuperação (V1)

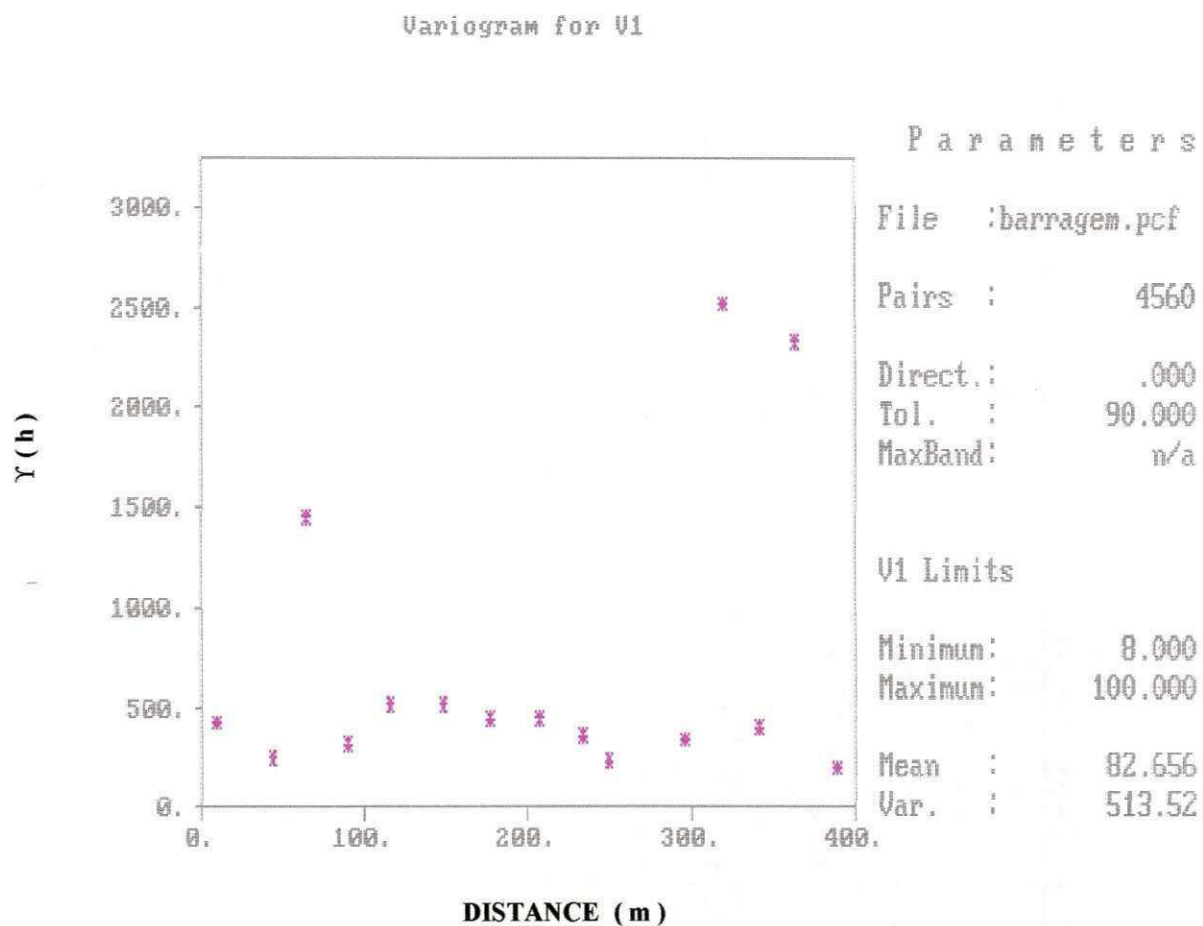


FIGURA 21 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 27,32 m - Recuperação ( V1 )

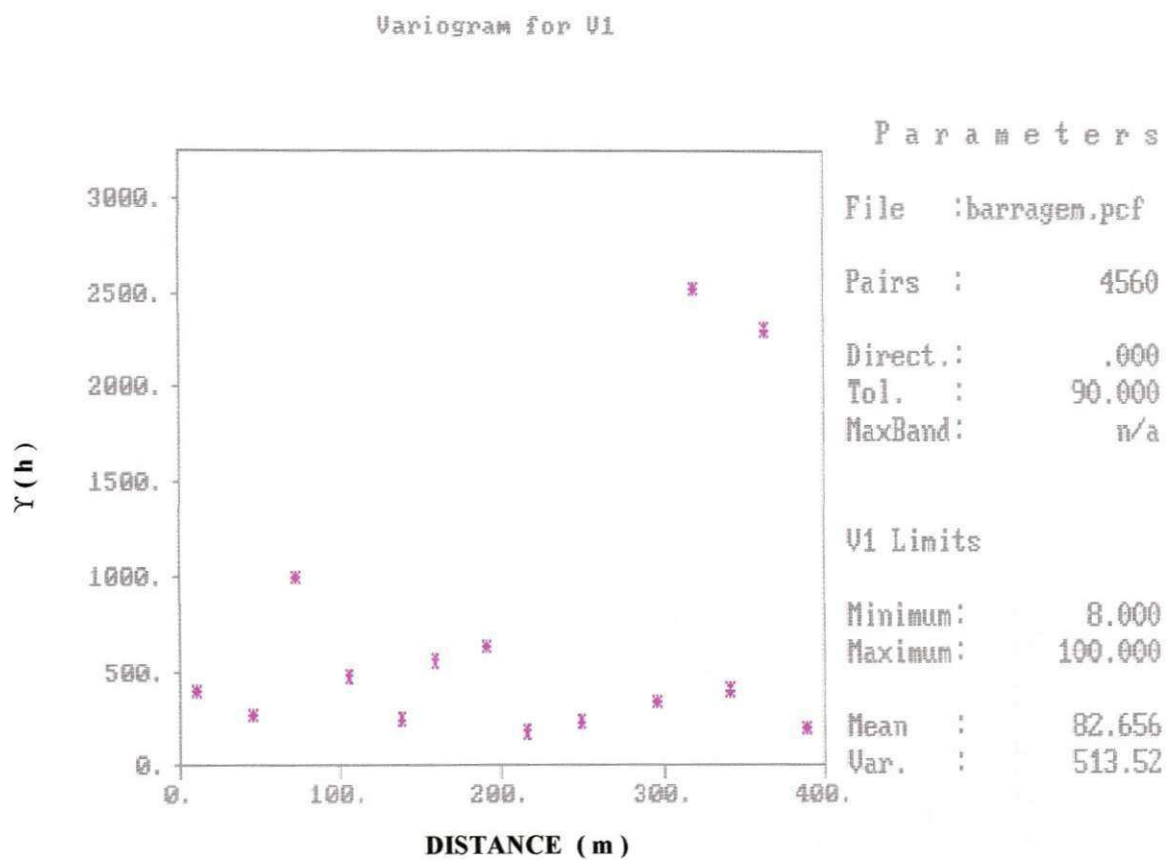


FIGURA 22 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 30,00m - Recuperação ( V1 ).

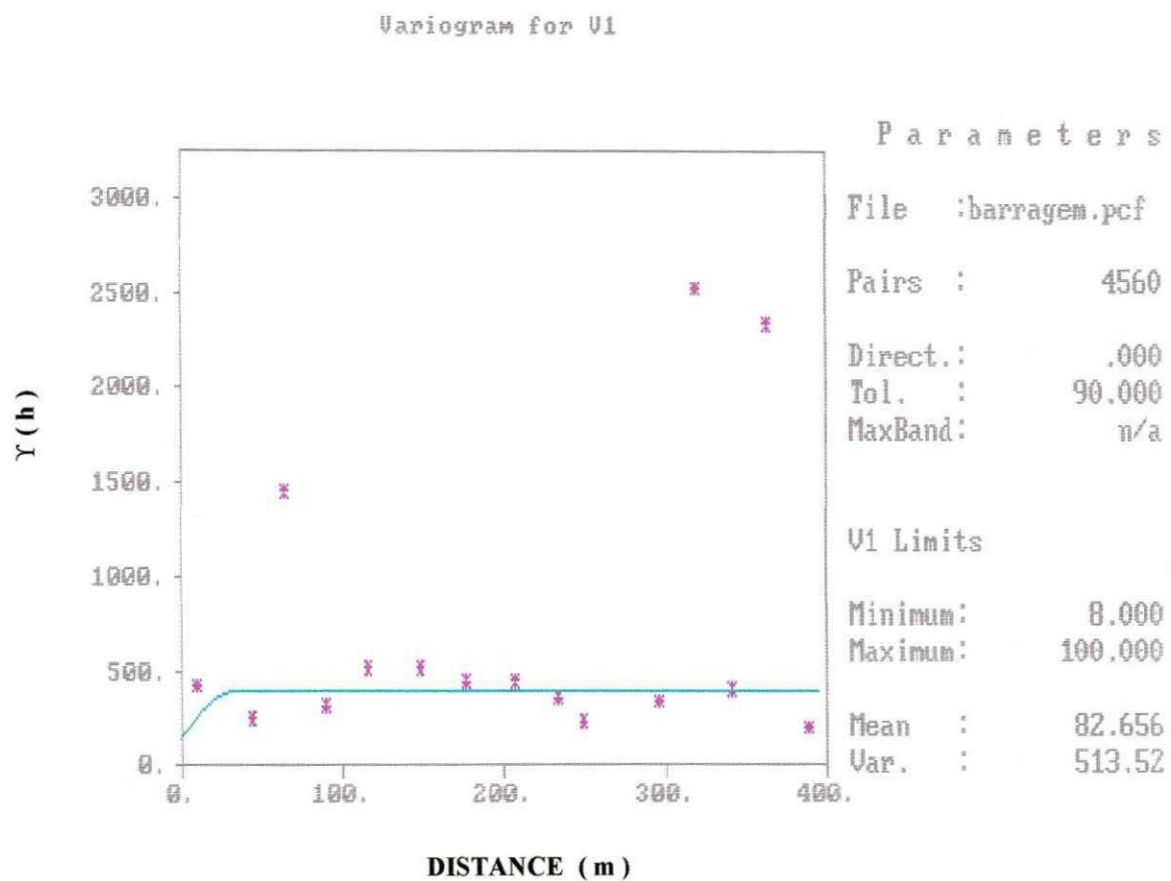


FIGURA 23 - Variograma Teórico de amostras com distâncias entre pares de 27,32 m - Recuperação ( V1 )

várias direções como também vários ângulos de tolerância. Foi possível observar que praticamente em todas as direções, não ocorria mudanças na estrutura do variograma, esta mudança só era percebida quando variava distâncias entre pares, em função desta particularidade, selecionou-se então a direção  $0^{\circ}$  e o ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$  e posteriormente passou a testar os vários incrementos possíveis e passíveis de favorecer o variograma no que diz respeito ao desenvolvimento estrutural.

## 6.2 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO RQD ( V2 )

Com relação a variável V2 ou RQD ( Rock Quality Designation ), foi utilizado o mesmo número de amostras utilizado para a análise variográfica da variável Recuperação ( V1 ), ou seja, 96 amostras. Constatou-se através dos resultados uma média amostral dos valores da variável em estudo ( RQD ) de 36,05%, uma média via de regra considerada muito baixa principalmente quando se leva em consideração os limites inferior ( 0,00 % ) e superior (96,00 % ) como também a classificação geomecânica evidenciada por Bieniawski (1989), que considera um maciço rochoso de qualidade pobre ou fraco, quando o mesmo estiver inserido em uma faixa classificatória entre 25 a 50%. Esta particularidade da variável também é evidenciada, através dos resultados apresentados pela análise estatística, onde a diferença dos valores observados e estimados são apresentados. Entende-se que uma das possíveis explicações para este fenômeno mostrado pela análise estatística, diz respeito ao fato da grande presença, no maciço rochoso, de micros fratura preenchidas, aparentando desta forma um corpo homogêneo. No entanto, quando da execução dos trabalhos de sondagens referente as manobras para retirada do testemunho, se evidencia o

fenômeno de partição do mesmo nestas discontinuidades, fator este que tem reflexo primordial no cálculo do RQD.

A média amostral da variável RQD é 36,05% com uma variância de 740,84 (Tab. 14), uma variação bastante alta e mostrando uma heterogeneidade da rocha que mesmo assim está de acordo com os valores apresentados pela análise estatística pois a mesma fornece a noção de quanto dispersos estão os valores em relação a seu valor médio. O coeficiente de variação foi de 75,49%, um parâmetro considerado alto, visto que o mesmo fornece ou indica o grau de variabilidade do RQD do maciço em questão. Analisando o histograma de frequência, nota-se que o mesmo evidencia vários pontos onde a frequência alcança valores superiores ou de moda, isto nos permite classificá-lo de um histograma com várias modas ou multi-modal com assimetria positiva ( 0,37 ), ou seja existem uma tendência da concentração de valores baixos à esquerda do gráfico enquanto percebemos o oposto para os valores mais baixos, ou seja os valores menores estão concentrados a direita do histograma. Com relação a curtose observamos o valor de 2,16 (Tab. 14) é um valor menor que 3 caracterizando desta forma como platicúrtica.

Observando a curva de probabilidade normal; é possível constatar natureza multimodal com agrupamento das amostra entre o intervalo 0-10, 12-30, 30-90 e 90-99.

TABELA 14 - Parâmetros da estatística básica - Variável RQD

%	MÉDIA	VARIÂNCIA	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	ASSIMETRIA	CURTOSE	NUMERO DE AMOSTRA
0/98	36,05	740,84	75,49	0,37	2,16	96

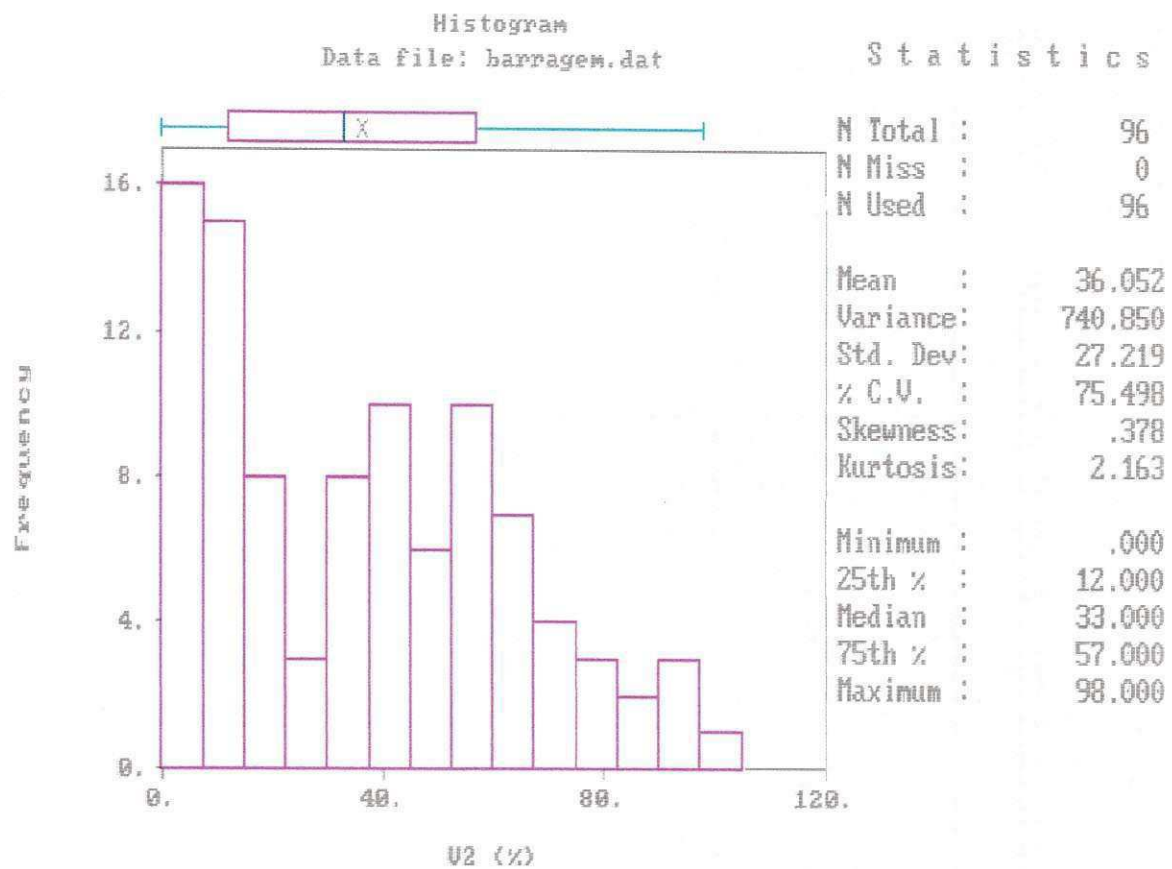


FIGURA 24 - Histograma de frequência simples - RQD (V2)



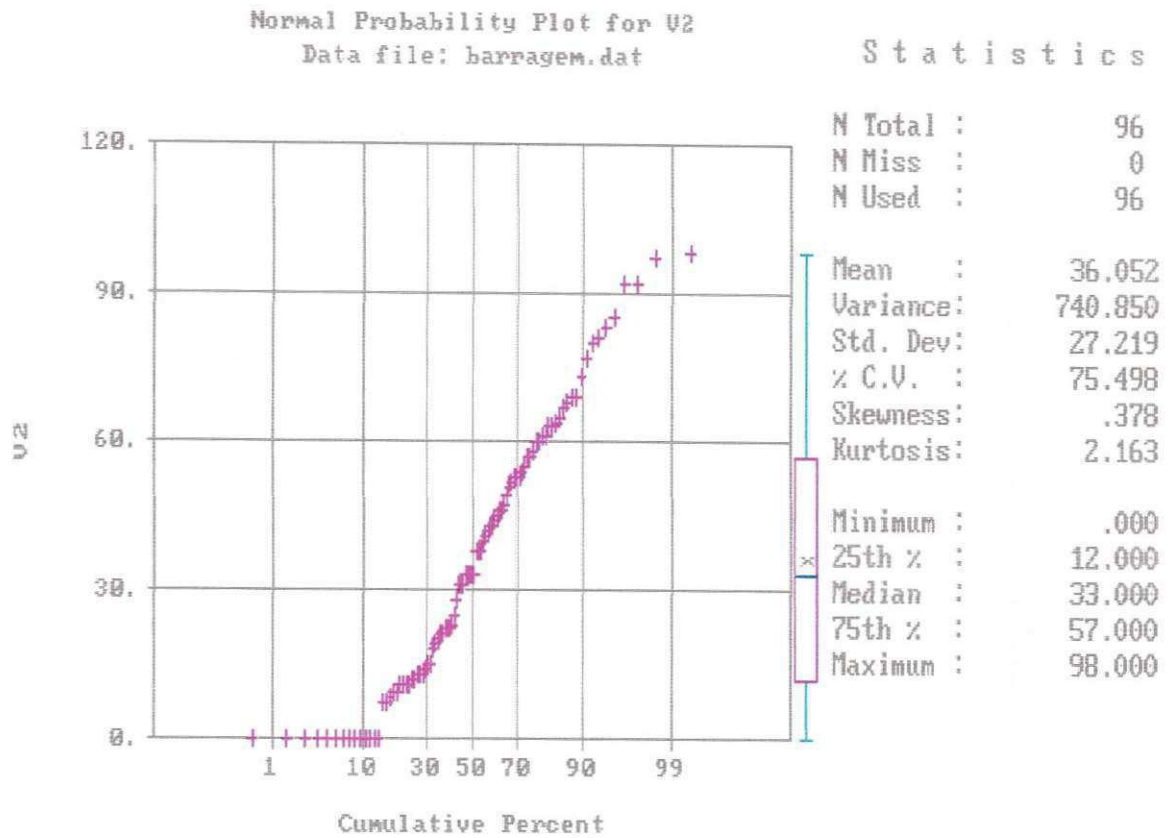


FIGURA 25 - Curva de probabilidade normal - RQD ( V2 )

Assim com a definição do tipo de população e distribuição dos dados iniciou-se a análise variográfica na direção de  $00^{\circ}$  e ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$  e com a distância entre os pares de amostras proporcionado pelo programa, definido em 19,65 m , objetivando desta forma, observar o comportamento das variáveis como também as possíveis ou aparentes presença de estruturas. Nesta oportunidade foi possível observar no primeiro variograma geral, que os pontos representativo dos pares estão dispostos de uma maneira totalmente desordenada, sem proporcionar algum indicio estrutural suficiente para ser analisado (Fig. 26). Desta forma foi necessário testar outras direções, outros ângulos de tolerância e por conseguinte variando também as distâncias entre pares de amostras.

Após fazer várias tentativas com diversas direções e ângulos de tolerância diferentes, selecionou-se para análise, a direção de  $0^{\circ}$  e ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$  e se passou a trabalhar no sentido de selecionar uma melhor distância entre pares de amostras, de modo que o variograma obtido venha apresentar indícios de uma estrutura e que venha favorecer na análise deste mesmo variograma. Para obter um variograma aceitável, utilizou-se vários valores de distancias entre pares ( 10,00 , 19,65 , 30,00 m ) além da distancia 28,50 m pois foi a que melhor mostrou evidência estrutural (Fig. 27). Mesmo sem apresentar avanço na definição da estrutura significativo, foi realizada análise do variograma para a distância de 30,00 m em relação aos parâmetros de variograma, como também a "cross validation" (validação dos dados ).

No cálculo do alcance o resultado encontrado foi de 55 metros e a tangente resultante dos primeiros pontos indicam um efeito pepita de 650 e uma variância de dispersão de 150 (Tab. 15). Com esses valores passou-se a ajustar um variograma teórico a partir do indicio de estrutura encontrada utilizando os valores de alcance, efeito pepita e variância de dispersão. O variograma teórico referente a distância entre pares de 30,00 m foi analisada pela validação dos dados observados. Os valores encontrados na validação são a média estimada de 36,05 e variância de 740,84, desta forma foi possível observar uma boa aproximação da média amostral (36,05) e a média estimada ( 36,80 ). No entanto no que diz

TABELA 15 - Parâmetros de variograma : Variável RQD

Direção : 00°

Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito pepita relativo
10,00 m	450	600	15	0,75
19,65 m	650	100	40	6,50
28,50 m	650	170	60	3,82
30,00 m	650	150	55	4,33

TABELA 16 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ( "cross validation" )

Direção : 00°

Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância: Erro	Média de Variância de Krigagem
10,00 m	36,05	740,85	36,70	332,33	0,65	532,22	1,44
19,65 m	36,05	740,85	36,78	267,32	0,73	541,02	0,02
28,50 m	36,05	740,85	36,80	269,45	0,75	538,70	0,04
30,00 m	36,05	740,85	36,80	269,28	0,74	539,16	0,03

TABELA 17 - Parâmetros de variograma : Variável RQD

Direção : 90°

Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras ( h )	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito pepita relativo
10,00 m	450	600	15	0,75
19,65 m	650	100	40	6,50
28,50 m	650	170	60	3,82
30,00 m	650	150	55	4,33

TABELA 18 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ( "cross validation" )

Direção : 90°

Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras ( h )	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância : Erro	Média de Variância de Krigagem
10,00 m	36,05	740,85	36,70	332,33	0,65	532,22	1,44
19,65 m	36,05	740,85	36,78	267,32	0,73	541,02	0,02
28,50 m	36,05	740,85	36,80	269,45	0,75	538,70	0,04
30,00 m	36,05	740,85	36,80	269,28	0,74	539,16	0,03

TABELA 19 - Parâmetros de variograma : Variável RQD

Direção : 45<sup>0</sup>

Tolerância : 90<sup>0</sup>

Distância entre pares de amostras ( h )	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito pepita relativo
10,00 m	450	600	15	0,75
19,65 m	650	100	40	6,50
28,50 m	650	170	60	3,82
30,00 m	650	150	55	4,33

TABELA 20 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ( "cross validation" )

Direção : 45<sup>0</sup>

Tolerância : 90<sup>0</sup>

Distância entre pares de amostras ( h )	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância : Erro	Média de Variância de Krigagem
10,00 m	36,05	740,85	36,70	332,33	0,65	532,22	1,44
19,65 m	36,05	740,85	36,78	267,32	0,73	541,02	0,02
28,50 m	36,05	740,85	36,80	269,45	0,75	538,70	0,04
30,00 m	36,05	740,85	36,80	269,28	0,74	539,16	0,03

respeito a variância estimada além de ficar bem abaixo (269,28 ) da variância observada ( 740,84 ), assumiu valor muito diferente do observado. A diferença entre as médias dos percentuais do RQD ( V2 ) observada e estimadas é representado pela média dos erro de 0,74 e a variância do erro que alcançou 539,16 (Tab. 16).

Conhecidos estes valores, foi confeccionado um terceiro variograma utilizando uma terceira distância entre pares de amostras no sentido de diminuir a variância do erro. Para que um modelo teórico de variograma seja aceitável é necessário diminuir a variância do erro e aproximá-lo o máximo possível à média de variância de krigagem. A possibilidade da aproximação desses duas variáveis demonstra que está sendo conseguido um modelo teórico adequado ( Garcia Guerra - 1988 ).

No terceiro variograma experimental em evidência, foi mantido o mesmo número de amostras utilizadas no variograma anterior, a direção e o ângulo de tolerância constantes, variando somente a distância entre os pares de amostras. Com a distância entre pares de amostras de 28,50 m, foi possível melhorar a evidência estrutural entre os variogramas apresentados, desta forma a distância mencionada acima foi escolhida e por conseguinte o modelo, para a partir dele se elaborar o variograma teórico. O efeito pepita calculado foi o mesmo valor do variograma anterior, a variância de dispersão 170 e o alcance de 60 m. A média estimada é a mesma do variograma anterior ( 36,80 ), no entanto o parâmetro que melhorou foi a aproximação entre variância do erro e a média da variância de krigagem, tornando-se desta forma um bom indicativo para a escolha final do variograma (Tab. 16).

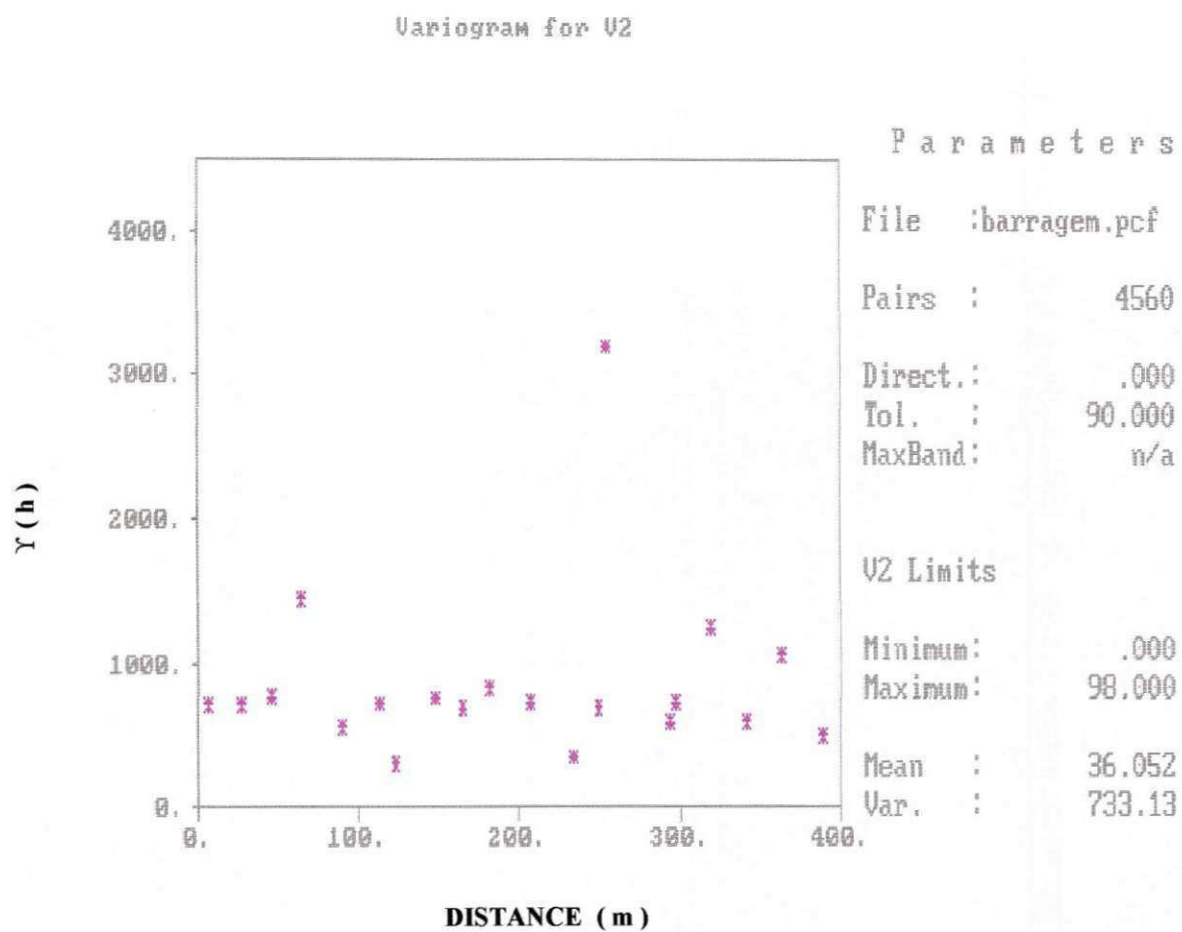


FIGURA 26 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 19,65 m - RQD ( V2 )

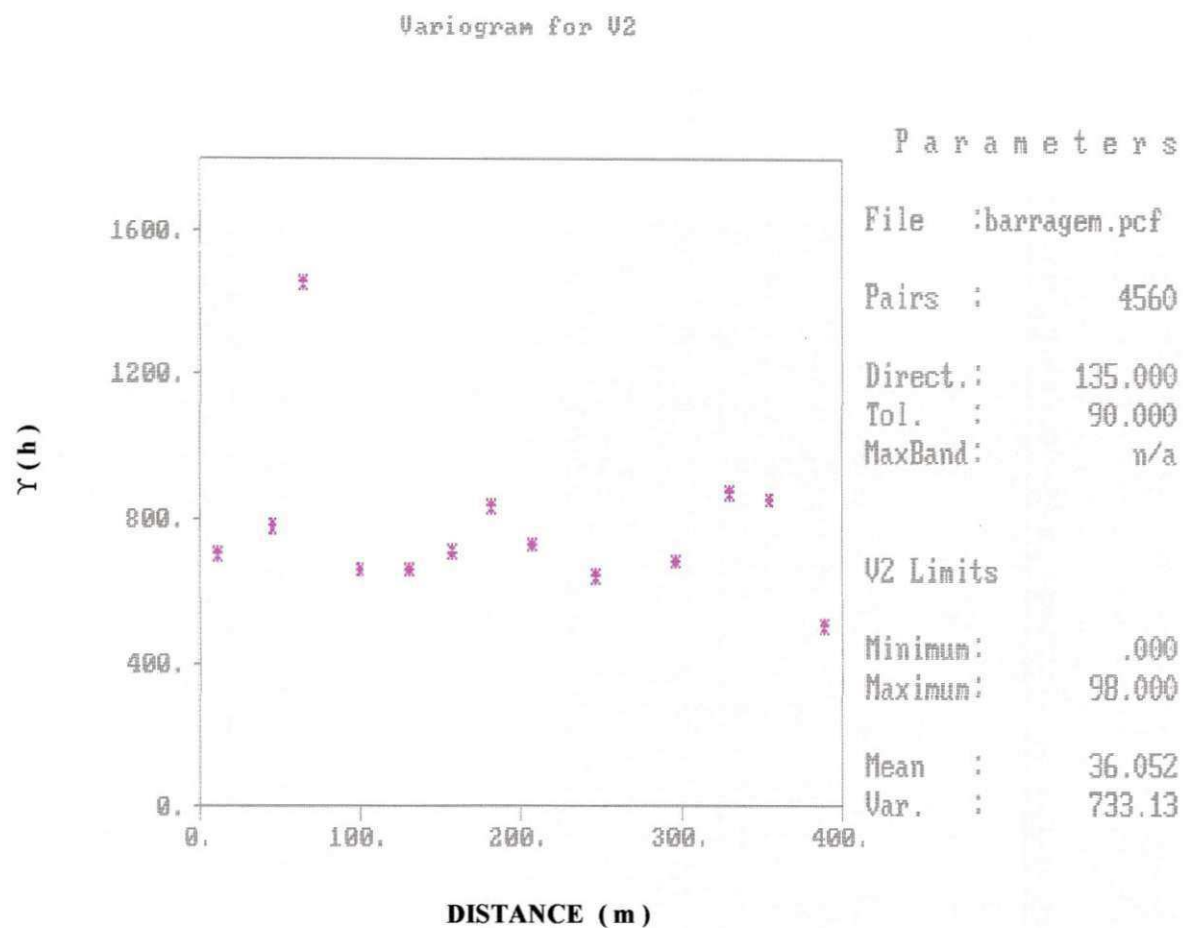


FIGURA 27 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 28,50 m - RQD ( V2 )



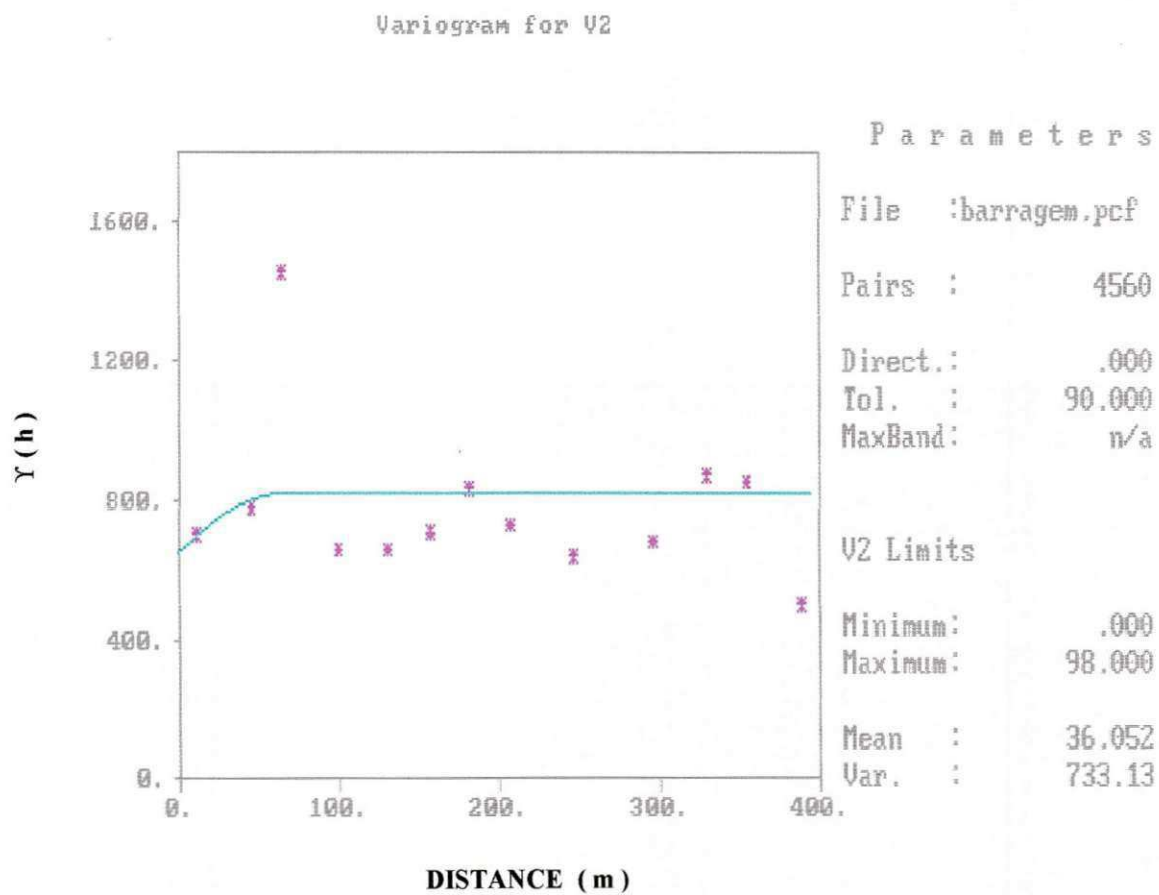


FIGURA 28 - Variograma teórico de amostras com distâncias entre pares de 28,50 m - RQD ( V2 )

### 6.3 ANÁLISE VARIOGRÁFICA DO ENSAIO DE PERDA D'ÁGUA ( V3 )

Para análise da variável vazão ( V3 ), levou-se em consideração o mesmo número de amostras utilizado nas análises variográficas de outras variáveis, ou seja um total de 96 amostras, recolhidas dos vários trechos recuperados dos furos de sondagens, dispostos na malha projetada. Constatou-se por meio dos resultados uma média de 25,35 l/m com a variância de 1101.64 (Tab. 21). Com relação a média, pode-se perceber que é um valor considerado alto em função dos critérios de absorções defendidos por Lugeon (1933), ou seja o autor considera o maciço rochoso passivo de ser injetado, quando o mesmo obtiver uma absorção superior ao intervalo de 1,0 - 3,0 l/min/m/10 atm. Existem um grande número de outros autores que também defendem seus critérios e condicionantes de classificação de absorções máximas para os maciços rochosos. O coeficiente de variação de 130,93 é relativamente alto e demonstra o grau de variabilidade da variável vazão. O histograma de frequência apresenta várias modas (multi-modal), com alguns espaçamento entre as modas, este fenômeno é evidenciado em função talvez da falta de amostras com esses valores, ou em outras palavras a não absorção por parte do maciço rochoso nesses intervalos; sua assimetria é positiva de valor 0,98 e a curtose com valor 2,13 caracterizando como platicúrtica (curtose < 3 ) (Fig. 29). Com relação a curva de probabilidade normal pode-se identificar dois grupos de amostras, uma concentração maior entre os valores de 0 a 30 e uma concentração menor acima do valor 60, intercalados por um espaço sem a presença de amostras (Fig. 30).

Se faz necessário uma ressalva com relação aos parâmetros de referência mostrados neste tópico no que diz respeito a unidade lugeon. Esta unidade é resultado da absorção avaliada em l/min/m sob uma pressão de 10 kg/cm<sup>2</sup> . É necessário salientar, que quando da realização do ensaio de perda d'água, trabalha com no mínimo três pressões diferentes, em outras palavras as pressões

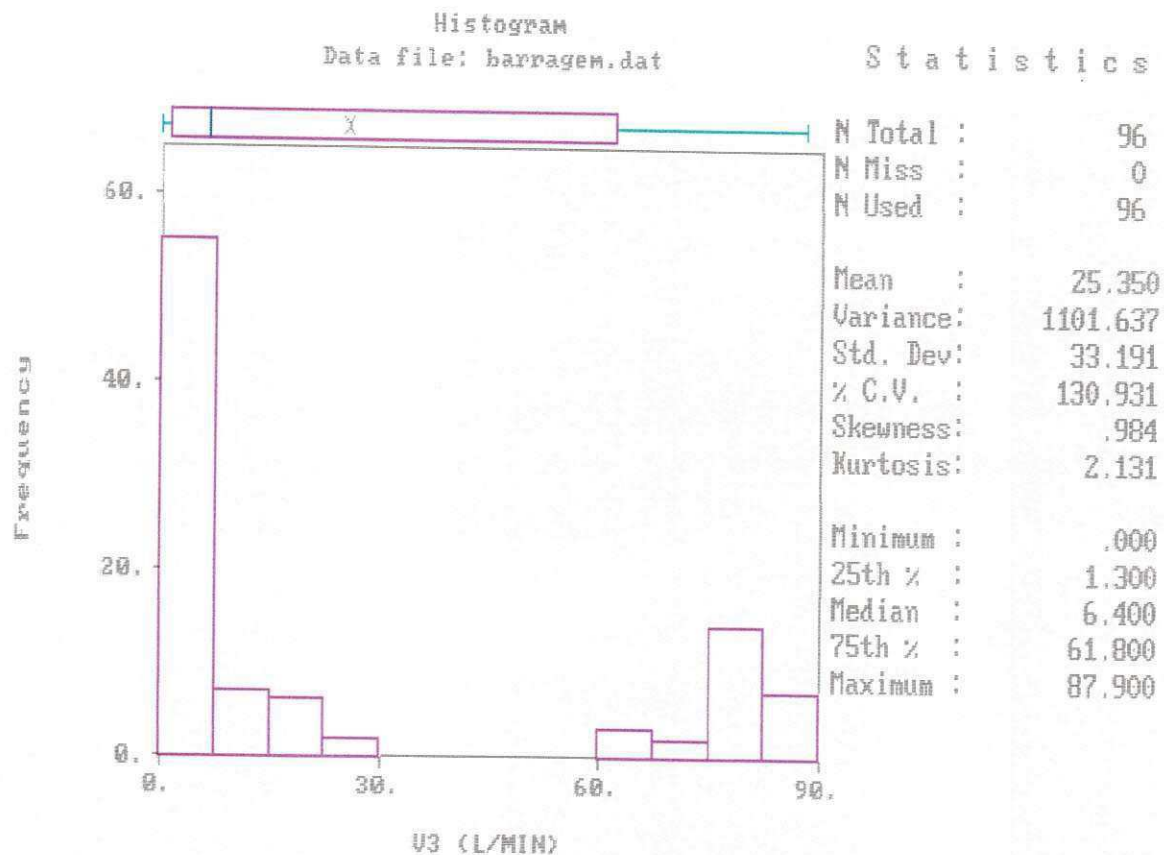


FIGURA 29 - Histograma de frequência simples relativa - Vazão ( V3 )

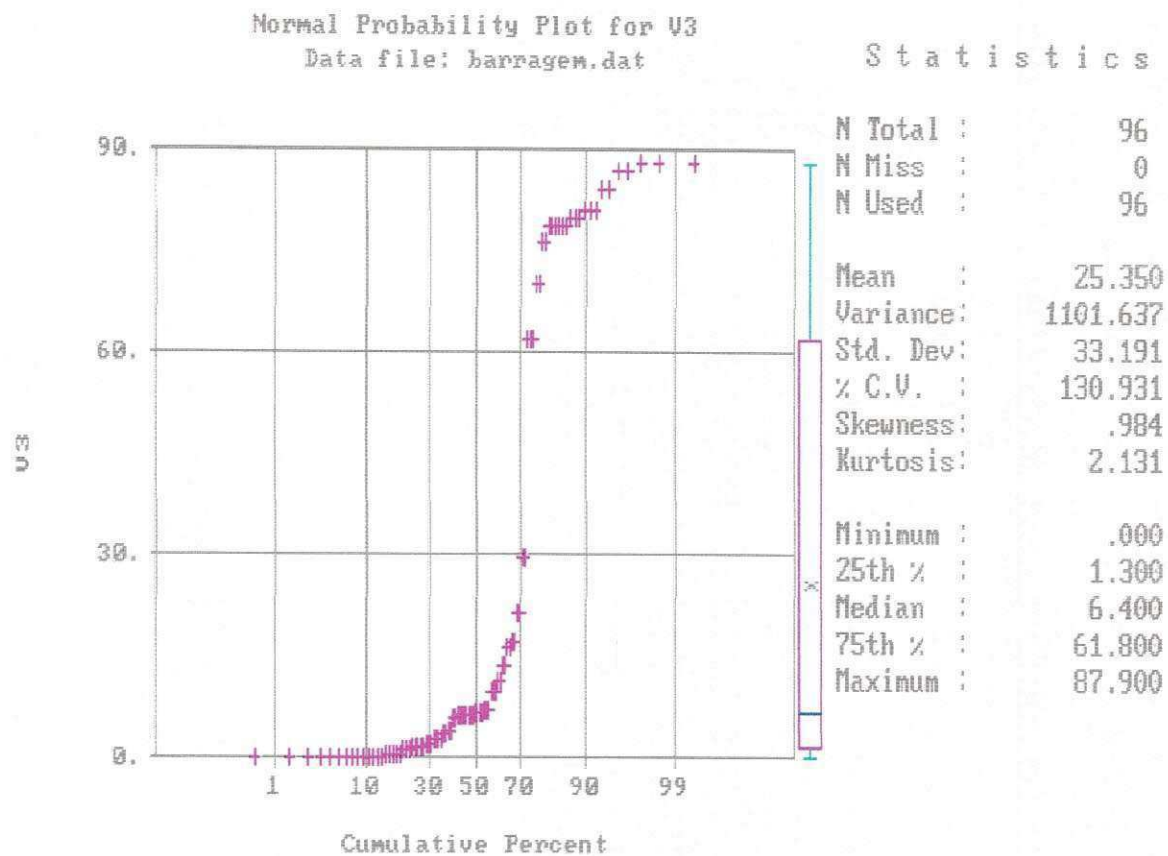


FIGURA 30 - Curva de probabilidade normal - Vazão ( V3 )

usadas nos cálculos dos ensaios, dependendo da profundidade, não conhecerá com a pressão usada na unidade lugeon.

TABELA 21 - Parâmetros da estatística básica - Variável Vazão

L/M	MÉDIA	VARIÂNCIA	COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	ASSIMETRIA	CURTOSE	NÚMERO DE AMOSTRAS
00/87.9	25,35	1101,64	130,93	0,98	2.13	96

Após a obtenção do histograma, curva de probabilidade normal e os demais resultados iniciais, iniciou-se a elaboração do primeiro variograma experimental com direção  $00^{\circ}$  e ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$  e com a distância entre os pares de amostras definidos em 19,65m, objetivando observar o comportamento do variograma médio e a presença de estrutura. Observou-se neste primeiro variograma, a presença de estrutura pouca ou quase sem definição, sem proporcionar subsídios estruturais suficientes para uma análise precisa do variograma, desta forma tratou-se de trabalhar com outras direções, com outros ângulos de tolerâncias e por conseguinte variando as distâncias entre pares de amostras. Após muitas tentativas variando direções, ângulos de tolerâncias e distâncias entre pares de amostras, selecionou-se para análise a direção  $00^{\circ}$  com ângulo de tolerância de  $90^{\circ}$  e com distâncias entre pares de amostras de 43,90 metros. Neste intervalo de distância entre pares de amostras e nesta direção conseguiu-se a melhor estrutura variográfica. apresentadas por todos os valores analisados e propostos(Fig. 32). Fixada a distância entre pares de amostras ( $h=43,90$  m ), passou-se ao cálculo do variograma teórico a partir desse modelo. O

TABELA 22 - Parâmetros de variograma - Vazão

Direção : 00°  
Tolerância : 90°

Distância entre pares de amostras ( h )	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito Pepita Relativo
15,00m	40	80	25	0,50
19,65m	50	150	30	0,33
43,90m	50	950	170	0,05
45,00m	200	1100	60	0,18

TABELA 23 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ( "cross validation" )

Direção : 00°  
Tolerância : 90°

Distâncias entre pares de amostras ( h )	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância: Erro	Média de Variância de Krigagem
15,00m	25,35	1.101,57	25,22	1.022,72	-0,12	64,48	0,12
19,65m	25,35	1.101,57	25,20	1.025,28	-0,14	60,37	0,22
43,90m	25,35	1.101,57	25,21	1.027,20	-0,14	58,06	0,27
45,00m	25,35	1.101,57	25,21	1.024,64	-0,13	61,62	0,84

TABELA 24 - Parâmetros de variograma - Vazão

Direção : 90<sup>0</sup>

Tolerância : 90<sup>0</sup>

Distância entre pares de amostras ( h )	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	Efeito Pepita Relativo
15,00m	40	80	25	0,50
19,65m	50	150	30	0,33
43,90m	50	950	170	0,05
45,00m	200	1100	60	0,18

TABELA 25 - Parâmetros estatísticos da validação dos dados ( "cross validation" )

Direção : 90<sup>0</sup>

Tolerância : 90<sup>0</sup>

Distâncias entre pares de amostras ( h )	Média Observada	Variância Observada	Média Estimada	Variância Estimada	Média : Erro	Variância : Erro	Média de Variância de Krigagem
15,00m	25,35	1.101,57	25,22	1.022,72	-0,12	64,48	0,12
19,65m	25,35	1.101,57	25,20	1.025,28	-0,14	60,37	0,22
43,90m	25,35	1.101,57	25,21	1.027,20	-0,14	58,06	0,27
45,00m	25,35	1.101,57	25,21	1.024,64	-0,13	61,62	0,84

variograma demonstra a presença de uma estrutura muito semelhante a calculada para a distância  $h = 45,00$  metros, inclusive todos os variogramas calculados nesse intervalo, possuem estruturas parecidas, no entanto quando calculado para  $h = 43,90$  m, pode-se perceber uma estrutura mais uniforme (Fig. 32). O variograma teórico calculado a partir desse modelo tem efeito pepita, de 50, variância de dispersão de 950 e o alcance de 170 m, ou seja um alcance superior aos demais calculados, permitindo concluir que com este modelo a influência de uma amostra sobre as demais suplanta em muito os outros modelos apresentados (Fig. 34). A média estimada de 25,21 é muito próxima ou praticamente a mesma da média amostra 25,35 e embora o valor obtido pela média de variância de krigagem é relativamente maior entre os variograma apresentados, a variância do erro é a menor apresentados por todos os modelos (Tab. 23). Outro fato que deve ser levado em conta é justamente a aproximação de valores entre o erro da variância (58,06) e a média de variância de krigagem, considerando desta forma um bom indicativo na escolha final do modelo do variograma (Tab. 23).

É óbvio que foi experimentada varias alternativas de variogramas, objetivando alcançar ou conseguir aquele modelo que apresente uma melhor estrutura variográfica, tentando-se várias direções como também vários ângulos de tolerância. Em nenhum variograma direcional ocorreu mudanças de estrutura variográfica e a mudança só foi percebida quando variava a distância entre pares. Em função desta particularidade passou-se a perseguir aquela distância entre pares (  $h$  ) que melhor influenciasse estruturalmente o variograma, chegando desta forma ao variograma final apresentado na figura 34.



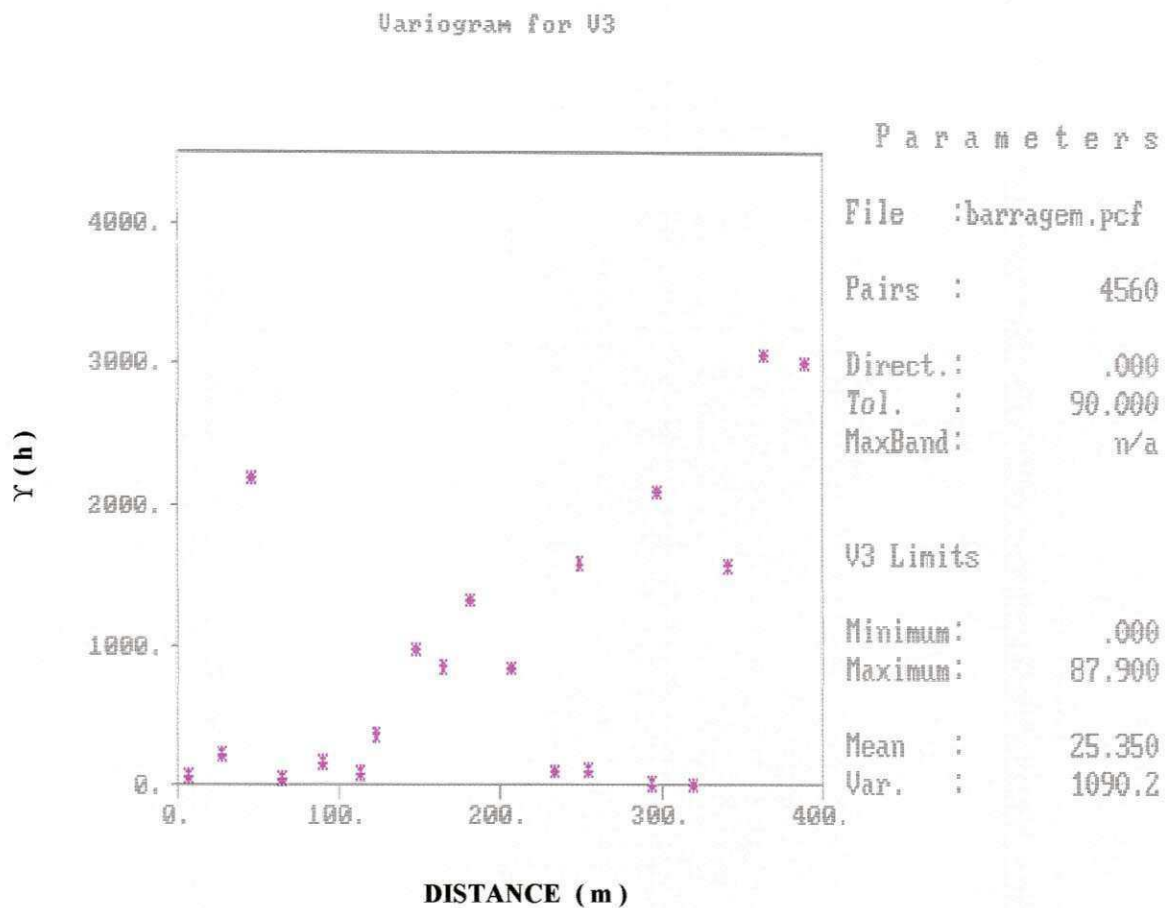


FIGURA 31 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 13,00m - Vazão - V3

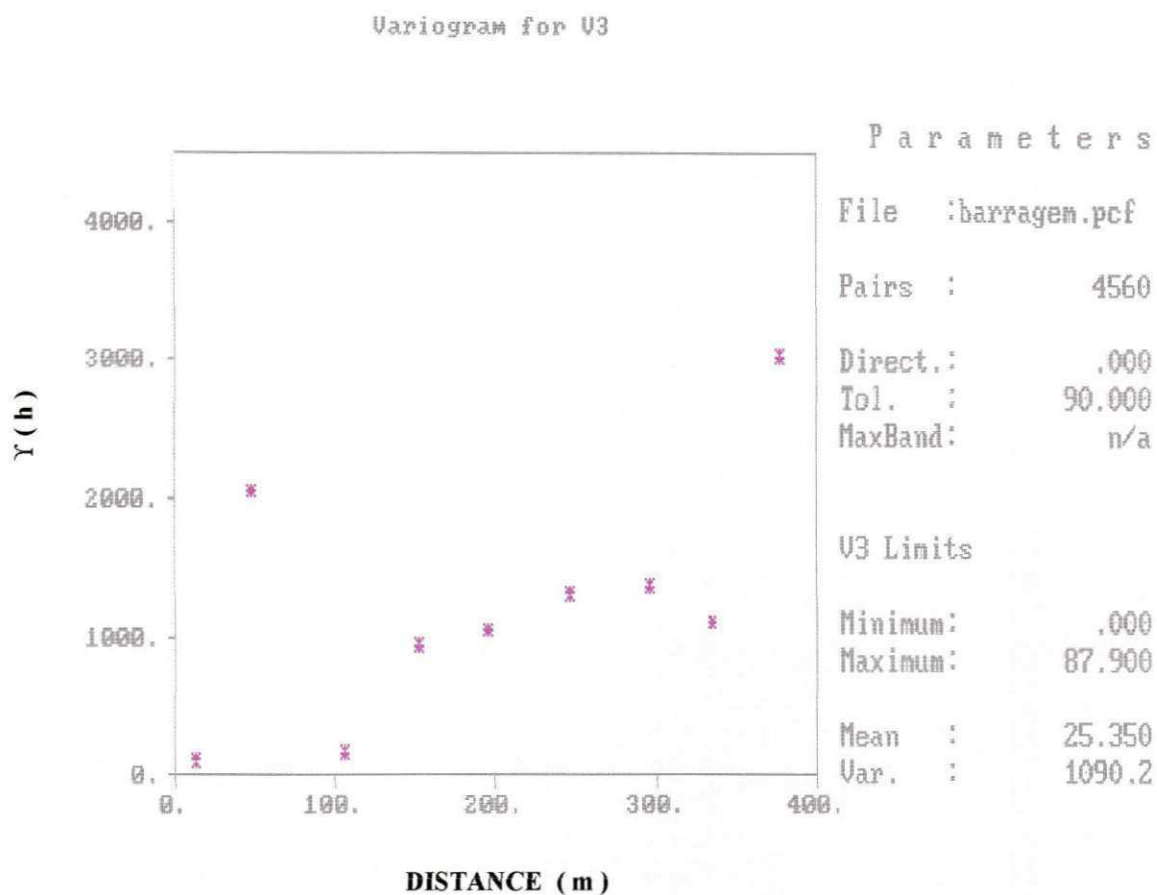


FIGURA 32 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 43,90m - Vazão - V3

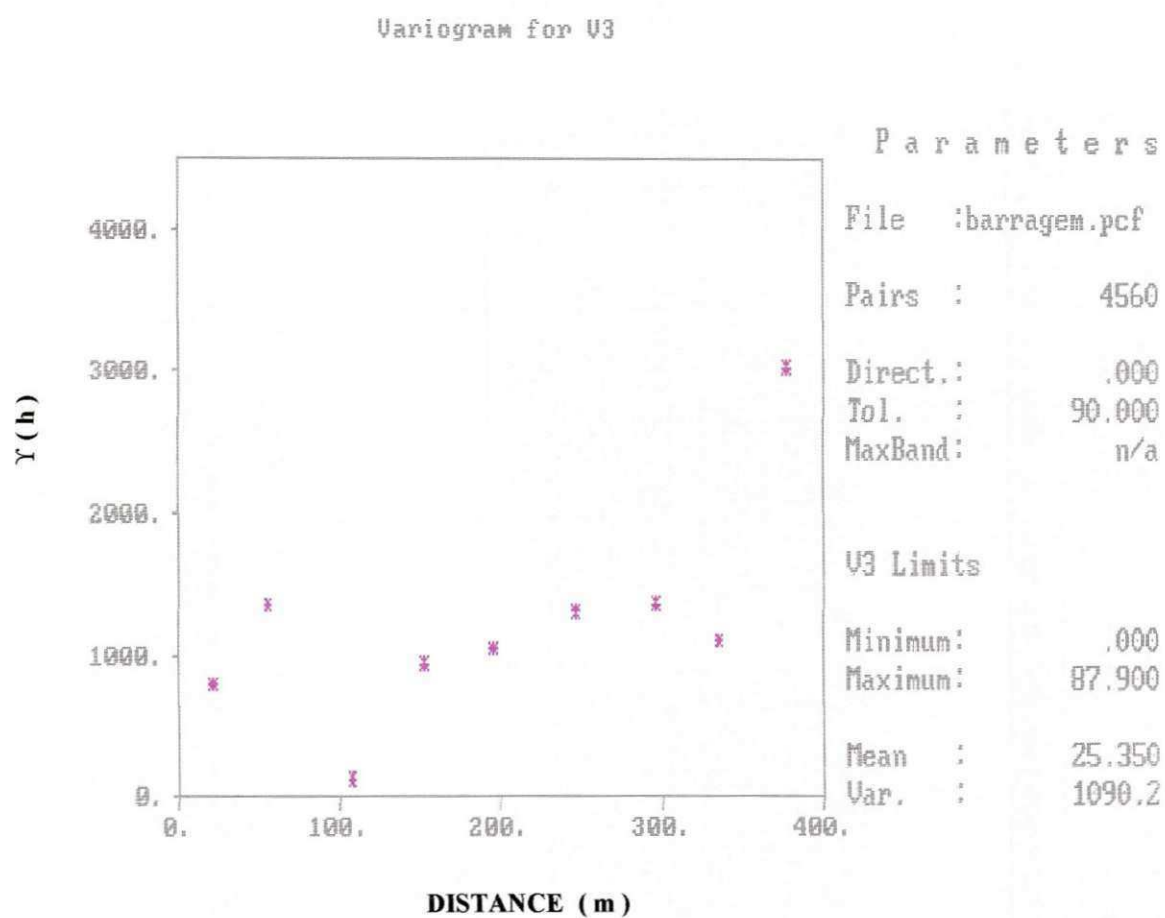


FIGURA 33 - Variograma de amostras com distâncias entre pares de 45,00m - Vazão - V3

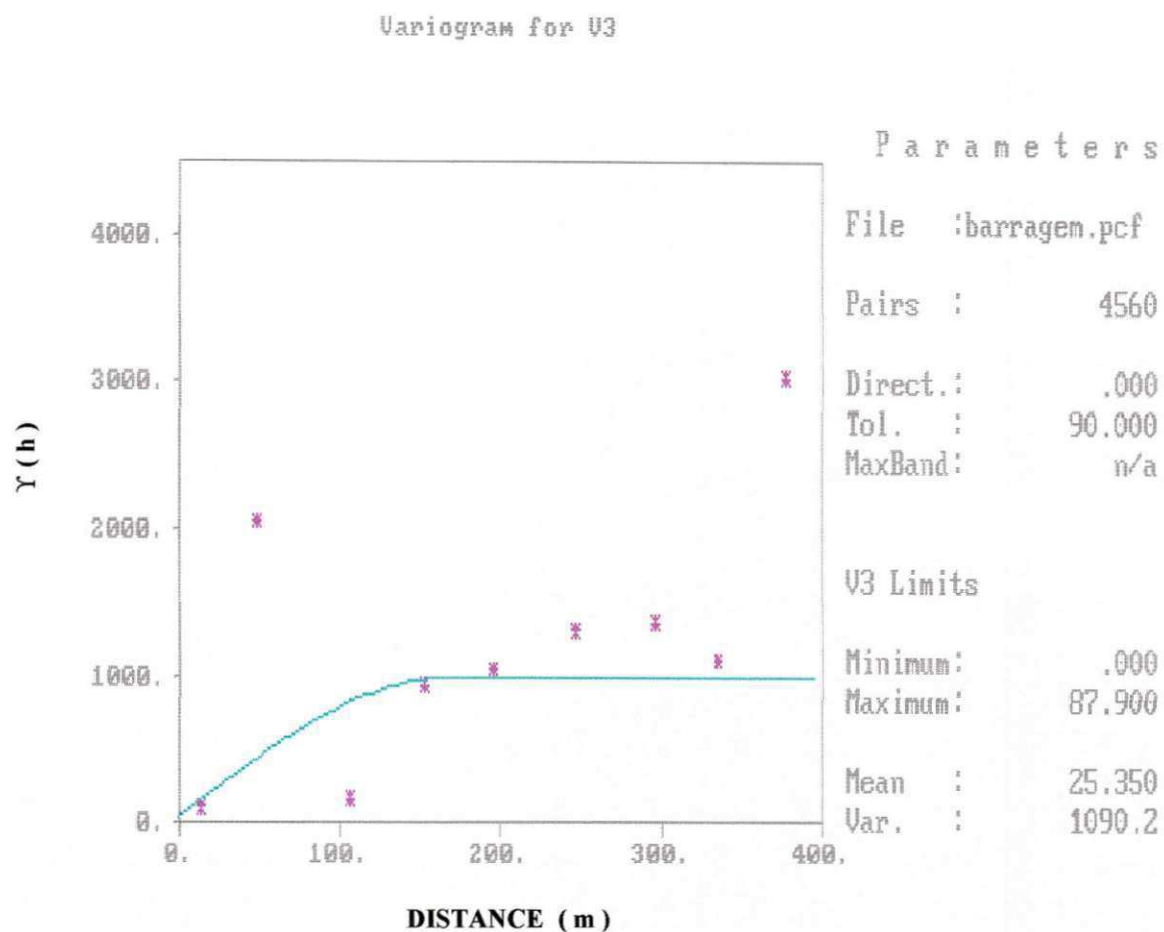


FIGURA 34 - Variograma Teórico com distâncias entre pares de amostras de 43,90m - Vazão - V3

## 7. DISCUSSÃO

### 7.1 - RECUPERAÇÃO

Entende-se que vários fatores contribuem para que elevados percentuais de recuperação sejam conseguidos, estes fatores começam a afetar diretamente o processo de coleta de testemunho desde uma manobra mal executada, a utilização de equipamentos sem condição de funcionamento e se estende até as peculiaridades geológicas que fazem parte do maciço rochoso como os elementos estruturais ( xistosidade, falha, fraturas, etc ), grau de alteração da rocha e outros. Segundo Chiossi ( 1983 ), existe uma relação entre o percentual de recuperação e o estado de alteração da rocha. Isso significa que rochas inalteradas fornecem uma recuperação de 95% a 100%; rochas muito alteradas ou fraturadas fornecem uma recuperação em torno de 50%. Entre elas, pode-se estabelecer uma escala completa de proporcionalidade. As figuras de 5 a 16 mostram furos com variações verticais de recuperação e nota-se que em geral a recuperação aumenta com a profundidade com exceção de alguns testemunhos.

Considerando os parâmetros de classificação e fazendo um paralelo principalmente com a média amostral encontrada ( 82,65 ) pode-se dizer que o maciço rochoso da barragem do Castanhão recebe uma pequena contribuição de parte do maciço que sofreu algum tipo de alteração, e que este reflexo é sentido em função da média amostral como também a média estimada, ficarem abaixo do intervalo proposto pela classificação para rochas ditas inalteradas. Merece ressaltar também que pela descrição dos furos de sondagem e pelos perfis apresentados, existe uma tendência de aumento no percentual de recuperação a partir do momento em que se penetra na sub-superfície do maciço rochoso. É importante salientar que embora o maciço rochoso tenha sido analisado

considerando a sua homogeneidade usando o variograma em varias direções, o comportamento variográfico permaneceu inalterado, permitindo desta forma concluir que a área estudada é portadora de um fenômeno regionalizado isotrópico, ou seja, a variável em estudo não depende ou varia com a direção.

## 7.2 - RQD

Diversas alternativas foram utilizadas na elaboração de variogramas objetivando alcançar modelo que apresentasse uma organização e/ou continuidade na distribuição de RQD na área pesquisada. Na elaboração tentou-se varias direções, como também ângulos de tolerância e foi possível observar que em todas as direções, não ocorria mudanças na estrutura do variograma. A mudança na estrutura só foi percebida quando variou as distâncias entre pares, em função desta particularidade, selecionou-se então a direção e o ângulo de tolerância e posteriormente se passou a testar os vários incrementos possíveis e passíveis de favorecer o variograma no que diz respeito ao desenvolvimento estrutural

Quando se investiga o RQD, perceber-se a estreita relação existente entre este parâmetro e o parâmetro recuperação. A variação vertical do RQD é observada nas figuras de 5 à 16. Neste trabalho as duas variáveis foram pesquisadas principalmente em função da importância dos dados adquiridos. No capítulo anterior se discutiu a variável recuperação e se percebeu claramente os vários fatores que diretamente ou indiretamente afetam no processo de coleta do testemunho. É importante salientar também que grande parte desses fatores exercem influencia significativa quando do cálculo do RDQ. Pode-se dizer que a diferença básica entre a Recuperação e RQD está ligado diretamente no que diz respeito a questão do cálculo. No cálculo do RQD, de todo testemunho

recuperado, os comprimentos superiores a 100 mm são considerados para obtenção do RQD, este conceito difere em parte do conceito de recuperação, pois na recuperação todo o testemunho recuperado é usado no cálculo. De imediato por esta diferença básica pode-se perceber dois pontos importantes apresentados pela análise variográfica: Em primeiro, lugar nota-se um valor aparentemente alto da média amostral conseguido pela variável recuperação e em segundo lugar o baixo valor da média amostral encontrado com relação variável RQD. Este baixo valor apresentado, demonstra de uma maneira bem realista, os baixos índices que foram encontrados quando do cálculo do RQD para os diversos trechos dos furos de sondagem, com isto pode-se fazer algumas conclusões no que diz respeito ao comportamento do maciço rochoso. Mesmo considerando que nos vários furos acontecem recuperações com valores expressivos, não acontece por parte da variável RQD este mesmo acompanhamento de valores, sendo isto reflexo da grande incidência de micro fratura preenchidas. Isso resulta em uma alta recuperação e baixos valores conseguidos com RQD. Outro fator que de certa forma também contribuiu para se chegar a esta média amostral pouco expressiva da variável RQD, foi em função do maciço rochoso ser constituído por um conjunto de rochas polimetamórficas bastante heterogênea, proporcionando assim planos de fraqueza que resulta, na subdivisão do testemunho ocasionando desta forma com frequência, a presença de testemunhos com tamanho inferior 100 mm. Além desses fatores mencionados acima, outros fatores como manobras excessivamente curtas e o estado de manutenção do equipamento de sondagem, também contribuem de forma direta para que aconteça a subdivisão do testemunho recuperado.

Com o objetivo de enquadrar os maciços rochosos estudados dentro de uma classificação geomecânica, Bieniawski ( 1989 ) usou parâmetros mecânicos e definiu que após o cálculo do RQD, se o percentual calculado fosse menor do que 25% esta rocha seria considerada de qualidade muito fraca. Por outro lado, se esta mesma análise apresentasse um valor que estivesse contido no intervalo entre 90-100%, a rocha segundo Bieniawski, pode ser considerada de excelente qualidade. Os demais intervalos propostos são 75-90% boa qualidade, 50-75%

qualidade moderada e 25-50% de qualidade fraca. Considerando esta classificação e os resultados encontrados na análise variográfica principalmente no que diz respeito a média amostral ( 36,05% ), é possível perceber que este valor está compreendido no intervalo no qual as rochas são consideradas de qualidade fraca. É importante salientar que os valores resultantes da análise variográfica quando inseridos na classificação proposta por Bieniawski traduz na realidade o comportamento e a natureza do maciço rochoso. Também é necessário ressaltar que este estudo variográfico foi realizado com dados coletados de furos de sondagens localizados em uma faixa do maciço rochoso e que é descrita no início de nosso trabalho, ou seja os valores encontrados são válidos para amostras coletadas nesta faixa considerando seus respectivos alcances.

### 7.3 - VAZÃO

O alto valor da média amostral de 25,35% é muito marcante para vazão nesse maciço. Isto deixa transparecer que se está diante de uma região onde o maciço rochoso é totalmente fraturado. No entanto se for observada as absorções verificadas, pode se notar que existe uma certa incidência em maior grau, de absorções na parte inicial dos furos ou em furos e trechos isolados. Nota-se também que a partir do momento em que os ensaios se aproximam da rocha se acontece uma diminuição progressiva das absorções.

No maciço rochoso, a absorção d'água ocorre essencialmente pelas fendas. A matriz, a rocha sem fissura, pode ser praticamente considerada impermeável, no entanto a geologia regional como também a local é constituída de rochas metamórficas precambrianas e que possui a particularidade de serem entrecortadas por intrusões ígneas de rochas básicas e ácidas, resultando em



anomalias em alguns furos com grande absorções. Também é aparente que as altas absorções de alguns trechos de determinados furos puxaram a média amostral para cima, proporcionando uma média de 25,35. Isso pode ser observado por exemplo que a sondagem mista SM-18 (Fig. 14), executada na borda lateral do páleo canal, apresentou valores de perda d'água específica elevados, com perda d'água total sem registro de pressão desejada em toda a extensão do furo em rocha.

Pode ser observado que a vazão apresenta uma grande variação aleatória dentro do mesmo furo e entre furos. O coeficiente de variação desta variável de 130,9% mostra elevada irregularidade do comportamento dos trechos ensaiados, em comparação com a variável RQD. Entretanto não foi detectada nenhuma estrutura variográfica da variável vazão para nenhuma direção, tolerância ou distância entre pares. Isso leva a concluir que os valores de vazão obtidos não refletem um valor natural da rocha mas influenciadas por altos valores localizados, principalmente nos furos da borda do páleo canal, introduzindo assim considerável variação aleatória. Em função dessas particularidades , pelas absorções verificadas , levando em conta principalmente o conceito de maciço permeável (se absorver mais de uma unidade lugeon ) e pelo resultado da análise variográfica verificada neste local, pode se dizer que é uma área que necessita de tratamento de fundação em função de todos os resultados apresentados.

## 8. CONCLUSÕES

I. É importante salientar que o objetivo inicial deste estudo, era trabalhar com dados colhidos ao longo de todo maciço rochoso onde estava posto o barramento. No entanto em função da pouca quantidade de furos dispostos para sondagens ao longo do mesmo, fez com que a escolha, fosse direcionada para a área do eixo do canal do rio, onde se centralizava a maior quantidade de furos de sondagens, portadores de uma quantidade razoável de dados suficientes para suprir as necessidades básicas deste estudo

II. O valor baixo da média amostral da variável RQD, indica a grande influência exercida pela presença considerável de micro-fraturas preenchidas e planos de partições ou fraqueza da rocha. Este fenômeno é percebido de uma maneira mais real, principalmente quando se compara as médias amostrais entre as variáveis Recuperação e RQD.

III. A média amostral ( 25,35 l/min ) da variável vazão é considerada alta em função principalmente do conceito de maciço estanque ( regra lugeon ), um maciço é considerado estanque e não será injetado se absorver menos de uma unidade lugeon. O que na realidade elevou o valor da média amostral da vazão, foi determinados trechos de alguns furos e principalmente os furos localizados na borda do páleo canal nos quais ocorreram vazão total da bomba.

IV. Pela amostragem apresentada dos furos de sondagem e também pelos perfis apresentados percebe-se uma forte tendência no sentido do aumento do percentual de recuperação a partir do momento em que se penetra na sub-superfície do maciço rochoso, permitindo concluir que a incidência maior de

fraturamento e micro-fraturamento é um fenômeno que ocorre preferencialmente na superfície.

V. Para todas as variáveis estudadas foram realizadas suas respectivas análise variográficas em diversas direções e ângulos de tolerâncias e o que se descobriu, foi a não alteração do comportamento variográfico, permitindo desta forma considerar a área estudada como portadora de fenômeno regionalizado isotrópico, em outras palavras a variável em estudo não depende da direção.

VI. A média estimada através de krigagem de validação cruzada ( "cross validation"), das variáveis estudadas, ficou próxima da média amostral (observada). Entretanto a variância estimada é menor do que a variância observada, deixando desta forma a evidente demonstração da ineficiência de estimação pelo método de krigagem simples dos pontos ou amostras, devido a alta heterogeneidade dos valores encontrados, principalmente observada na variável ensaio de perda d'água.

VII. A média encontrada para a variável recuperação ( 82,65% ), é uma média que demonstra o homogeneidade aparente do maciço rochoso, ou seja esta média não está inserida no intervalo considerado para rochas ditas inalteradas (95/100% ), como também no intervalo de rochas muito alteradas ( 50% ), isto é possível em função das próprias particularidades do maciço rochoso, onde não são apresentados indícios de excessivo fraturamento, ou de rocha sã.

VIII. Os resultados obtidos para os alcances, mostram que todos eles possuem valores inferiores ao espaçamento usado para a malha de furos que é 70 m. Isto permiti concluir, considerando o conceito de alcance ( Garcia Guerra - 1988 ), que o valor utilizado como espaçamento na sondagem não está muito distante do intervalo proposto pelos respectivos alcances de cada variável, mesmo assim o valor usado pela malha ( 70 m ) faz com que as amostras não exerçam influência uma sobre as outras, estando pois as mesmas, inseridas num ambiente de pura

aleatoriedade, justificando desta forma os valores encontrados neste trabalho de 35 m para a variável recuperação e 60 m para a variável RQD.

---

## 9. BIBLIOGRAFIA

---

ARAÚJO, M. Z. T. *Barragem do Castanhão - Projeto e aspecto de construção*. I Forum interamericano de gestão dos recursos hídricos, p. 21. Fortaleza ( 1997 ).

ASILOMAR CONFERENCE GROUNDS - *Foundations for dams, geotechnical engineering division, asce* - United State committez on large dams, pacific gove, Califórnia ( 1974 ).

AGUASOLOS / HIDROTERRA. *Relatório dos serviços geotécnicos complementares*. 09 p. Fortaleza ( 1997).

ANDRADE R. M. *Mew technidque for the determination of the hydraulic properties of rock masse*. Engevix. Rio de janeiro ( Brasil ) ( 1987 ).

ASCE. *Preliminary glossary of terms relating to grouting*. Committee on grouting of the geotechnical engineering division, asce; journal of geotechnical engineering. GT-7, 15581, p. 803-815 ( 1980 ).

BUREAU OF RECLAMATION. *Cement grout flow behavioux in fratured rock*. Repodrte rec-erc 87-7, p. 51 ( 1987 ).

CASAGRANDE, ARTHUR. *Control of seepage through foundations na abutment of dams*. Geotechnique, vol II, número 3, tradução, p. 161 a 182. São Paulo ( 1961 ).

DEERE, D. V. *Dams on rock foundations - some design questions*. Rock engineering for foundations and slopes. Proc. spe conf. On geot. Eng. Division, Asce Boulder, Colorado, vol 2, p. 55-86 ( 1976 ).

ELSWORTH D. AND GOODMAN R. E. *Characterisation of rock fissure hidráulica conductivity using idealized wall roughness profiles*. Int. j. rock mech. min. Sci. e geomech. abstr. 23, p. 233-243, ( 1986 ).

E. HOEK E E. T. BROWN. *Underground excavations in rock*, 527 p. London, 1980.

ERNEST E WAHLSTRON. *Develoments in geotechnical engineering*, 6. Dams, Dam foundations, na reservoir sites, chapter 10, p. 233-266, New York, 1974.

GEONORTE - *Engenharia de solos e fundações Ltda*. Apresentação do relatório dos serviços geotécnicos na barragem do castanhão, em alto santo, Ceará. Fortaleza, 1997, p. 01/05, anexo A, des. 01, anexo D, des. 71 ao 88, anexo F des. 92 ao 131.

GRAF, E. ET AL. *Chemical grout curtains at mountain dams*. In issues in dam grouting, asce, p. 92-103 ( 1985 ).

GLOSSOP R. *The invention and developmente of injetion processes*. Geotechnique 10, p. 91-100 ( 1960 ); 11, pp. 255-279 ( 1961 ).

HIRSCHFELD, RONALD C. AND STEVE J. POULOS. *Embasndment - Dam engineering*, vol Casagrande, Winchester-Massachusetts ( 1972 ).

HASSLER L. *The influence of flow geometry on the interpretation of lugeon teste and the choice of grout material and grouting method*. Proc. Of the conf. On grouting. In rockand concrete, Salzburg, Austria. A. A. Balkema ( 1992 ).

INT. JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND MINING SCIENCE E GEOMECH, Abstr. Vol 33. Número 8, p. 803-842. Great Britain ( 1996 ).

ISAAKS E SRIVASTAVA. *An introduction to applied geoestatistic*. Editora Oxford Univ. Press, 1989, 591p.

JOURNEL, A. G. E HUIJBREGTS, CH. J. *Mining Geoestatistic*. Centre de Geoestatistique, Fointainebleau, France. Academic Press, London, New York, San Francisco, 1978, 600p.

LUIS C. *A study of grounddwater flow in jointed rock and its influence on the stability of rock masse*. Rock mech. res. rep. nr. 10 imp. College, London ( 1969 )

LONG, J. C. S. AND WITHERSPOON P.A. *the relationship of interconnection to permeability in fracture networks*. J. geophys. Res. 90, 3087 - 3087 ( 1985 ).

LOMBARDI, G. *The hole of cohesion in cement grouting of rock*. 15<sup>th</sup> icold. Congress, lausanne, vol. III, p. 235 - 261 ( 1985 ).

NONVEILLER, E. *Grouted cut off curtains in fissured rock*. Int. symp. On rock mechanics, Madrid IV. 3, p. 389-400 ( 1968 ).

SHROFF A. V. AND SHAH D. L. *Grouting technology in funnelling and dam construction*. A A. Balkema, Rotterdam ( 1993 ).

SILVA, CARLOS A. REIS. *Emprego das injeções de calda de cimento no tratamento de fundação de barragem*. Trabalho apresentado no IV encontro técnico, Goiânia, 1991, 26p.

SABARLY, F. *Les injections et les drainages de fondations de barrages en roches peu permeables*. Géotechnique, tradução vol. XVIII, número 2, p.229-249, São Paulo (1968).

SHROFF A. V. AND SHAH D. L. *Grouting technology in funnelling and dam construction*. A A. Balkema, Rotterdam ( 1993 ).

THOMAS, HENRY H. *The engineering of large dams part 1 . Foundations, chapter 8,* p. 169 206, London ( 1976 ).

WAHLSTRON, ERNEST E. *Dams, dam foundations, na reservoir sites. Developments in geotechnical engineering.* New York ( 1974 ).



**10. ANEXOS**

10.1 - Resultados do variograma elaborado, com as especificações das quantidades de pares, distâncias médias e estimadas computadas entre pares de amostras.

Variável : Recuperação

VALORES:           Mínimo: 8%                   Máximo: 100%

DIREÇÃO: 00°           ÂNGULO DE TOLERÂNCIA: 90°

ESTIMADOR:       Variograma           TOTAL DE PARES: 4.560

TABELA 26 - Resultados da variável recuperação

Nº	PARES	DISTÂNCIA MÉDIA	ESTIMADA
1	732	10.657	424.440
2	714	44.616	255.216
3	81	64.699	1456.080
4	168	90.522	318.714
5	272	116.439	517.529
6	499	149.111	518.628
7	440	177.370	442.330
8	379	207.539	447.851
9	56	234.047	360.688
10	258	250.034	236.928
11	258	296.648	340.376
12	114	320.472	2519.206
13	277	342.229	402.446
14	144	364.340	2333.792
15	168	390.305	202.899

10.2 - Resultados do variograma elaborado, com as especificações das quantidades de pares, distâncias médias e estimadas computadas entre os pares de amostras.

Variável : RQD.

VALORES:           Mínimo: 0%                   Máximo: 98%

DIREÇÃO: 00°           ÂNGULO DE TOLERÂNCIA: 90°

ESTIMADOR:       Variograma           TOTAL DE PARES: 4.560

TABELA 27 - Resultados da variável RQD

Nº	PARES	DISTÂNCIA MÉDIA	ESTIMADA
1	770	11.537	705.903
2	679	45.582	781.267
3	78	65.081	1454.686
4	299	100.239	660.485
5	322	130.995	661.783
6	451	158.124	709.132
7	307	181.962	836.101
8	379	207.539	730.736
9	314	247.183	643.871
10			
11	258	296.648	684.653
12	258	330.454	876.426
13	277	355.736	855.596
14	168	390.305	504.884

10.3 - Resultados do variograma elaborado, com as especificações das quantidades de pares, distâncias médias e estimadas computadas entre os pares de mostras.

Variável : Ensaio de perda d'água.

VALORES: Mínimo: 0 L Máximo: 87.90 L  
 DIREÇÃO: 00° ÂNGULO DE TOLERÂNCIA: 90°  
 ESTIMADOR: VARIOGRAMA TOTAL DE PARES: 4.560

TABELA 28 - Resultados da variável ensaio de perda d'água

Nº	PARES	DISTÂNCIA MÉDIA	ESTIMADA
1	859	14.169	116.574
2	668	49.011	2060.218
3	440	103.543	172.030
4	632	152.827	944.400
5	686	196.093	1056.939
6	314	247.183	1317.271
7	258	296.648	1369.791
8	391	335.885	1113.604
9	312	378.321	3035.381

#### 10.4 - Conceitos básicos usados na dissertação

- **GEOESTATÍSTICA:** Refere-se a aplicação da Teoria das Variáveis Regionalizadas na resolução de problemas de Geologia e Mineração.
- **VARIÁVEIS REGIONALIZADAS:** Função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade. Isto é, são variáveis cujos valores são relacionados de algum modo com a posição espacial que ocupam.
- **ANISOTROPIA:** Característica essencial da variável regionalizada refere-se a que pode existir uma direção privilegiada ao longo da qual os valores não variam de forma significativa, em quanto que isto acontece ao longo de outra direção.
- **VARIOGRAMA:** Ferramenta matemática que permite, estudar a dispersão natural das variáveis regionalizadas.
- **VARIOGRAMA EXPERIMENTAL OU OBSERVADO:** Variograma obtido a partir do conjunto de amostras derivadas da amostragem realizada.
- **VARIOGRAMA VERDADEIRO:** É o variograma real do depósito, e é sempre desconhecido.
- **VARIOGRAMA TEÓRICO:** É um variograma de referência.
- **EFEITO PEPITA:** São as variações locais ou em pequena escala como erro de análise, amostragem etc.

- **ALCANCE:** Corresponde a idéia de zona de influência de uma amostra. Ele marca assim o início a partir da qual um ponto da variável em estudo não tem mais influência sobre o ponto vizinho.
- **PATAMAR:** Marca o valor da variância total em estudo.
- **COEFICIENTE DE VARIAÇÃO:** Indica o grau de variabilidade do depósito.
- **VARIÂNCIA:** Fornece a noção de quanto dispersos estão os valores em relação a seu valor médio.
- **VARIÂNCIA DE DISPERSÃO:** Representa as diferenças espaciais entre os valores de uma variável tomada em dois pontos separados por distâncias cada vez maiores.
- **ÂNGULO DE TOLERÂNCIA:** Área estudada nas quais as amostras coletadas estão restritas a um ângulo de cobertura.

10.5 - Equipamento básico para ensaio de perda d'água

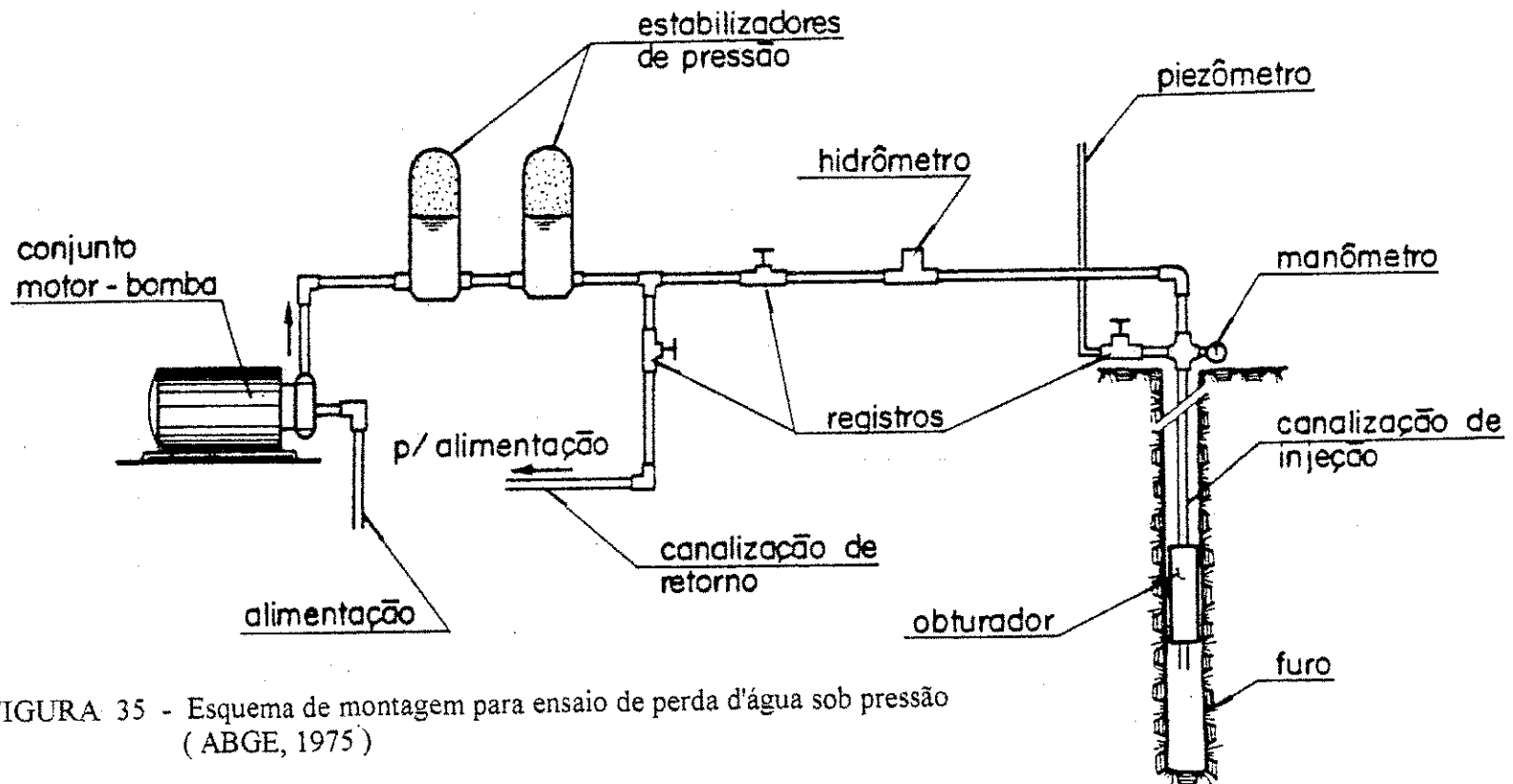


FIGURA 35 - Esquema de montagem para ensaio de perda d'água sob pressão (ABGE, 1975)