



**Campus de São Carlos**

VERIFICAÇÃO DA EFICÁCIA DOS SISTEMAS  
DE VEDAÇÃO E DRENAGEM EM FUNDAÇÕES  
DE BARRAGENS DE CONCRETO

AUTOR: SILVIA DELATTRE LEVIS

ORIENTADOR: PROF. DR. TARCÍSIO BARRETO CELESTINO

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**



**ESCOLA DE ENGENHARIA  
DE SÃO CARLOS**



SILVIA DELATTRE LEVIS

**Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e  
drenagem em fundações de barragens de concreto**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia  
de São Carlos da Universidade de São Paulo para  
obtenção do título de Mestre em Geotecnia.

Área de Concentração: Mecânica das Rochas  
Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino

São Carlos  
2006

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

L666v Levis, Silvia Delattre  
Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto / Silvia Delattre Levis. -- São Carlos, 2006.

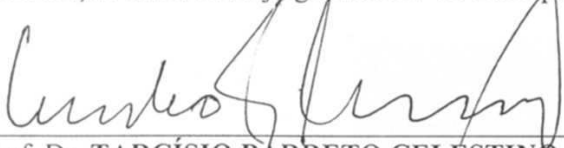
Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 2006.  
Área:Geotecnia.  
Orientador: Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino.


1. Subpressão. 2. Cortina de injeção. 3. Drenagem.  
4. Fundação de barragem de concreto. 5. Método de Monte Carlo. 6. Eficácia. 7. Confiabilidade. I. Título

FOLHA DE JULGAMENTO

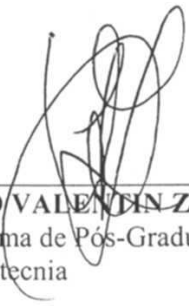
Candidata: Engenheira **SILVIA DELATTRE LEVIS**


Dissertação defendida e julgada em 27-10-2006 perante a Comissão Julgadora:

  
Prof. Dr. **TARCÍSIO BARRETO CELESTINO** (Orientador)  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) Aprovada

  
Prof. Dr. **NELSON AOKI**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADA

  
Prof. Associado **ALBERTO DE SAMPAIO FERRAZ JARDIM SAYÃO**  
(Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro/PUC-RJ) APROVADA

  
Prof. Associado **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em  
Geotecnia

  
Prof.<sup>ª</sup>. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**  
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC



“A naturalist’s life would be a happy one if he  
had only to observe and never to write.”  
(Charles Darwin)





## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Tarcísio Barreto Celestino pela orientação e estímulo na elaboração desta dissertação.

Aos professores Nélio Gaioto e Wilson Sérgio Venturini pelas valiosas críticas e contribuições durante o processo de Qualificação.

Aos professores Anselmo Chaves Neto e Nelson Aoki pela inestimável atenção dedicada no auxílio ao uso da Estatística.

A todos os funcionários, técnicos e professores do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos pela amabilidade com que sempre fui tratada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, CNPq, pela bolsa de estudos concedida durante o período de dedicação integral.

À COPEL, pela oportunidade de utilização dos dados de suas obras.

Aos amigos e colegas de mestrado, em especial à Rafaelle Tiboni, Isabella Chaves, Regiane Velozo, Isaura Regadas, Ovídio dos Santos Jr., José Miguel Garcia, Jefferson Lins da Silva, Thelma Kamiji, Rafael Plácido, Fernando Lavoie e Karla Rebelo, pelos momentos de alegrias e de tristezas e ao imenso apoio dedicado, na cidade de São Carlos.

Aos engenheiros Lourenço Babá, Kamal Kamel e Pedro Lago Marques Filho, da Intertechne Consultores Associados, pela confiança depositada. À ajuda e às valiosas sugestões dos engenheiros Alex Calcina e Giovanni Marquesi, na elaboração e análise dos modelos em elementos finitos.

A meus pais, Paulo Levis e Dulcinéia G. D. Levis, pelo carinho e dedicação com que sempre me incentivaram e apoiaram. Além da imensa ajuda técnica, como excelentes profissionais de geologia e biblioteconomia que são. Ao meu irmão, Flavio, pela competência na edição de imagens. Ao meu avô, Roget Delattre, pelo simples fato de existir e sempre se mostrar presente em todos os momentos de minha vida.

A Diego Leyser de Souza, pelo amor, carinho, incentivo, ajuda e confiança inigualáveis, sem os quais a concretização deste trabalho teria sido muito mais difícil.



## RESUMO

LEVIS, S.D. **Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto**. 2006. 186p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

A subpressão consiste em um dos maiores problemas no que diz respeito à segurança de obras hidráulicas. A execução de vedações com cortinas de injeção de cimento, associadas à drenagem é de suma importância para coibir as ações da água percolada através de suas fundações. Torna-se, portanto, indispensável conhecer elementos para a verificação do bom funcionamento destes sistemas. Grande parte dos critérios de subpressão utilizados hoje no dimensionamento de barragens é baseada em métodos determinísticos e empíricos, com origem em experiência acumulada sob certas condições específicas. Quando tais critérios são utilizados para lugares específicos, com feições geológicas peculiares, podem não refletir os dados utilizados anteriormente. Tanto projetos sem segurança como anti-econômicos podem resultar desta prática. Neste trabalho, procura-se avaliar a eficácia dos sistemas de vedação e drenagem de maneira probabilística, utilizando métodos estatísticos e dados obtidos durante a execução de obras já prontas, de modo a considerar a heterogeneidade dos maciços de fundação. A primeira parte da pesquisa consistiu, portanto, na compilação e ajuste de curvas de distribuição estatística aos valores de absorções de água e calda de cimento das barragens da Usina Hidrelétrica de Salto Caxias e da Derivação do Rio Jordão. As duas localizam-se no Estado do Paraná e são de propriedade da COPEL – Companhia Paranaense de Energia. Ambas são fundadas em rochas basálticas, mas possuem diferentes características de permeabilidade. A eficácia de uma cortina de injeção pode ser dividida em duas: na dos trabalhos de injeção, com o controle dos valores de calda de cimento absorvida, e na da cortina em si, através da verificação da diminuição das subpressões e das vazões de percolação. Assim, através da análise da

tendência das curvas de distribuição encontradas, foi possível comprovar o bom resultado dos trabalhos de injeção realizados nas duas obras. Na segunda parte da pesquisa, é proposta uma metodologia de análise probabilística da eficácia das cortinas de vedação e de drenagem. Esta metodologia baseia-se nos princípios do Método de Monte Carlo, gerando-se cenários aleatórios de acordo com as curvas de distribuição estatísticas obtidas da primeira parte do trabalho. Através de simulações numéricas com elementos finitos, com valores de permeabilidades das fundações obedecendo àquelas distribuições estatísticas, foi possível obter uma distribuição estatística das subpressões. Com isso, pode-se proceder a análises de confiabilidade, e probabilidades de falha podem ser obtidas utilizando leituras de instrumentação ou mesmo critérios de subpressão.

Palavras-chave: Subpressão. Cortina de Injeção. Drenagem. Fundação de Barragem de Concreto. Método de Monte Carlo. Eficácia. Confiabilidade.

## ABSTRACT

LEVIS, S.D. **Grouting and drainage curtains efficacy verification in concrete dam foundations**. 2006. 186p. M.Sc. Dissertation – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

One of the biggest problems for hydraulic works safety is the uplift pressure. The execution of grouting, associated with drainage, is very important to control seepage through concrete dam foundations. Therefore, appropriate means to check the efficiency of those systems are essential for dam safety evaluation. Most of the uplift pressure criteria used nowadays for dam design is based on deterministic and empirical methods, originated from accumulated experience under certain specific conditions. When such criteria are used for a specific site, peculiar geological features may not be reflected in the data basis used as previous experience. Either unsafe or uneconomic designs may result from such practice. In this work, grouting and drainage systems effectiveness are evaluated in a probabilistic way, using statistical methods and data obtained during grouting execution, which provide good assessment for foundation properties variability. The first part of the research consisted, therefore, in the compilation and statistical distribution curves adjustment of data from Salto Caxias and Jordão River Hydroelectric Power Plants water pressure tests and grouting takes. The two dams are located in the state of Paraná, Brazil, and are owned by COPEL – Companhia Paranaense de Energia. They are founded on basaltic rocks, but have different permeability characteristics. Grout curtain effectiveness can be divided in two: in the grouting operation, with the treatment of cement grout take data, and in the curtain, which is measured by uplift and seepage reductions. Thus, by analyzing statistical distribution trends, it was possible to verify treatments effectiveness in the two dams. In the second part of the research, a probabilistic analysis methodology of drainage and grouting curtains effectiveness is proposed. This methodology is based on Monte Carlo Method principles,

randomly generating scenarios according to statistical distributions obtained in the first part of the work. By means of numerical simulations with finite elements, using foundation permeability coefficients following those statistical distributions, it was also possible to obtain a statistical distribution of uplift forces. Reliability analyses can be performed, and failure probabilities can be obtained using instrumentation readings, or even any uplift pressure criterion.

Key-words: Uplift pressure. Grout curtain. Drainage. Concrete dam foundation. Monte Carlo Method. Efficacy. Reliability.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Configurações típicas do ensaio de perda d'água (ZEIGLER, 1976).....	27
Figura 2.2. Configuração dos ensaios em plantas nas escalas de 5, 15 e 40 m (TRESSOLDI et al., 1990).....	28
Figura 2.3. Parâmetros de análise de um meio fraturado (LOUIS, 1974) .....	29
Figura 2.4. Modelos de fluxo considerados na análise de ensaios de furo único (HSIEH; NEUMAN; SIMPSON, 1983) .....	30
Figura 2.5. Casos teoricamente esperados de comportamento do trecho ensaiado (OLIVEIRA; SILVA; FERREIRA JÚNIOR, 1975).....	31
Figura 2.6. Comparação das fórmulas de permeabilidade (ZEIGLER, 1976) .....	35
Figura 2.7. Relação entre perda d'água e abertura de fraturas (CRUZ, 1979) .....	36
Figura 2.8. Variação da permeabilidade de maciços rochosos fraturados, com a profundidade (AZEVEDO; ALBUQUERQUE FILHO, 1998) .....	38
Figura 2.9. Cálculos de estabilidade da Barragem de Vérut, França .....	40
Figura 2.10. Hipótese de Lieckfeldt (ANDRADE, 1982) .....	42
Figura 2.11. Hipótese de Levy (ANDRADE, 1982).....	42
Figura 2.12. Diagrama de intensidade de subpressão com vários fatores (ANDRADE, 1982) .....	43
Figura 2.13. Casos hipotéticos dos estudos de Casagrande, 1961 .....	43
Figura 2.14. Papel das injeções e drenagem segundo Londe, 1972 (GUIMARÃES, 1988) .	44
Figura 2.15. Critérios do U.S. Army Corps of Engineers para consideração da subpressão	46
Figura 2.16. Critério do USBR para consideração da subpressão.....	47
Figura 2.17. Critério de Cruz e Silva (1978) .....	48
Figura 2.18. Critério de Cruz e Barbosa (1981).....	50
Figura 2.19. Critério de Azevedo (1993).....	51
Figura 2.20. Critério de Cruz (1996) .....	52

Figura 2.21. Critério de Subpressão da Eletrobrás (OSAKO, 2002) .....	54
Figura 2.22. Exemplo de equipamento de injeção (modificado de MARQUES FILHO, 1986) .....	58
Figura 2.23. Esquemas alternativos ou complementares de injeção junto ao paramento de montante de estruturas de concreto dotadas de galerias de drenagem. (MARQUES FILHO, 1986).....	60
Figura 2.24. Exemplo de divisão de uma cortina em seções e zonas (MARQUES FILHO, 1986).....	61
Figura 2.25. Método Ascendente (MARQUES FILHO, 1986).....	62
Figura 2.26. Método Descendente (MARQUES FILHO, 1986) .....	63
Figura 2.27. Método do Espaçamento Divisional (MARQUES FILHO, 1986) .....	64
Figura 2.28. Modelo teórico do espaçamento mais conveniente dos furos primários (MARQUES FILHO, 1986).....	64
Figura 2.29. Gráfico de pressões de injeção em várias barragens (HSU; RE; ONO, 1970) .	68
Figura 2.30. Comparação entre critérios de pressão de injeção utilizados (HSU; RE; ONO, 1970).....	69
Figura 2.31. Curva de injetabilidade, Laboratório de Tecnologia de Concreto de Salto Santiago, ELETROSUL (MARQUES FILHO, 1986) .....	71
Figura 2.32. Possível desenvolvimento da pressão da calda X volume injetado (LOMBARDI, 1996).....	75
Figura 2.33. Diversos valores $G/N$ que podem ser alcançados (LOMBARDI, 1996).....	76
Figura 2.34. Curva GIN limite (LOMBARDI 1996) .....	77
Figura 2.35. Conjunto de curvas GIN limites experimentais (LOMBARDI, 1996).....	78
Figura 2.36. Comparação entre o método clássico e o GIN (LOMBARDI, 1999).....	79
Figura 2.37. Absorções de cimento nas diferentes fases de perfuração (GUIDICINI; ANDRADE, 1983) .....	84
Figura 2.38. Perda d'água específica nas diferentes fases de perfuração (GUIDICINI; ANDRADE, 1983) .....	85



Figura 2.39. Frequência de ensaios relacionada à unidade Lugeon ( $l/m.min.10kgf/cm^2$ ) (modificada de TASHIRO et al., 1995) .....	86
Figura 2.40. Eficácia da cortina de injeção em obras dotadas de piezômetros (MARSAL; RESENDIZ, 1975) .....	88
Figura 2.41. Eficácia de cortinas de injeção baseada na avaliação das vazões (MARSAL; RESENDIZ, 1975) .....	89
Figura 3.1. Localização das barragens de Salto Caxias e da Derivação do Rio Jordão .....	93
Figura 3.2. Vista aérea da barragem de Salto Caxias .....	94
Figura 3.3. Arranjo geral das estruturas da U. H. de Salto Caxias .....	94
Figura 3.4. Seções típicas da barragem de Salto Caxias .....	95
Figura 3.5. Vista aérea da barragem da Derivação do Rio Jordão .....	96
Figura 3.6. Planta e seção típica da barragem da derivação do rio Jordão .....	96
Figura 3.7. Perfil geológico ao longo do rio Iguaçu .....	97
Figura 3.8. Diferentes derrames na região de Salto Caxias (LEVIS et al., 1998) .....	99
Figura 3.9. Perfil Geológico da barragem de Salto Caxias .....	99
Figura 3.10. Perfil Geológico da barragem da Derivação do Jordão (LEVIS et al., 1998) ...	100
Figura 4.1. Simulações de Monte Carlo (LEMAIRE; CHATEAUNEUF; MITTEAU, 2005) ..	107
Figura 4.2. Carga média na boca do dreno ( $H_{dm}$ ) e fator de forma da linha de drenos ( $\lambda$ ) .	113
Figura 4.3. Malha com valores de permeabilidade aleatórios, obtidos a partir de ensaios de perda d'água realizados em furos primários .....	116
Figura 4.4. Malhas (a) com cortina de injeção e (b) com cortinas de injeção e drenagem .	117
Figura 4.5. Combinações de valores de permeabilidades do maciço e da cortina .....	118
Figura 4.6. Modelo SEEP, de meio homogêneo, utilizado para a barragem da Derivação do Rio Jordão .....	119
Figura 4.7. Modelo SEEP utilizado para a barragem de Salto Caxias – Margem Esquerda	120
Figura 4.8. Modelo SEEP utilizado para a barragem de Salto Caxias – Leito do Rio .....	121

Figura 5.1. Derivação do Rio Jordão – Gráficos de absorção de: (a) cimento X ensaios realizados e (b) água X ensaios realizados .....	123
Figura 5.2. Salto Caxias – Gráficos de absorção de: (a) cimento X ensaios realizados e (b) água X ensaios realizados.....	124
Figura 5.3. Derivação do Rio Jordão – Distribuições logísticas de: (a) absorções de água e (b) absorções de cimento, de diferentes classes de furos.....	125
Figura 5.4. Salto Caxias (Derrame D3) – Distribuições logísticas de: (a) absorções de água e (b) absorções de cimento, de diferentes classes de furos.....	127
Figura 5.5. Diagramas de subpressão obtidos a partir de simulações numéricas (a) em meio homogêneo e (b, c e d) meios aleatórios.....	132
Figura 5.6. Comparações de diagramas de subpressão para valores de permeabilidade médios e aleatórios nos casos de: (a) fundação original; (b) com cortina de injeção e (c) com cortina de injeção e drenagem.....	134
Figura 5.7. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de vedação – Derivação do Rio Jordão .....	137
Figura 5.8. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de drenagem – Derivação do Rio Jordão .....	138
Figura 5.9. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação com cortinas de injeção e drenagem – Derivação do Rio Jordão .....	139
Figura 5.10. Diagramas de subpressão no caso de maciço homogêneo – Jordão .....	141
Figura 5.11. Critérios de subpressão relacionados à curva de probabilidade acumulada – Jordão .....	143
Figura 5.12. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada da redução da vazão através dos drenos, com inserção da cortina de injeção – Derivação do Rio Jordão.....	145
Figura 5.13. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de vedação – Salto Caxias / Leito do Rio .....	147
Figura 5.14. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de drenagem – Salto Caxias / Leito do Rio .....	148

Figura 5.15. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação com cortinas de injeção e drenagem – Salto Caxias / Leito do Rio .....	149
Figura 5.16. Diagramas de subpressão – Salto Caxias / Leito do Rio .....	150
Figura 5.17. Critérios de subpressão relacionados à curva de probabilidade acumulada – Salto Caxias / Leito do Rio .....	152
Figura 5.18. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada da redução da vazão através dos drenos, com inserção da cortina de injeção – Salto Caxias / Leito do Rio.....	154
Figura 5.19. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de vedação – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	156
Figura 5.20. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de drenagem – Salto Caxias / Margem Esquerda.....	157
Figura 5.21. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação com cortinas de injeção e drenagem – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	158
Figura 5.22. Diagramas de subpressão – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	159
Figura 5.23. Critérios de subpressão relacionados à curva de probabilidade acumulada – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	161
Figura 5.24. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada da redução da vazão através dos drenos, com inserção da cortina de injeção – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	163



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Equações mais freqüentes no cálculo de permeabilidade .....	34
Tabela 2.2 – Classificação do maciço rochoso baseada no “SPI” e considerações sobre tratamento por injeção .....	39
Tabela 2.3 – Subpressões e Vazões Relativas do Critério de Cruz, 1996.....	53
Tabela 2.4 – Orientação geral para análise das absorções de cimento.....	85
Tabela 2.5 – Susceptibilidade à injeção devido aos aspectos estruturais e litológicos das rochas.....	90
Tabela 2.6 – Exemplo de aplicação do critério de injeções em rochas basálticas.....	91
Tabela 3.1 – Características dos derrames encontrados em Salto Caxias.....	98
Tabela 3.2 – Injeções da barragem da Derivação do Rio Jordão, descontados volumes de furos.....	102
Tabela 3.3 – Injeções da barragem de Salto Caxias, descontados volumes de furos .....	103
Tabela 3.4 – Relação entre tipo de furo e derrame ou contato, na U.H. Salto Caxias.....	104
Tabela 4.1 – Médias dos valores de permeabilidades para as diferentes classes de furos – Derivação do Rio Jordão .....	110
Tabela 4.2 – Médias dos valores de permeabilidades para as diferentes classes de furos – Salto Caxias.....	111
Tabela 4.3 – Dados de entrada para cálculo da permeabilidade equivalente de drenos....	114
Tabela 5.1 – Médias dos valores de absorções de água para as diferentes classes de furos – Derivação do Rio Jordão .....	126
Tabela 5.2 – Médias dos valores de absorções de cimento para as diferentes classes de furos – Derivação do Rio Jordão .....	126
Tabela 5.3 – Médias dos valores de absorções de água para as diferentes classes de furos e derrames – Salto Caxias .....	128

Tabela 5.4 – Médias dos valores de absorções de cimento para as diferentes classes de furos e derrames – Salto Caxias.....	129
Tabela 5.5. Redução da subpressão com execução de injeções e drenagem – Derivação do Rio Jordão.....	135
Tabela 5.6. Diminuição das vazões com o efeito da cortina de injeção – Jordão (meio heterogêneo).....	135
Tabela 5.7. Valores extremos e médios de subpressão encontrados nas simulações – Jordão .....	140
Tabela 5.8 – Subpressões referentes a diferentes critérios de projeto – Jordão.....	142
Tabela 5.9 – Probabilidade de ocorrência de diferentes critérios – Jordão.....	143
Tabela 5.10. Diminuição da vazão passante pelos drenos com inserção de cortina de injeção – Jordão .....	146
Tabela 5.11. Valores extremos e médios de subpressão encontrados nas simulações – Salto Caxias / Leito do Rio.....	150
Tabela 5.12 – Subpressões referentes a diferentes critérios de projeto – Salto Caxias / Leito do Rio.....	151
Tabela 5.13 – Probabilidade de ocorrência de diferentes critérios – Salto Caxias/Leito do Rio .....	152
Tabela 5.14. Diminuição da vazão passante pelos drenos com inserção de cortina de injeção – Salto Caxias / Leito do Rio.....	153
Tabela 5.15. Valores extremos e médios de subpressão encontrados nas simulações – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	158
Tabela 5.16 – Subpressões referentes a diferentes critérios de projeto – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	160
Tabela 5.17 – Probabilidade de ocorrência de diferentes critérios – Salto Caxias / Margem Esquerda.....	161
Tabela 5.18. Diminuição da vazão passante pelos drenos com inserção de cortina de injeção – Salto Caxias / Margem Esquerda .....	163

## LISTA DE SÍMBOLOS

$h$	comprimento do trecho ensaiado
$k_m$	permeabilidade do maciço rochoso
$k_r$	permeabilidade da matriz rochosa
$k_f$	permeabilidade das descontinuidades
$a$	abertura das descontinuidades
$b$	espaçamento das descontinuidades
$g$	aceleração da gravidade
$\nu$	viscosidade cinemática da água
$r$	raio do furo
$R$	raio de influência do ensaio
$Q$	vazão
$p$	pressão
$p_e$	carga efetiva aplicada no trecho ensaiado
$H_a$	carga da coluna d'água
$p_m$	pressão manométrica medida no topo do furo
$p_c$	perda de carga na canalização
$h_m$	altura do manômetro
$h_{ob}$	profundidade do obturador
$h_{NA}$	profundidade do NA
$h'_{NA}$	altura do NA em casos de artesianismo
$PE$	perda d'água específica
$k$	coeficiente de permeabilidade
$\pi$	Pi
$F_f$	fator de forma
$H_c$	carga piezométrica no centro do trecho ensaiado

$F_c$	fator de correção
$R'$	distância radial a partir da seção ensaiada
$PE'$	perda d'água específica turbulenta
$N_f$	número de fraturas por centímetro
$k'$	permeabilidade turbulenta
$SPI$	índice de permeabilidade secundária
$F_s$	fator de segurança ao deslizamento
$V$	forças verticais
$U$	força resultante das subpressões
$\phi$	ângulo de atrito
$c$	coesão
$B$	largura da base da estrutura
$H$	forças horizontais
$W$	peso da barragem
$E$	empuxo horizontal
$H_m$	carga do reservatório de montante
$H_j$	carga do reservatório de jusante
$\gamma$	peso específico da água
$FI$	fator de intensidade
$f$	fração de decréscimo da subpressão
$h_g$	altura da galeria
$d$	distância dos drenos ao paramento de montante
$H_d$	carga piezométrica na linha de drenos
$E_d$	eficácia dos drenos
$K$	fator de redução de eficácia com trinca de tração
$T$	comprimento da trinca de tração
$j$	distância dos drenos ao paramento de jusante



$\Delta H$	diferença de carga entre os níveis de montante e jusante do reservatório
$FS$	fator de sedimentação
$\Delta t$	tempo de escoamento
$GIN$	número de intensidade de injeção (grouting intensity number)
$p_f$	pressão final
$v_f$	absorção final de calda por metro
$R_c$	distância alcançada pela calda
$c_c$	coesão da mistura
$v$	volume absorvido por metro
$Fl_G$	fator de intensidade global
$E_c$	eficácia da cortina de injeções
$Q_i$	vazão de infiltração estimada antes do tratamento
$Q_f$	vazão de infiltração após o tratamento
$P$	probabilidade
$P_f$	probabilidade de falha
$\sim P_f$	estimativa de probabilidade de falha
$I_{Df}$	domínio de falha
$N$	número de tiragens aleatórias
$H_{dm}$	carga média na boca do dreno
$\lambda$	fator de forma da linha de drenos
$e$	espaçamento entre drenos
$d_d$	diâmetro do dreno
$i$	gradiente hidráulico
$A$	área de influência do dreno
$h_d$	profundidade do dreno
$k_x$	permeabilidade do maciço na direção x
$k_d$	permeabilidade na região do dreno

- $Q_d$  vazão passante pelo dreno
- $A_d$  área lateral do dreno
- $D$  comprimento da circunferência do dreno
- $\mu$  média
- $\sigma$  desvio padrão

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução .....</b>	<b>22</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>24</b>
2.1	Tratamento de Fundações de Barragens .....	24
2.2	Permeabilidade em Maciços Rochosos .....	26
2.2.1	Ensaio de Perda d'água sob pressão .....	26
2.2.2	Comportamento do Maciço Rochoso e Coeficiente de Permeabilidade (K) .....	29
2.2.3	Heterogeneidade do Maciço Rochoso .....	37
2.2.4	Índice de Permeabilidade Secundária .....	39
2.3	Ação da Subpressão na Fundação de Barragens de Concreto .....	40
2.3.1	Crítérios de Subpressão.....	41
2.4	Tratamento do Maciço Rochoso por Injeção de cimento.....	55
2.4.1	Considerações sobre o Processo Executivo das Injeções .....	57
2.4.2	Pressão de Injeção .....	65
2.4.3	Injetabilidade da Calda.....	70
2.4.4	Método GIN (Grouting Intensity Number) .....	74
2.5	Cortina de Drenagem.....	80
2.6	Drenagem X Injeções .....	80
2.7	Desempenho das Injeções .....	83
2.7.1	Eficácia dos Trabalhos de Injeção .....	83
2.7.2	Eficácia da Cortina de Injeção .....	87
2.7.3	Eficácia das Injeções em Basaltos.....	89
<b>3</b>	<b>Barragens Estudadas.....</b>	<b>92</b>
3.1	Características Principais .....	92
3.1.1	Barragem de Salto Caxias .....	92
3.1.2	Barragem da Derivação do Rio Jordão.....	95

3.2	Características Geológicas das Regiões das Barragens .....	97
3.2.1	Características Geológicas de Salto Caxias .....	97
3.2.2	Características Geológicas da Derivação do rio Jordão .....	100
3.3	Injeções das Fundações .....	101
3.3.1	Derivação do Rio Jordão.....	101
3.3.2	Salto Caxias .....	102
<b>4</b>	<b>Metodologia de Análise da Eficácia da Cortina de Injeção.....</b>	<b>106</b>
4.1	Análise Estatística em Fundações de Barragens de Concreto .....	107
4.2	Método de Simulação Monte Carlo .....	109
4.3	Permeabilidade Relativa da Cortina de Drenagem .....	112
4.4	Simulações Numéricas do Maciço Heterogêneo .....	115
4.5	Simulações Numéricas do Maciço Homogêneo com Permeabilidades Variáveis.....	117
4.6	Dados de Saída.....	121
<b>5</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>122</b>
5.1	Eficácia dos Trabalhos de Injeção .....	122
5.2	Eficácia da Cortina de Injeção em Simulações com Meio Heterogêneo.....	130
5.3	Eficácia dos Sistemas de Vedação e Drenagem em Simulações com Meio Homogêneo.....	135
5.3.1	Barragem da Derivação do Rio Jordão .....	136
5.3.2	Barragem de Salto Caxias – Seção no Leito do Rio .....	146
5.3.3	Barragem de Salto Caxias – Seção na Margem Esquerda.....	155
<b>6</b>	<b>Conclusão .....</b>	<b>164</b>
6.1	Eficácia dos Trabalhos de Injeção .....	164
6.2	Eficácia das Cortinas de Injeção e de Drenagem .....	165
6.3	Probabilidade de Ocorrência de Valores de Subpressão .....	166
	<b>Referências Bibliográficas.....</b>	<b>168</b>
	<b>Anexo 1 – Distribuições de Probabilidade .....</b>	<b>176</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A subpressão pode ser entendida como o esforço ascendente, exercido na base de obras hidráulicas, provocado pela água que percola através de seu maciço de fundação. Ela atua no alívio do peso da estrutura, reduzindo sua resistência ao deslizamento, levando a uma condição menos segura.

O entendimento de sua ação, no final do século XIX, revolucionou o futuro dos tratamentos de fundações de barragens. A execução de vedações com cortinas de injeção de cimento, associadas com drenagem, passou a ser, desde então, de suma importância para a segurança e viabilidade econômica das obras.

Conseqüentemente, vários critérios de determinação da subpressão foram estudados, sendo estes, em sua maioria, métodos empíricos. Tentativas empíricas para desenho de diagramas de subpressão não estão erradas, mas podem ser perigosas, dependendo da geologia, como em fundações com alta variabilidade; além de caras e conservadoras, em determinados casos. Métodos probabilísticos para análise deste problema são raros e pouco disponíveis. Portanto, há interesse em retroanalisar dados existentes e aferir se métodos probabilísticos conseguem fornecer estimativas dentro de limites de confiabilidade conhecidos.

Neste trabalho, procurou-se analisar a eficácia das obras de vedação e de drenagem das barragens da derivação do Rio Jordão e de Salto Caxias, localizadas no estado do Paraná e de propriedade da COPEL – Companhia Paranaense de Energia. As duas obras são fundadas em rochas basálticas. Entretanto, a primeira encontra-se em uma região onde o maciço apresenta-se menos permeável, sem fraturas significativas, e a segunda sobre derrames com contatos e descontinuidades altamente permeáveis. Objetivou-se, desta maneira, a comparação de resultados entre duas feições geológicas diferentes de forma a

mostrar a influência da geologia local no exercício da subpressão e na eficácia de seus sistemas de redução.

De uma maneira geral, a eficácia de uma cortina de injeções pode ser dividida em dois aspectos: na dos trabalhos de injeção, com o estudo dos valores de água e de calda de cimento absorvidas, e na da cortina em si, através da verificação da diminuição das vazões de percolação e da subpressão sob a barragem.

Os estudos, neste trabalho, foram, portanto, divididos em duas etapas. Na primeira, para verificação da eficácia dos trabalhos de injeção, foram tratados e analisados estatisticamente dados de absorções de água e de cimento obtidos durante as execuções das obras. Estes valores foram ajustados a curvas de distribuições estatísticas de modo a poderem se confirmar suas tendências de redução.

A segunda etapa consistiu na proposição de uma metodologia para análise probabilística da eficácia da cortina de injeção de cimento como elemento de redução de vazões e de subpressão. Para tanto, optou-se pela utilização de enfoque estatístico, como o Método de Monte Carlo, e de modelagem numérica, utilizando elementos finitos. Os dados de absorções de água foram utilizados no cálculo de permeabilidades, as quais puderam servir de base para a modelagem. Desta forma, as eficácias dos sistemas de vedação e de drenagem das duas barragens puderam ser verificadas levando-se em consideração as características geológicas de cada maciço.

Ao final, foram confrontados os valores de subpressões encontrados nas simulações de Monte Carlo com dados reais de instrumentação e critérios de projeto universalmente utilizados.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 TRATAMENTO DE FUNDAÇÕES DE BARRAGENS

O material ideal de fundação de uma barragem seria aquele pouco permeável, de elevada resistência e baixa deformabilidade. Entretanto, na grande maioria dos casos, o que ocorre é justamente o contrário.

Hsu, Re e Ono (1970) vêem a permeabilidade como uma das características mais importantes do maciço. No caso de os materiais apresentarem baixas resistências e altas permeabilidades, estes são geralmente removidos. Já quando as características quanto à resistência e à deformabilidade são aceitáveis, mas o maciço se apresenta muito permeável, torna-se necessário seu tratamento com sistemas de vedação ou impermeabilização. Para Cruz (1996), maciços rochosos com “permeabilidade média” inferior a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s não necessitam de tratamentos para redução de permeabilidade.

Segundo esse autor, a avaliação da quantidade de água de percolação admitida pelo conjunto maciço – fundação deve ser feita com base na finalidade da barragem. Assim, pode-se citar como exemplos valores de vazão de até 5,0 litros/min por metro de barragem, para barragens com finalidade de controle de cheias ou para hidroelétricas; e de até 0,1% da média das vazões naturais para barragens de abastecimento de água e irrigação. Para ele, o fluxo pela fundação pode ser e na maioria das barragens é dominante.

Cruz (1996) e Gaioto (2003) descrevem os principais sistemas de tratamentos de fundação utilizados hoje no Brasil:

- a) **Trincheira de vedação ou “cut-off”**: escavação dos materiais permeáveis sob a base do núcleo, em barragens de terra. A substituição do material escavado é feita por aterro compactado nas mesmas condições do núcleo. É a única solução que pode ser considerada efetiva, pois intercepta integralmente a feição permeável onde se deseja interromper o fluxo.
- b) **Paredes Diafragma**: podem ser rígidas, plásticas, colunas injetadas, colunas secantes de concreto, etc., construídas sob a zona do núcleo das barragens. São utilizadas em formações arenosas e em cascalho.
- c) **Tapete Impermeável**: construído a montante, conectado à seção impermeável da barragem, combinado com um sistema de drenagem a jusante. Seu objetivo é reduzir o gradiente hidráulico através da fundação, pelo acréscimo do caminho de percolação da água sob a barragem. É considerada uma solução econômica para o controle de fluxo pela fundação da barragem. No entanto, pode perder sua eficiência se não for executado com cuidados especiais. Pode ocorrer fissuramento do tapete por ressecamento e fissuras por recalques diferenciais junto ao pé de montante da barragem.
- d) **Cortina de Injeção**: pode ser executada em maciços rochosos ou aluviões permeáveis. Nos maciços rochosos, a cortina é constituída por uma ou mais linhas de furos, executados por meio de equipamento rotativo ou roto-percussivo, que são preenchidos por injeção de calda, geralmente de cimento. A permeabilidade média residual dos maciços injetados aproxima-se de  $10^{-4}$  cm/s. Em areias, a cortina impermeabilizante eficiente deve reduzir a permeabilidade no local de 50 a 100 vezes, o que conduz a uma redução de fluxo para  $2/3$  e  $1/2$ , respectivamente. A eficiência da cortina depende ainda de um adequado engaste na rocha. Qualquer pequena deficiência na ligação reduz drasticamente sua eficiência.



## 2.2 PERMEABILIDADE EM MACIÇOS ROCHOSOS

### 2.2.1 Ensaio de Perda d'água sob pressão

O ensaio de perda d'água surgiu da necessidade de determinação da permeabilidade de maciços rochosos de fundações de barragens. Esta medida tornava-se importante para se estudar o problema da percolação e possíveis tratamentos de impermeabilização a fim de evitar perdas de água (ANDRADE, 1982). Dos ensaios desenvolvidos, o mais satisfatório foi o de Maurice Lugeon, em 1933.

Este ensaio consiste na injeção de água sob pressão em um trecho do furo de sondagem, selado por um ou mais obturadores (Figura 2.1), e na medida da quantidade de água que se infiltra no maciço durante certo tempo, sob uma dada pressão (OLIVEIRA; SILVA; FERREIRA JÚNIOR, 1975). Segundo Porto (2002), originalmente, este ensaio consistia em medir a vazão d'água penetrante no maciço sob a pressão de 1 MPa (10 kgf/cm<sup>2</sup>), a qual deveria ser aplicada em todos os trechos ensaiados, qualquer que fosse sua profundidade. A unidade Lugeon corresponde à vazão de 1 litro por minuto por metro, num ensaio em que a pressão de injeção d'água se mantém a 10 kgf/cm<sup>2</sup> durante 10 minutos. Equivale a uma perda d'água específica de 1,0 l/m.min.10atm.

Corrêa Filho (1985) afirma que o ensaio de perda d'água sob pressão, como é denominado no Brasil, deriva do ensaio proposto por Maurice Lugeon, e é muitas vezes chamado de ensaio Lugeon, embora não seja realizado da forma inicialmente proposta. Sua realização é normalmente feita em maciços rochosos, através de furos de sondagens. Visa à determinação da permeabilidade e do comportamento desses maciços frente à percolação d'água através de suas fissuras (OLIVEIRA; SILVA; FERREIRA JÚNIOR, 1975).

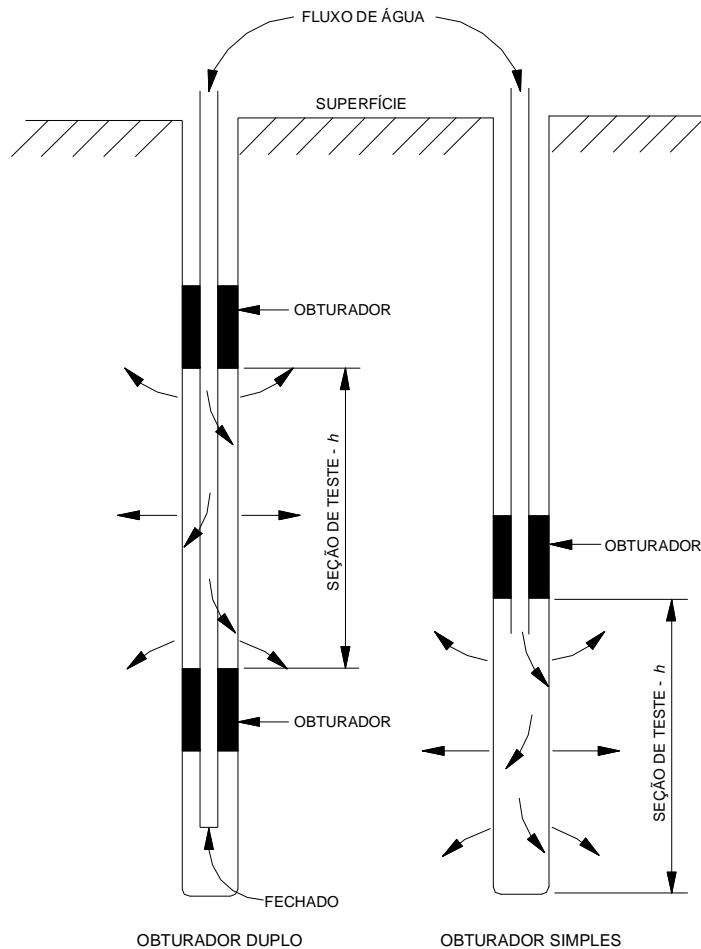


Figura 2.1. Configurações típicas do ensaio de perda d'água (ZEIGLER, 1976)

Além do ensaio em um único furo, como o geralmente executado após sondagens, também é possível a realização de ensaio de múltiplos furos, para obtenção de uma rede tridimensional de condutividade. Neste caso, a água é injetada em um trecho de um dos furos enquanto a pressão é monitorada em outros próximos. Segundo Hsieh, Neuman e Simpson (1983), ao considerar-se o maciço como um meio discreto, levando-se em conta as geometrias individuais de cada fratura, o ensaio de furo único torna-se necessário para determinação da abertura das fraturas, enquanto o de múltiplos furos é utilizado para investigar a orientação e interconectividade entre os pontos. Também segundo os mesmos autores, a maior vantagem do ensaio de furo único é sua simplicidade de execução, pois seus resultados geralmente não representam as características do maciço como um todo, é limitado ao entorno do local ensaiado.

Em 1990, Tressoldi et al. apresentaram estudos hidrológicos e hidrogeotécnicos tridimensionais na Usina Hidrelétrica de Porto Primavera. Nas fundações em basalto da barragem, foram executados sete furos de sondagem rotativa verticais, em rocha, de 12 m de profundidade cada. Através da intercomunicação por bombeamento de diferentes combinações de furos, envolvendo diversos planos e direções, obtiveram-se hidrotomografias completas do local, em distâncias distintas: 5, 15 e 40 m (Figura 2.2). Esta análise em três escalas permite a consideração do meio como discreto ou contínuo, dependendo do número de fraturas presentes na região. Para essas distâncias, os autores encontraram médias geométricas dos valores de condutividade hidráulica duas e meia a três vezes maiores na menor escala. Nas maiores, possivelmente ocorrem fraturas e contatos com baixo grau de interconexão.

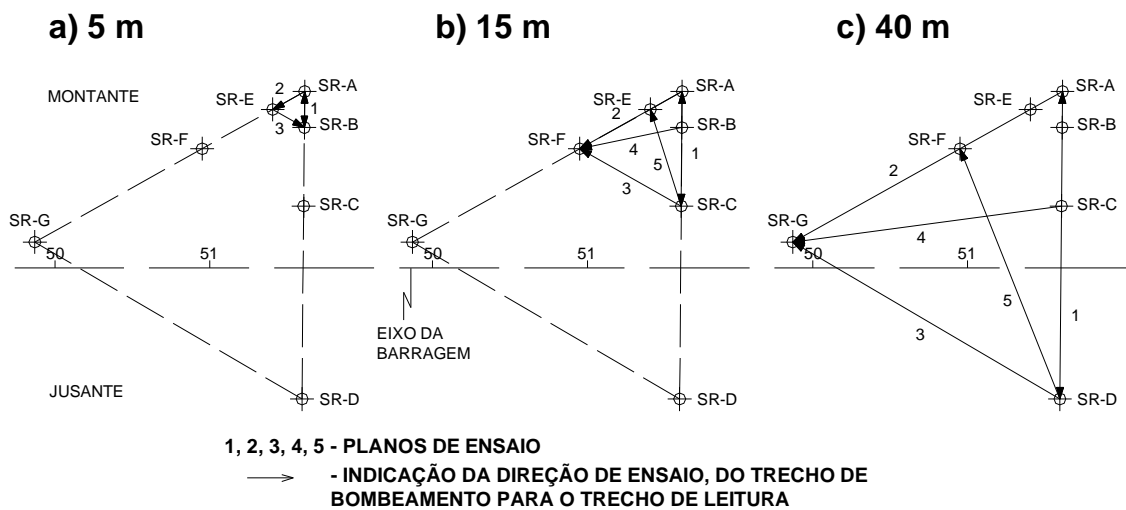


Figura 2.2. Configuração dos ensaios em plantas nas escalas de 5, 15 e 40 m (TRESSOLDI et al., 1990)

Os ensaios foram efetuados com a Sonda Hidráulica Multiteste apresentada por Silva (1987). Para interpretação dos resultados, foram utilizados o método e a solução analítica propostos por Hsieh, Neuman e Simpson (1983) e Hsieh et al. (1985), comparando, primeiramente, uma curva bilogarítmica padrão da variação da carga hidráulica em função do tempo, com a obtida a partir do ensaio de bombeamento efetuado em um ponto, acompanhado de leituras da variação da carga hidráulica em outros pontos.

## 2.2.2 Comportamento do Maciço Rochoso e Coeficiente de Permeabilidade (K)

De acordo com Louis (1974), para se caracterizar a permeabilidade de um maciço rochoso, a seguinte equação, baseada no modelo ortogonal clássico (Figura 2.3) proposto por Snow (1966), pode ser utilizada:

$$k_m = \frac{a}{b} \cdot k_f + k_r \quad (2.1)$$

Em que:

$k_m$  = permeabilidade do maciço rochoso ( $L.T^{-1}$ );

$a$  = abertura das descontinuidades (L);

$b$  = espaçamento das descontinuidades (L);

$k_r$  = permeabilidade da matriz rochosa ( $L.T^{-1}$ );

$k_f$  = permeabilidade da descontinuidade ( $L.T^{-1}$ ),

Sendo:

$$k_f = \frac{g \cdot a^2}{12 \cdot \nu} \quad (2.2)$$

$g$  = aceleração da gravidade ( $L.T^{-2}$ );

$\nu$  = viscosidade cinemática da água ( $T.L^{-2}$ ).

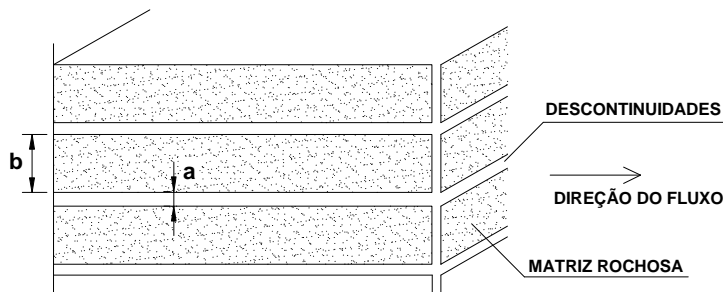


Figura 2.3. Parâmetros de análise de um meio fraturado (LOUIS, 1974)

Existem várias maneiras e fórmulas para se determinar o coeficiente de permeabilidade de um maciço rochoso após a realização de um ensaio de perda d'água. Nos ensaios de furo único, os principais métodos assumem as hipóteses de um meio homogêneo, isotrópico e poroso. O cálculo pode ser realizado considerando-se o fluxo através das fraturas como laminar ou turbulento, dependendo das condições do maciço.

Além disso, segundo Hsieh, Neuman e Simpson (1983), os modelos mais frequentemente assumidos para o fluxo do trecho ensaiado são o radial e o esferoidal (ou elipsoidal). No caso radial, o fluxo é tido como perpendicular e radialmente simétrico ao eixo do furo; e confinado por limites impermeáveis acima e abaixo do intervalo ensaiado (Figura 2.4a). As superfícies equipotenciais resultantes são cilindros concêntricos de altura igual à do trecho do teste. No caso esferoidal, assume-se um fluxo uniforme a partir da linha de alimentação, localizada no eixo do intervalo de teste (Figura 2.4b). As equipotenciais resultam em elipsóides com focos no final do eixo (ou elipses, no caso elipsoidal).

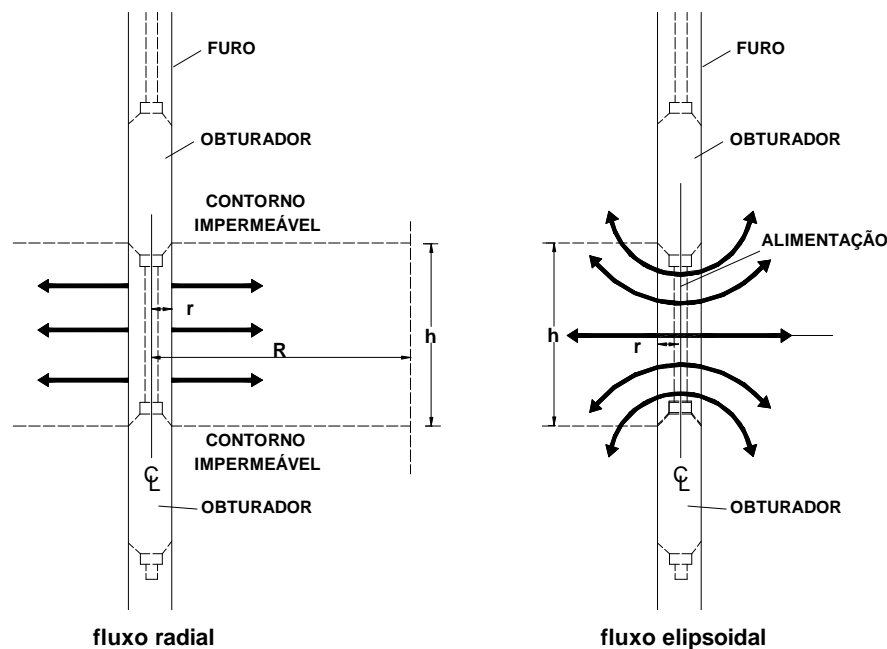


Figura 2.4. Modelos de fluxo considerados na análise de ensaios de furo único (HSIEH; NEUMAN; SIMPSON, 1983)

A análise do comportamento do trecho ensaiado também pode ser feita através da observação dos gráficos de carga efetiva x vazão obtidos no ensaio. Oliveira, Silva e Ferreira Jr. (1975) definiram quatro casos, teoricamente esperados, de comportamento do maciço, mostrados na figura 2.5. Aqueles autores afirmam que a condição necessária para o cálculo do coeficiente de permeabilidade é a existência de um regime laminar sem alteração das condições físicas das fissuras (caso L1). Para os demais casos, os autores sugerem a adoção dos valores do primeiro estágio de pressão.

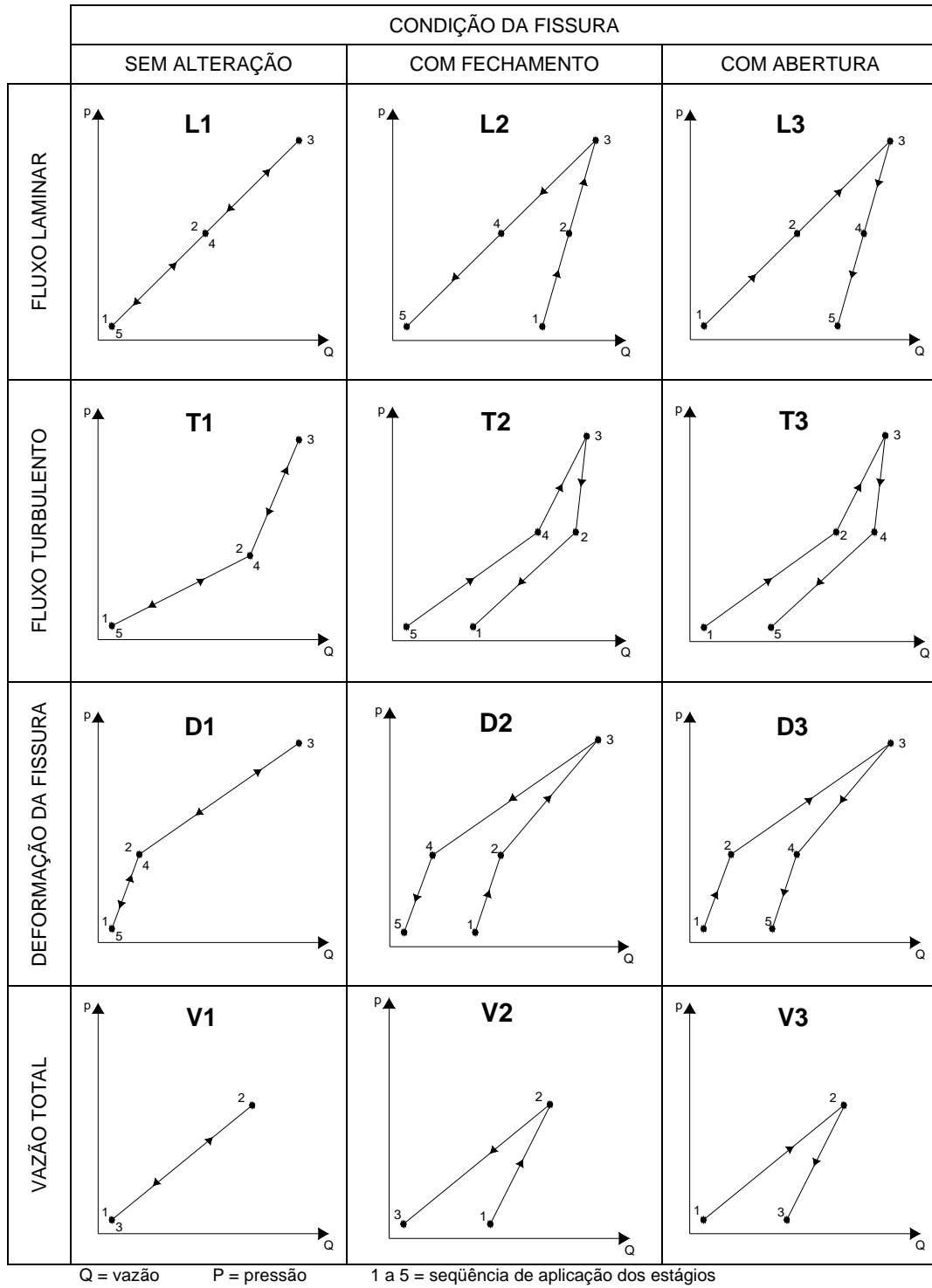


Figura 2.5. Casos teoricamente esperados de comportamento do trecho ensaiado  
(OLIVEIRA; SILVA; FERREIRA JÚNIOR, 1975)

O método de determinação do coeficiente de permeabilidade tradicionalmente utilizado no Brasil considera as condições do caso L1, apresentado acima.

Quando não se dispõe de leituras de pressão num transdutor instalado no trecho de ensaio, mas apenas de um manômetro na superfície, procede-se à análise como mostrado abaixo.

Inicialmente, determina-se a carga efetiva ( $p_e$ ) aplicada no trecho ensaiado, em  $\text{kgf/cm}^2$ :

$$p_e = \frac{H_a}{10} + p_m - p_c \quad (2.3)$$

Onde:

$H_a$  = carga da coluna d'água (m);

$p_m$  = pressão manométrica medida no topo do furo ( $\text{kgf/cm}^2$ );

$p_c$  = perda de carga na canalização ( $\text{kgf/cm}^2$ ).

A carga da coluna d'água deve ser determinada de acordo com a posição do nível d'água em relação ao trecho ensaiado:

$$H_a = h_m + h_{ob} + h/2 \rightarrow \text{trecho acima do NA}$$

$$H_a = h_m + h_{NA} \rightarrow \text{trecho abaixo do NA}$$

$$H_a = -h'_{NA} + h_m \rightarrow \text{casos de artesianismo}$$

Com:

$H_m$  = altura do manômetro (m);

$h_{ob}$  = profundidade do obturador (m);

$h$  = comprimento do trecho ensaiado (m);

$h_{NA}$  = profundidade do NA (m);

$h'_{NA}$  = altura do NA em casos de artesianismo (m).

Em seguida, é possível calcular a perda d'água específica ( $PE$ ) e o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ):

$$PE = \frac{Q}{h \cdot p_e} \quad (\text{l/m} \cdot \text{min} \cdot \text{kgf/cm}^2) \quad (2.4)$$

$Q$  = vazão (l/min);

$p_e$  = carga efetiva aplicada no trecho ( $\text{kgf/cm}^2$ ).

Com essas unidades ( $PE$  em  $l/m.min.kgf/cm^2$ ), para se obter o valor do coeficiente de permeabilidade em  $cm/s$  é necessário utilizar o fator de conversão  $1,66 \times 10^{-4}$  multiplicado à perda d'água específica. Portanto:

$$k = \frac{Q}{2.\pi.h.p_e} . \ln \frac{0,66.h}{r} \quad (2.5)$$

$$k \text{ (cm/s)} = \frac{1,66 \times 10^{-4} . PE}{2.\pi} . \ln \frac{0,66.h}{r} \quad (2.6)$$

Chamando  $F_f = \ln \frac{0,66.h}{r}$  de fator de forma, tem-se: (2.7)

$$k \text{ (cm/s)} = \frac{1,66 \times 10^{-4} . PE}{2.\pi} . F_f \quad (2.8)$$

E, ainda, considerando:

$$F = \frac{1,66 \times 10^{-4}}{2.\pi} . F_f \quad (2.9)$$

o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) em  $cm/s$  pode ser dado por:

$$\boxed{k = PE.F} \quad (2.10)$$

Zeigler (1976) organizou uma coletânea das equações mais utilizadas para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (Tabela 2.1). Em todos os casos, o cálculo é baseado nas hipóteses de fluxo laminar e de uma seção de teste vertical em um meio poroso homogêneo e isotrópico.



Tabela 2.1 – Equações mais freqüentes no cálculo de permeabilidade

Autor	Ano	Permeabilidade
Hvorslev	1951	$k = \frac{Q}{h.H_c} \left\{ \frac{1}{2.\pi} \cdot \ln \left[ \frac{h}{2.r} + \sqrt{1 + \left( \frac{h}{2.r} \right)^2} \right] \right\} \quad (2.11a)$
		$k = \frac{Q}{h.H_c} \cdot \left[ \frac{1}{2.\pi} \cdot \ln \left( \frac{R}{r} \right) \right] \quad (2.11b)$
USBR	1965, 1965	$k = \frac{Q}{h.H_c} \cdot \left[ \frac{1}{2.\pi} \cdot \sinh^{-1} \left( \frac{h}{2.r} \right) \right], \text{ para } 10 > \frac{h}{r} > 1 \quad (2.12a)$
		$k = \frac{Q}{h.H_c} \cdot \left[ \frac{1}{2.\pi} \cdot \ln \left( \frac{h}{r} \right) \right], \text{ para } \frac{h}{r} > 10 \quad (2.12b)$
Moye	1967	$k = \frac{Q}{h.H_c} \cdot \left\{ \frac{1}{2.\pi} \cdot \left[ 1 + \ln \left( \frac{h}{2.r} \right) \right] \right\} \quad (2.13)$

(ZEIGLER, 1976)

Onde:

 $H_c$  = carga piezométrica no centro do trecho ensaiado (L); $r$  = raio do furo (L); $R$  = raio de influência do ensaio (L), distância radial a partir da seção ensaiada correspondente a 100% de perda de carga piezométrica.

As equações 2.11a, 2.12a e 2.12b são normalmente usadas pelo U.S. Army Corps of Engineers e pelo U.S. Bureau of Reclamation. Estas equações assumem um modelo de fluxo elipsoidal e são essencialmente equivalentes. A equação 2.11b considera um modelo de fluxo radial. A equação 2.13 é utilizada pela Hydro-electric Authority, na Austrália, e baseia-se em fluxo radial ocorrendo próximo ao furo, tornando-se esférico a uma distância  $L/2$  do mesmo.

Zeigler (1976) cita ainda em seu trabalho a equação de Sharp (1970). Esse autor considera que o fluxo em um trecho de furo é, em geral, hemisférico, nos extremos superior e inferior; radial, próximo e ao longo da seção de ensaio; e esférico, a uma grande distância

do furo. Com isso, sua equação, modificada da equação 2.11b, considera somente a porção que flui radialmente à seção ensaiada:

$$k = \frac{Q}{h.H_c} \cdot F_c \cdot \left[ \frac{1}{1,6 \cdot \pi} \cdot \ln \left( \frac{R'}{r} \right) \right] \quad (2.14)$$

Com:

$F_c$  = fator de correção indicando a porção radial do total de fluxo a uma distância  $R'$  da seção ensaiada.

$R'$  = distância radial a partir da seção ensaiada, correspondente a 80% de perda de carga piezométrica ( $L$ ).

Como todas as equações apresentadas por Zeigler (1976) são no formato

$k = \frac{Q}{h.H_c} [C]$ , pôde ser feito um gráfico comparativo das permeabilidades encontradas para

as seis formulas (Figura 2.6).

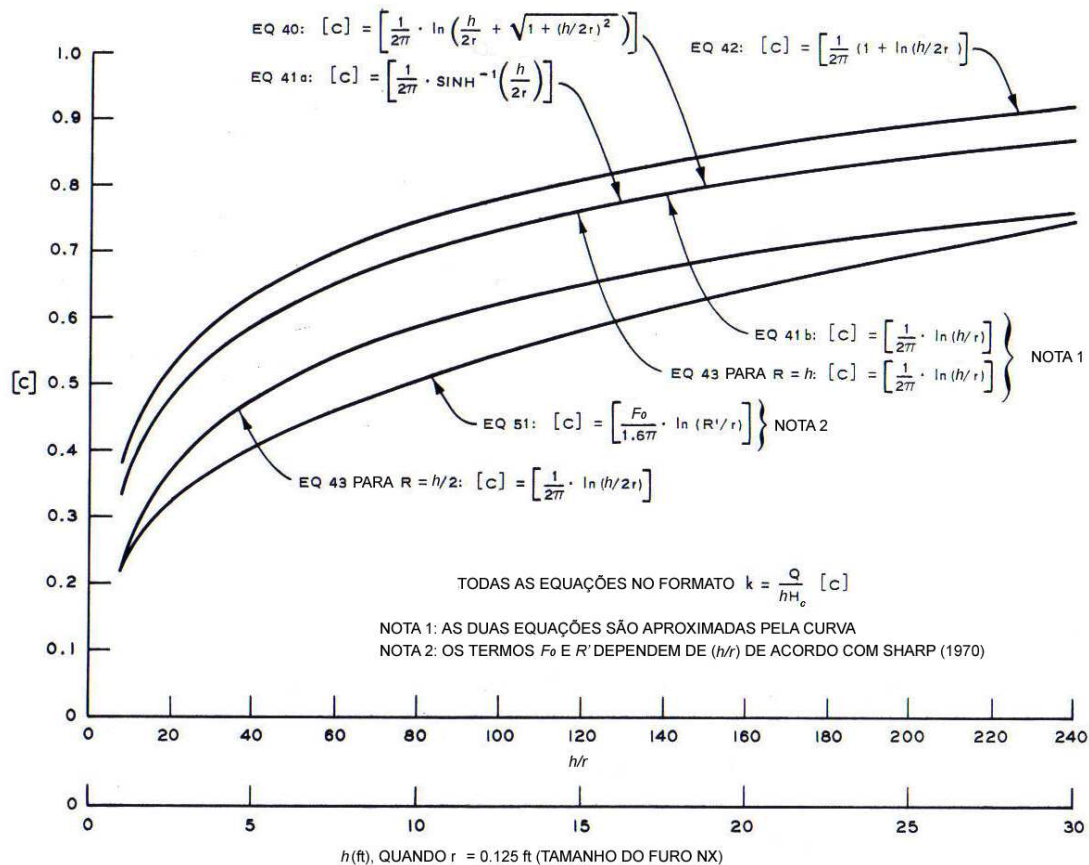


Figura 2.6. Comparação das fórmulas de permeabilidade (ZEIGLER, 1976)

Como observado, geralmente as fórmulas para cálculo de permeabilidade a partir de ensaios de perda d'água levam em consideração a condição de fluxo laminar. Entretanto, segundo Cruz (1979), quando, em um ensaio de perda d'água sob pressão, o trecho intercepta uma feição de elevada permeabilidade, a natureza do fluxo tem condição de ser turbulenta ou, pelo menos, transacional. Rissler (1977, apud FOYO, 2005) mostra que o escoamento laminar ocorre, quase exclusivamente, em aberturas de juntas iguais ou menores que 0,15 mm e o turbulento em aberturas maiores ou iguais a 0,6mm. Nos casos de aberturas intermediárias, o regime laminar ou turbulento depende da rugosidade relativa da junta. Cruz (1979) propõe uma perda d'água específica turbulenta ( $PE'$ ) e uma permeabilidade turbulenta ( $k'$ ):

$$PE' = 2,4 \cdot 10^{-5} \cdot a \cdot \sqrt{a} \cdot N_f \quad (2.15)$$

$$k' = 4 \cdot \sqrt{g \cdot a} \quad (2.16)$$

Sendo a unidade de  $PE'$  l/m.min.(kgf/cm<sup>2</sup>)<sup>-2</sup>, e a abertura da fratura da rocha,  $N_f$  o número de fraturas por centímetro no trecho ensaiado e  $g$  a aceleração da gravidade.

Cruz apresenta, também, um gráfico (Figura 2.7) correlacionando a perda d'água em regime turbulento e laminar com a abertura das fraturas no maciço ensaiado.

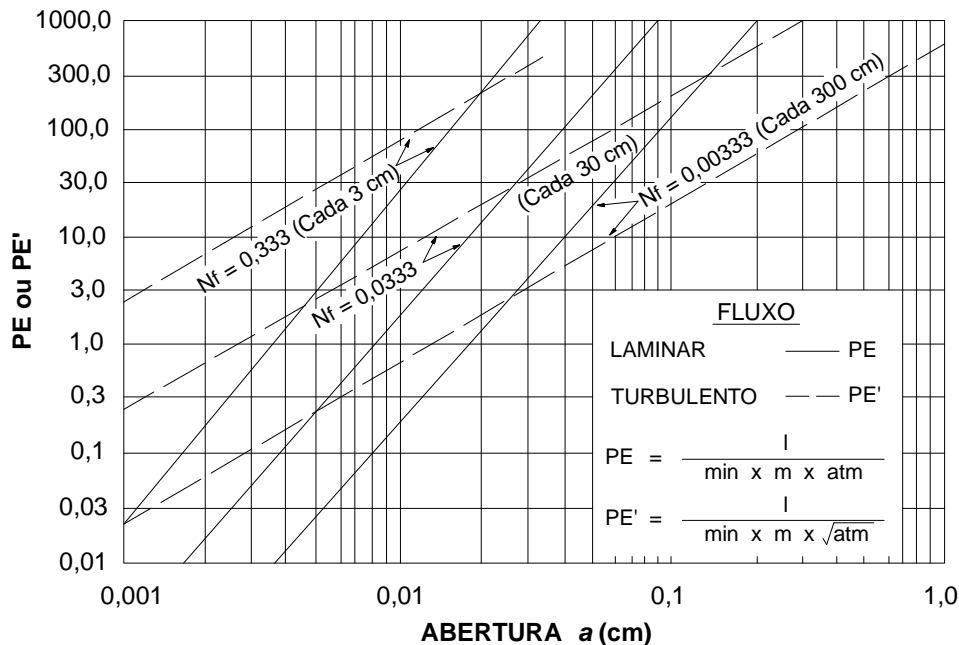


Figura 2.7. Relação entre perda d'água e abertura de fraturas (CRUZ, 1979)

De acordo com Porto (2002), após um bom tratamento das fundações por injeção, é mais provável que as fissuras estejam fechadas e não inter-comunicantes, aproximando-se da hipótese de regime de fluxo laminar durante o ensaio.

Ewert (1985) afirma que os resultados deste teste estão fortemente relacionados com as características geométricas e grau de intemperismo das passagens de água. Aquele autor declara, ainda, que a seção de teste pode ser considerada impermeável sempre que a absorção de água for menor ou igual a 1 Lugeon ( $l/m.min.10.kgf/cm^2$ ). A experiência de Oliveira (1972), mostra que em maciços rochosos com valores de perda d'água específica inferiores a 1 Lugeon é impossível se injetar qualquer calda de cimento.

### **2.2.3 Heterogeneidade do Maciço Rochoso**

Azevedo e Albuquerque Filho (1998) mostram que maciços rochosos fraturados são meios heterogêneos, apresentando grande variação da permeabilidade com a profundidade (Figura 2.8). As rochas efusivas basálticas são as que apresentam uma maior heterogeneidade, com tendência de aumento da condutividade hidráulica nas juntas falhas sub-horizontais com o aumento de profundidade.

No estudo apresentado por Tressoldi et al. (1990), os autores concluíram, entretanto, que o maciço de basalto muito fraturado analisado pode ser comparado a um meio homogêneo e anisotrópico, além de evidenciarem as diferenças apresentadas pelo fator escala.

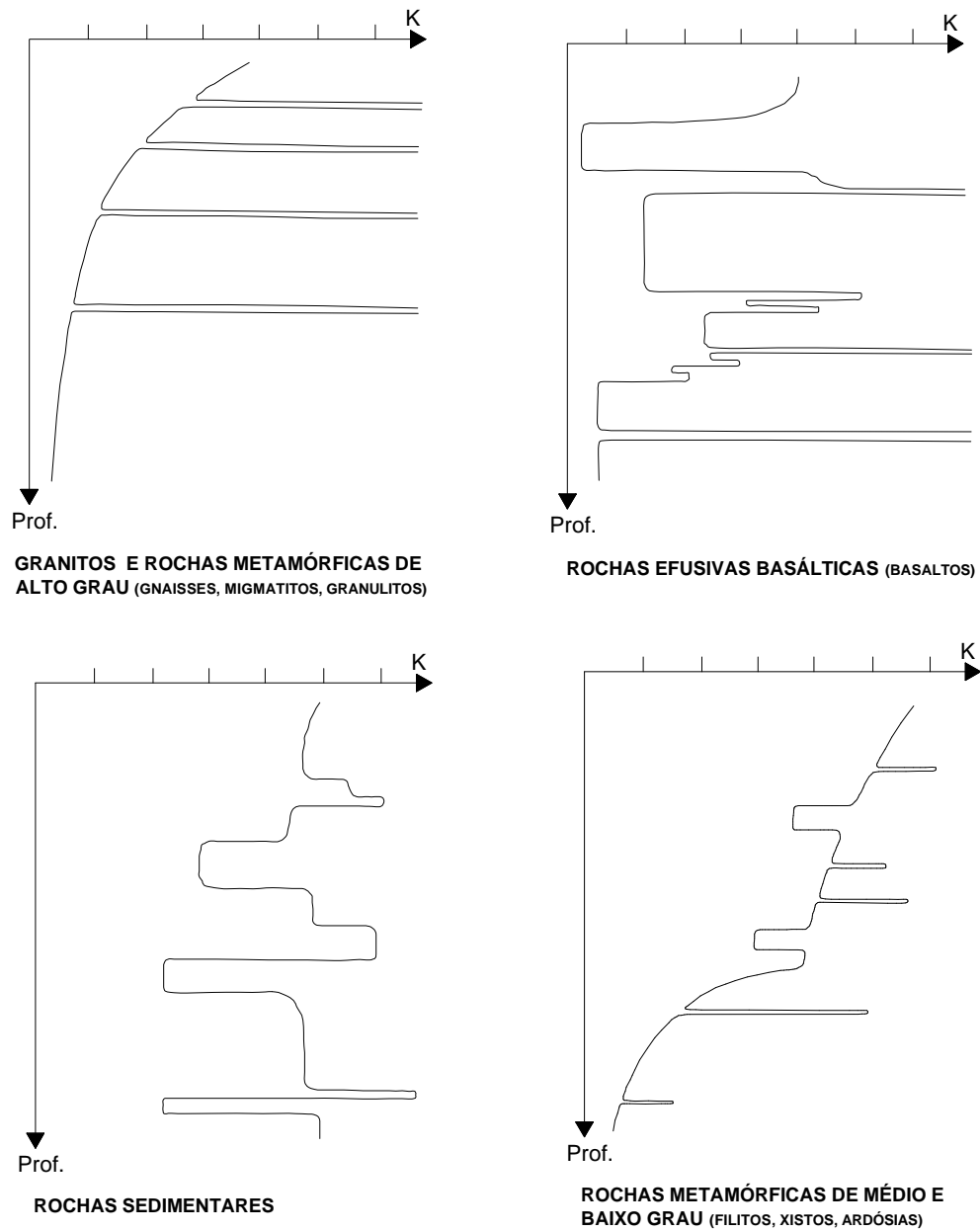


Figura 2.8. Variação da permeabilidade de maciços rochosos fraturados, com a profundidade (AZEVEDO; ALBUQUERQUE FILHO, 1998)

## 2.2.4 Índice de Permeabilidade Secundária

Foyo, Sanchez e Tomillo (2005) afirmam que o ensaio de perda d'água sob pressão permite a avaliação das aberturas de juntas através das quais a água percola, mas não permite a definição da persistência da junta, uma descontinuidade pode servir de ponte entre a seção de teste e uma área adjacente com diferentes feições de permeabilidade. Ainda segundo os autores, é freqüente que uma área de maciço rochoso que contenha um baixo grau de juntas mostre uma alta absorção de água devido à persistência da junta ou ao intemperismo do preenchimento. Assim, em seu trabalho, é proposto um método de classificação do maciço rochoso através do Índice de Permeabilidade Secundária (*SPI*). Este índice corresponde principalmente à absorção de água pelos planos de fratura presentes no maciço. Expressa a absorção no ensaio de perda d'água sob pressão pelo tempo (*l/s*), através da face da câmara de injeção ( $m^2$ ). Portanto, a classificação proposta não reflete a resistência da rocha intacta, mas define a qualidade da rocha baseada nas feições de permeabilidade do maciço. A tabela 2.2 mostra a relação entre o Índice de Permeabilidade Secundária e a qualidade do maciço rochoso, além de indicação sobre a utilização de injeções de cimento.

Tabela 2.2 – Classificação do maciço rochoso baseada no *SPI* e considerações sobre tratamento por injeção

		Índice de Permeabilidade Secundária “ <i>SPI</i> ” ( <i>l/s.m</i> <sup>2</sup> )		
		$2,16 \times 10^{-14}$	$1,72 \times 10^{-13}$	$1,72 \times 10^{-12}$
Maciço Rochoso	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Classificação	Excelente	Bom-Médio	Pobre	Muito Pobre
Tratamento por injeção	Não necessário	Local	Necessário	Extensivo

(FOYO; SANCHEZ; TOMILLO, 2005)

### 2.3 AÇÃO DA SUBPRESSÃO NA FUNDAÇÃO DE BARRAGENS DE CONCRETO

A subpressão pode ser entendida como o esforço exercido em uma estrutura ou em sua fundação, no sentido ascendente, em função da pressão decorrente da percolação de água através dos maciços de concreto, rochoso ou de terra.

Até final do século XIX, este esforço não era levado em consideração ao se projetar uma estrutura hidráulica. Os cálculos de estabilidade da Barragem de Vêrut (Figura 2.9), na França, datados de 1890, confirmam esta afirmação.

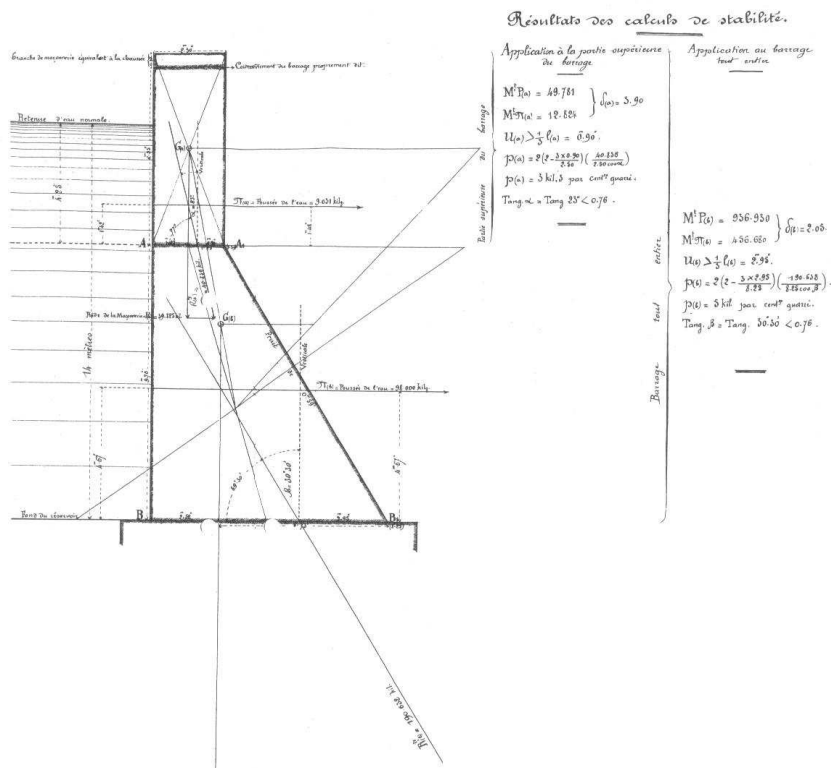


Figura 2.9. Cálculos de estabilidade da Barragem de Vêrut, França

Foi somente após o acidente de Bouzey, em 1895, que Maurice Levy indicou as pressões de água instaladas na rocha e a força de subpressão atuante sob a fundação da barragem como causas da catástrofe.

Silva Filho e Gama (2003) mostram que, atualmente, em barragens de concreto, uma das tarefas mais importantes a serem executadas é a determinação de sua estabilidade ao deslizamento. A equação 2.17 apresenta, de maneira simplificada, a correlação entre as forças que atuam na barragem, por metro, de modo a manter seu equilíbrio:

$$F_s = \frac{(\Sigma V - U) \cdot \tan \phi + c \cdot B}{\Sigma H} \quad (2.17)$$

Onde:

$F_s$  = coeficiente de segurança ao deslizamento;

$\Sigma V$  = somatório das forças verticais (M.L.T<sup>-2</sup>);

$U$  = força resultante das subpressões atuantes na base (M.L.T<sup>-2</sup>);

$\phi$  = ângulo de atrito na base;

$c$  = coesão na base (M.L<sup>-1</sup>.T<sup>-2</sup>);

$B$  = largura da base da estrutura (L);

$\Sigma H$  = somatório das forças horizontais (M.L.T<sup>-2</sup>).

Observando-se a expressão, pode-se concluir que as únicas grandezas passíveis de serem modificadas pelo projetista são: o peso da estrutura, a resultante das subpressões e a área da base. Assim, com a minoração da subpressão, há um decréscimo no consumo de concreto. Portanto, a determinação das subpressões é de grande importância tanto para a estabilidade da estrutura quanto no aspecto econômico.

### 2.3.1 Critérios de Subpressão

Após a “descoberta” da subpressão, surgiram várias hipóteses para o seu estabelecimento. A primeira, segundo Andrade (1982), foi a de Lieckfeldt, 1898, na qual se admitia uma distribuição retangular, conforme a figura 2.10.



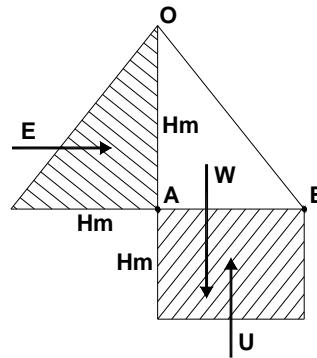


Figura 2.10. Hipótese de Lieckfeldt (ANDRADE, 1982)

A segunda hipótese foi a de Levy, 1899, onde a subpressão se estabelecia linearmente de montante para jusante (Figura 2.11).

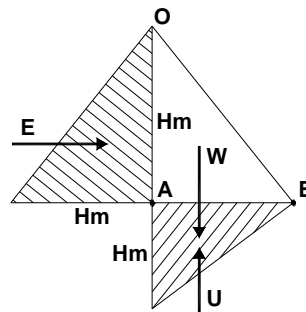


Figura 2.11. Hipótese de Levy (ANDRADE, 1982)

Andrade (1982) relata que em 1951, a American Society of Civil Engineers organizou um comitê para estudar a possibilidade de explicar a subpressão. Foi exposto, então, o seguinte (Figura 2.12):

Estabelecia-se inicialmente que a subpressão, como definida por Levy, variaria linearmente de montante para jusante e caberiam dois coeficientes: o coeficiente de área e o de intensidade. O coeficiente de área representaria a percentagem da área de atuação da subpressão. O coeficiente de intensidade seria uma percentagem da carga máxima de montante.

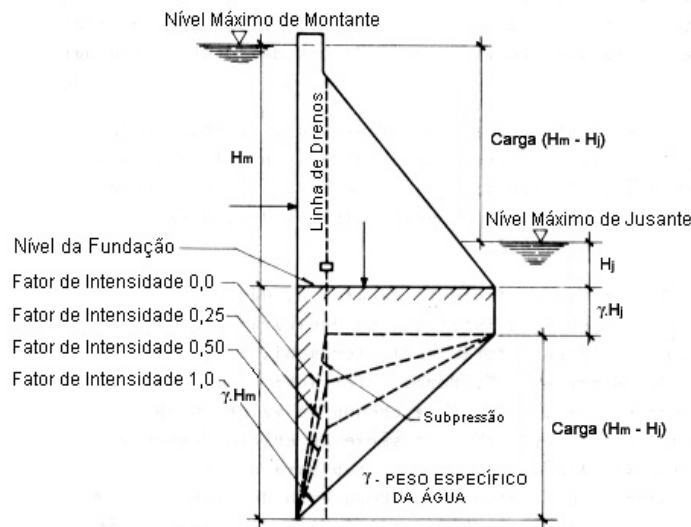


Figura 2.12. Diagrama de intensidade de subpressão com vários fatores (ANDRADE, 1982)

O fator de intensidade  $FI$  dependeria das condições geológicas da fundação, principalmente no que dizia respeito à estrutura, capacidade de absorção e permeabilidade, sistema dominante das camadas, juntas, espessuras e estanqueidade relativa dos estratos.

Casagrande (1961) estudou casos hipotéticos de situações com cortinas de drenagem e de injeções eficientes e ineficientes, como ilustrado na figura 2.13.

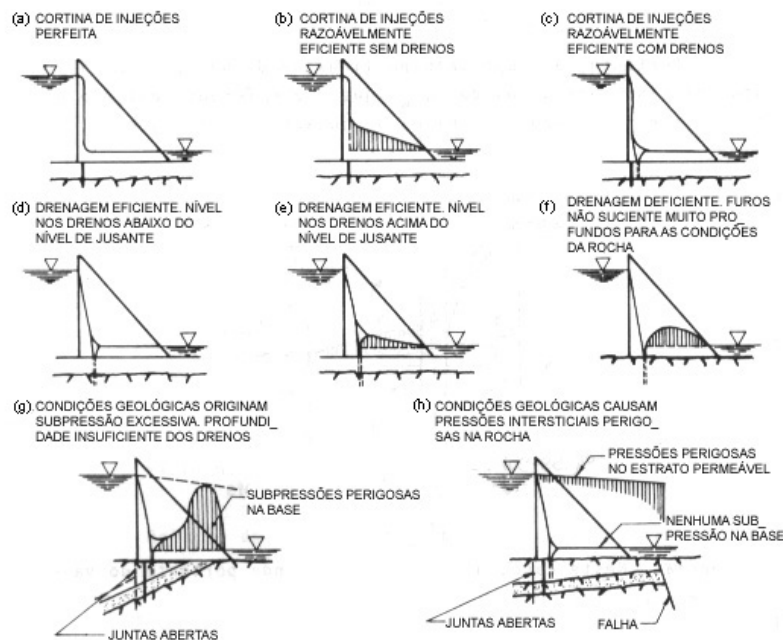


Figura 2.13. Casos hipotéticos dos estudos de Casagrande, 1961

Assim como Casagrande, Londe (1972 apud GUIMARÃES, 1988) também faz considerações sobre o papel das injeções e drenagem na subpressão (Figura 2.14).

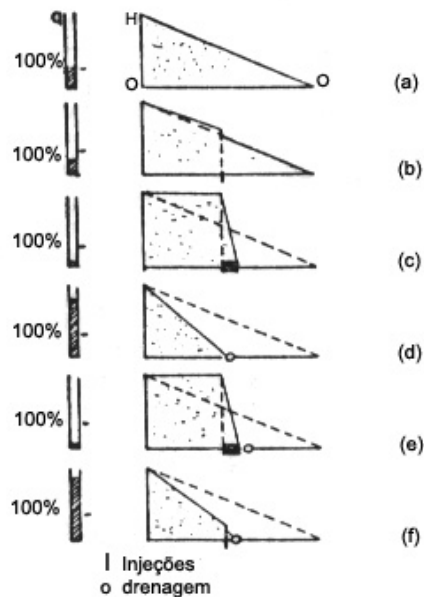


Figura 2.14. Papel das injeções e drenagem segundo Londe, 1972 (GUIMARÃES, 1988)

Para ele, a cortina de vedação só apresenta eficácia na redução das vazões e pressões a jusante se possuir espessura suficiente e se produzir no maciço uma notável diferença de permeabilidade ( $b \neq c$ ). Neste caso, a drenagem torna-se dispensável ( $c = e$ ). No caso de injeções em maciços de baixa permeabilidade, seu efeito é muito reduzido, devido à penetração limitada e conseqüente pequena espessura. A cortina de vedação é praticamente inexistente ( $b \approx a$ ) e as pressões acabam sendo condicionadas pela drenagem ( $d \approx f$ ). Além disso, cortinas com pequena espessura têm sua eficácia comprometida pela possibilidade de existência de vazios.

Atualmente, cada órgão controlador procura apresentar seus critérios de projeto, os quais fixam valores máximos de subpressões a serem admitidos nas diferentes fases do projeto. Estes critérios levam ou não em consideração os dispositivos de injeção e drenagem.

- **CRITÉRIO SUECO:** adota o valor de 100% ou 1,0 para os fatores de área e intensidade, resultando em um diagrama triangular ou trapezoidal, dependendo do nível de jusante. Cortinas de injeção e drenagem não são levadas em consideração. (ANDRADE, 1982)
- **CRITÉRIO ITALIANO:** as subpressões devem decrescer linearmente, desde um valor igual à pressão hidrostática no paramento de montante, até uma fração “ $f$ ” desta pressão na linha de drenos e daí até zero ou até um valor igual à carga de jusante. O valor da fração “ $f$ ” varia entre 0,3 e 0,5, dependendo das características de permeabilidade da rocha e distância entre drenos. (NUNES, 1963 apud GUIMARÃES, 1988)
- **CRITÉRIO ALEMÃO:** recomenda que, junto à cortina de injeção seja admitida a carga do reservatório (diagrama retangular) e, junto aos drenos considere-se um fator de redução de pressão de 0,4. (NUNES, 1963 apud GUIMARÃES, 1988)
- **CRITÉRIO DO U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS:** faz considerações de subpressão ao longo da base e na fundação. A subpressão age em 100% da base. Sua distribuição depende da eficiência dos drenos e da cortina de injeção, onde aplicáveis, e de feições geológicas como: permeabilidade da rocha, fendas, falhas e juntas. A subpressão em qualquer ponto abaixo da estrutura será a pressão do nível d’água de jusante mais a pressão medida como uma ordenada do nível d’água de jusante ao gradiente hidráulico entre os níveis de montante e jusante. A figura 2.15 mostra as diversas hipóteses com ou sem drenos.

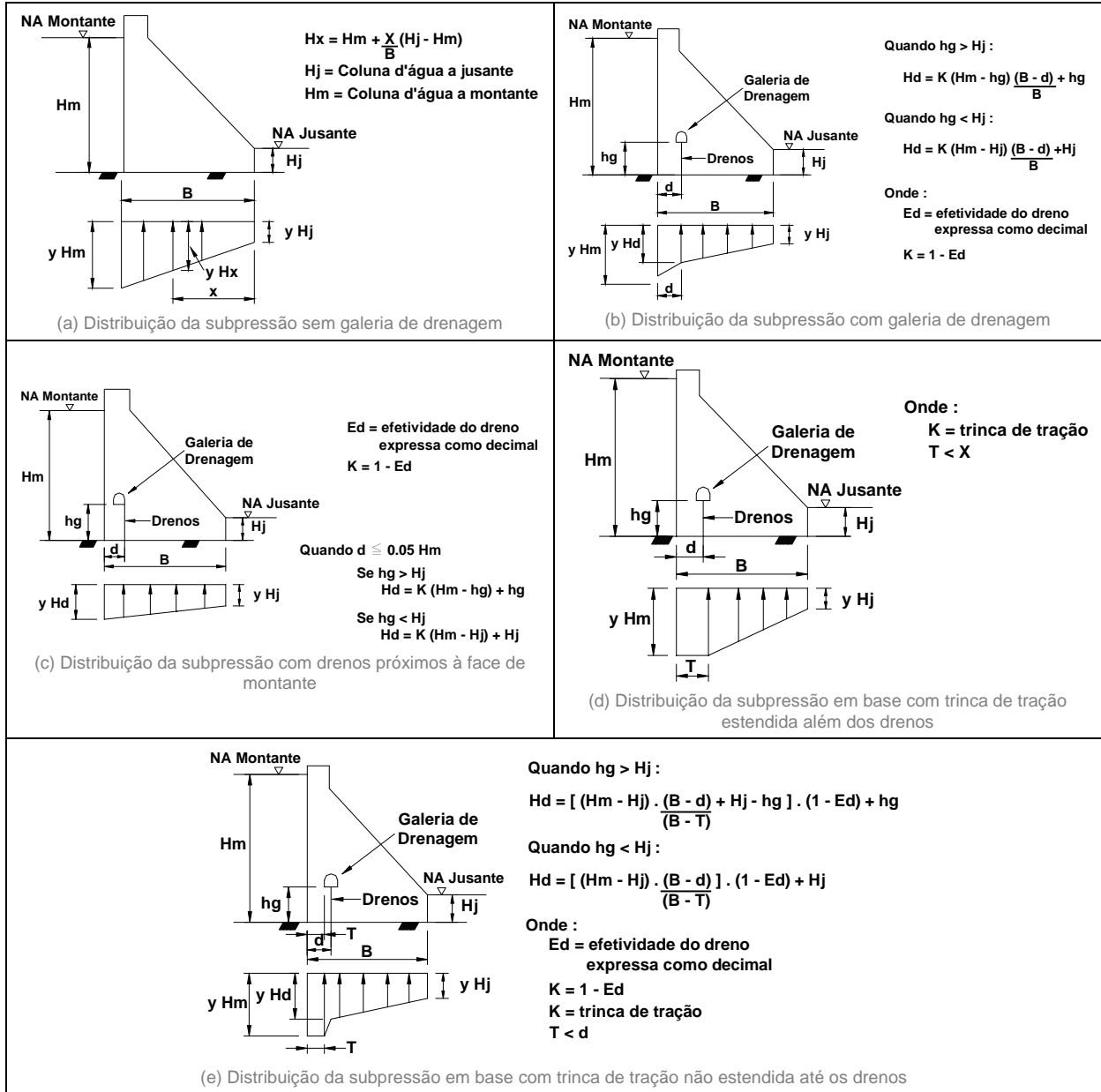


Figura 2.15. Critérios do U.S. Army Corps of Engineers para consideração da subpressão

- CRITÉRIO DO U.S. BUREAU OF RECLAMATION:** considera a subpressão atuando em 100% da área da base e um fator de intensidade de 1/3 da carga hidrostática imposta à estrutura, na linha de drenos (Figura 2.16). Comparando-se ao critério anterior, pode-se observar que o valor da variável  $H_d$  será maior usando o critério do USBR, pois, no primeiro, a diferença entre os níveis de montante e jusante é multiplicada pelo termo  $(B - d) / B$ . (OSAKO, 2002)

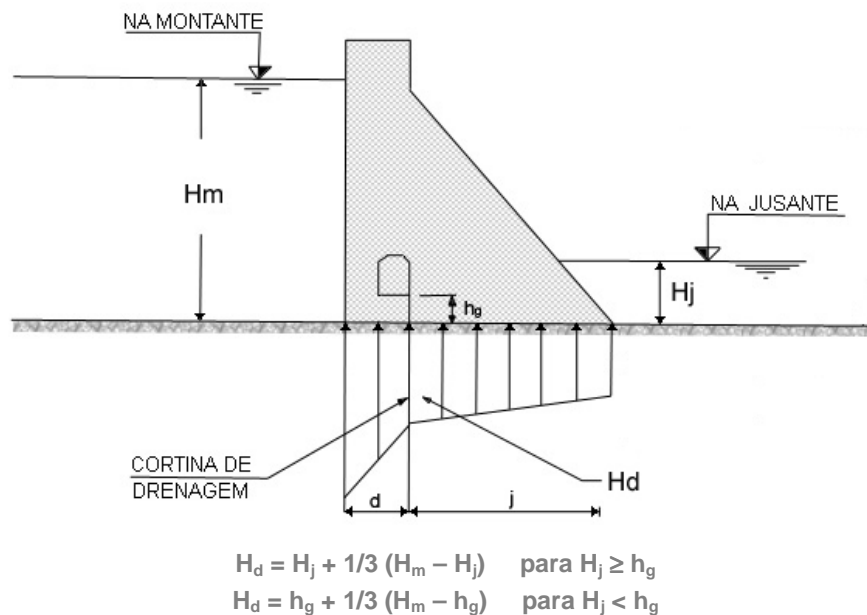


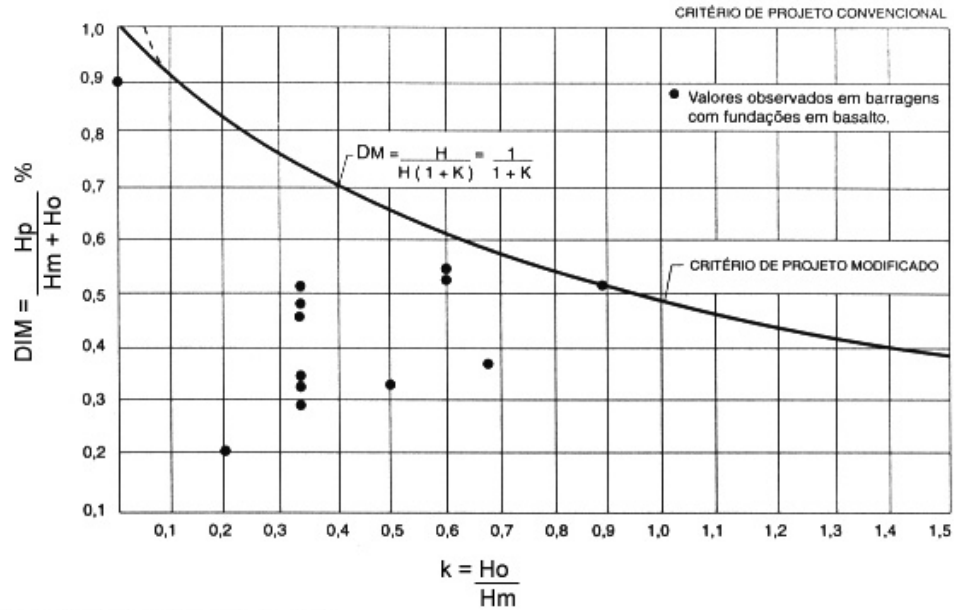
Figura 2.16. Critério do USBR para consideração da subpressão

Guidicini e Andrade (1983), baseando-se principalmente na observação de barragens brasileiras fundadas em basalto, acreditam que hipóteses de subpressão como as do U.S. Corps of Engineers e do USBR mostram-se muito distanciadas do comportamento efetivo dos protótipos e se revelam sempre muito conservadoras, sobretudo ao serem aplicadas a estruturas dotadas de dispositivos múltiplos de drenagem. Este fato levou vários autores a elaborarem novos critérios de subpressão, como os posteriormente apresentados.

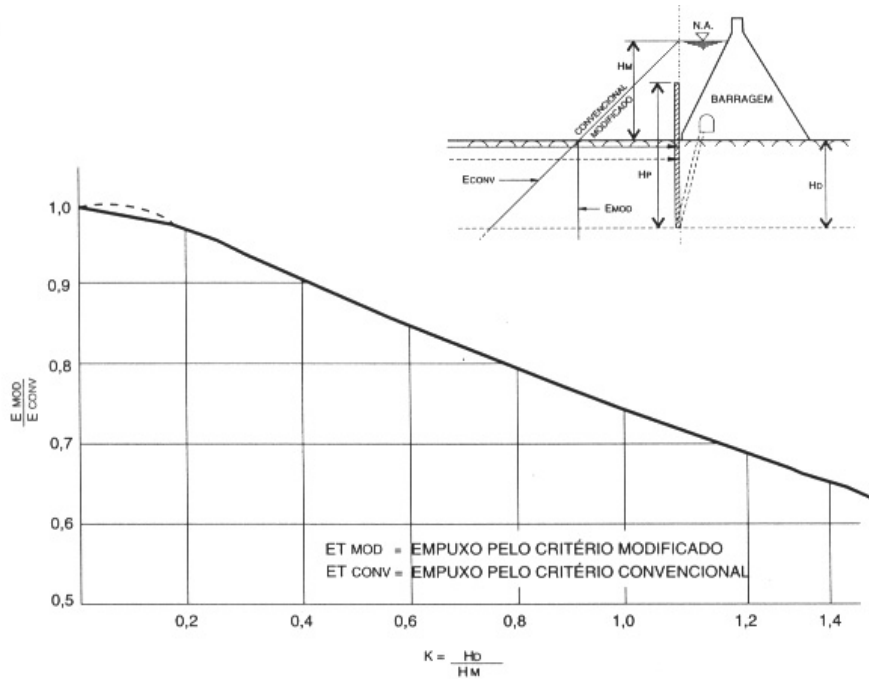
- CRITÉRIO DE CRUZ E SILVA (1978):** adotam um método observacional, para introduzir um critério para emprego em fundações basálticas de estruturas tipo gravidade e para os horizontes de percolação preferencial neles contidos. Nas 23 estruturas observadas, a envoltória correspondente a uma eficiência de drenagem de 67% cobre mais de 90% dos casos e 100% das barragens. A partir de uma análise detalhada do comportamento dos piezômetros locados em pontos estratégicos, com relação à posição de cortinas de vedação e linhas de drenagem, concluem pela inexistência de efeitos devidos à formação de “fendas de tração” e propõem a adoção de um critério de coeficiente de perda de carga a montante (Figura 2.17). O

diagrama de empuxos a montante sofre reduções graduais, à medida que o plano de análise se aprofunda para o interior do maciço rochoso. O diagrama de subpressões também sofre reduções, em virtude destas perdas de carga que o maciço propicia.

(CRUZ; SILVA, 1978)



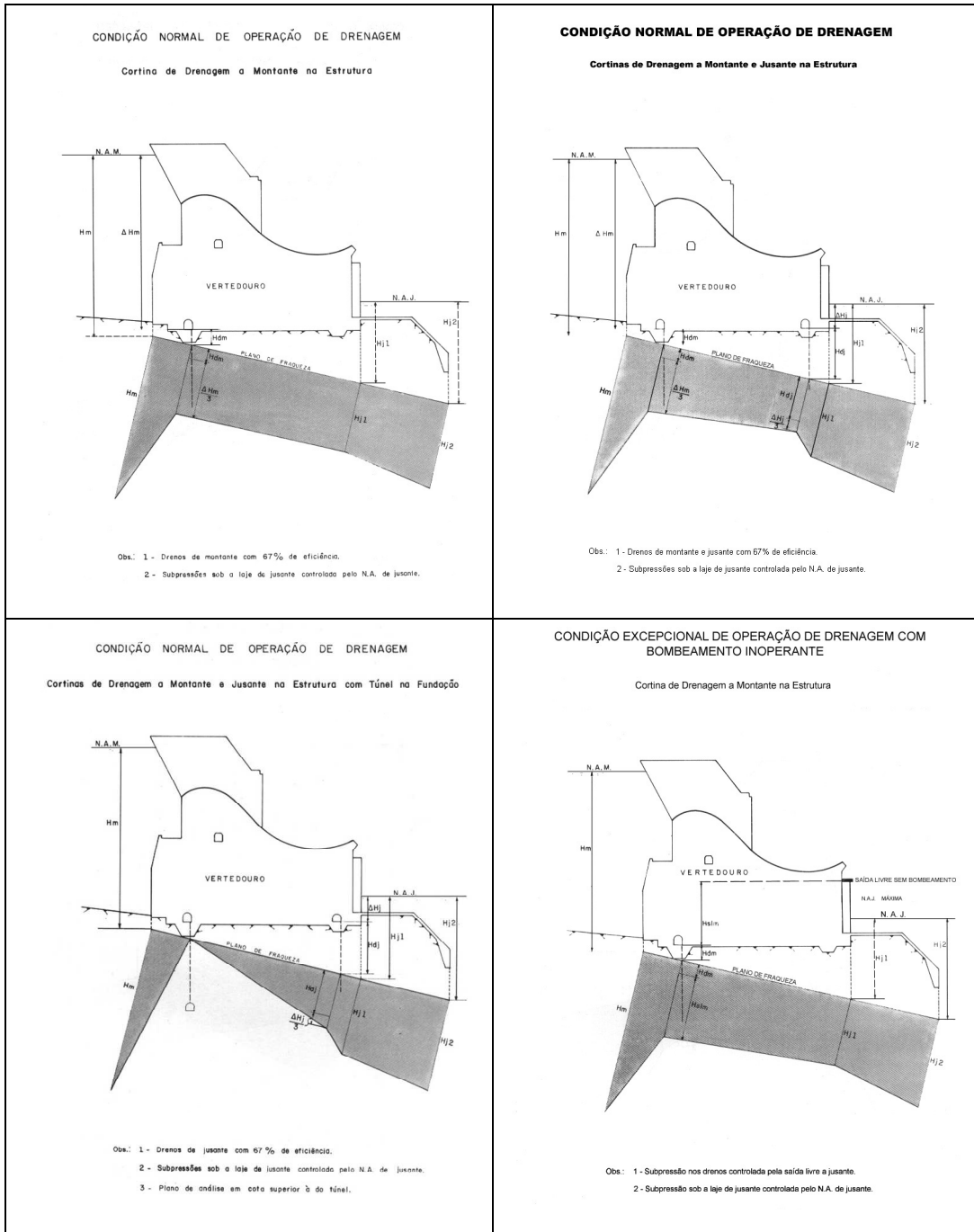
(a) subpressões propostas e observadas



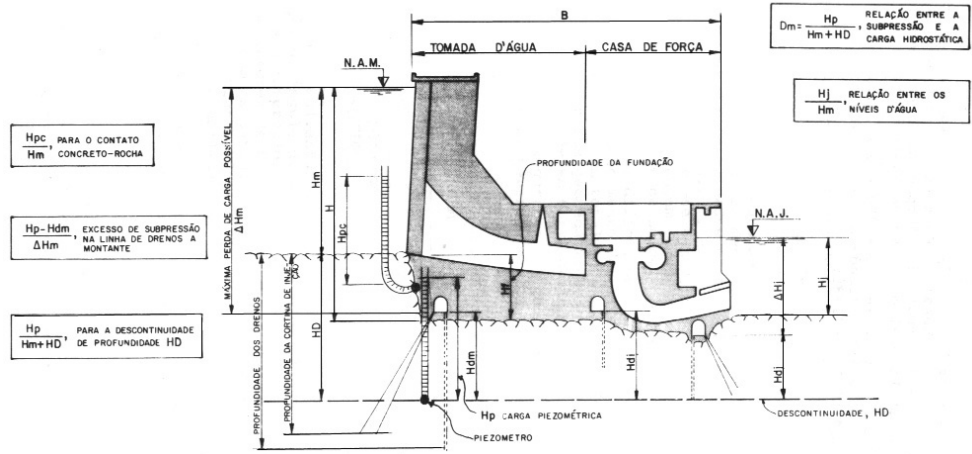
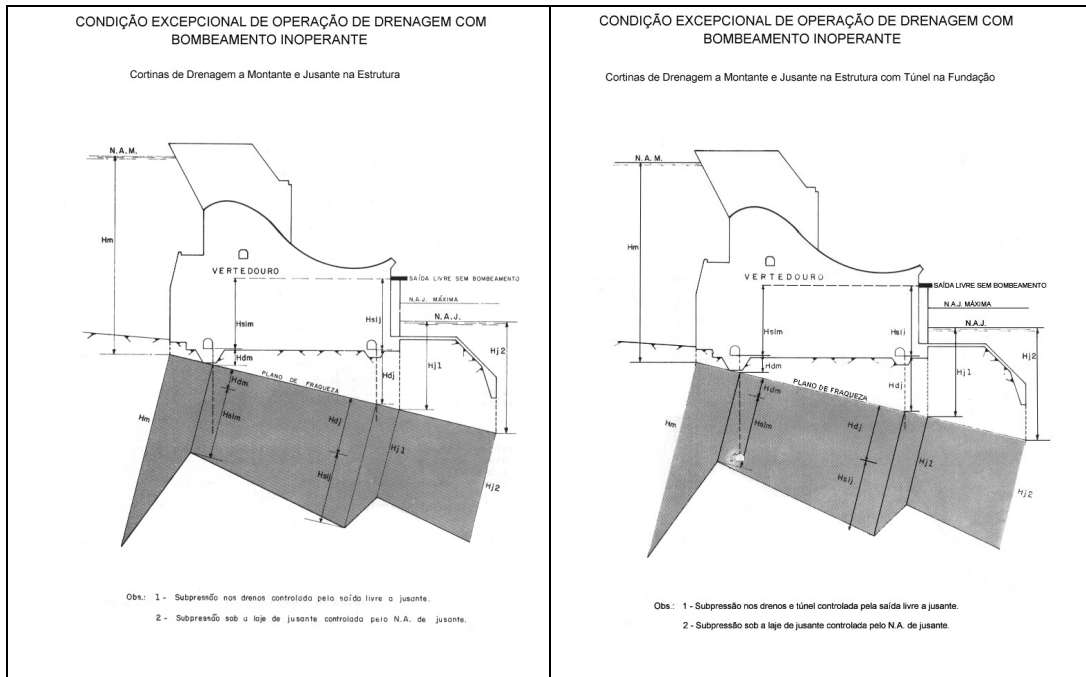
(b) redução do empuxo de água com a profundidade

Figura 2.17. Critério de Cruz e Silva (1978)

- CRITÉRIO DE CRUZ E BARBOSA (1981):** utilizam observações de obras no Brasil e no exterior para apresentar critérios para determinação de subpressão no contato concreto-rocha e em planos de fraqueza estruturais existentes na rocha de fundação de barragens concreto-gravidade (Figura 2.18).



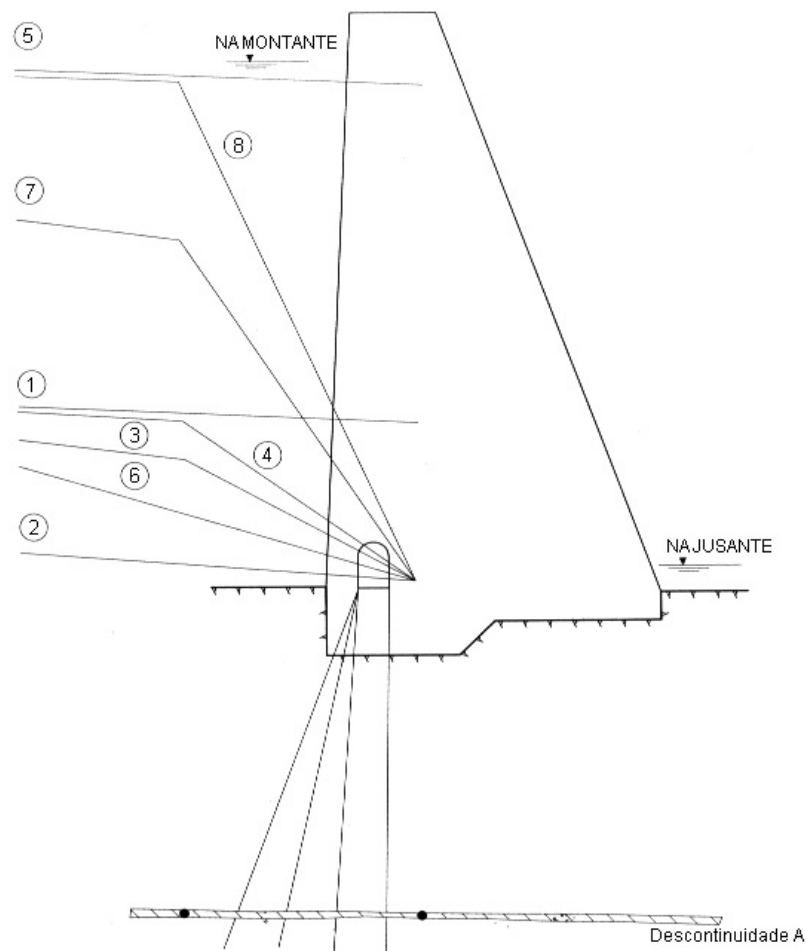




SÍMBOLOS REFERIDOS NAS FIGURAS

Figura 2.18. Critério de Cruz e Barbosa (1981)

- **CRITÉRIO DE AZEVEDO (1993):** esse autor também analisou a subpressão em fundações em rochas basálticas, na Barragem de Taquaruçu, chegando ao diagrama de subpressões apresentado na figura 2.19.



### DIAGRAMAS DE SUBPRESSÕES

CASO A - Descontinuidade "A" não aflora no reservatório    CASO B - Descontinuidade "A" aflora no reservatório

- |   |   |
|---|---|
| ① - sem injeção ou com injeção, sem drenagem          | ⑤ - sem injeção ou com injeção, com drenagem          |
| ② - injeção ineficiente, drenagem eficiente           | ⑥ - injeção ineficiente, drenagem eficiente           |
| ③ - injeção com eficiência de 66%, drenagem eficiente | ⑦ - injeção com eficiência de 66%, drenagem eficiente |
| ④ - injeção 100% eficiente                            | ⑧ - injeção 100% eficiente, drenagem eficiente        |

Figura 2.19. Critério de Azevedo (1993)

- **CRITÉRIO DE CRUZ (1996):** Cruz apresenta, em seu livro, esquemas de redução de subpressão numa feição permeável de uma barragem de concreto hipotética apoiada em rocha, considerando casos de tratamento somente com drenagem, somente com injeção e com drenagem e injeção, para uma ou duas galerias (Figura 2.20).

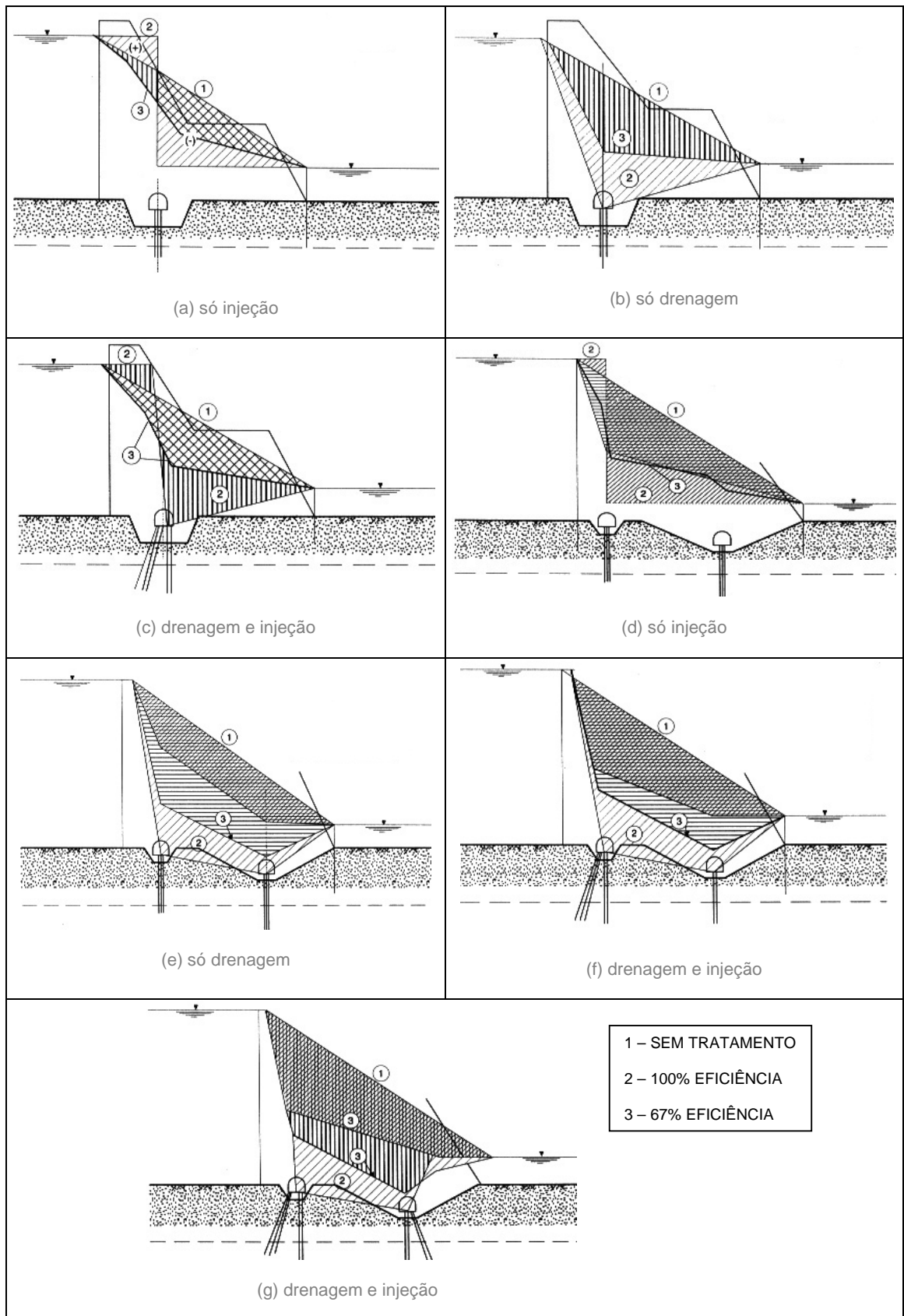


Figura 2.20. Critério de Cruz (1996)

Esse autor ainda mostra (Tabela 2.3) os valores das subpressões totais o plano da descontinuidade, e as reduções previstas para os vários tratamentos, considerando eficiência de 100% (teórica) e 67% (comum em critérios de projeto). Para as vazões, admitindo gradiente linear na fundação para a condição sem tratamento, pode-se estimar a redução ou o aumento das vazões resultantes dos tratamentos.

Tabela 2.3 – Subpressões e Vazões Relativas do Critério de Cruz, 1996

CASO	SUBPRESSÃO TOTAL (1)	SUBPRESSÃO		VAZÕES	
		100%Eficiência	67%Eficiência	100%Eficiência	67%Eficiência
A	U	0,83 U	0,85 U	0	034 Q
B	U	0,53 U	0,71 U	5,2 Q	3,6 Q
C	U	0,52 U	0,73 U	0,4 Q	0,7 Q
D	U	0,64 U	0,72 U	0	0,22 Q
E	U	0,37 U	0,57 U	9,3 Q	7,1 Q
F	U	0,39 U	0,56 U	1,4 Q	2,0 Q
G	U	0,44 U	0,50 U	0	1,3 Q

(CRUZ, 1996)

- **CRITÉRIO DA ELETROBRÁS (2001):** segundo Osako (2002), a Eletrobrás elaborou critérios, com auxílio do Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, de modo a tentar uniformizar os utilizados no Brasil. Para tanto, seguiu-se o molde do USBR. A seguir estão apresentados os principais critérios (Figura 2.21):

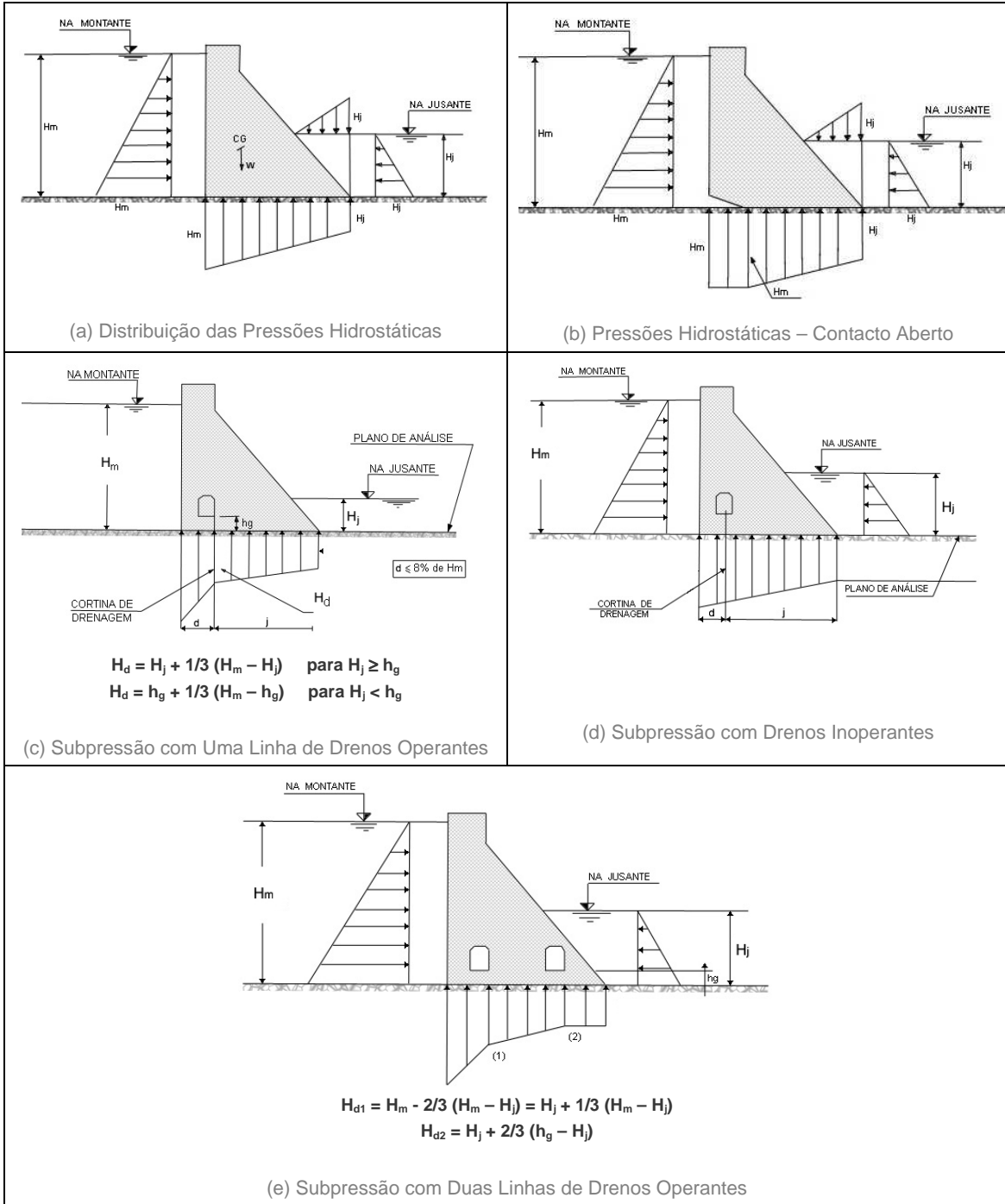


Figura 2.21. Critério de Subpressão da Eletrobrás (OSAKO, 2002)

## 2.4 TRATAMENTO DO MACIÇO ROCHOSO POR INJEÇÃO DE CIMENTO

As primeiras experiências com injeções foram realizadas na França, em 1802, quando o engenheiro Charles Bérigny fez uso de um processo de injeção para consolidação das fundações da eclusa de Dieppe, um porto marítimo da França, visando à recuperação da mesma. Empregou-se então uma argamassa pozolânica para a consolidação de uma camada muito permeável de cascalho, injetada através de tubos providos de pistão. A injeção foi bem sucedida. Esta foi, ao que consta, a primeira experiência realizada no campo de tratamento de fundações.

A primeira aplicação em barragens se deve a Collin, em 1838, na Barragem de Grosbois, no canal de Bourgogne (França), onde apareceram trincas na alvenaria do paramento de jusante (GLOSSOP, 1960 apud SAMPAIO, 1988).

De acordo com Azevedo (1993), certa sistematização do processo vem dos trabalhos de Maurice Lugeon, 1933, que criou e divulgou o método de ensaio que leva o seu nome.

Papadakis (1962 apud SAMPAIO, 1988), preocupado com as características reológicas das caldas de cimento, recomenda a consulta à chamada « curva de injetabilidade », que constitui, ainda hoje, um valioso ponto de apoio na escolha da relação água/cimento.

No Brasil, a primeira experiência do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) em injeções de calda de cimento em fundações de barragens ocorreu durante a construção da Barragem de Barra Bonita (Rio Tietê, SP), na década de 50.

Os estudos mais extensos sobre o tratamento de fundações de barragens por injeções ocorreram durante a construção da Barragem de Ilha Solteira (Rio Paraná, SP/MS), na década de 60.

Hsu, Re e Ono (1970) afirmam que os processos de tratamento por meio de injeções, de fundações e ombreiras, visam aos seguintes objetivos:

- Reduzir a perda d'água por percolação;
- Controlar a pressão d'água dentro do maciço da fundação e no contato estrutura – fundação da barragem;
- Melhorar a resistência mecânica e as propriedades elásticas das rochas fraturadas;
- Obter informação de maiores detalhes das anomalias da fundação pela observação dos furos de injeção.

Além disso, estes autores explicam que a necessidade ou a desejabilidade do tratamento depende principalmente dos seguintes fatores:

- Altura da barragem;
- Permeabilidade da fundação;
- Importância que se dá à perda d'água através da fundação;
- Natureza da rocha e suas fraturas.

Nos EUA, em geral, injeções não são executadas para barragens de menos de 15 m de altura e aquelas maiores de 30 m, usualmente recebem este tratamento.

Segundo Marques Filho (1986), as injeções podem ser efetuadas tanto em rochas como em solos, variando, em cada caso, as finalidades e, principalmente, os métodos de execução. Nas rochas, tratam-se predominantemente os maciços fraturados e apenas raramente os de tipo essencialmente intergranular, como os de arenito, a não ser quando fraturados.

Para Munarski (1977), os métodos empregados dependem dos objetivos a serem atingidos. Por exemplo, em uma rocha maciça, uma simples linha de injeções é capaz de reduzir as infiltrações pelas fundações da barragem, no entanto, em uma rocha bastante fraturada e com muitas diáclases, deve-se executar nova linha de furos cobrindo uma faixa. Em outro caso, quando as condições do subsolo não favorecem a migração da calda para distâncias apreciáveis, pode-se aumentar o número de furos.

As injeções podem ser divididas, de acordo com suas finalidades em:

- a) **INJEÇÕES DE IMPERMEABILIZAÇÃO:** destinam-se a obturar as fissuras e descontinuidades de qualquer tipo de rochas de fundação. Em consequência, provocam a perda de carga hidrostática, reduzem a percolação d'água e as subpressões.
- b) **INJEÇÕES DE CONSOLIDAÇÃO:** aumentam a compacidade das rochas, melhorando sua resistência mecânica e seu módulo de elasticidade. Empregam-se em rochas fraturadas de baixa resistência e refletem na sua impermeabilização.
- c) **INJEÇÕES DE COLAGEM:** aumentam a aderência na interface barragem e fundação, contribuindo para a redução da permeabilidade e da subpressão.

#### 2.4.1 Considerações sobre o Processo Executivo das Injeções

Pela descrição de Marques Filho (1986), a injeção é efetuada através de furos abertos na rocha, em geral com equipamento roto-percussivo. Para evitar que os detritos penetrem nas fraturas abertas e colmatem os vazios, esta perfuração é sempre executada com circulação de água e seguida por lavagem cuidadosa.

Os furos rotativos com retirada de testemunho são reservados para furos exploratórios (para determinar as características da rocha antes da injeção) e de verificação (para verificar a eficiência do tratamento), já que o seu custo é da ordem de 4 a 6 vezes maior do que os roto-percussivos.

Os furos podem ser verticais ou inclinados. Os trabalhos são, em geral, mais eficientes e baratos quando os furos se dispõem normalmente às fraturas principais.

Os equipamentos de injeção (Figura 2.22) geralmente consistem de:

- a) **Misturadores:** preparam a calda. São em geral de alta rotação, 1.000rpm ou mais, para dispersar bem os grânulos de cimento.
- b) **Agitadores:** mantêm a calda homogênea.



- c) Bombas: injetam a calda sob pressão. Devem ter capacidade para injetar grandes vazões de calda a pressões elevadas, de até  $20\text{kgf/cm}^2$ .
- d) Equipamentos complementares: mangueiras, engates rápidos, registros, manômetros e conjunto de hastes e obturador, que descem ao furo para efetuar a injeção em trechos mais profundos.

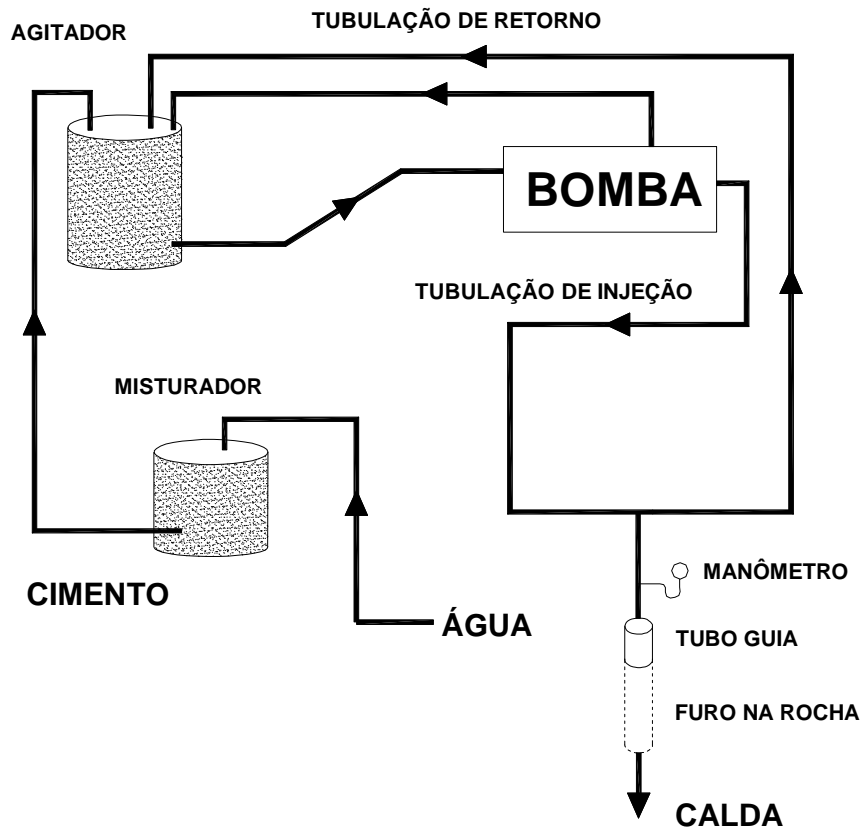


Figura 2.22. Exemplo de equipamento de injeção (modificado de MARQUES FILHO, 1986)

Os trabalhos de injeção geralmente implicam em fases de perfuração, de ensaio, de injeção e de verificação. Os ensaios são os testes de perda de água sob pressão, realizados para avaliar a permeabilidade da rocha e as características das fraturas. Segundo Marques Filho (1986), ao contrário da prática usual há algumas décadas, atualmente não se costuma ensaiar todos os furos. O mais comum é concentrar-se nos furos iniciais e finais ou de verificação, simplificando-se os ensaios, efetuando testes com apenas um estágio de pressão, em trechos mais longos e às vezes no furo todo, com maior rapidez.

Existem dois tipos básicos de tratamentos por injeção: injeções de cortina e injeções de impermeabilização superficial ou de consolidação. As injeções de consolidação são geralmente feitas para diminuir a permeabilidade ao longo de uma área relativamente extensa, porém até uma profundidade relativamente pequena (5 a 10m). Entretanto, como já citado anteriormente, são efetivamente de consolidação quando a sua finalidade é melhorar as características de resistência da rocha. As injeções deste tipo são freqüentemente efetuadas introduzindo-se calda em diversos furos simultaneamente. Também é comum iniciar por furos mais afastados uns dos outros e apenas numa segunda etapa, se necessário, injetar os furos intermediários (MARQUES FILHO, 1986).

As injeções de cortina visam a criar uma zona menos permeável, relativamente estreita, subvertical ou levemente inclinada para montante, disposta como uma continuação das estruturas de impermeabilização da própria barragem. Pode ser constituída por uma, duas ou até três linhas de furos. É freqüente efetuar uma linha central que vai a maiores profundidades e duas linhas de furos mais rasos, a montante e a jusante da central. Sampaio (1983), ao estudar 19 barragens brasileiras (17 fundadas em basalto, 1 em quartzito e 1 em moscovita gnaisses), constatou que o número de linhas utilizada variou de 1 a 4, sendo contudo os números mais freqüentes de 1 a 3.

Nas barragens de concreto, é usual efetuar as injeções a partir das galerias que são construídas para tal fim e para drenagem, no extremo de montante da barragem. Entretanto, apesar de constituir-se em uma solução de ótima qualidade, pois podem ser efetuadas com pressões mais elevadas e com boa obturação dos vazios superficiais, os trabalhos realizados a partir de galerias de pequenas dimensões são muito incômodos e freqüentemente mais caros. Uma alternativa muito utilizada é a de injetar externamente ao paramento de montante, em uma saliência ligada à estrutura principal, como ilustra a figura 2.23b. O segundo método é menos eficiente que o primeiro, além de que as tensões desenvolvidas no pé de montante da barragem, no enchimento, são predominantemente de tração, podendo causar reabertura das fissuras injetadas. Entretanto, muitas barragens

brasileiras como Salto Osório, Salto Santiago, Foz do Areia, Jordão e Salto Caxias, foram executadas desta maneira apresentando excelentes resultados (MARQUES FILHO, 1986).

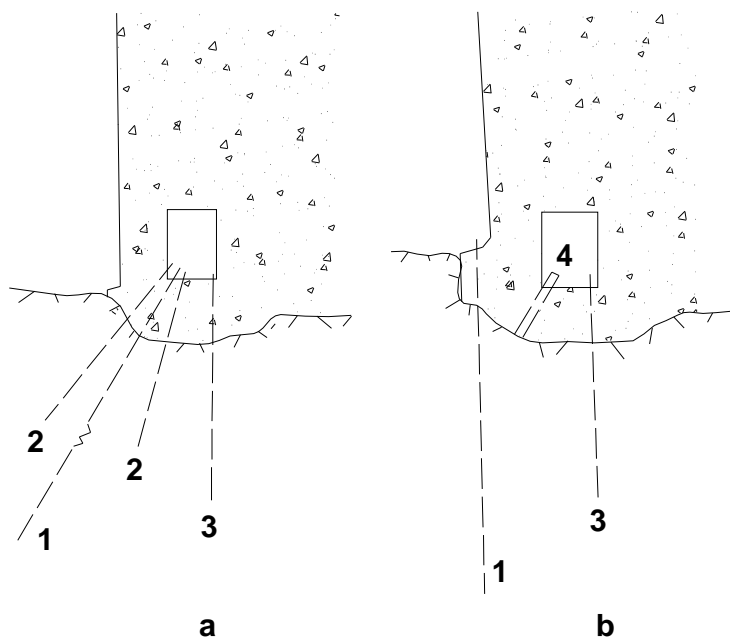


Figura 2.23. Esquemas alternativos ou complementares de injeção junto ao paramento de montante de estruturas de concreto dotadas de galerias de drenagem. (1) – furos para injeção profunda, (2) – furos para injeção rasa, (3) – furos de drenagem, (4) – tubos guia deixados através da armadura para eventual reforço da injeção a partir da galeria. No esquema a, os furos (2) são executados antes dos furos (1). (MARQUES FILHO, 1986)

De acordo com Marques Filho (1986), a profundidade das cortinas de injeção varia bastante de obra para obra, dependendo das condições geológicas locais. Em calcários carstificados, por exemplo, onde as infiltrações podem ser muito grandes, as cortinas chegam a profundidades de mais de uma vez a altura máxima da barragem. Nos casos mais comuns, encontrado um estrato impermeável, raramente se atingem profundidades maiores que meia altura da barragem. As 19 barragens relatadas por Sampaio (1983) apresentaram profundidade média dos furos de 30 m, o que representa, na grande maioria, metade da altura da barragem.

Os critérios de injeção também variam com a profundidade, mais rigorosos nos primeiros 10 a 20m e progressivamente menos rigorosos a maiores profundidades, onde os trabalhos visam a encontrar e obturar apenas fraturas muito abertas e grandes vazios.

Cruz (1996) propõe um critério para cortinas de injeção em maciços rochosos extremamente fraturados:

- para permeabilidade média da fundação entre  $5 \times 10^{-4}$  e  $10^{-3}$  cm/s, utilizar linha única de injeção;
- para permeabilidade média da fundação superior a  $10^{-3}$  cm/s, utilizar linha tripla com profundidade igual a  $0,4\Delta H$ , sendo  $\Delta H$  a diferença de carga entre o nível máximo do reservatório e o nível mínimo de jusante;
- a profundidade da cortina deve atender sempre a critérios geológicos; o valor  $0,4\Delta H$  é apenas indicativo.

Ao se programar a injeção de uma cortina, esta é geralmente dividida em seções e zonas. As seções são subdivisões mais ou menos regulares do comprimento total da cortina; são função do espaçamento dos furos primários e, em geral, representam trechos de cortina onde não se pode efetuar, simultaneamente, trabalhos de injeção, de perfuração e de ensaio. As zonas são divisões feitas em profundidade, como mostradas na figura 2.24.

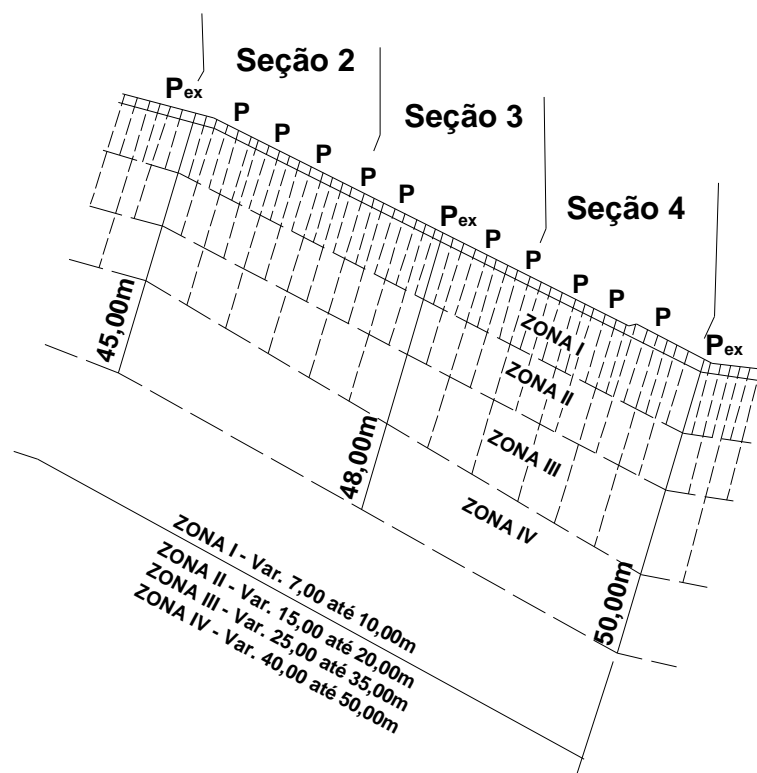


Figura 2.24. Exemplo de divisão de uma cortina em seções e zonas (MARQUES FILHO, 1986)

Quanto ao espaçamento entre furos, Cruz (1996) afirma que estes devem ser de 3,0 m no máximo, quando a linha de injeção for única. Neste caso, a linha de injeção pode ser considerada uma barreira com 1,5 m de largura e permeabilidade de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm/s. No caso de linha tripla de injeções, com mesmo espaçamento entre furos, ela pode ser considerada uma barreira com 3,0 m de largura e permeabilidade semelhante à anterior. Sampaio (1983) também encontrou, em barragens brasileiras, espaçamento entre furos variando de 3,0 a 6,0 m, prevalecendo o de 3,0 m.

As injeções nos furos podem ser feitas de duas maneiras: descendente ou ascendente. O método dos estágios ascendentes consiste em abrir o furo de uma só vez em toda a sua profundidade e injetá-lo de baixo para cima, em diversos estágios de injeção (Figura 2.25). Os estágios, em geral, coincidem com a subdivisão das zonas, sendo que às vezes uma zona pode ser dividida em mais de um estágio, dependendo das suas características de permeabilidade.

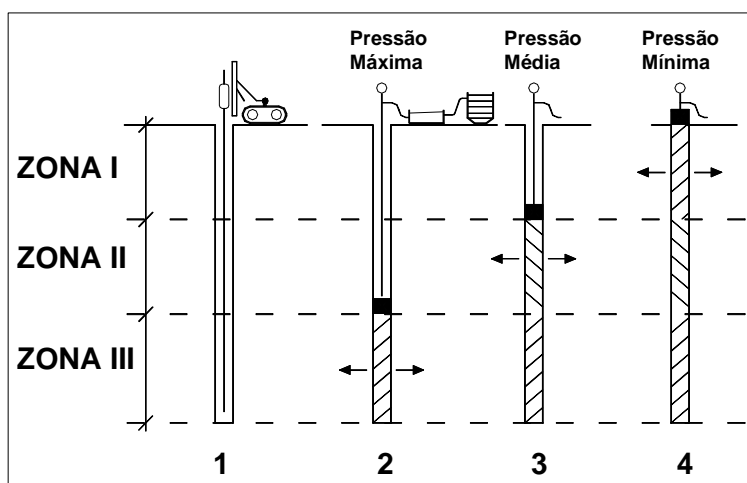


Figura 2.25. Método Ascendente (MARQUES FILHO, 1986)

- (1) – O furo é aberto na profundidade total ;
- (2) – O furo é injetado na zona III – pressão máxima
- (3) – O furo é injetado na zona II – pressão média
- (4) – O furo é injetado na zona I – pressão mínima

No método dos estágios descendentes, as operações seguem ordem inversa, abrindo-se o furo somente até o fim da zona mais superficial, injetando-a, reabrindo o furo

antes da pega final da calda, perfurando a zona seguinte e repetindo-se o processo até o final do furo (Figura 2.26).

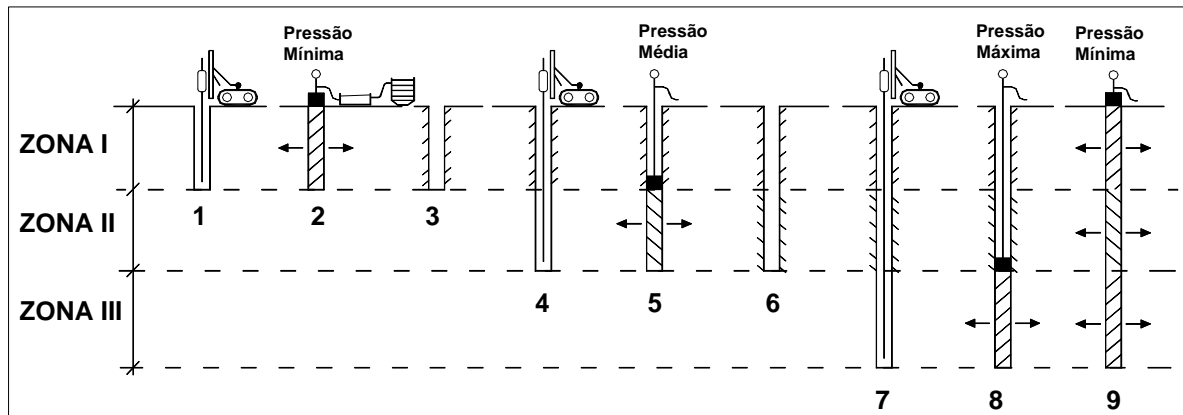


Figura 2.26. Método Descendente (MARQUES FILHO, 1986)

- (1) – O furo é aberto na zona I; (2) – Injeção da zona I; (3) – O furo é reaberto;
- (4) – O furo é aberto até a zona II; (5) – Injeção da zona II (pressão média);
- (6) – reabertura do furo; (7) – Perfuração da zona III;
- (8) – Injeção da zona III (pressão máxima); (9) – Reinjeção e obturação.

O método ascendente é mais rápido e simples que o descendente. Entretanto, o segundo protege melhor a rocha superficial contra excessos de pressão de injeção, sendo o mais recomendado para rochas em que a porção superficial é mais fraturada e sensível ao efeito de pressões elevadas.

Um princípio normalmente empregado na execução de uma cortina de injeção é o espaçamento divisional (Figura 2.27). Primeiro abrem-se furos a distâncias relativamente grandes uns dos outros (6 a 12m), chamados furos primários. Após a sua injeção, são abertos furos secundários, a meia distância entre os primários, e injetados da mesma maneira. Se necessário, são abertos e injetados furos terciários entre os anteriores, diminuindo-se o espaçamento entre os furos de injeção até se atingir o grau de impermeabilização desejado. A subdivisão em seções é feita de modo a permitir que, enquanto numa determinada seção, estejam sendo injetados furos primários, por exemplo, numa adjacente já se esteja efetuando a perfuração e ensaio dos secundários, e assim por diante.

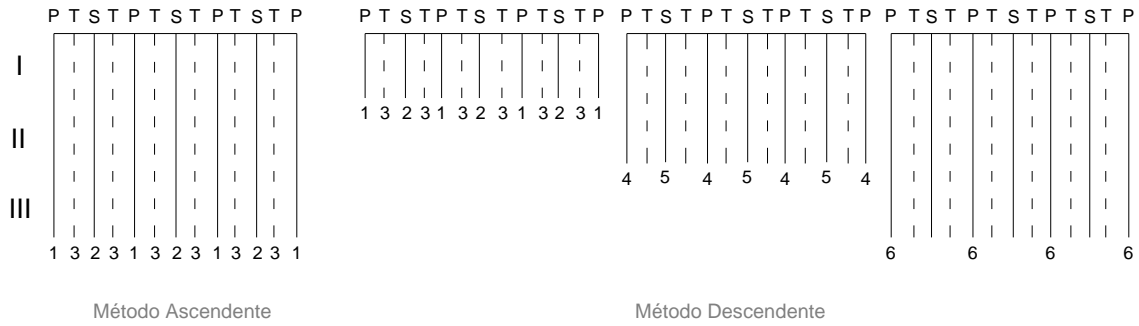


Figura 2.27. Método do Espaçamento Divisional (MARQUES FILHO, 1986)

Uma vantagem do método divisional é ser autoprovante, ou seja, os resultados obtidos em cada fase permitem avaliar a eficiência do tratamento da fase anterior. O projeto da cortina é em geral feito de modo que os furos primários distanciem-se um pouco menos que duas vezes o raio da seção circular de influência da injeção. Assim, neste caso, praticamente bastam os furos primários para concluir a cortina e os furos secundários são feitos quase como uma verificação e complementação deste trabalho, como ilustra a figura 2.28.

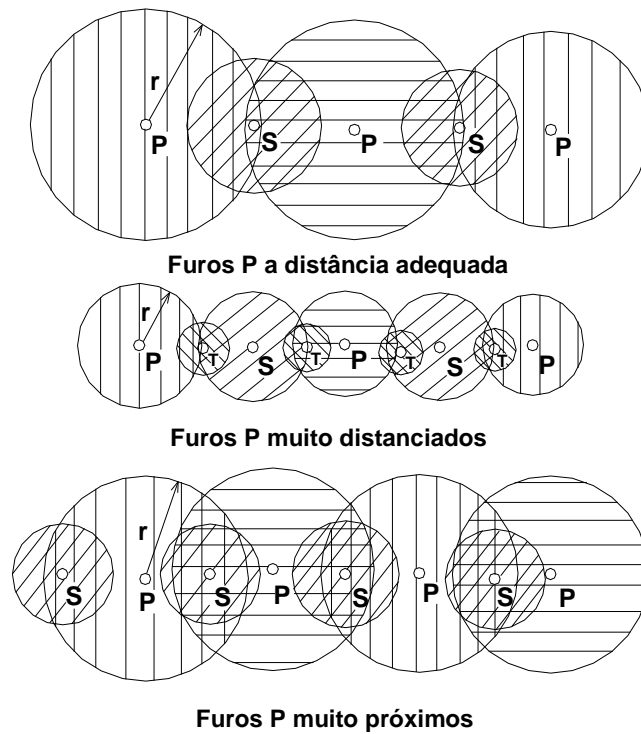


Figura 2.28. Modelo teórico do espaçamento mais conveniente dos furos primários (MARQUES FILHO, 1986)

## 2.4.2 Pressão de Injeção

As pressões de injeção constituem um parâmetro muito controvertido e que deve ser investigado no início dos trabalhos de modo a obter os melhores resultados pelo menor custo. Uma maior pressão de injeção faz crescer a quantidade de calda injetada e, sendo a pressão muito alta, pode determinar a perda de coesão da rocha (MUNARSKI, 1977).

A pressão ideal de injeção, para um determinado maciço rochoso de fundação, é a pressão máxima que não cause movimentação do maciço e, portanto é função da profundidade da zona injetada, estrutura da rocha, atitude das fraturas e da sobrecarga devida à estrutura (INFANTI JR.; NITTA, 1978).

Em linhas gerais, destacam-se duas tendências distintas no que diz respeito às pressões de injeção (MUNARSKI, 1977; MARQUES FILHO, 1986):

- a) **SISTEMA AMERICANO:** defende o uso de pressões de injeção relativamente baixas, em geral próximas as que podem ser calculadas pela regra prática « 1psi / pé de profundidade », o que corresponde aproximadamente a uma progressão de  $0,25\text{kgf/cm}^2$  / metro de profundidade ou a  $\gamma \cdot h$ , ou seja, à densidade do maciço multiplicada pela profundidade da injeção. A bomba de injeção geralmente utilizada é de forte vazão que alimenta um sistema fechado sob pressão.
- b) **SISTEMA EUROPEU:** adota pressões altas, com gradientes da ordem de  $1\text{kgf/cm}^2$  / metro de profundidade ou ainda maiores. A injeção se realiza com bomba de pequena capacidade e com pressões interligadas a vazões, uma vez que se aumentando a pressão diminui-se a vazão.

Segundo Marques Filho (1986), no Brasil, a prática mais comum tem sido a de seguir o sistema americano, mas a tendência atual é a de usar pressões mais elevadas.

As altas pressões geralmente trazem economia aos trabalhos, uma vez que elas tendem a produzir um alargamento nas fissuras e com isso permitem uma penetração



melhor até mesmo de caldas relativamente grossas e feitas com cimentos comuns. Também ampliam substancialmente a distância de penetração das caldas. Assim, pressões elevadas tendem a aumentar a quantidade de calda que é injetada a partir de um mesmo furo, aumentando seu raio de influência, fazendo com que se possa efetuar o tratamento de modo mais eficiente e com um menor número de perfurações. Como o custo da perfuração constitui, via de regra, a maior parcela no custo total de um trabalho de injeção, o emprego de altas pressões pode diminuir consideravelmente o custo de um tratamento deste tipo, além de normalmente melhorar bastante sua qualidade.

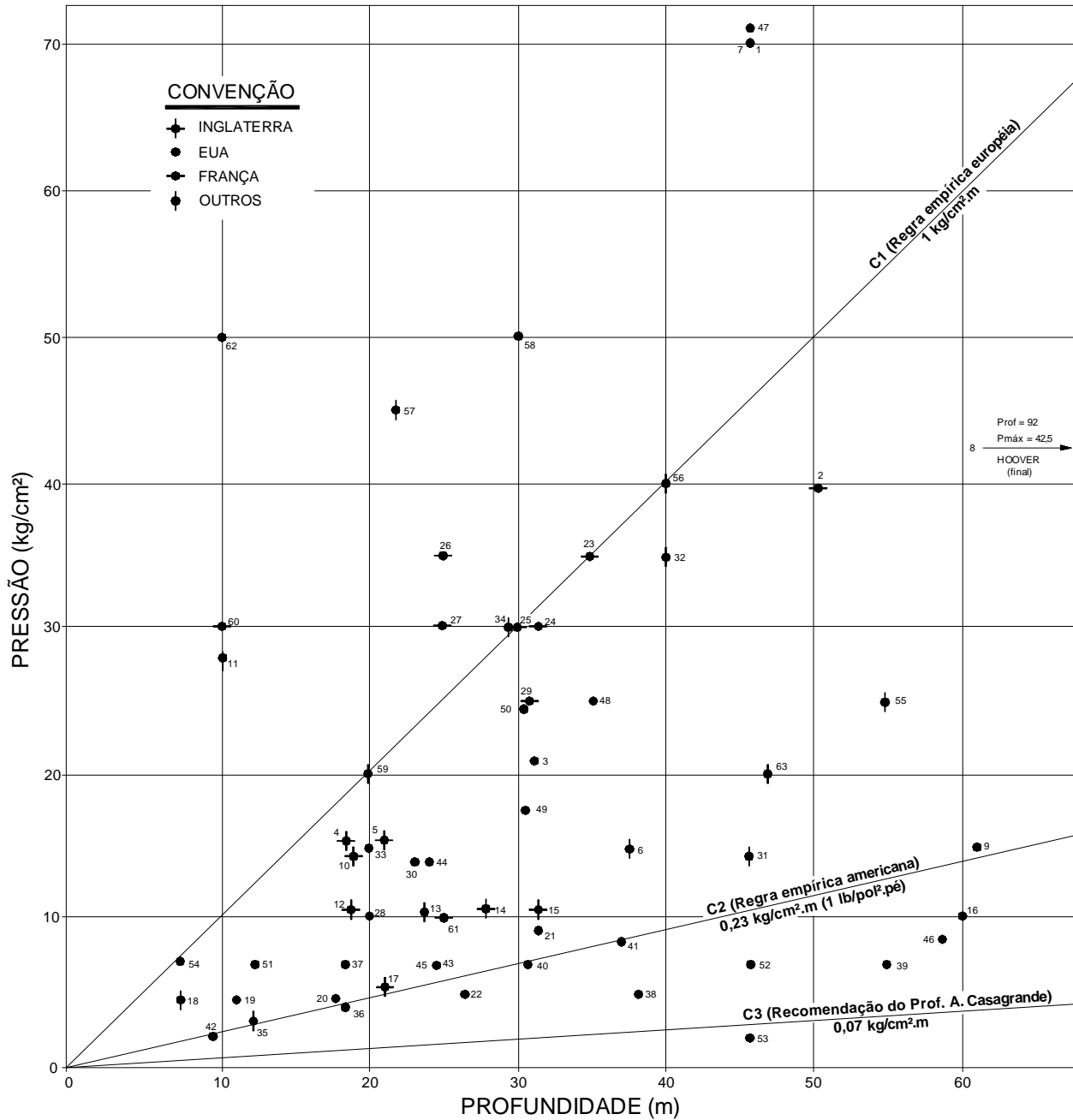
O principal argumento contra o emprego de pressões elevadas é o de que elas tendem não apenas a abrir elasticamente as fissuras, mas, freqüentemente, produzir aberturas de tipo irreversível, ou seja, em que as juntas, abertas durante a aplicação da pressão, não voltam mais à antiga situação. A abertura elástica de fissuras é um efeito benéfico e normalmente procurado, mesmo quando se usam pressões relativamente baixas. Por outro lado, as pressões muito altas podem abrir fissuras que estavam seladas e, no caso de rochas de baixa resistência, criar fraturas novas por fratura hidráulica. Por exemplo, as rochas de tipo laminado, principalmente sedimentares, em que as fraturas estão em posição sub-horizontal em profundidades não muito grandes, são muito sensíveis à abertura irreversível de juntas e planos de estratificação previamente selados; estas rochas são igualmente sensíveis a problemas de levantamento das fundações, que podem ocorrer quando se ultrapassa o equivalente ao peso da rocha sobrejacente. Isto pode provocar danos a estruturas leves de concreto já existentes na superfície, causando pequenas deformações e trincas.

Quando a injeção é feita com água, nos ensaios de permeabilidade sob pressão, estes mecanismos são realmente bastante efetivos para produzir abertura de fissuras previamente seladas ou ruptura hidráulica, já que a fluidez da água permite uma penetração muito mais fácil e com perdas de carga muito menores. Nas injeções com caldas, particularmente caldas grossas, este risco diminui consideravelmente. A sensibilidade às pressões é bem menor, devido à viscosidade, que dificulta a penetração e limita as pressões

elevadas às proximidades do furo, tornando o problema menos sério e permitindo usar pressões maiores do que aquelas que já produziriam danos em ensaios com água. Além disso, numa fratura aberta, que esteja aceitando calda em quantidades relativamente grandes, o efeito das pressões se dá mais no sentido de vencer as perdas de carga nas tubulações e ao longo da fratura, sem muita influência na abertura da fissura; é quando as absorções estão diminuindo e aproximando-se do ponto de recusa que o efeito de pressões elevadas pode se tornar mais perigoso, no sentido de produzir levantamento de fundações ou fenômenos deste tipo.

Marques Filho (1986) conclui que a tendência atual é mais para pressões relativamente elevadas, acima da regra prática americana, porém definidas através de uma análise racional das características geológicas do local, das finalidades que se busca atingir e das particularidades das injeções, se superficiais ou profundas, se próximas a estruturas leves de concreto ou situadas sob estruturas pesadas, se localiza perto de encostas, etc.

Esta tendência a pressões mais elevadas pode ser observada na figura 2.29 apresentado por Hsu, Re e Ono (1970):

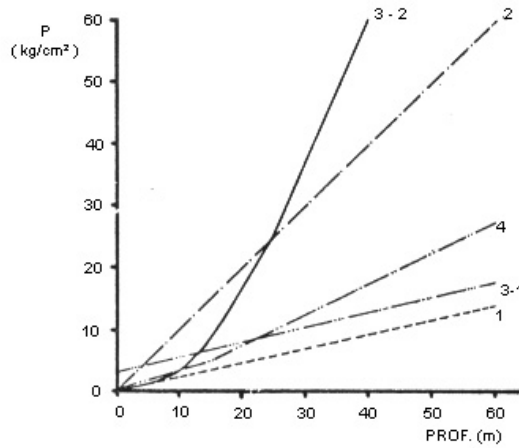


**LEGENDA**

- |   |  |  |
|---|--|--|
| 1 - SHASTA  | 22 - KENTUCKY (CALCÁREO) (T.V.A.)                                | 43 - APALACHIA (QUARTZITO, XISTOS) (T.V.A.)                |
| 2 - CHAMSON                                       | 23 - AIGLE   | 44 - HIWASSEE (QUARTZITO, XISTOS, GNAISSES) (T.V.A.)       |
| 3 - BEAR CREEK                                    | 24 - LA SELVE  | 45 - OCOEE NES (FILITOS, QUARTZITO) (T.V.A.)               |
| 4 - GLEN SHIRA                                    | 25 - COUESQUE  | 46 - NOTTELY (XISTOS, QUARTZITO) (T.V.A.)                  |
| 5 - NORTH GRAUDALON                               | 26 - MARESES   | 47 - SOULDER   |
| 6 - EIN KAREN                                     | 27 - CASTELNAU   | 48 - LAS PIROQUITAS (GNAISSES) (ARGENTINA)                 |
| 7 - HOOVER (ORIGINAL) (U.S.B.R.) (ANDESITO)       | 28 - LOUROS  | 49 - SIMINOE (GRANITO) (U.S.B.R.)                          |
| 8 - HOOVER (FINAL) ( II ) ( II )                  | 29 - CHASTANG  | 50 - BARTLETT (U.S.B.R.)                                   |
| 9 - DOUGLAS (CALCÁREO DOLOM. FOLHELHOS) (T.V.A.)  | 30 - CHIEF JOSEPH (GRANUDIORITO, GNAISSES)                       | 51 - SORGE (CONGLOMERADOS, ARENITOS, FOLHELHOS) (U.S.B.R.) |
| 10 - SLOY   | 31 - CARILLON (CALCÁREO, FOLHELHOS, ESTRATIF. HORIZ.)            | 52 - GREEN MOUNTAIN (PÓRFIRO) (U.S.B.R.)                   |
| 11 - KARAPIRO                                     | 32 - BARRA BONITA (BASALTO)                                      | 53 - GREEN MOUNTAIN (FOLHELHOS) (U.S.B.R.)                 |
| 12 - WEIS   | 33 - SUKAVU (BASALTO)  | 54 - EASTON (QUARTZITO) (U.S.B.R.)                         |
| 13 - ÁGUA FRIA                                    | 34 - AYUJI   | 55 - GALLO MATESE (ITÁLIA)                                 |
| 14 - COD BECK                                     | 35 - JUPIÁ (BASALTO)   | 56 - RAMA (IUGOSLÁVIA)                                     |
| 15 - ERROCHTY                                     | 36 - PICKWICK LANDING (CALCÁREO, FOLHELHOS) (T.V.A.)             | 57 - EL ATAZAR (ESPAÑA)                                    |
| 16 - HARRIS (CALCÁREO) (T.V.A.)                   | 37 - WHEELER (CALCÁREO) (T.V.A.)                                 | 58 - LA CHAUDANNE (FRANÇA) (CALCÁREOS SEDIMENTARES)        |
| 17 - SUTTON BINGHAM                               | 38 - HALES BAR (CALCÁREO, FOLHELHOS) (T.V.A.)                    | 59 - SUKAVU (BASALTO) (TANGÂNICA)                          |
| 18 - WORONORA                                     | 39 - FORT LONDOUN (CALCÁREO) (T.V.A.)                            | 60 - CADARACHE (ROCHAS MICROCRÁSTICAS) (FRANÇA)            |
| 19 - WATTS BAR (ARENITO, FOLHELHO) (T.V.A.)       | 40 - CHEROKEE (CALCÁREO E FOLHELHOS) (T.V.A.)                    | 61 - SENISSAIT (1938) (FRANÇA)                             |
| 20 - SUNTERSVILLE (CALCÁREO E FOLHELHOS) (T.V.A.) | 41 - SOUTH HOLSTON (ARENITOS, FOLHELHOS, CONGLOMERADOS) (T.V.A.) | 62 - SERRE PONCON (1956) (FRANÇA)                          |
| 21 - CHICKAMAUGA (CALCÁREO) (T.V.A.)              | 42 - WATAUGA (QUARTZITO, FOLHELHOS, DOLOMITO) (T.V.A.)           | 63 - AVALON  |

Figura 2.29. Gráfico de pressões de injeção em várias barragens (HSU; RE; ONO, 1970)

Esses autores também comparam, na figura 2.30, alguns critérios ou limites estabelecidos para pressões utilizados em várias partes do mundo.



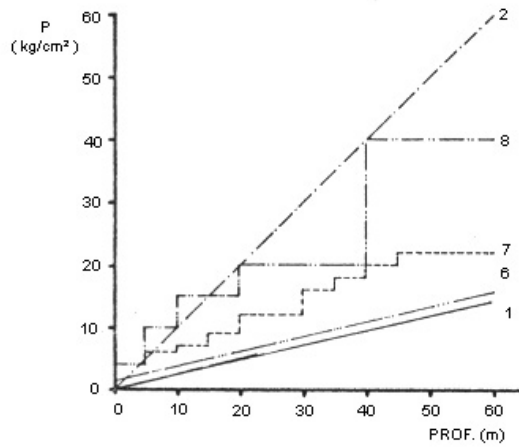
**LEGENDA**

- 1 -) 1 PSI POR PÉ (REGRA EMPÍRICA AMERICANA)
- 2 -) 1 kg/cm<sup>2</sup> POR mL (REGRA EMPÍRICA EUROPEIA)

" DANIEL JOHNSON" - CANADÁ

- 3-1) INJEÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO SUPERFICIAL.
- 3-2) CORTINA DE INJEÇÃO.

ALTURA MÁX. 214,00m  
FUNDAÇÃO: GNAISS



4 -) " LA AMISTAD" - MÉXICO

FUNDAÇÃO: ROCHA CALCÁREA, TIPO GEORGETOWN  
ALTURA MÁX. 35,00m

6 -) "OUTARDES" - DAM 1 - CANADÁ

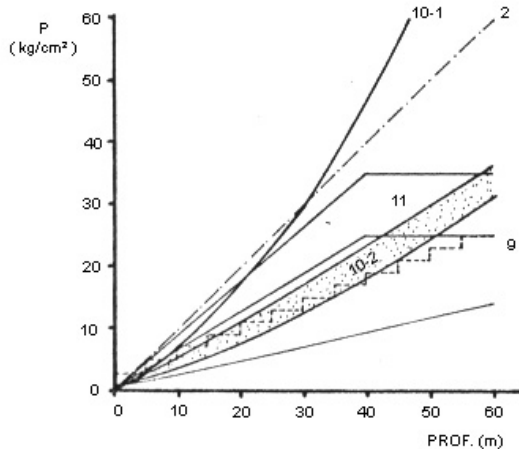
ALTURA MÁX. 128,00m  
FUNDAÇÃO: ALUVIÃO, "TALUS" MUITO PERMEÁVEIS

7 -) "EL ATAZAR" - ESPANHA

ALTURA MÁX. 133,00m  
FUNDAÇÃO: GRANITO

8 -) "RAMA" - IUGUSLÁVIA

FUNDAÇÃO: CALCÁREA COM CARSTIFICAÇÃO



9 -) "GALLO MATESE" - ITÁLIA

FUNDAÇÃO: ROCHA, CALCÁREA E ARENITO.  
ALTURA. 27,00m

10-1) ROCHA MACIÇA (ASCE - TASK COMMITTEE - 1.963)

10-2) ROCHA ESTRATIFICADA (ASCE - TASK COMMITTEE - 1.963)

11 -) "NEBAANA" - TUNÍSIA

FUNDAÇÃO: ROCHA, CALCÁREA, PERMEÁVEL E - CÁRSTICA.  
ALTURA 63,00m

Figura 2.30. Comparação entre critérios de pressão de injeção utilizados (HSU; RE; ONO, 1970)

### 2.4.3 Injetabilidade da Calda

A noção de injetabilidade da calda pode ser definida como a capacidade da calda penetrar no meio a ser injetado, e é dada pela seguinte função (PAPADAKIS, 1959):

$$\text{INJETABILIDADE} = F (\text{FLUIDEZ, ESTABILIDADE})$$

Há para cada espécie de calda e para cada tipo de trabalho a ser efetuado um limite de injetabilidade abaixo do qual não se deve descer, e é indispensável que seja determinado. Evidentemente, a melhor injetabilidade deve ser compatível com as resistências mecânicas posteriores que a calda deve fornecer. Em injeções de consolidação, por exemplo, normalmente exige-se que os materiais injetados apresentem uma resistência mecânica elevada, enquanto que este fator pode ser dispensável em injeções de estanqueidade, em prol de uma maior impermeabilidade (HSU; RE; ONO, 1970).

Para comparar a injetabilidade de várias caldas, é necessário prepará-las de tal maneira que apresentem a mesma fluidez; a mais injetável será aquela que possui a estabilidade mais elevada.

Segundo Munarski (1977), com estas duas características reológicas definidas, é possível a construção das chamadas “curvas de injetabilidade” como a da figura 2.31. Esta mostra a relação que existe entre a injetabilidade de uma calda, tal como evidenciado pela relação entre a sua velocidade de escoamento, ou seja, a velocidade com que ela passa através de um funil padrão, e a sua estabilidade, definida pelo fator de sedimentação, para diferentes fatores de água/cimento (MARQUES FILHO, 1986).

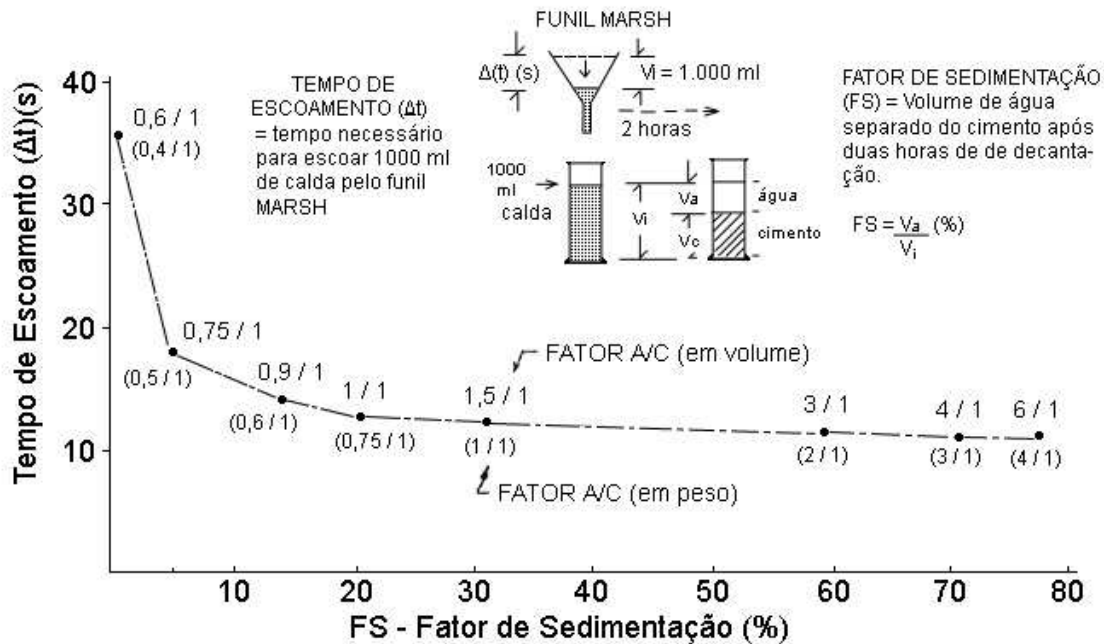


Figura 2.31. Curva de injetabilidade, Laboratório de Tecnologia de Concreto de Salto Santiago, ELETROSUL (MARQUES FILHO, 1986)

Marques Filho (1986) e Munarski (1977) afirmam que o ponto ótimo de injetabilidade situa-se na região onde a curva apresenta seu menor raio de curvatura. Nota-se claramente que nessa região as caldas possuem um menor fator de sedimentação conjugado a um mais baixo tempo de escoamento, isto, evidentemente, corresponde às melhores condições de injetabilidade.

Os fatores água/cimento ou água/sólidos variam desde 4 : 1, em caldas ralas, até 0,6 : 1, em caldas grossas (fatores A/C em volume ; quando expressos em peso, os números aumentam um pouco). Na atualidade, dificilmente se usam caldas mais ralas do que 3 : 1, e as mais usadas em geral variam entre 2 : 1 e 1 : 1, isto porque as caldas muito ralas são mais fluidas e injetam mais facilmente, porém segregam mais rapidamente, isto é, as partículas de cimento decantam mais velozmente, e o produto final, após solidificação, é mais fraco e lixiviável. As caldas grossas são menos fluidas e injetam com mais dificuldade as fissuras finas, porém injetam bem as mais abertas e dão produtos finais mais resistentes, após a pega (MARQUES FILHO, 1986).

Sampaio (1983) verificou que em barragens mais antigas prevalecia o uso de caldas ralas (relações A/C em peso entre 1 : 1 e 6 :1), enquanto que nas mais recentes, iniciou-se o uso de caldas mais grossas (entre 0,5 : 1 e 0,7 :1).

Caputo (1987) aconselha iniciar os trabalhos com caldas bem ralas e terminar com caldas grossas.

Segundo Hsu, Re e Ono (1970), a injeção surtirá efeito desprezível se a permeabilidade da rocha é devida à presença de grande número de trincas com espessura da ordem de dezenas ou centenas de microns, pois o cimento comum possui pelo menos 15% em peso de grãos maiores que 74  $\mu\text{m}$ . Sabarly (1968, apud SAMPAIO, 1988) também recomenda atenção quanto à presença de grãos maiores no cimento, mesmo em diminutas quantidades, como por exemplo, dois em mil grãos com diâmetro maior que 0,25mm. Teoricamente, 2 centésimos de grama de grãos de cimento de 0,25mm de diâmetro são suficientes para vedar a entrada de uma fenda de 0,25mm de abertura, num furo de injeção de 5cm de diâmetro, se a fenda não for muito inclinada em relação ao furo.

Atualmente, entretanto, já existe o microcimento, o qual, segundo Abreu, Mezzalira e Cruz (2004), trata-se de um produto cimentício a base de clínquer, finamente micropulverizado. Esses autores citam em seu trabalho microcimentos com diâmetros máximos de partículas inferiores a 20  $\mu\text{m}$  e 30  $\mu\text{m}$ , que permitem uma alta injetabilidade em microfissuras. A Barragem de Irapé, no Vale do Jequitinhonha, Minas Gerais, é mostrada como exemplo de utilização bem sucedida do microcimento de 30  $\mu\text{m}$ .

Para Hsu, Re e Ono (1970), o uso de aditivos é o fator mais importante que influi na injetabilidade de caldas de cimento. Alguns dos mais utilizados são:

- a) BENTONITA: utilizada geralmente em porcentagens pequenas (2 a 3% em peso dos sólidos) para melhorar a injetabilidade (Hsu *et al.* 1970). A bentonita, sendo uma argila altamente expansiva e tixotrópica, possibilita o aumento do fator água/cimento da calda, reduzindo sua massa específica e seu consumo de cimento (SAMPAIO, 1988).

- b) ESCÓRIA DE ALTO FORNO:** destinada a substituir o cimento como ligante. Provoca aumento de fluidez e grande diminuição da estabilidade, para as mesmas condições de finura e relação água/sólidos (HSU; RE; ONO, 1970).
- c) TENSO-ATIVOS:** substâncias que diminuem a tensão superficial e permitem a perfeita “molhagem” dos grãos do cimento e melhoram a curva de injetabilidade (HSU; RE; ONO, 1970).
- d) ACELERADORES:** são empregados em injeções de maciços rochosos, quando se deseja obter resistências mecânicas relativamente altas às primeiras idades (economia de tempo). Os aceleradores mais empregados, são à base de cloreto de cálcio, carbonatos e hidróxidos alcalinos e trietanolamina (IPT, 1984 apud SAMPAIO, 1988).
- e) DISPERSANTES:** aumentam a fluidez das caldas de cimento, reduzindo sua viscosidade. Sua ação faz baixar os parâmetros reológicos, viscosidade plástica e limite de escoamento das caldas, facilitando seu bombeamento e penetração nas fissuras. Os dispersantes mais comuns são o lignossulfato de sódio, que tem ação retardadora e o cloreto de sódio (IPT, 1984 apud SAMPAIO, 1988).
- f) EXPANSORES:** aumentam a penetração e a estabilidade das caldas nas fissuras. O expansor mais comum e utilizado nas injeções da caldas de cimento em maciços rochosos é o pó de alumínio (IPT, 1984 apud SAMPAIO, 1988).
- g) ADIÇÃO DE CINZA VULCÂNICA OU VOLANTE « FLY ASH »:** com a utilização de uma cinza volante de superfície específica igual a  $6.000\text{cm}^2/\text{g}$  misturada ao cimento Portland comum, a reologia da calda, para um fator água/cinza mais cimento constante, tem o seguinte comportamento (IPT, 1984 apud SAMPAIO, 1988):
- a fluidez diminui com a quantidade de cinza adicionada ;
  - a estabilidade aumenta com a quantidade de cinza adicionada.



Além destes aditivos, são também utilizadas caldas com pozolana e cimento oferecendo as vantagens de maior resistência à dissolução, menor permeabilidade e maior economia, mas com o inconveniente de ligeira diminuição da resistência à compressão (SAMPAIO, 1988).

Munarski (1977) afirma que é preciso verificar se a calda endurecida nas fissuras não terá menor resistência do que a própria rocha, o que tornaria ineficiente o tratamento.

#### **2.4.4 Método GIN (Grouting Intensity Number)**

As discussões sobre pressões de injeção e fluidez das caldas de cimento fizeram com que Lombardi e Deere (1993) desenvolvessem um método para sistematizar a execução de cortinas de injeção. Segundo Lombardi (1996, 1997, 1998, 1999), o objetivo do Método GIN é obter o melhor resultado possível a curto e longo prazo. Além de evitar danos ao maciço rochoso (ou às estruturas), pelo menor custo e da maneira mais simples possível.

Os principais princípios do método são resumidos a seguir (LOMBARDI, 1998):

- Estudo da calda a ser utilizada (laboratório e campo);
- Calda estável com superplastificante;
- Calda única (a melhor);
- Intercalação sucessiva de séries de perfurações;
- Diminuição das absorções de série a série;
- Comprimento variável dos estágios de injeção com a profundidade;
- Saturação prévia do maciço acima do lençol freático de modo a evitar que a água seja sugada da mistura pela rocha seca;
- Controle em tempo real por meio de gravação contínua dos dados em computador;
- Evitar ensaios de perda d'água durante o processo de injeção. Entretanto, são válidos antes e após as injeções para checar os resultados.
- Não há o receio de hidrofraturamento;

- Não há receio de sobre-elevação do terreno;
- Limite de pressão variável segundo o critério GIN;
- Seleção de uma curva GIN limite apropriada.

### O Conceito GIN

A intensidade de injeção é definida como o produto da pressão final de injeção vezes a absorção de calda por metro de furo ao final do processo de injeção de um só estágio (LOMBARDI, 1996):

$$GIN = p_f \cdot v_f \quad (2.18)$$

Onde:  $p_f$  = pressão final ( $M.L^{-1}.T^{-2}$ ),

$v_f$  = absorção final de calda por metro ( $L^3/L$ ).

A figura 2.32 mostra o possível desenvolvimento da pressão da calda, com o volume injetado.

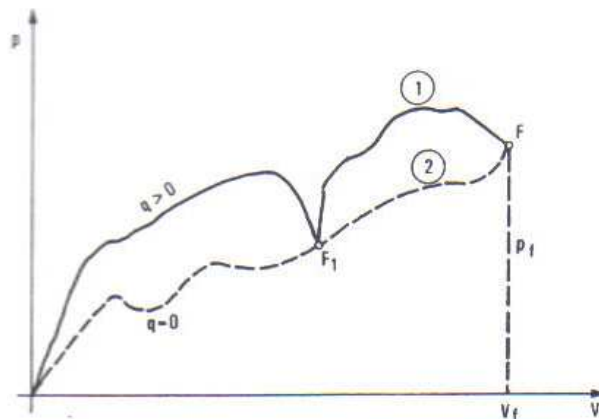


Figura 2.32. Possível desenvolvimento da pressão da calda X volume injetado (LOMBARDI, 1996)

A intensidade de injeção é uma aproximação aceitável da energia injetada no maciço rochoso, enquanto as perdas de energia durante o processo de injeção podem ser ignoradas. Como o processo pode ser parado a qualquer momento, ou seja, a qualquer pressão, pode-se também pará-lo a qualquer valor de intensidade de injeção selecionado (Figura 2.33).

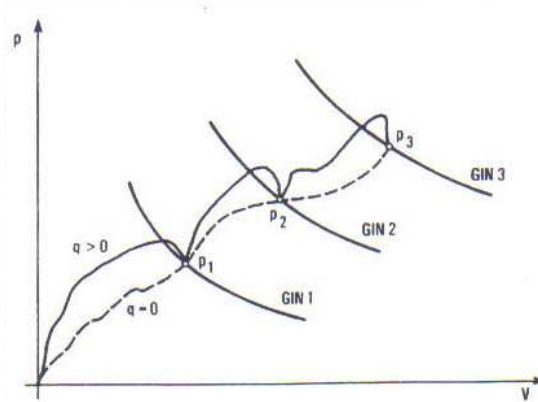


Figura 2.33. Diversos valores  $GIN$  que podem ser alcançados (LOMBARDI, 1996)

Lombardi (1996) afirma que limitar a intensidade de injeção significa limitar a energia injetada e, portanto, limitar o risco de danos ao maciço rochoso. A pressão é dada por:

$$p \cong \frac{R_c \cdot c_c}{a} \quad (2.19)$$

Onde:

$R_c$  = distância alcançada pela calda (L);

$c_c$  = coesão da mistura ( $M.L^{-1}.T^{-2}$ );

$a$  = abertura equivalente da junta (L).

O volume absorvido por metro é, aproximadamente:

$$v \cong R_c^2 \cdot a \quad (2.20)$$

Portanto:

$$GIN = p \cdot v \cong R_c^3 \cdot c_c \quad (2.21)$$

O valor  $GIN$  passa a não mais depender da abertura da junta, parâmetro mais difícil de ser determinado. Assim, para um dado valor  $GIN$  e para uma mistura específica, com determinada coesão, a calda irá alcançar aproximadamente a mesma distância do furo, não importando a abertura das juntas.

Vários fatores devem ser considerados para se obter a distância alcançada como função do valor  $GIN$  (geometria do sistema de juntas, RQD, etc.). Estes podem ser agrupados em um “fator de intensidade global”  $FI_G$ :

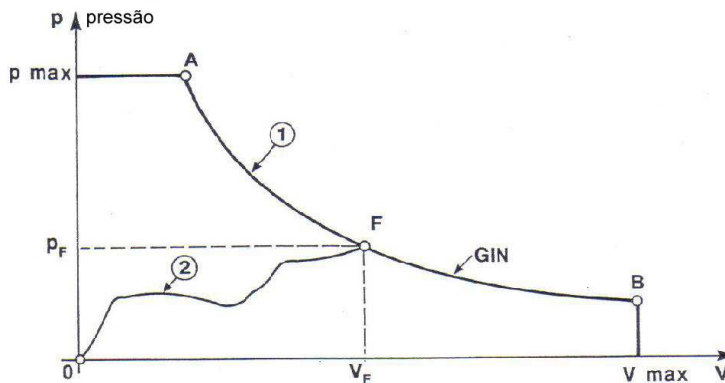
$$GIN = p.v = \frac{c_c \cdot R_c^3}{Fl_G^3} \quad (2.22)$$

$$\text{ou} \quad R_c = Fl_G \cdot \sqrt[3]{\frac{GIN}{c_c}} \quad (2.23)$$

Pode-se, assim, controlar o processo de injeção: se a pressão for muito alta, as juntas abrirão muito e uma fração significativa do volume de calda será absorvida próximo ao furo, então a distância alcançada será menor e a absorção será maior que a esperada.

O valor *GIN* deverá ser definido para cada zona do projeto com condições rochosas aproximadamente homogêneas.

A definição da curva *GIN* limite compreende um valor *GIN*, uma pressão máxima e uma absorção máxima (Figura 2.34).



Exemplo de desenvolvimento da injeção

1 → Limite *GIN* (pressão, volume e intensidade máximos)

2 → Desenvolvimento efetivo (p = pressão, v = volume injetado)

Figura 2.34. Curva *GIN* limite (LOMBARDI 1996)

Há três maneiras de se definir a injetabilidade:

- Método matemático: começando de uma descrição exata ou simplificada das juntas do maciço rochoso, tenta-se simular o processo de injeção. Este método pode ser usado em casos simples como, por exemplo, na injeção de fissuras em maciços de concreto;

- Método experimental: executa-se um campo de testes e mede-se a distância alcançada pela calda durante o processo de injeção como função dos diferentes valores  $GIN$ ;
- Método observacional: iniciam-se as injeções com um valor  $GIN$  baseado em experiências prévias ou em dados da literatura (Figura 2.35), que pode ser ajustado durante o processo de injeção, de acordo com os resultados obtidos.

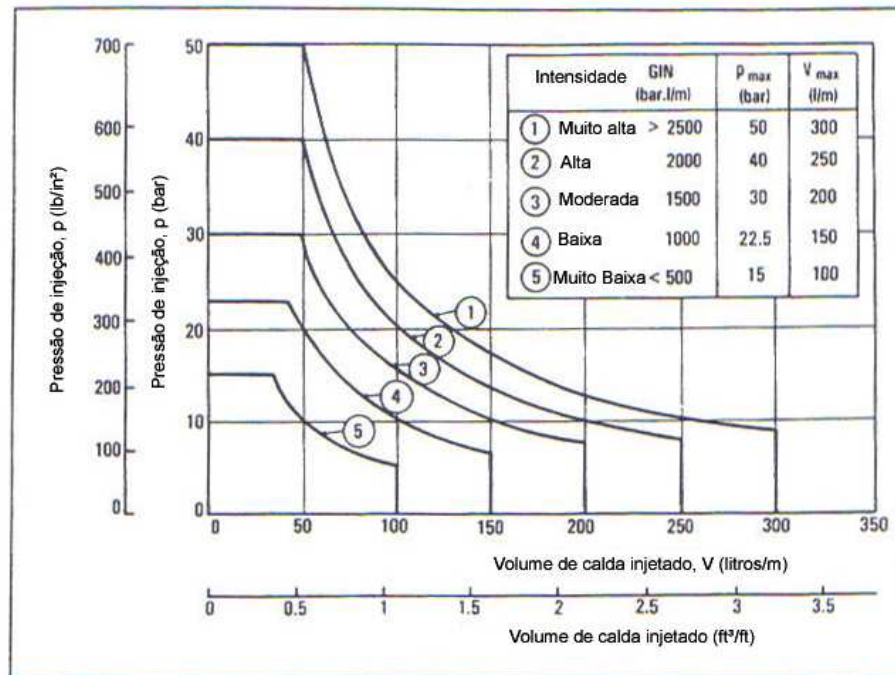


Figura 2.35. Conjunto de curvas  $GIN$  limites experimentais (LOMBARDI, 1996)

Usando-se o método do espaçamento divisional, controla-se a taxa de redução da absorção. Se a taxa observada for muito baixa, isto significa que o valor  $GIN$  usado está muito baixo para o espaçamento escolhido. Neste caso, o valor  $GIN$  pode ser aumentado ou a distância de furo a furo deve ser reduzida.

Para questões práticas, a pressão de injeção deve ser limitada. A definição da pressão máxima é, em princípio, independente do valor  $GIN$  selecionado e precisa ser escolhida com base nos objetivos do projeto.

No caso da cortina de injeção, por exemplo, é usual se escolher uma pressão que seja 2 a 3 vezes a futura pressão de água, para se evitar a posterior abertura de juntas pela mesma.

Para Lombardi (1997), o problema consiste em balancear o custo dos furos de maneira a alcançar a combinação mais econômica possível. Como resultado, é compreensível que vários valores *GIN* sejam aplicados ao mesmo tempo em diferentes pontos, mesmo se somente um tipo de mistura for usado.

### Comparação do Método GIN com o Método Clássico

Lombardi (1999) compara o método tradicionalmente usado com o Método GIN. Para ele, o método clássico de injeção consiste em fixar um limite de pressão e reduzir progressivamente a quantidade de água na calda, aumentando a coesão, em função do volume já absorvido. No método GIN, pelo contrário, as propriedades reológicas da calda, em particular a coesão, permanecem constantes. É a diminuição progressiva do limite de pressão em função do volume absorvido que leva à conclusão da operação. A Figura 2.36 apresenta quatro gráficos comparativos entre os dois métodos.

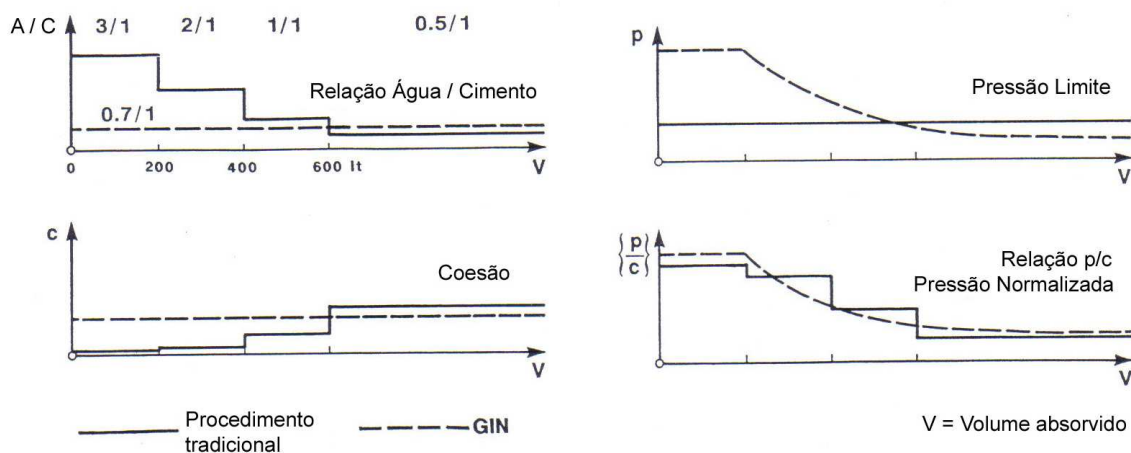


Figura 2.36. Comparação entre o método clássico e o GIN (LOMBARDI, 1999)

Assim, segundo esse autor, a diferença essencial entre os dois procedimentos é que no caso clássico, encontra-se no maciço uma mistura heterogênea de todos os tipos de

calda, possivelmente de má qualidade. No caso GIN, é utilizada somente a melhor calda, escolhida em função de suas propriedades finais, sendo, portanto, a única a ser encontrada no maciço.

## 2.5 CORTINA DE DRENAGEM

Segundo Porto (2002), as cortinas de drenagem são constituídas de furos igualmente espaçados e dispostos logo a jusante da cortina de injeção profunda. Seu objetivo consiste em drenar as águas que fluem através do maciço e aliviar as subpressões impostas pela carga hidráulica do reservatório.

Guimarães (1988) comenta que também é indispensável que os drenos interceptem as fraturas susceptíveis de conduzir água e que a cota de esgotamento do dreno seja a menor possível, pois ela condiciona os potenciais impostos ao maciço. Quanto menores estas cotas, maiores serão as reduções de subpressão proporcionadas (e maiores também serão as vazões efluentes do sistema).

## 2.6 DRENAGEM X INJEÇÕES

Casagrande (1961, p.163), durante a Primeira “Rankine Lecture”, realizada para a Sociedade Britânica de Mecânica dos Solos e Fundações, defendeu o uso de apenas drenos para o controle da subpressão:

[...] na maioria das publicações, a maior ênfase é dada à discussão da cortina de injeções. Comparativamente, a discussão sobre os furos de drenagem é geralmente muito breve. Se considerarmos, além do mais, que

os drenos são sempre muito mais espaçados entre si que os furos de injeções, e que sua profundidade é geralmente apenas cerca de metade daquela da cortina, tenho a impressão que os drenos são tratados como enteados. Certamente, o custo de tal linha de drenos é pequeno comparado ao da cortina de injeções. Há obviamente uma contradição, que é talvez mais facilmente explicável pelo fato de que os méritos relativos das cortinas de injeções e dos drenos têm sido objeto altamente controvertido durante muito tempo... As afirmações mais freqüentes encontradas em publicações, nas quais parece haver alguma regra de concordância, é que o propósito da cortina de injeções é controlar a quantidade de percolação por baixo da barragem, e o da drenagem é aliviar a subpressão. Entretanto, não posso compreender como estes dois efeitos possam ser separados desta maneira simples. Uma cortina de injeções que promove uma redução substancial na percolação também deverá reduzir as subpressões a jusante da mesma.

Sabarly (1966 apud HSU; RE; ONO, 1970) reafirma a constatação de Casagrande mostrando que em um terreno homogêneo, para escoamento em regime permanente, a distribuição das subpressões depende somente das disposições geométricas: forma da obra, situação e espaçamento dos drenos, e de maneira alguma do coeficiente de permeabilidade. O terreno poderá ser mais ou menos permeável, mas a pressão será a mesma nos mesmos pontos, resultando daí que, uma rede de drenagem terá o mesmo efeito nas subpressões, quer o terreno seja muito ou pouco permeável, variando tão somente a vazão pelos drenos.

De acordo com Cruz (1996), o sistema de drenagem das fundações é de fundamental importância no controle do fluxo e a vedação deve ser considerada como “uma segunda linha de defesa”, e em nenhum caso como a única linha de defesa. Em conformidade com esta afirmação, Hsu, Re e Ono (1970), dizem que injeções e drenagem são duas formas de tratamento intimamente ligadas.

Sabarly, novamente, em 1971 (*apud* GUIMARÃES, 1988, p.82) simplifica a questão da utilização dos dois tratamentos para os casos extremos de maciços pouco e muito permeáveis:



[...] em terreno pouco permeável, a cortina de injeção não terá qualquer efeito, sendo portanto inútil, mas as subpressões irão se desenvolver exatamente como num terreno mais permeável e a drenagem será portanto indispensável. Deixar-se-á de lado a cortina de injeção (apesar do dogma!) e todo o esforço deverá ser concentrado na drenagem; em terreno muito permeável, somente a drenagem, tendo em vista as subpressões, teria a mesma eficácia que em terrenos pouco permeáveis, mas a vazão nos drenos poderia ser considerável e inadmissível para a economia do projeto, sem falar na possibilidade de “saturação” dos drenos ou no risco de erosão interna do terreno devido às elevadas velocidades de percolação. Mas neste caso, uma cortina de injeção é capaz de reduzir de várias potências de 10 a permeabilidade do terreno. E se tal cortina for executada, ela tornará os drenos menos necessários, pois o terreno a jusante da cortina continua muito permeável em relação à cortina e as subpressões perigosas não arriscam a se produzir. Neste último caso de um terreno permeável, poderemos deslocar todo o esforço sobre a cortina de injeções e nos contentar com uma rede de piezômetros a jusante, para verificar que as subpressões não sejam perigosas.

Assim, o U. S. Army Corps of Engineers (1995) afirma que, para a drenagem ser controlada economicamente, é necessário retardar o fluxo para os drenos, ou seja, se o terreno não for naturalmente impermeável, é necessária a execução de uma barreira artificial. Esta barreira, sob condições normais, seria uma cortina de injeção de profundidade de  $2/3$  a  $3/4$  da diferença entre os níveis d'água de jusante e de montante. A complementação seria feita por drenos com profundidade de pelo menos  $2/3$  da cortina.

Guimarães (1988) comenta que também é indispensável que os drenos interceptem as fraturas susceptíveis de conduzir água e que a cota de esgotamento do dreno seja a menor possível, pois ela condiciona os potenciais impostos ao maciço. Quanto menores estas cotas, maiores serão as reduções de subpressão proporcionadas (e maiores também serão as vazões afluentes do sistema).

Quanto à eficiência da rede de drenagem, é importante ressaltar que sua manutenção deve ser constante. Dentre as principais causas de queda da eficiência dos drenos, Osako (2002) cita a necessidade de se analisar o tipo de cimento empregado nas

injeções e a agressividade da água, tendo em vista o perigo da dissolução de carbonato de cálcio e a sua posterior deposição nas superfícies internas e na boca de saída dos drenos, quando as velocidades são muito baixas. As “estalactites” formadas na superfície interna dos drenos podem eliminar seu funcionamento, cimentando todas as aberturas capazes de levar o fluxo das águas infiltradas.

## **2.7 DESEMPENHO DAS INJEÇÕES**

Segundo Azevedo (1993), o conceito de eficácia no caso das injeções pode ser visto sob dois enfoques: eficácia dos trabalhos de injeção e eficácia da cortina de vedação. O primeiro deve ser entendido como a capacidade que as injeções têm de reduzir gradativamente a condutividade hidráulica do meio rochoso ao longo das diversas etapas executivas. A eficácia da cortina de vedação diz respeito ao desempenho da cortina com relação aos propósitos inicialmente estabelecidos, ou seja, ao desempenho enquanto elemento de redução de vazões e/ou subpressões. Assim, uma cortina executada de maneira adequada não será necessariamente eficaz (OLIVEIRA, 1981).

### **2.7.1 Eficácia dos Trabalhos de Injeção**

A eficácia de um trabalho de injeções não é muito fácil de ser calculada. Em geral, os trabalhos que produzem uma redução de 10 vezes na permeabilidade já são considerados eficazes, embora a margem de redução dependa das permeabilidades originais e da permeabilidade residual que se deseja atingir. Esta eficácia pode ser analisada através da diminuição das permeabilidades e das absorções de cimento até serem atingidos os critérios de estanqueidade especificados para cada zona (MARQUES FILHO, 1986).

A análise das absorções de cimento é uma das técnicas mais antigas e largamente empregadas para verificação dos trabalhos de injeção. Tal técnica baseia-se no princípio de que, a cada etapa, com a diminuição sucessiva do espaçamento entre furos, os vazios vão sendo sucessivamente preenchidos. Entretanto, por mais intensos e cuidadosos que os trabalhos sejam, as injeções jamais alcançarão uma eficiência de 100% (GUIDICINI; ANDRADE, 1983). O que se observa nas etapas finais de injeção são absorções bastante elevadas ao lado de vários furos com absorções nulas (Figura 2.37). Assim, há um limite inferior de absorções denominado “absorção residual” (AZEVEDO; OLIVEIRA; SOARES, 1978), que consiste em um indicativo para suspensão dos trabalhos de injeção. Estas absorções poderiam ainda ser diminuídas, diminuindo-se o espaçamento entre furos, entretanto os custos para sua execução seriam inaceitáveis.

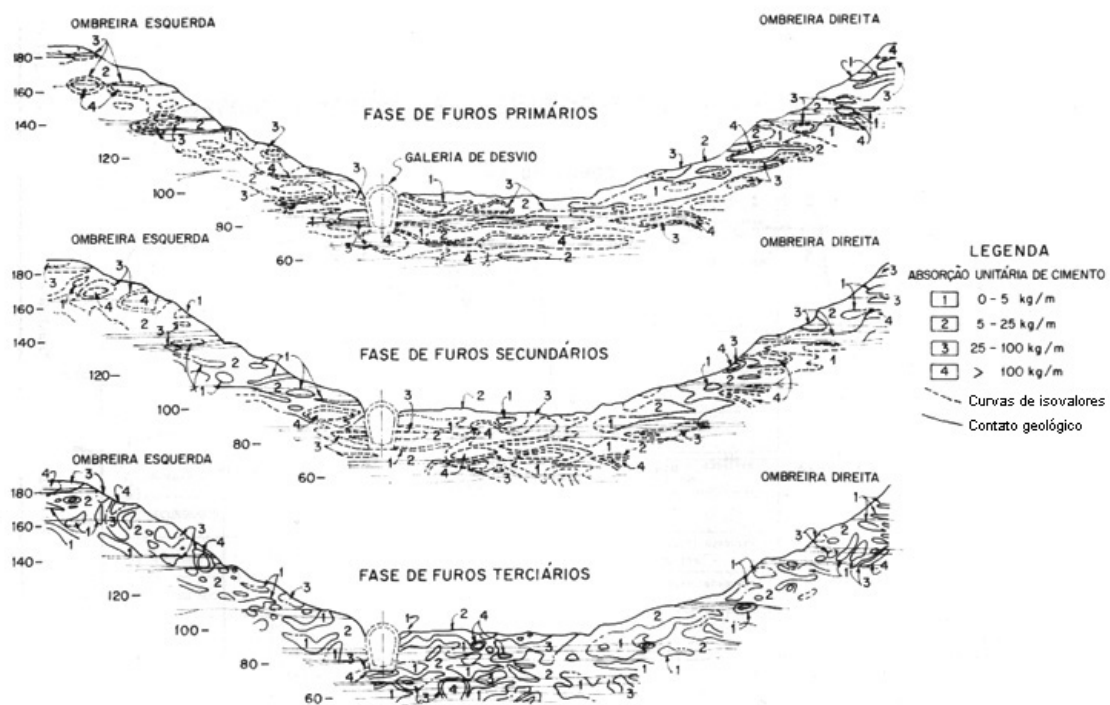


Figura 2.37. Absorções de cimento nas diferentes fases de perfuração (GUIDICINI; ANDRADE, 1983)

Deere (1977) propõe um critério que serve de orientação geral para a análise das absorções de cimento (Tabela 2.4). Ele considera que, em barragens com mais de 15 m de

altura, as absorções devem chegar a valores baixos, da ordem de 12,5 a 25 kg/m, o que, de certa forma, corresponde a perdas d'água perto de  $0,5 \cdot 10^{-5}$  cm/s ou pouco maiores.

Tabela 2.4 – Orientação geral para análise das absorções de cimento

Designação da Absorção	Peso de cimento absorvido por metro de furo (kg/m)
Muito baixa	0 a 12,5
Baixa	12,5 a 25
Moderadamente baixa	25 a 50
Moderada	50 a 100
Moderadamente alta	100 a 200
Alta	200 a 400
Muito alta	mais de 400

(DEERE, 1977)

Outra técnica amplamente utilizada é a análise de ensaios de perda d'água realizados antes e após as injeções ou mesmo durante a execução da cortina (Figura 2.38). Tais ensaios têm sido realizados tanto como controle da injeção como critério orientativo do objetivo dos tratamentos, que buscam a impermeabilização do maciço (AZEVEDO, 1993).

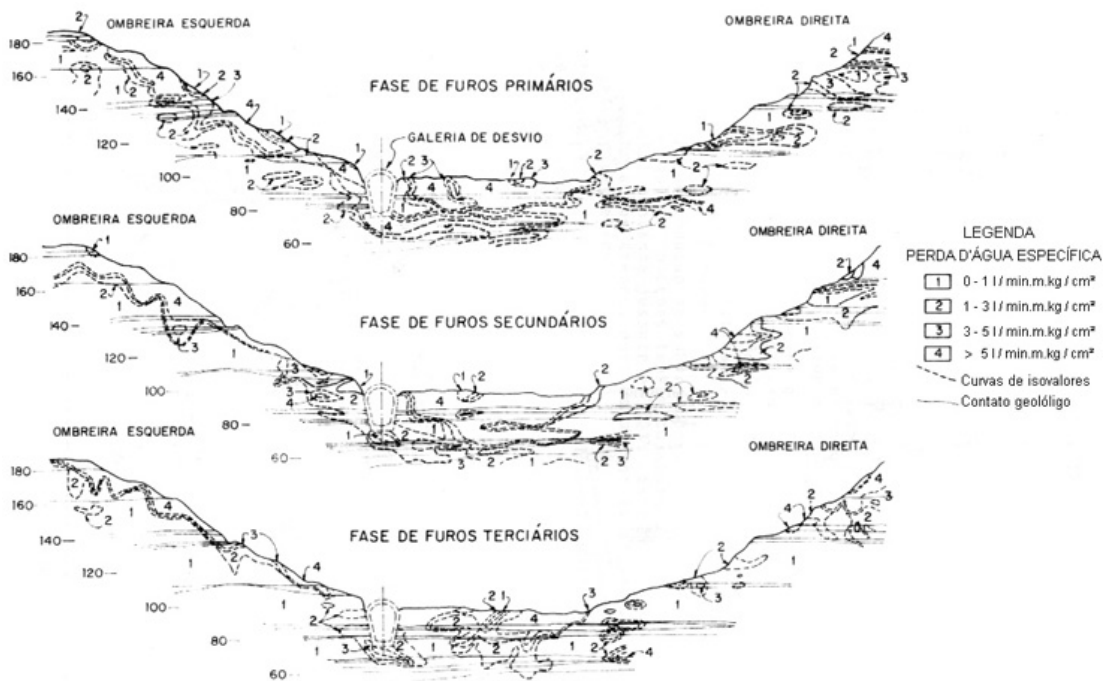


Figura 2.38. Perda d'água específica nas diferentes fases de perfuração (GUIDICINI; ANDRADE, 1983)

Quando são feitos ensaios de perda d'água em todos os furos e em todos os trechos de injeção, pode-se fazer um controle estatístico das reduções de permeabilidade com o progresso dos trabalhos. Para as zonas superiores, onde os critérios devem ser mais rigorosos, é comum especificar uma permeabilidade média da ordem de  $0,5 \cdot 10^{-5}$  cm/s, embora sejam aceitáveis valores de até  $10^{-4}$  cm/s. Para zonas inferiores, os critérios vão sendo progressivamente relaxados, por exemplo,  $10^{-4}$  a  $1,5 \cdot 10^{-4}$  cm/s para a segunda zona e  $2,0 \cdot 10^{-4}$  a  $3,0 \cdot 10^{-4}$  cm/s para zonas mais profundas (MARQUES FILHO, 1986).

Segundo Tashiro et al. (1995), as injeções atingem seu objetivo quando a média das absorções d'água no ensaio Lugeon, nos diferentes tipos de furos, decresce progressivamente, diminuindo seu desvio padrão (Figura 2.39).

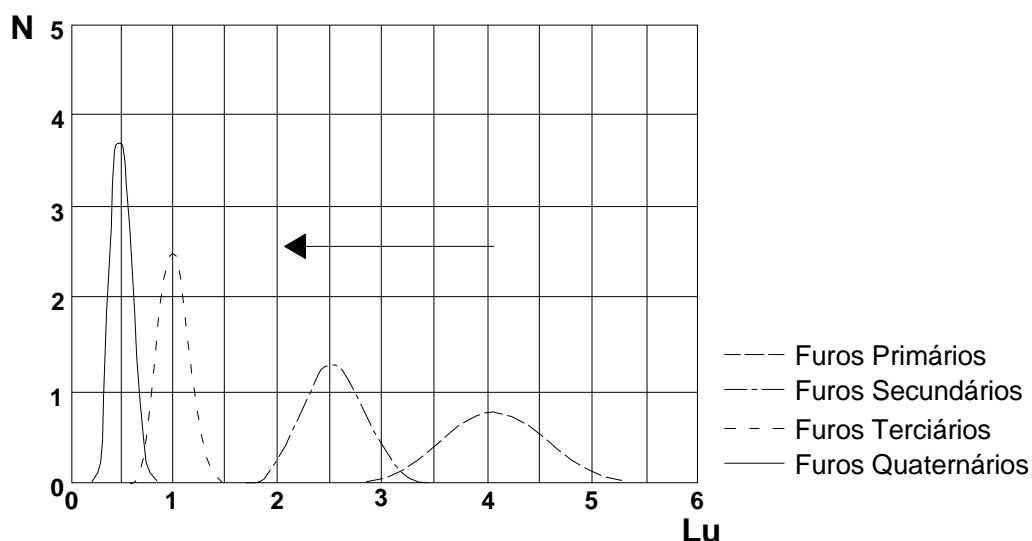


Figura 2.39. Frequência de ensaios relacionada à unidade Lugeon ( $l/m \cdot \min \cdot 10 \text{kgf/cm}^2$ )  
(modificado de TASHIRO et al., 1995)

O controle final da cortina é, em geral, efetuado com a execução dos furos finais de injeção ou com sondagens rotativas, para assegurar que as injeções homogeneizaram o maciço rochoso, reduzindo as altas permeabilidades e as concentrações de fluxo (AZEVEDO, 1993).

## 2.7.2 Eficácia da Cortina de Injeção

Para Guidicini e Andrade (1983), se à cortina de injeções for atribuído exclusivamente o papel de vedar descontinuidades, reduzindo a seção de escoamento da água, na grande maioria dos casos, este objetivo será atingido. Se, entretanto, pretende-se que ela desempenhe um papel significativo no controle de subpressões, os resultados tenderão a ser desanimadores.

Somente durante e após o enchimento do reservatório é que a análise da eficácia da cortina de vedação pode ser efetuada de forma mais adequada, pois aí as injeções devem realmente mostrar sua finalidade (MARQUES FILHO, 1986).

A avaliação desta eficácia pode ser feita a partir de várias técnicas. Guidicini, Signer e Cruz (1981) citam duas técnicas diretas de ensaio. A primeira consiste na realização de ensaios mecânicos de deformabilidade “*in situ*” antes e após as injeções, entretanto, estes acarretam custos elevados e resultados pontuais. A segunda avalia a variação de velocidade de propagação de camadas por meios dinâmicos, antes e depois do tratamento, mas é de difícil realização.

Marsal e Resendiz (1975) mostram que, em obras dotadas de piezômetros imediatamente a montante e a jusante da cortina (Figura 2.40), pode-se estimar a eficácia da cortina pela equação:

$$E_c = \frac{\Delta H}{H_m} \quad (2.24)$$

Onde:

$E_c$  = eficácia da cortina;

$\Delta H$  = diferença entre as alturas piezométricas de montante e jusante (L);

$H_m$  = altura piezométrica de montante (L).

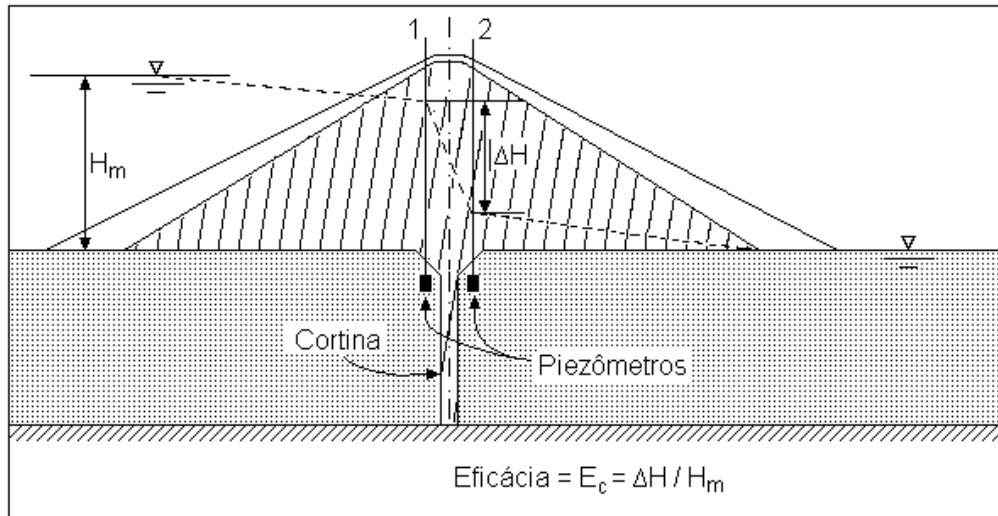


Figura 2.40. Eficácia da cortina de injeção em obras dotadas de piezômetros  
(MARSAL; RESENDIZ, 1975)

Entretanto, mesmo na presença de um bom sistema de instrumentação, a forte influência da rede de drenos na dissipação das subpressões tende a mascarar o papel da cortina (GUIDICINI; SIGNER; CRUZ, 1981).

A eficácia de uma cortina de injeções também pode ser estimada por relações como a de Kratochvil e Halek (1961 apud MARSAL; RESENDIZ, 1975), mostrada na figura 2.41, que se baseia numa avaliação das permeabilidades e das vazões de infiltração antes e depois do tratamento:

$$E_c = \frac{Q_i - Q_f}{Q_i} \quad (2.25)$$

Onde:

$E_c$  = eficácia da cortina;

$Q_i$  = vazão de infiltração estimada antes do tratamento (L);

$Q_f$  = vazão de infiltração após o tratamento (L).

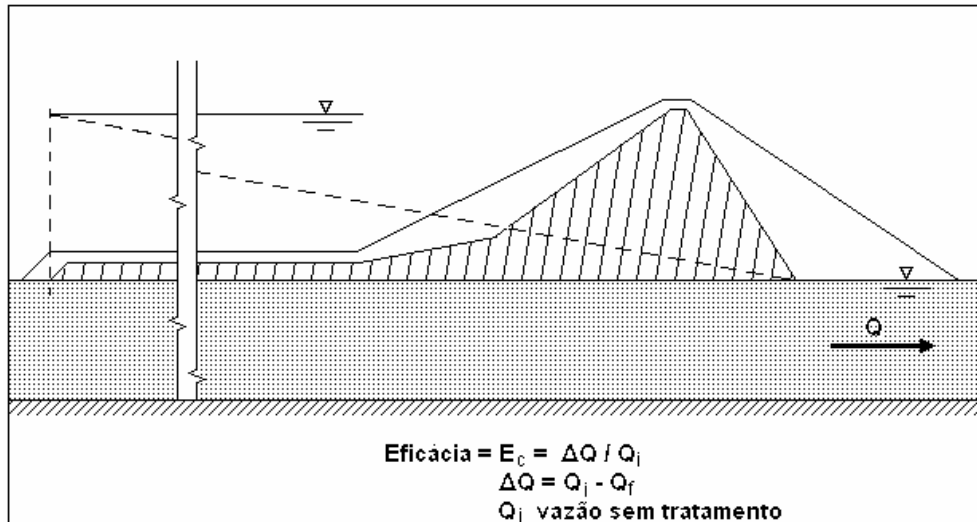


Figura 2.41. Eficácia de cortinas de injeção baseada na avaliação das vazões (MARSAL; RESENDIZ, 1975)

Guidicini, Signer e Cruz (1981) também citam a comparação da quantidade de fluxo d'água inferida por análises teóricas ou empíricas, com relação às medidas reais de vazões no sistema de drenagem do protótipo. Comentam, porém, que se estará comparando medidas reais com hipóteses e estimativas, o que fornecerá um dado de caráter qualitativo.

### 2.7.3 Eficácia das Injeções em Basaltos

Grande parte dos trabalhos sobre fundações de barragens, apresentados em Congressos Brasileiros nas décadas de 70 e 80, tem seu foco voltado para características e tratamentos de fundações em rochas basálticas. A título de exemplo, pode-se citar os seguintes autores: Azevedo, Oliveira e Soares (1978), Guidicini, Signer e Cruz (1981), Guidicini e Andrade (1983), Barbi (1983), Sampaio (1983), Osako (2002) e Porto (2002).

Assim, tendo em vista as técnicas de análise apresentadas anteriormente, alguns destes autores procuraram estabelecer critérios para definir a eficiência de cortinas de injeção executadas em formações basálticas.



Azevedo, Oliveira e Soares (1978) lançaram o conceito de “compartimento geológico”, que consiste em agrupar aspectos estruturais e litológicos das rochas basálticas, com o intuito de permitir correlações e comparações entre feições semelhantes. De posse dos dados fornecidos por esses autores, Guidicini e Andrade (1983) elaboraram a tabela 2.5, a qual relaciona as feições geológicas à sua susceptibilidade à injeção por calda de cimento.

Tabela 2.5 – Susceptibilidade à injeção devido aos aspectos estruturais e litológicos das rochas

<b>Compartimento Geológico</b>	<b>Susceptibilidade à Injeção por Calda de Cimento</b>
Contato concreto x rocha	Apresenta absorções bastante irregulares. A influência das condições geológicas passa a ser preponderante quando os efeitos das escavações são minimizados pelo uso de pré-fissuramento. Em média, absorções de 10 kg/m por furo.
Basalto compacto ou vesicular, com diaclasamento normal	As injeções têm um papel pouco relevante. As absorções são pouco significativas. Trata-se do corpo do derrame, com baixa condutividade hidráulica.
Brechas, lavas aglomeráticas, siltitos e arenitos	Apresentam extrema variabilidade de absorções, devido à distribuição errática e irregular dos vazios. As condições de injetabilidade são desfavoráveis. Sua eficiência é discutível. Em média, absorções de 4 a 50 kg/m.
Faixas fraturadas com extensão lateral significativa	A eficiência das injeções é aqui elevada, as condições geológicas predominando sobre os procedimentos técnicos utilizados. Em média, 15 a 40 kg/m.
Contatos e juntas-falhas	O mesmo que nas faixas fraturadas com extensão significativa. Em média, 130 a 450 kg/furo.

(GUIDICINI; ANDRADE, 1983)

Quanto à percolação em maciços basálticos, Guidicini e Andrade (1983) acreditam que se possa admitir que trabalhos de injeção atinjam os seguintes níveis, dependendo do compartimento geológico:

- Em descontinuidades com grande expressão lateral (contatos, junta-falhas, faixas fraturadas significativas) e muito permeáveis, o tratamento é eficaz e conduz o meio tratado a uma permeabilidade residual não inferior a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s;

- Em horizontes do maciço com permeabilidade superior a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s, o tratamento é eficaz e reduz o coeficiente para um valor igual à metade do original, mas nunca inferior a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s;
- Em horizontes ou descontinuidades que já possuam permeabilidade inferior a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s, o tratamento é ineficaz.

A tabela 2.6 apresenta algumas aplicações do critério anteriormente exposto.

Tabela 2.6 – Exemplo de aplicação do critério de injeções em rochas basálticas

<b>Eficiência de Injeções em Maciços Basálticos</b>		
<b>Horizonte a ser tratado</b>	<b>“k” antes das injeções (cm/s)</b>	<b>“k” após as injeções (cm/s)</b>
Descontinuidades expressivas	$1 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-4}$
	$8 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
Maciço com diaclasamento normal	$2 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
	$8 \times 10^{-4}$	$5 \times 10^{-4}$
	$7 \times 10^{-5}$	$7 \times 10^{-5}$

(GUIDICINI; ANDRADE, 1983)

Assim, Azevedo, Oliveira e Soares (1978, p.23) concluíram em seu trabalho que

[...] a maior eficiência é antes produto do tipo de estrutura tratada, do que do procedimento técnico empregado, ou seja, é nas estruturas que apresentam um maior grau de injetabilidade (faixas fraturadas, contato entre derrames, junta-falha) que se verifica maior eficiência das injeções, independentemente da técnica utilizada.

### **3 BARRAGENS ESTUDADAS**

Para realização das análises de eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens, foram utilizados dados de injeção de cimento e de ensaios de perda d'água de duas obras já existentes: da Derivação do Rio Jordão e de Salto Caxias.

A seguir, são apresentadas localização e descrições dessas barragens, bem como as principais características geológicas presentes nas regiões e volumes de cimento absorvidos durante a execução das cortinas de injeção. Estes dados podem ser encontrados em vários artigos e livros como: Levis, Soares e Andrade (1998), Levis et al. (1998 e 1999) e Main Brazilian Dams (2000).

#### **3.1 CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS**

##### **3.1.1 Barragem de Salto Caxias**

A Usina Hidrelétrica de Salto Caxias foi construída e é operada pela COPEL (Companhia Paranaense de Energia). Sua construção deu-se no período de março de 1996 a outubro de 1998. Possui capacidade instalada de 1.240 MW. Localiza-se no Rio Iguaçu a, aproximadamente, 560 km de Curitiba (Figura 3.1).

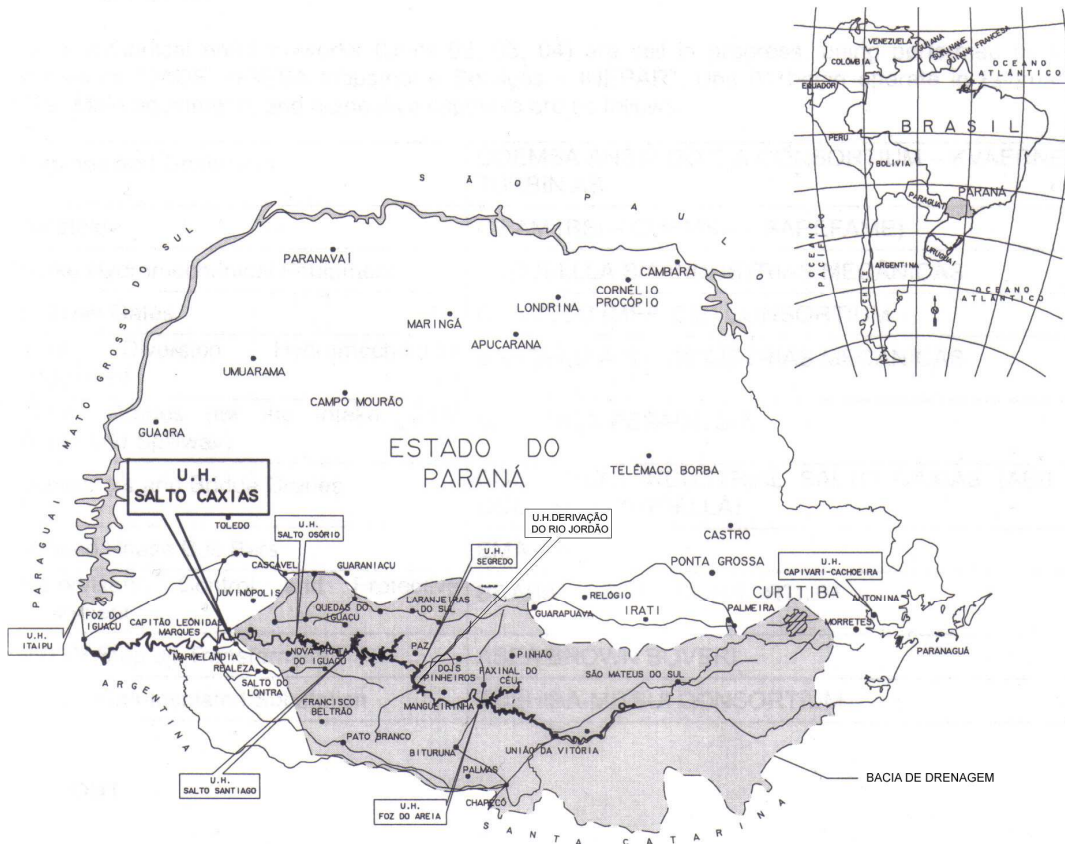


Figura 3.1. Localização das barragens de Salto Caxias e da Derivação do Rio Jordão

A barragem da hidrelétrica (Figuras 3.2, 3.3 e 3.4) é de gravidade, de concreto compactado com rolo, com as seguintes características (MAIN BRAZILIAN DAMS, 2000):

- 67 m de altura;
- 1.100 m de comprimento;
- 945.000 m<sup>3</sup> de CCR;
- 65.000 m<sup>3</sup> de concreto convencional;
- Capacidade do vertedouro de 49.600 m<sup>3</sup>/s;
- Nível d'água máximo normal de montante na EL. 325,00 m;
- Nível d'água máximo maximorum de montante na EL. 326,00 m;
- Nível d'água normal de jusante na EL. 259,10 m;
- Nível d'água máximo maximorum de jusante na EL. 268,50 m.



Figura 3.2. Vista aérea da barragem de Salto Caxias

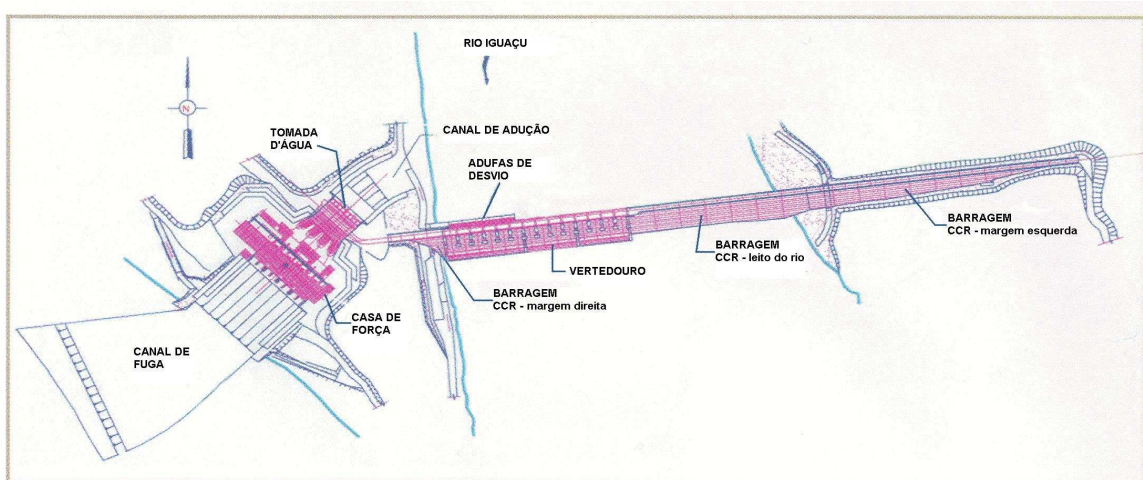


Figura 3.3. Arranjo geral das estruturas da U. H. de Salto Caxias

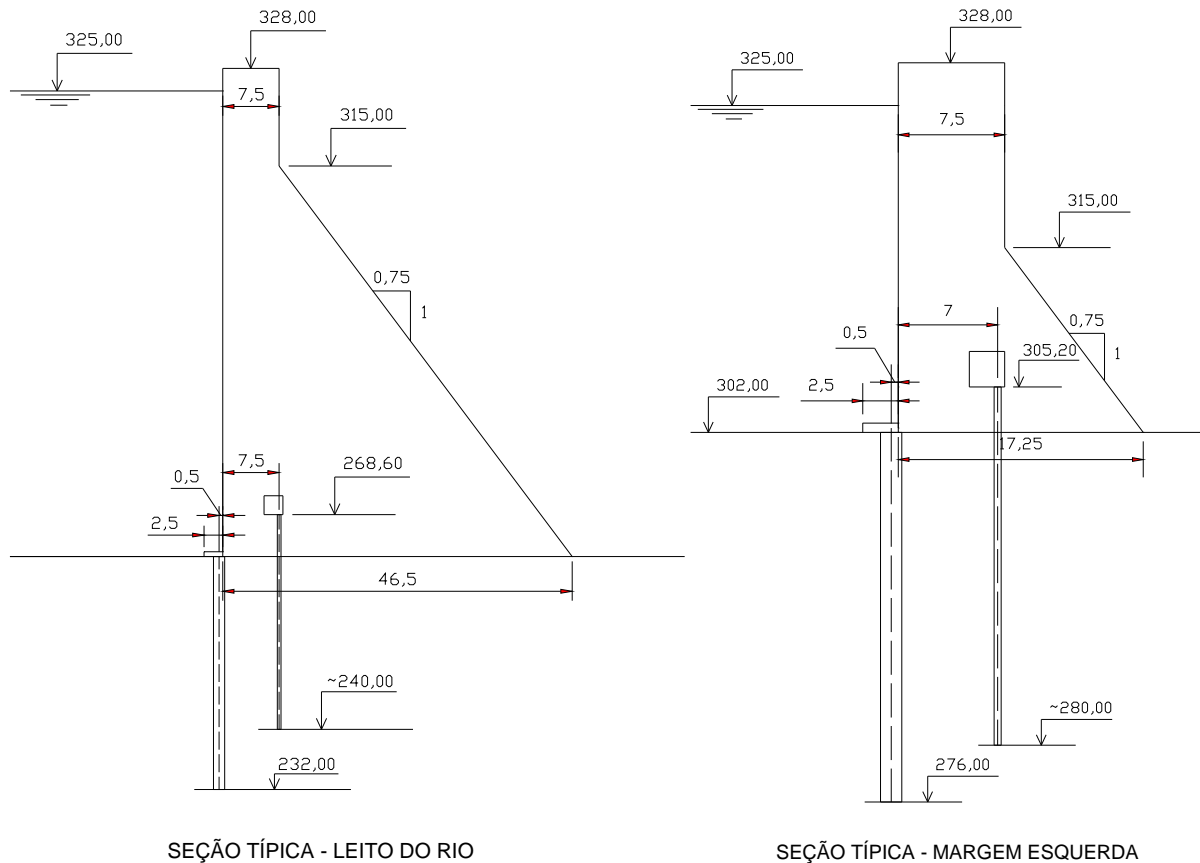


Figura 3.4. Seções típicas da barragem de Salto Caxias

### 3.1.2 Barragem da Derivação do Rio Jordão

Segundo Levis et al. (1998), a barragem da Derivação do Rio Jordão (Figuras 3.5 e 3.6), também de responsabilidade da COPEL, foi concluída em 1996. Localiza-se no rio que lhe dá nome, próximo ao seu encontro com o rio Iguaçu, nas proximidades da barragem de Segredo, entre os municípios de Reserva do Iguaçu e Foz do Jordão (Figura 3.1). Igualmente construída com Concreto Compactado com Rolo (CCR), possui 67 m de altura. Sua principal função é derivar a água do rio Jordão através de um túnel de 4704 m de comprimento para o reservatório da U.H. Governador Ney Braga (Segredo).

Suas principais características são (MAIN BRAZILIAN DAMS, 2000):

- 550 m de comprimento, sendo 300 m de vertedouro de soleira vertente;



- Capacidade instalada de 6,54 MW;
- Incremento na capacidade da U.H. Segredo de 62,40 MW;
- Nível d'água máximo normal de montante na EL. 610,00 m;
- Nível d'água máximo maximorum de montante na EL. 614,80 m;
- Nível d'água máximo maximorum de jusante na EL. 548,30 m.



Figura 3.5. Vista aérea da barragem da Derivação do Rio Jordão

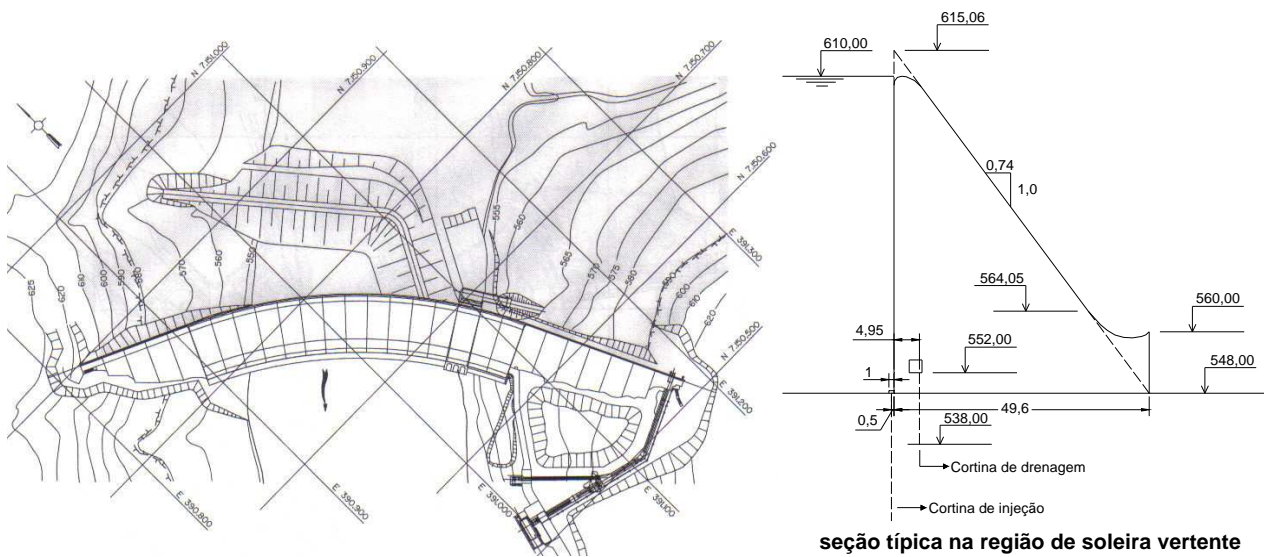


Figura 3.6. Planta e seção típica da barragem da derivação do rio Jordão

## 3.2 CARACTERÍSTICAS GEOLÓGICAS DAS REGIÕES DAS BARRAGENS

### 3.2.1 Características Geológicas de Salto Caxias

A U. H. de Salto Caxias está localizada em região de rochas basálticas. O perfil geológico ao longo do rio Iguaçu (Figura 3.7) ilustra a localização da usina em relação a sua foz.

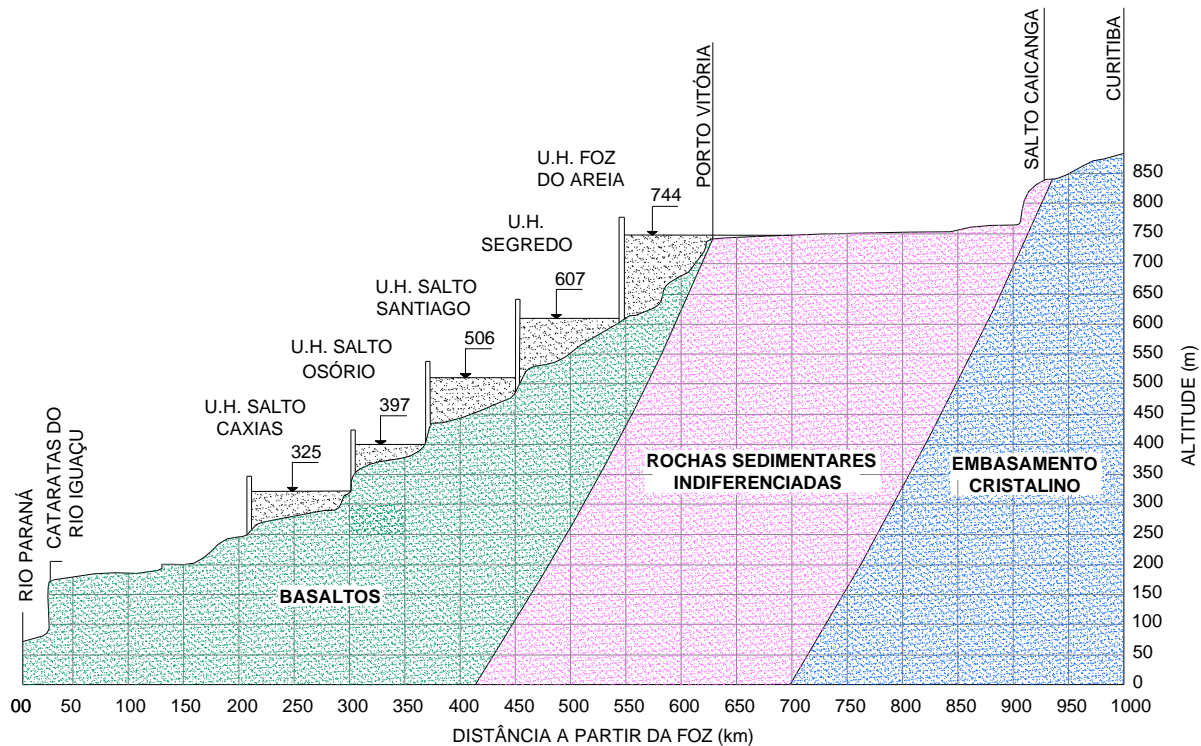


Figura 3.7. Perfil geológico ao longo do rio Iguaçu

Na região de Salto Caxias foram constatados 5 derrames, designados horizontalmente, de cima para baixo, D1, D2, D3, D4 e D5 (Figuras 3.8 e 3.9). Estes derrames são sub-horizontais, com um pequeno mergulho para oeste, de aproximadamente 5 m/km, e apresentam-se bastante regulares (LEVIS et al., 1998).



A morfologia de Salto Caxias é muito peculiar, formada pela ocorrência de uma grande volta do Rio Iguaçu, posteriormente seccionada de maneira a originar a formação atual.

As características de cada derrame são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Características dos derrames encontrados em Salto Caxias

Derrame	Espessura	Características
D1	superior a 40 m	Basalto maciço colunar. Próximo à superfície, com pouca cobertura de solo, coberto por espessa camada de saprolito e de rocha parcialmente alterada ao longo das fraturas colunares, com espessura de até 15 m.
D2	15 m	Basaltos vesículo-amigdalóides no topo e basalto micro-amigdalóide a maciço, pouco fraturado, com minerais esverdeados no meio e base.
D3	40 a 50 m	Brecha basáltica avermelhada e porosa seguida de: basalto maciço com amígdalas esparsas, horizonte delgado de basalto maciço afanítico do tipo micro-colunar (4 m de espessura), sobreposto a uma descontinuidade do tipo junta-falha (descontinuidade d3), e camada basal espessa de basalto maciço colunar. Ocorre desde aproximadamente a cota 280,00, nas ombreiras, até 10 a 15 m abaixo do leito do rio.
D4	pouco espesso	Basalto vesicular e micro-amigdalóide.
D5	superior a 40 m	Basalto vesicular, localmente brechado na porção superior, seguido por basalto micro-amigdalóide e basalto maciço.

Segundo Levis et al. (1998), na região de Salto Caxias foram encontradas algumas feições atectônicas significativas. Tiveram influência no projeto e construção:

- contatos de derrame, em sua maioria abertos e com grandes perdas de água;
- fraturação colunar dos basaltos maciços;
- fraturação sub-horizontal do basalto maciço que forma o leito do rio, margem esquerda, originada por decompressão erosiva;
- descontinuidade d3, uma zona fraturada sub-horizontal, alterada, muito extensa e permeável, do tipo junta-falha, localizada entre os materiais D3C e D3D.

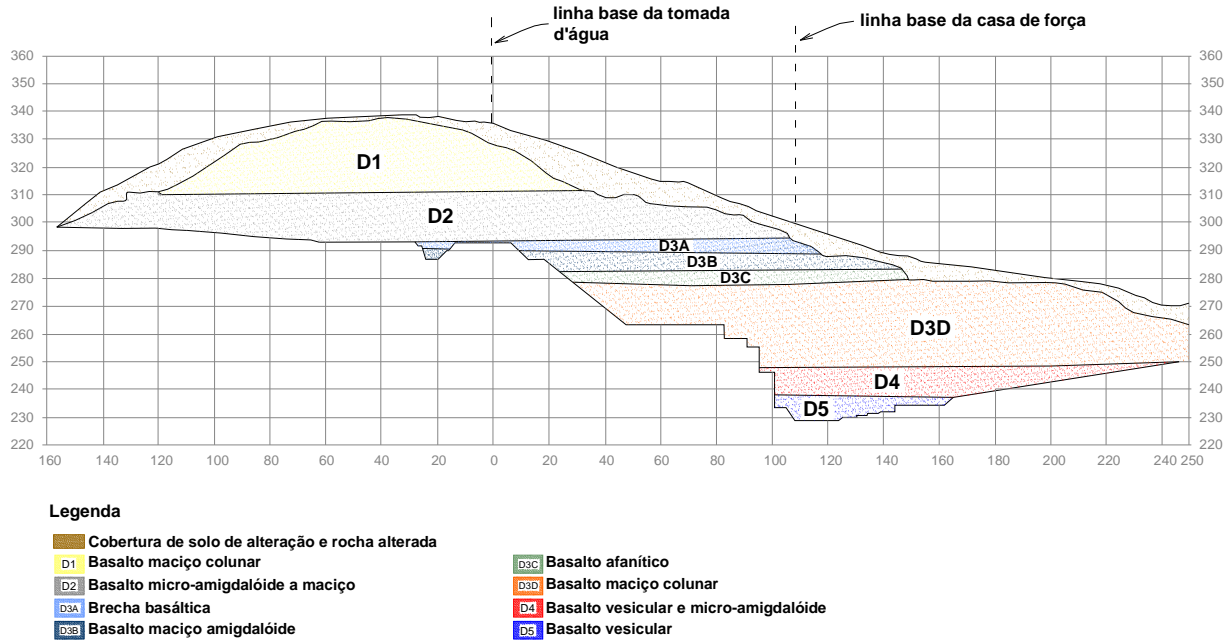


Figura 3.8. Diferentes derrames na região de Salto Caxias (LEVIS et al., 1998)

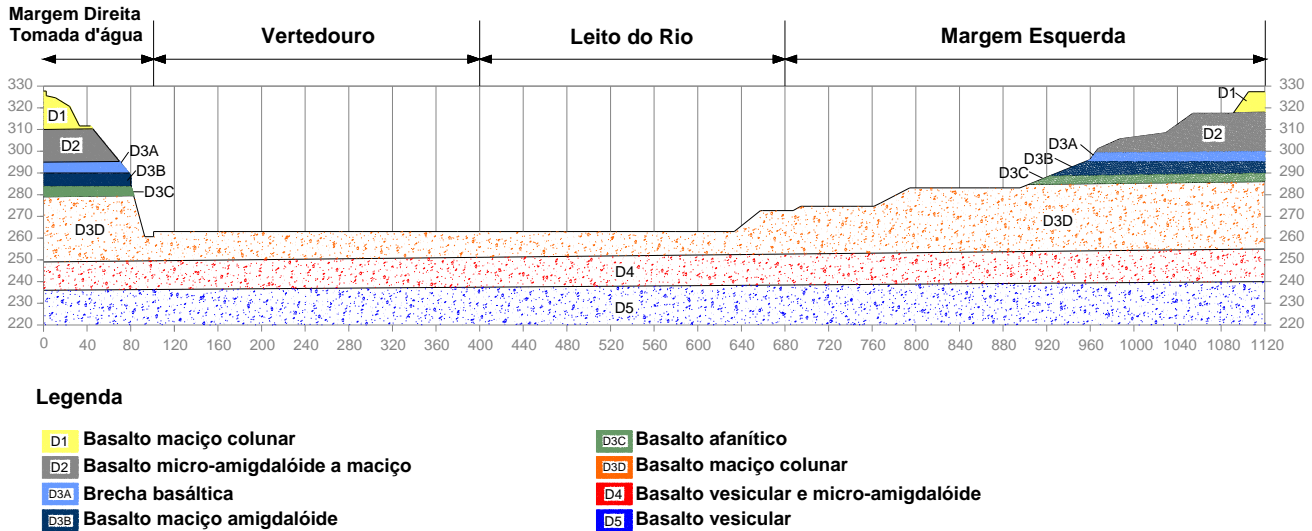


Figura 3.9. Perfil Geológico da barragem de Salto Caxias

### 3.2.2 Características Geológicas da Derivação do rio Jordão

A geologia da derivação do rio Jordão é relativamente mais simples que a apresentada para Salto Caxias. É composta basicamente por dois derrames de basalto (Figura 3.10) sub-horizontais, com pequeno mergulho para oeste. Os dois derrames têm grande extensão ao longo do vale do rio Jordão. O superior tem cerca de 50 a 60 m de espessura, constituído por basalto maciço colunar, com aproximadamente 5 m de brecha basáltica no topo. O contato com o derrame inferior é bem ressoldado e fechado. Este, por sua vez, tem uma espessura acima da média – 70 a 80 m de basalto maciço, sobrepostos por espessa camada de brecha basáltica interderrame. A transição ao basalto maciço subjacente é gradativa e mal definida, com a ocorrência local de um sub-derrame dividindo a faixa de brecha (LEVIS et al., 1998).

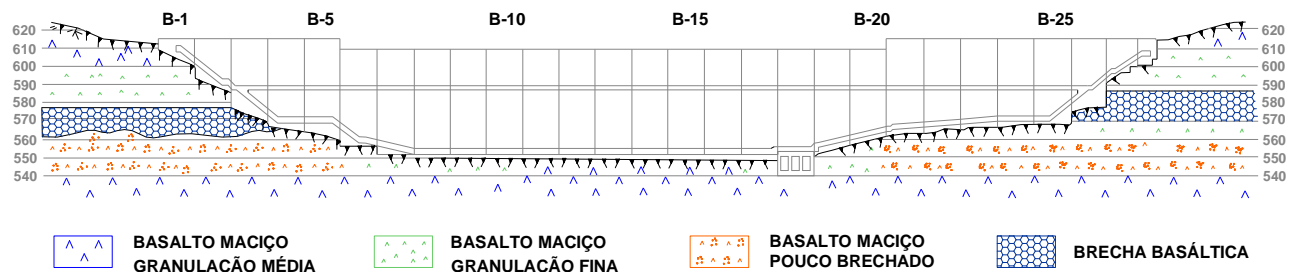


Figura 3.10. Perfil Geológico da barragem da Derivação do Jordão (LEVIS et al.,1998)

As características estruturais mais significativas para as obras foram:

- fraturação colunar dos basaltos densos;
- fraturas de descompressão encontradas perto da superfície;
- algumas descontinuidades sub-horizontais não muito extensas.

No local da barragem não foram encontrados falhamentos de grande porte, com exceção de pequena falha junto à margem direita, a qual foi tratada por meio de escavação, reposição em concreto e injeção de cimento.

### 3.3 INJEÇÕES DAS FUNDAÇÕES

A metodologia para execução das injeções de cimento foi a mesma para as duas barragens em questão. Os furos foram realizados em uma única linha, a partir de uma pequena laje de 2,5 m de largura, no caso de Salto Caxias e de 1,0 m, no caso da Derivação do Rio Jordão, localizada a montante do paramento. Esta laje é conectada ao corpo da barragem por um veda-juntas. O espaçamento típico entre furos primários foi de 6 m em Salto Caxias e de 8 m em Jordão.

As pressões utilizadas para injetar a calda foram moderadas, seguindo a escola americana ( $0,25 \text{ kg/cm}^2/\text{m}$  de profundidade), sem forçar a abertura de fraturas. Procurou-se injetar a calda mais grossa possível, variando o fator água/cimento entre 2:1 e 1:1, em peso. O critério de utilização de calda única não foi adotado, pois seria necessário o emprego de pressões mais elevadas. O cimento utilizado foi o pozolânico, de finura Blaine da ordem de  $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ .

#### 3.3.1 Derivação do Rio Jordão

A fundação da barragem do Jordão apresentou-se bem estanque, com valores médios de absorção muito baixos, revelando a excelente qualidade da rocha no local. A maior parte das absorções ocorreu próximo à superfície, em zonas mais danificadas pela escavação.

Os dados de volumes de calda absorvida obtidos em campo referem-se ao total de cimento injetado. Devido às baixas absorções, procurou-se expurgar os valores de calda remanescente nos furos, como mostrado na tabela 3.2. Os valores de absorção de cimento foram recalculados, para cada estrutura da barragem, a partir dos dados de absorção de

**Barragens Estudadas**

campo. Optou-se por adotar um cálculo conservador, subtraindo-se da calda injetada todo o volume referente ao furo. Assim, observa-se uma absorção do maciço de 60 a 80% da calda, ou seja, cerca de 30% do volume utilizado na injeção permaneceu nos furos.

Tabela 3.2 – Injeções da barragem da Derivação do Rio Jordão, descontados volumes de furos

ESTRU- TURA	PERFURA- ÇÃO (m)	VOLUME CALDA (CAMPO) (m <sup>3</sup> )	VOLUME FURO (m <sup>3</sup> ) d <sub>a</sub> = 1½"	MACIÇO (CALDA – FURO)		CIMENTO				FATOR A/C MÉDIO (PESO)
				(m <sup>3</sup> )	%	TOTAL (kg)	MÉDIA (kg/m)	MACIÇO (kg) (kg/m)		
Blocos 1 a 5	853,00	19,11	3,89	15,22	79,6	11 000	12,90	8 761	10,27	1,07:1
Blocos 6 a 13	1 006,50	16,02	4,59	11,43	71,3	9 009	8,95	6 428	6,39	1,11:1
Blocos 14 a 20	831,83	9,65	3,79	5,86	60,7	3 844	4,62	2 334	2,81	1,84:1
Blocos 21 a 28	1 072,68	24,51	4,89	19,62	80,0	12 399	11,56	9 925	9,25	1,31:1
Total	4 108	79,2	18,73	60,47	76,4	36 984	9,0	28 238	6,87	1,47:1

**3.3.2 Salto Caxias**

Na barragem de Salto Caxias, as absorções médias de calda de cimento apresentaram-se mais elevadas, na ordem de 33,6 kg/m. Descontando-se, também, o volume de furos (Tabela 3.3), a absorção do maciço girou em torno de 90%, ou seja, somente 10% da calda injetada permaneceram nos furos.

Tabela 3.3 – Injeções da barragem de Salto Caxias, descontados volumes de furos

ESTRUTURA	PERFURAÇÃO (m)	VOLUME CALDA (m <sup>3</sup> )	VOLUME FURO (m <sup>3</sup> ) d <sub>d</sub> = 1½"	MACIÇO (CALDA – FURO)		CIMENTO				FATOR A/C MÉDIO (PESO)
				(m <sup>3</sup> )	%	TOTAL (kg)	MÉDIA (kg/m)	MACIÇO		
								(kg)	(kg/m)	
Margem Esquerda	5 637	248	25,71	222,29	89,6	169 690	30,1	152 097	27,0	0,79:1
Leito do Rio	5 209	428	23,76	404,24	94,4	291 237	55,9	275 069	52,8	0,8:1
Vertedouro	5 553	332	25,32	306,68	92,4	174 303	31,4	161 010	29,0	1,24:1
Margem Direita	2 425	87	11,06	75,94	87,3	53 814	22,2	46 973	19,4	0,95:1
Tomada d'água	2 245	63	10,24	52,76	83,7	41 845	18,6	35 074	15,6	0,84:1
Galeria	851	15	3,88	11,12	74,1	5 952	7,0	4 412	5,2	1,85:1
<b>TOTAL</b>	<b>21 920</b>	<b>1 173</b>	<b>99,96</b>	<b>1 073</b>	<b>91,5</b>	<b>736 841</b>	<b>33,6</b>	<b>674 052</b>	<b>30,8</b>	<b>0,93:1</b>

Como visto anteriormente, a permeabilidade em basaltos apresenta-se alta em alguns horizontes, em geral sub-horizontais, e muito baixa em trechos intermediários.

Nos trechos mais permeáveis como nos contatos D3/D4 e D4/D5, as absorções ultrapassaram 1000 kg/m, em certos locais, levando a médias superiores a 100 kg/m (Tabela 3.4). Estas absorções apresentaram-se mais pronunciadas no leito do rio, como pode ser observado na tabela 3.3, onde o contato localiza-se a cerca de 10 m de profundidade.

Os valores mais altos de absorção encontrados na margem esquerda relacionam-se com a descontinuidade d3. Entretanto, esta se mostrou mais difícil de injetar, devido ao caráter fragmentado e alterado da rocha.

A tabela 3.4 relaciona as absorções médias, descontados os volumes de furos, com as diferentes fases de injeção e derrames ou contatos onde se encontram. Como a relação água/cimento durante o procedimento não foi mantida constante, ao tratarem-se os dados de absorção de cimento por derrame, adotou-se um fator água/cimento médio, em peso, de 1:1.

Tabela 3.4 – Relação entre tipo de furo e derrame ou contato, na U.H. Salto Caxias

TIPO DE FURO	ABSORÇÃO MÉDIA POR DERRAME (kg/m)									
	D1	D1/D2	D2	D2/D3	D3	Desconti- nuidade D3	D3/D4	D4	D4/D5	D5
Exploratórios e Primários	14,83	11,32	10,80	48,26	38,62	30,90	114,69	64,17	117,13	31,72
Secundários	10,00	17,38	25,17	18,60	22,04	12,48	41,38	41,19	79,16	17,90
Terciários	12,16	10,74	4,59	14,82	7,76	9,90	14,78	11,08	10,61	---
Quaternários	0,09	0,48	25,44	1,84	4,75	0,27	12,78	29,46	0,00	---
TOTAL	11,48	12,19	13,58	27,47	18,39	17,69	46,12	50,53	109,56	28,84





## 4 METODOLOGIA DE ANÁLISE DA EFICÁCIA DA CORTINA DE INJEÇÃO

A análise da eficácia da cortina de injeção e o cálculo da subpressão em fundações de barragens são geralmente feitos considerando-se o maciço como homogêneo, com valores determinísticos. Neste trabalho, procurou-se analisar o maciço de fundação probabilisticamente de duas formas, baseando-se nos ensaios de perda d'água feitos nos furos de injeção, seguindo o princípio do Método de Monte Carlo.

A primeira forma de análise foi testada somente para a barragem da Derivação do Rio Jordão. Foram realizadas simulações numéricas em meios heterogêneos, com valores aleatórios de permeabilidade.

A segunda foi aplicada para as duas barragens. Na de Salto Caxias, consideraram-se duas seções, uma na margem esquerda e outra no leito do rio, de modo a abordar os diferentes derrames de basalto presentes na região. Efetuaram-se 1000 simulações para cada seção, admitindo-se o maciço e a cortina de injeção como meios homogêneos, com valores de permeabilidade variando de acordo com diferentes pares de números aleatórios (Figura 4.1). Este procedimento tem sido já bastante utilizado em confiabilidade de estruturas (VENTURINI; SOARES; MOHAMED, 2001 e LEMAIRE; CHATEAUNEUF; MITTEAU, 2005) e em análises geotécnicas (HACHICH; NEGRO JR, 1990; AOKI, 2002; AOKI; CINTRA; MENEGOTTO, 2002; HACHICH, 2002).

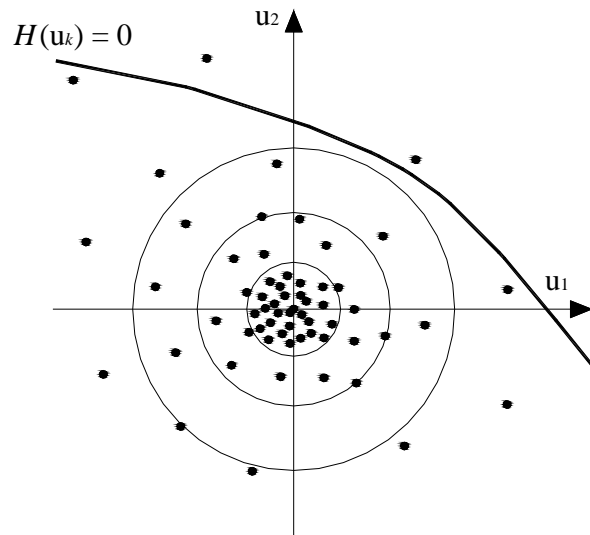


Figura 4.1. Simulações de Monte Carlo (LEMAIRE; CHATEAUNEUF; MITTEAU, 2005)

#### 4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA EM FUNDAÇÕES DE BARRAGENS DE CONCRETO

A Estatística é dividida em três ramos principais: estatística descritiva, que envolve a organização e a coleta de dados; a teoria da probabilidade, que proporciona uma base racional para lidar com situações influenciadas por fatores relacionados com o acaso, assim como estimar erros; e a teoria da inferência, que envolve análise e interpretação de amostras.

A Estatística, de modo geral, constitui um valioso instrumento para tomada de decisões. Outra característica sua é o uso de modelos. Estes são formas simplificadas de representar algum problema ou situação real. A característica fundamental dos modelos é o fato de reduzirem situações complexas a formas mais simples e mais compreensíveis.

A análise estatística das absorções de água e cimento e da permeabilidade em fundações de barragens de concreto foi feita baseada em dados obtidos durante os procedimentos de injeções de cimento das cortinas das barragens da Derivação do Rio Jordão e de Salto Caxias. O cálculo dos valores de permeabilidade foi feito através do

método apresentado pela ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (OLIVEIRA; SILVA; FERREIRA JÚNIOR, 1975) considerando-se, para os casos de absorção nula no ensaio de perda d'água, o valor de permeabilidade igual a  $1.10^{-8}$  cm/s.

A fim de se obter uma padronização para os valores, procurou-se, primeiramente, analisar a distribuição probabilística que melhor se ajustasse em cada caso de furos primários, secundários, terciários e quaternários. Para tanto, foram testados os valores de absorções originais e logarítmicos dos dados das duas barragens. De modo a tornar possível o cálculo do logaritmo de alguns números, admitiu-se para absorção nula de água o valor de 0,01 l/m.min.kgf/cm<sup>2</sup> e de cimento, 0,1 kg/m. No caso dos valores de permeabilidades, estes foram todos normalizados por  $10^{-6}$  cm/s.

As melhores distribuições foram obtidas com auxílio do programa STATGRAPHICS Plus (2001). Este permite a plotagem dos valores de acordo com diferentes distribuições estatísticas e a realização de testes de ajuste com diferentes métodos. O método usado para verificar a adequação ao ajuste do modelo probabilístico aos dados foi o teste de Kolmogorov-Smirnov ou de Kuiper (BAIN; ENGELHARDT, 2000). Este compara a curva do modelo teórico (pré-determinado) com a curva resultante dos dados. As distâncias entre os pontos das duas curvas (teórica e real) são medidas e resultam em uma estatística D. O valor desta estatística D tem em correspondência um valor-P e decide-se por aceitar o modelo quando este é superior a 5%. O anexo 1 apresenta as distribuições utilizadas nas comparações.

Observou-se que a quantidade de valores iguais a zero era muito grande, dificultando o ajuste de qualquer curva. Separou-se, então, a distribuição dos valores da variável aleatória Y em duas partes: o valor Y=0 e os valores Y>0, sendo que neste caso Y=X>0 e a distribuição de X é logística, ou seja:

$$Y = \begin{cases} 0 & \text{com } P(Y=0) = p_1 \\ Y=X>0 & \text{com } P(Y=x) = p_2 = 1 - p_1 \end{cases} \quad X \sim \text{logística} \quad (4.1)$$

Ou, ainda, no caso de valores logarítmicos:

$$Y = \begin{cases} k = \ln 0,01 \text{ (ou } \ln 0,1) \text{ com } P(Y=k) = p_1 \\ X > K \text{ com } P(Y=x) = p_2 = 1 - p_1 \end{cases} \quad X \sim \text{logística} \quad (4.2)$$

## 4.2 MÉTODO DE SIMULAÇÃO MONTE CARLO

O Método de Simulação Monte Carlo é um processo utilizado para gerar soluções determinísticas de forma repetida. Cada solução corresponde a um conjunto de valores fixados, vindos de variáveis aleatórias. O principal elemento de uma Simulação Monte Carlo, segundo Chaves Neto (2003), é a geração de números aleatórios de uma distribuição específica (Gaussiana, Lognormal, etc.).

Segundo Lemaire, Chateaufeuf e Mitteau (2005), o Método Monte Carlo permite o cálculo da probabilidade de falha de uma situação através de:

$$P_f = E[I_{Df}] \approx \tilde{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N I'_{Df} \quad (4.3)$$

Onde:

$E$  = esperança matemática;

$I_{Df}$  = domínio de falha;

$$I_{Df} = \begin{cases} 1 \text{ se } H(u_k) \leq 0 \\ 0 \text{ se } H(u_k) > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$\tilde{P}_f$  = estimativa de  $P_f$

$N$  = número de tiragens aleatórias.

O erro, para um intervalo de 95%, pode ser obtido por:

$$\%erro = 196 \sqrt{\frac{1 - \tilde{P}_f}{N \cdot \tilde{P}_f}} \quad (4.5)$$

Aqueles autores concluem, ainda, que, para avaliar corretamente uma probabilidade da ordem de  $10^{-n}$ , é necessária a execução de  $10^{n+2}$  a  $10^{n+3}$  simulações.

Assim, a primeira fase deste trabalho consistiu no ajuste de curvas de distribuição dos dados, como já visto anteriormente. O segundo passo foi a geração de valores aleatórios de permeabilidade, feita em duas etapas. De início, utilizou-se a distribuição de Bernoulli, onde:

$$Z \begin{cases} 0 & \text{para } P(Z=0) = p_1 \\ 1 & \text{para } P(Z=1) = p_2 = 1 - p_1 \end{cases} \quad (4.6)$$

$$Z \sim b(1; p_1)$$

Para gerarem-se  $n$  valores iguais a 0 e 1, com  $m$  zeros e  $n-m$  valores unitários. Assim, consideraram-se os valores iguais a zero como o número de valores nulos no ensaio de perda d'água, ou seja, com permeabilidade igual a  $1.10^{-8}$  cm/s. A quantidade de valores  $n-m$  iguais a 1 foi utilizada para gerar números aleatórios de uma distribuição logística com média e desvio padrão obtidos dos dados originais. Portanto, obtiveram-se  $m$  zeros e  $n-m$  valores vindos da distribuição logística com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$  (Tabelas 4.1 e 4.2).

A média da distribuição de Bernoulli, para a totalidade dos valores, pode ser encontrada a partir da equação 4.7, a qual relaciona os valores de probabilidade equivalentes aos valores nulos e não nulos.

$$E(Z) = P(Z = 0) \cdot E(K) + P(Z = 1) \cdot E(X) \quad (4.7)$$

Tabela 4.1 – Médias dos valores de permeabilidades para as diferentes classes de furos – Derivação do Rio Jordão

TIPO DE FURO	DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA			P (Y=-4,61)	MÉDIA GLOBAL (BERNOULLI)	PERMEABILIDADE ( $e^{\mu_{global}} \cdot 10^{-6}$ cm/s)
	MÉDIA ( $\mu$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	P (Y>-4,61)			
Primário	2,86	1,73	0,57	0,43	-0,38	$6,82 \cdot 10^{-7}$
Secundário	3,95	1,58	0,65	0,35	0,98	$2,67 \cdot 10^{-6}$
Terciário	3,59	1,42	0,58	0,42	0,18	$1,20 \cdot 10^{-6}$
Quaternário	2,66	0,83	0,52	0,48	-0,82	$4,42 \cdot 10^{-7}$

Tabela 4.2 – Médias dos valores de permeabilidades para as diferentes classes de furos – Salto Caxias

TIPO DE FURO	DERRAME / CONTATO	DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA			P (Y=-4,61)	MÉDIA GLOBAL (BERNOULLI)	PERMEABILIDADE ( $e^{\mu_{global}} \cdot 10^{-6}$ cm/s)
		MÉDIA ( $\mu$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	P (Y>-4,61)			
Primário	D1	3,75	1,93	0,72	0,28	1,51	4,53E-06
	D1/D2	3,74	1,26	0,75	0,25	1,73	5,64E-06
	D2	3,56	1,53	0,43	0,57	-0,93	3,93E-07
	D2/D3	4,63	1,84	0,73	0,27	2,25	9,48E-06
	D3	4,70	2,24	0,62	0,38	1,26	3,52E-06
	Desc. D3	4,22	1,50	0,65	0,35	1,22	3,38E-06
	D3/D4	5,10	2,08	0,84	0,16	3,64	3,80E-05
	D4	3,63	1,78	0,44	0,56	-0,85	4,27E-07
	D4/D5	3,63	1,73	0,54	0,46	0,01	1,01E-06
	D5	3,05	1,53	0,47	0,53	-0,88	4,17E-07
Terciário	D1	4,04	1,39	0,59	0,41	0,63	1,87E-06
	D1/D2	4,04	1,45	0,72	0,28	1,69	5,44E-06
	D2	3,28	1,10	0,21	0,79	-2,74	6,43E-08
	D2/D3	5,08	1,26	0,63	0,38	1,56	4,77E-06
	D3	4,26	1,51	0,45	0,55	-0,49	6,12E-07
	Desc. D3	4,03	1,68	0,42	0,58	-0,79	4,55E-07
	D3/D4	4,04	1,65	0,74	0,26	1,83	6,23E-06
	D4	2,18	0,97	0,50	0,50	-1,06	3,46E-07
	D4/D5	3,36	1,21	1,00	0,00	3,36	2,88E-05
Quaternário	D1/D2	3,38	0,85	0,60	0,40	0,31	1,36E-06
	D2	4,25	0,89	0,40	0,60	-0,88	4,13E-07
	D2/D3	4,07	0,59	0,90	0,10	3,24	2,54E-05
	D3	4,09	0,99	0,37	0,63	-1,20	3,02E-07
	Desc. D3	2,45	1,62	0,60	0,40	-0,25	7,75E-07
	D3/D4	3,98	1,45	0,89	0,11	3,06	2,13E-05

### 4.3 PERMEABILIDADE RELATIVA DA CORTINA DE DRENAGEM

A linha de drenos, na fundação de uma barragem, permite o fluxo de água e alívio de subpressão, funcionando como uma região de maior permeabilidade. No caso de modelagem numérica com elementos finitos, torna-se importante o conhecimento desta propriedade. Herrera López (2005), baseando-se em Andrade (1982), calcula a permeabilidade relativa dos drenos a partir de sua geometria e da permeabilidade do material ao seu entorno (Figura 4.2).

Primeiramente, determina-se a carga média na boca do dreno ( $H_{dm}$ ) por:

$$H_{dm} = \frac{j \cdot d \cdot \lambda \cdot H_d + H_m \cdot j + H_j \cdot d}{j \cdot d \cdot \lambda + B} \quad (4.8)$$

Onde:

$$\lambda = \frac{2\pi}{e \cdot \ln\left(\frac{e}{\pi \cdot d_d}\right)} \quad (4.9)$$

$e$  = espaçamento entre drenos (L);

$d_d$  = diâmetro do dreno (L);

$j$  = distância do dreno à face de jusante da barragem (L);

$d$  = distância do dreno à face de montante da barragem (L);

$H_d$  = carga hidráulica na boca do dreno (L);

$H_m$  = carga hidráulica de montante (L);

$H_j$  = carga hidráulica de jusante (L);

$B$  = largura da base da barragem (L).

O fator de forma da linha de drenos ( $\lambda$ ), introduzido por Andrade (1982), corresponde a um fator de correção da permeabilidade do meio devido à introdução dos furos de drenagem, ou seja, representa a maior ou menor capacidade de drenagem da cortina.

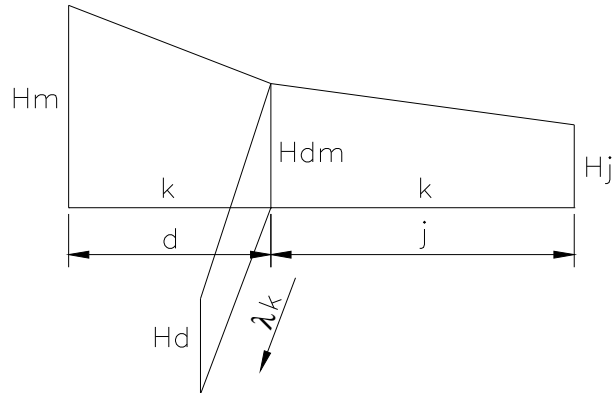


Figura 4.2. Carga média na boca do dreno ( $H_{dm}$ ) e fator de forma da linha de drenos ( $\lambda$ )

Assim, pode-se obter o gradiente hidráulico ( $i$ ) e a área de influência dos drenos ( $A$ ) com:

$$i = \left( \frac{H_m - H_{dm}}{d} \right) - \left( \frac{H_{dm} - H_j}{j} \right) \quad (4.10)$$

$$A = h_d \cdot e \quad (4.11)$$

Conhecendo-se a permeabilidade do maciço na direção  $x$  ( $k_x$ ), pela equação de Darcy, tem-se:

$$Q = k_x \cdot i \cdot A \quad (4.12)$$

Assumindo que esta vazão passará integralmente pelos drenos ( $Q = Q_d$ ), pode-se dizer que a permeabilidade na região dos drenos é:

$$k_d = \frac{Q_d}{i \cdot A_d} \quad (4.13)$$

Onde a área lateral do dreno ( $A_d$ ) é obtida do produto do comprimento de sua circunferência ( $D$ ) pela sua profundidade ( $h_d$ ):

$$A_d = D \cdot h_d \quad (4.14)$$

A tabela 4.3 apresenta os valores dos dados de entrada utilizados nos cálculos das permeabilidades equivalentes dos drenos das três seções:



Tabela 4.3 – Dados de entrada para cálculo da permeabilidade equivalente de drenos

Seção	e (m)	$d_d$ (mm)	j (m)	d (m)	$H_d$ (m)	$H_m$ (m)	$H_j$ (m)	B (m)	$h_d$ (m)
Jordão	2,00	76,20	44,95	6,05	552,00	610,00	548,00	51,00	10,00
Caxias – Margem Esquerda	3,00	76,20	10,25	9,50	305,20	325,00	302,00	19,75	22,00
Caxias – Leito do Rio	3,00	76,20	39,00	10,00	268,60	325,00	264,00	49,00	23,00

Então, para a barragem do Rio Jordão, obtém-se:

$$\lambda = 1,48 \text{ m}^{-1} \quad H_{dm} = 557,70 \text{ m} \quad i = 8,40$$

$$A = 20,00 \text{ m}^2 \quad A_d = 4,80 \text{ m}^2$$

$$k_d = 4,17 \cdot k_x$$

Na barragem de Salto Caxias:

→ para a seção da Margem Esquerda

$$\lambda = 0,83 \text{ m}^{-1} \quad H_{dm} = 306,90 \text{ m} \quad i = 1,40$$

$$A = 9,00 \text{ m}^2 \quad A_d = 1,40 \text{ m}^2$$

$$k_d = 6,40 \cdot k_x$$

→ para a seção do Leito do Rio

$$\lambda = 0,83 \text{ m}^{-1} \quad H_{dm} = 274,40 \text{ m} \quad i = 4,80$$

$$A = 33,00 \text{ m}^2 \quad A_d = 5,30 \text{ m}^2$$

$$k_d = 6,25 \cdot k_x$$

Portanto, como se pode perceber através dos resultados obtidos, o fator de maior influência no cálculo de permeabilidade equivalente na região dos drenos é o espaçamento entre os elementos (2 metros no caso da Derivação do Rio Jordão e 3 metros em Salto Caxias).

#### 4.4 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO MACIÇO HETEROGÊNEO

As análises de subpressão e percolação pelo maciço de fundação foram feitas utilizando o software SEEP/W (1999), através do Método dos Elementos Finitos (MEF).

A rigor, os coeficientes de permeabilidade de cada elemento se correlacionam com os dos vizinhos através de um critério geoestatístico, levando em conta a distância entre elementos de acordo com um variograma. Uma descontinuidade na origem do variograma caracteriza a ausência de correlação na escala do menor espaço entre amostras. Ao se aumentar o efeito pepita, os pesos tendem a ser mais similares entre si, assim como aumenta a variância da estimativa. O efeito pepita pode ser atribuído a erros de medição ou ao fato de que os dados não foram coletados a intervalos suficientemente pequenos para mostrar o comportamento espacial subjacente ao fenômeno em estudo.

A hipótese extrema aqui adotada corresponde ao caso de variograma definido pelo efeito pepita puro, ou seja, o procedimento de estimativa torna-se uma simples média das amostras disponíveis, com ausência de dependência espacial. Portanto, a simulação considerando-se o maciço de fundação como meio heterogêneo foi realizada somente para a barragem da Derivação do Rio Jordão.

A seção estudada encontra-se na região de soleira vertente, no leito do rio, e possui 62 m de altura e 49,6 m de base. Considerou-se o nível d'água máximo normal de montante na elevação 610,00 e sua cota de fundação (548,00) como nível d'água de jusante.

Cada análise foi realizada em três etapas:

1. Fundação Original: com permeabilidades geradas aleatoriamente, obtidas a partir das distribuições estatísticas ajustadas aos resultados de ensaios de perda d'água realizados em furos primários e exploratórios (Figura 4.3).

2. Com cortina de injeção: inserção, na “fundação original”, de uma cortina de injeção com 2 m de largura (distância entre furos terciários), 24 m de profundidade e permeabilidades geradas aleatoriamente, obtidas a partir das distribuições estatísticas ajustadas aos resultados de ensaios realizados em furos quaternários. Na distribuição dos números aleatórios pela cortina, tomou-se cuidado em não substituir os elementos originais por outros de permeabilidades maiores (Figura 4.4a).

3. Com cortinas de injeção e drenagem: inserção de cortina de drenagem com 0,5 m de largura (região de influência) e 10 m de profundidade, com pressão na boca do dreno e permeabilidade calculadas conforme Andrade (1982) – Equações 4.8 a 4.14. No caso de meio aleatório, a permeabilidade do maciço não se mantém constante. Assim, em cada análise considerou-se a maior permeabilidade ao redor da região do dreno como sendo o valor de  $k_x$ .

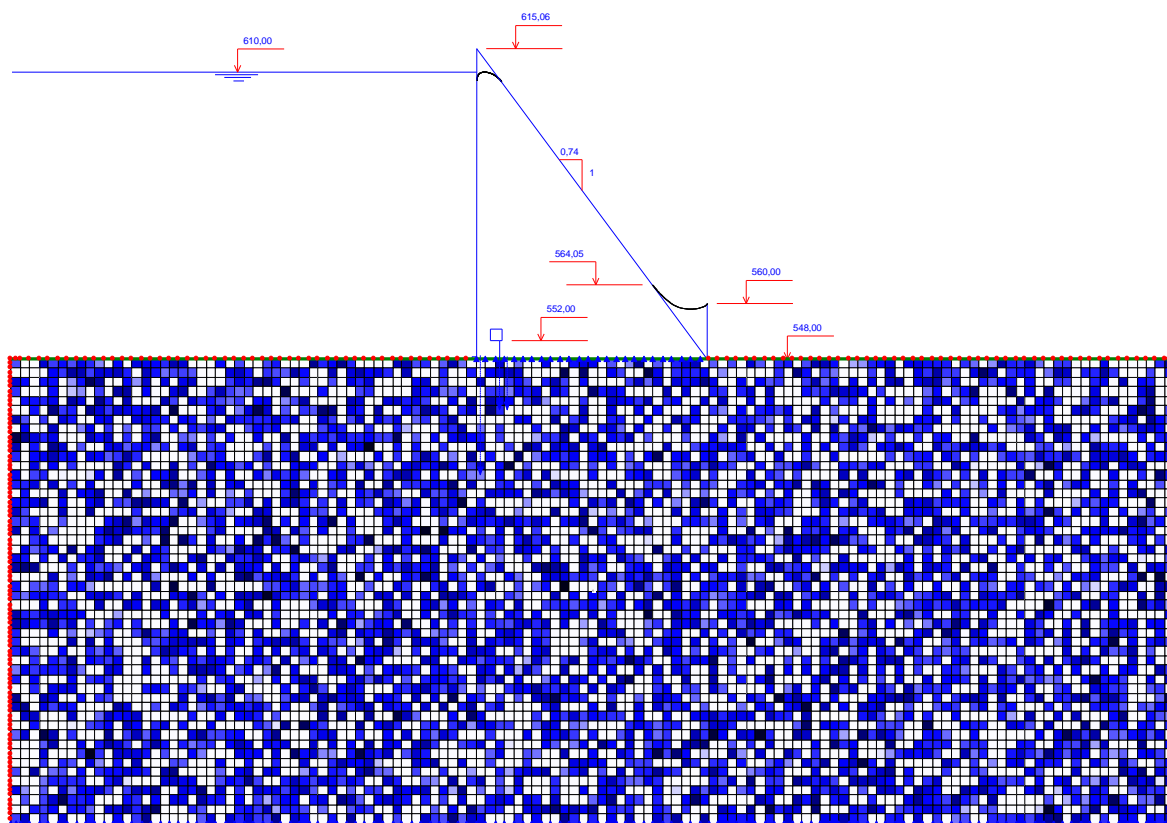


Figura 4.3. Malha com valores de permeabilidade aleatórios, obtidos a partir de ensaios de perda d'água realizados em furos primários. Elementos mais escuros representam maiores permeabilidades, as quais variam de  $1.10^{-10}$  a  $1.10^{-3}$

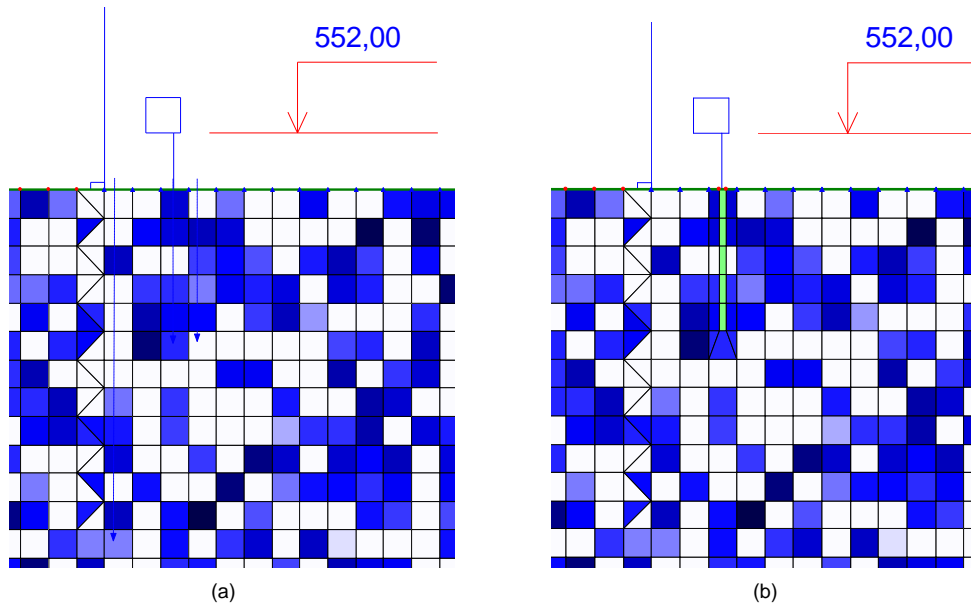


Figura 4.4. Malhas (a) com cortina de injeção e (b) com cortinas de injeção e drenagem

#### 4.5 SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DO MACIÇO HOMOGÊNEO COM PERMEABILIDADES VARIÁVEIS

Devido à ausência de correlação espacial entre elementos nas simulações numéricas em meio heterogêneo, como explicado no item 4.4, optou-se por realizar novas análises, considerando o maciço de fundação e a cortina de injeção como meios homogêneos. Ao contrário de considerarem-se diversos valores aleatórios de permeabilidade em uma mesma simulação, realizou-se 1000 ( $10^{1+2}$ ) simulações em meio homogêneo, com pares de permeabilidades aleatórias (Figura 4.5), encontradas a partir das distribuições estatísticas vistas anteriormente, o que resultou em uma precisão em torno de  $10^{-1}$  ou 10%.

Para a barragem da Derivação do Rio Jordão, encontrou-se um par de valores para cada análise, utilizando os dados de perda d'água dos furos primários e quaternários.

Enquanto que, para a de Salto Caxias, foi definida uma combinação para cada derrame e contato de basalto, utilizando-se resultados de ensaios dos furos primários e terciários, devido ao número limitado de quaternários.

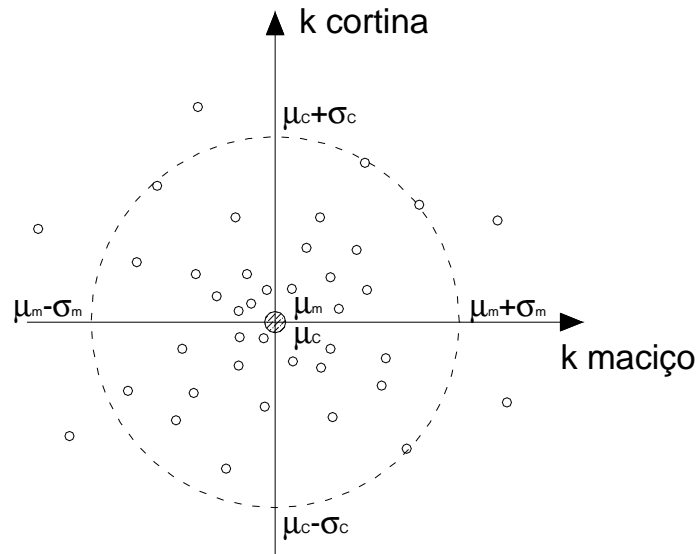


Figura 4.5. Combinações de valores de permeabilidades do maciço e da cortina

Em certos casos, ao combinarem-se os pares de valores aleatórios, observaram-se permeabilidades para a cortina de injeções maiores que para o maciço rochoso. Nessas situações, limitou-se o valor de permeabilidade da cortina ao mesmo do maciço.

Ao todo, foram utilizadas três seções nas análises, uma para a Derivação do Rio Jordão e duas para Salto Caxias. A primeira é idêntica à do caso de maciço heterogêneo. A figura 4.6 ilustra esta seção, bem como o modelo com meio homogêneo utilizado na simulação com o programa SEEP/W.

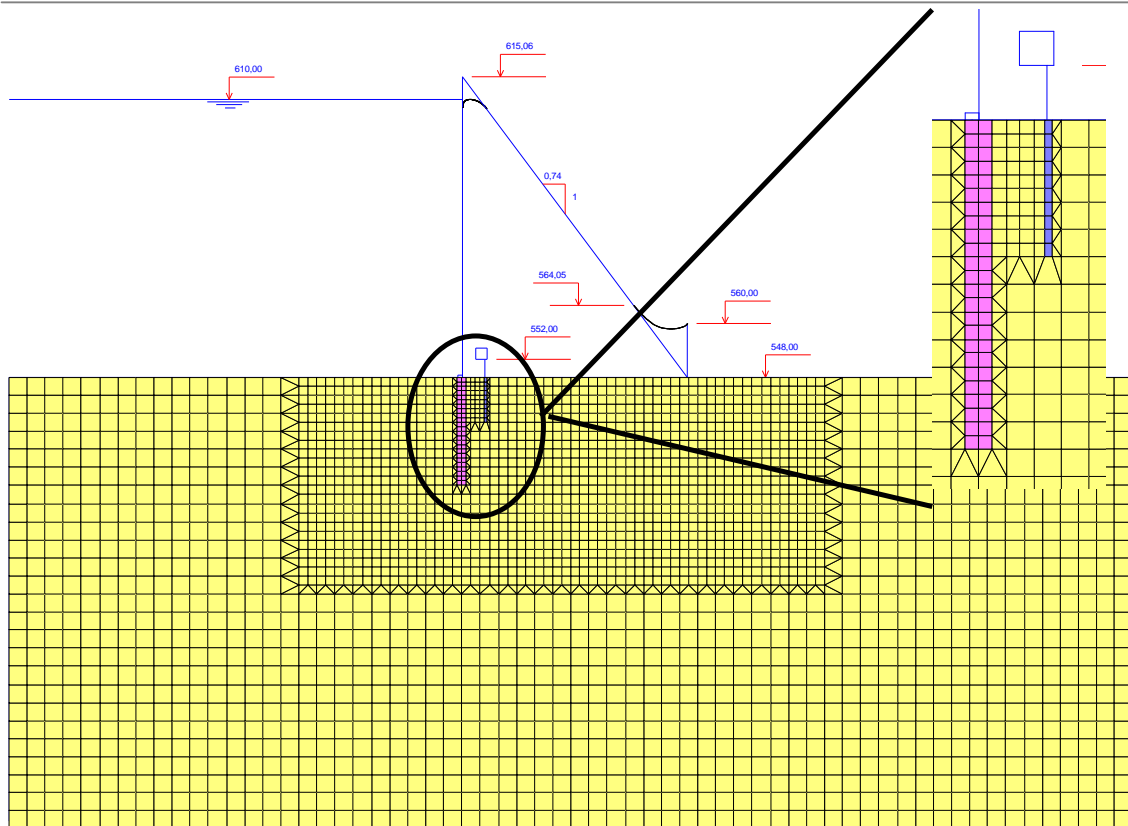


Figura 4.6. Modelo SEEP, de meio homogêneo, utilizado para a barragem da Derivação do Rio Jordão

Como já apresentado no Capítulo 3, o maciço rochoso em Salto Caxias apresenta uma geologia mais complexa e variável. Deste modo, objetivando-se alcançar todos os derrames de basalto presentes na região, estudou-se uma seção na margem esquerda da barragem e outra no leito do rio.

Na margem esquerda, a barragem possui 26 m de altura e 17,25 m de base. O nível d'água máximo normal de montante encontra-se na elevação 325,00 e, assim como para a Derivação do Rio Jordão, considerou-se o nível d'água de jusante como a cota do terreno, neste caso 302,00. O maciço de fundação desta seção é composto por quatro derrames (D2, D3, D4 e D5), três contatos (D2/D3, D3/D4 e D4/D5) e uma descontinuidade (d3). A cortina de injeções e o dreno interceptam os dois primeiros derrames, seu contato e a descontinuidade. A figura 4.7 ilustra este caso, com seu modelo utilizado na simulação em elementos finitos.

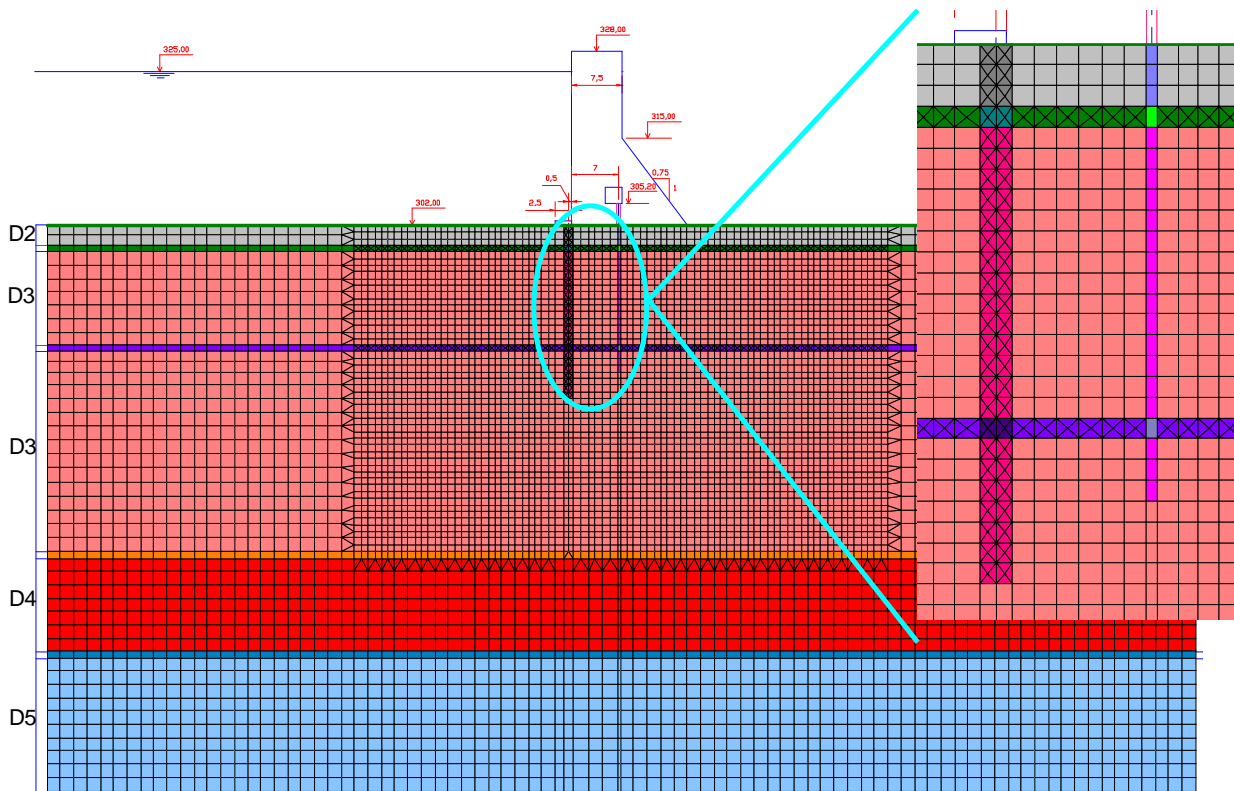


Figura 4.7. Modelo SEEP utilizado para a barragem de Salto Caxias – Margem Esquerda

A seção do leito do rio tem altura de 65 m, base de 46,5 m e cota de fundação aproximadamente na elevação 263,00. Os níveis d'água máximos normais de montante e de jusante estão, respectivamente, nas elevações 325,00 e 264,00. Nesta região, a cortina de injeções intercepta os derrames D3, D4 e D5, além de seus contatos. Os drenos foram perfurados através dos derrames D3 e D4 e do contato, como mostra a figura 4.8.

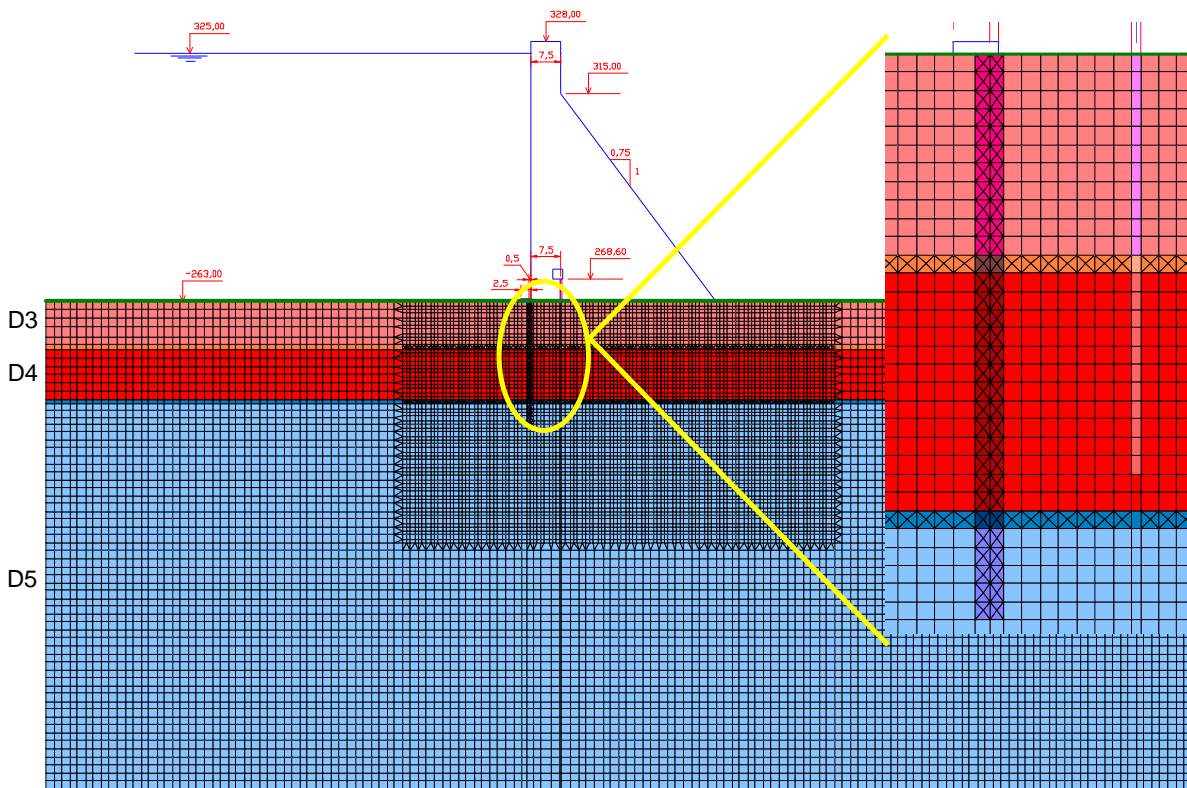


Figura 4.8. Modelo SEEP utilizado para a barragem de Salto Caxias – Leito do Rio

#### 4.6 DADOS DE SAÍDA

Em ambos os casos de simulação, com maciço de fundação heterogêneo ou homogêneo, objetivaram-se os cálculos da subpressão atuante na base da barragem e do volume de água passante pelos drenos, a fim de definir-se a eficácia das cortinas de vedação e de drenagem. Com isso, as forças resultantes, atuantes sob as bases de cada seção, para cada análise, foram calculadas a partir dos diagramas de pressão fornecidos pelo programa após cada simulação. A vazão passante pelos drenos foi obtida através da diferença do volume de água de entrada e de saída do modelo.

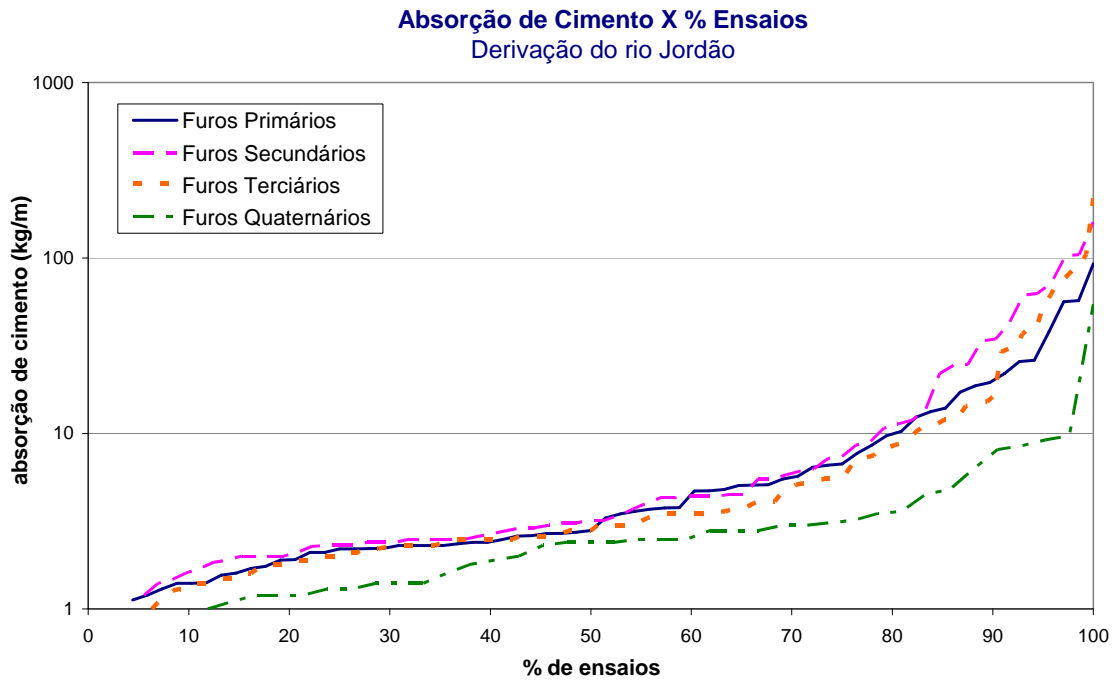


## 5 RESULTADOS

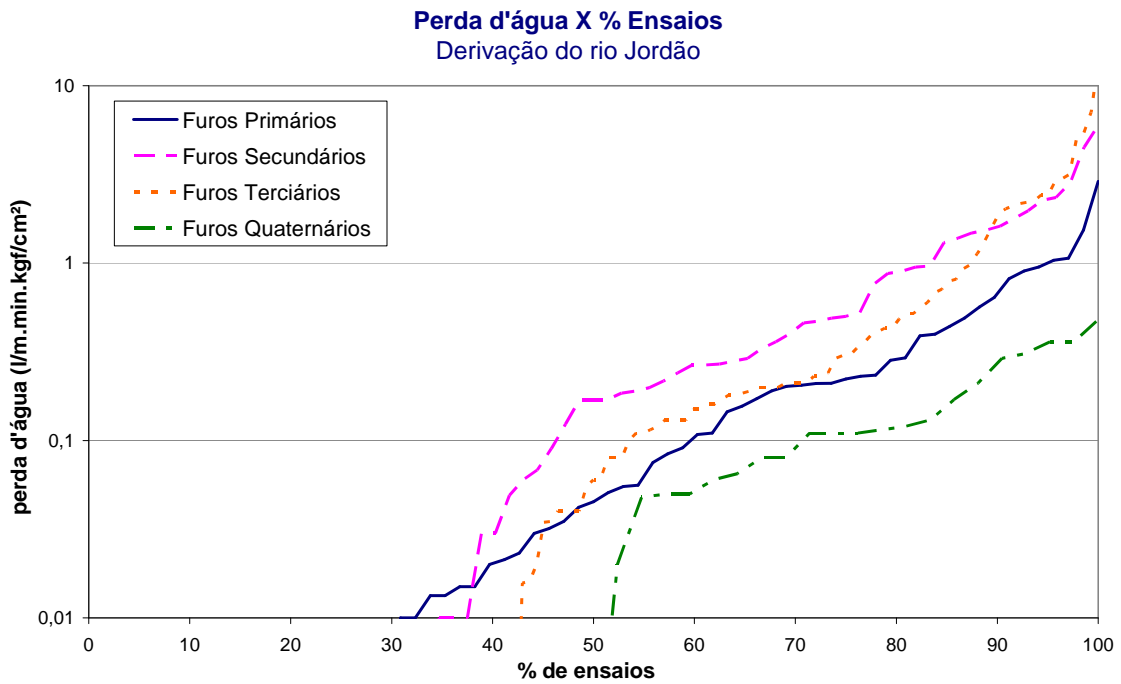
### 5.1 EFICÁCIA DOS TRABALHOS DE INJEÇÃO

Como já visto, a eficácia dos trabalhos de injeção pode ser analisada de várias maneiras. A mais comum é a verificação da diminuição das absorções de cimento e de água durante as injeções de cimento e ensaios de perda d'água. É esperado que as absorções decresçam com o aumento da classe do furo, ou seja, furos primários tendem a apresentar maiores absorções que furos secundários. Isto pode ser comprovado através de gráficos relacionando as absorções com o número de ensaios realizados (Figuras 5.1 e 5.2).

No caso da Derivação do Rio Jordão, esta tendência pode ser mais bem verificada a partir dos furos secundários, mas em Salto Caxias, a diminuição de absorções deu-se desde o início.

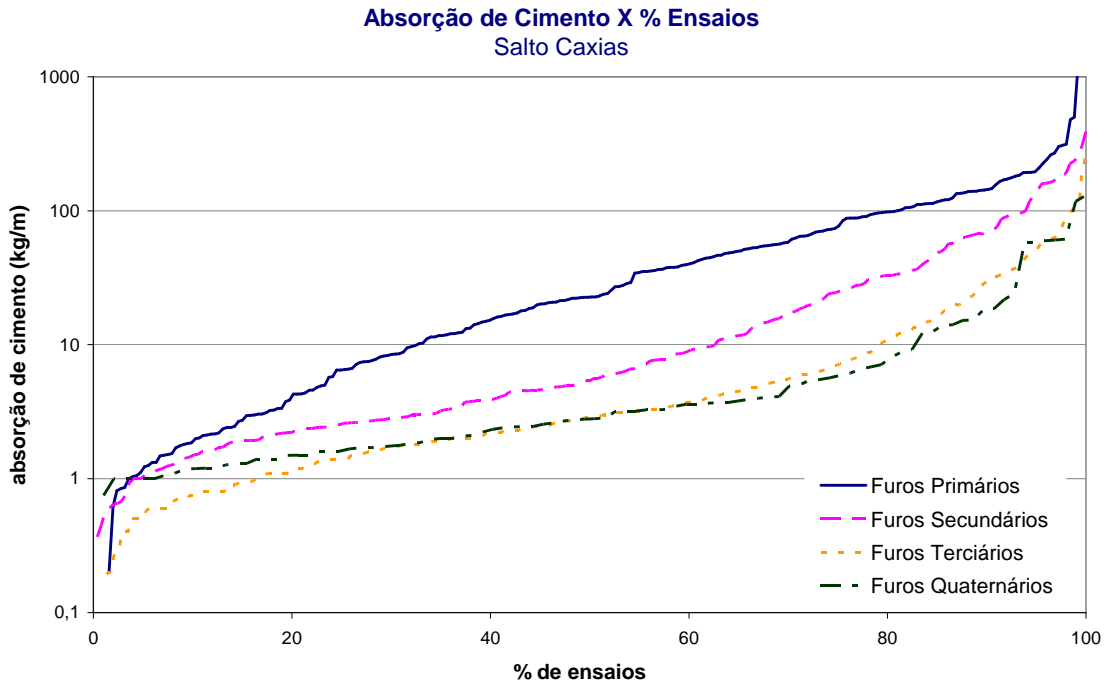


(a)

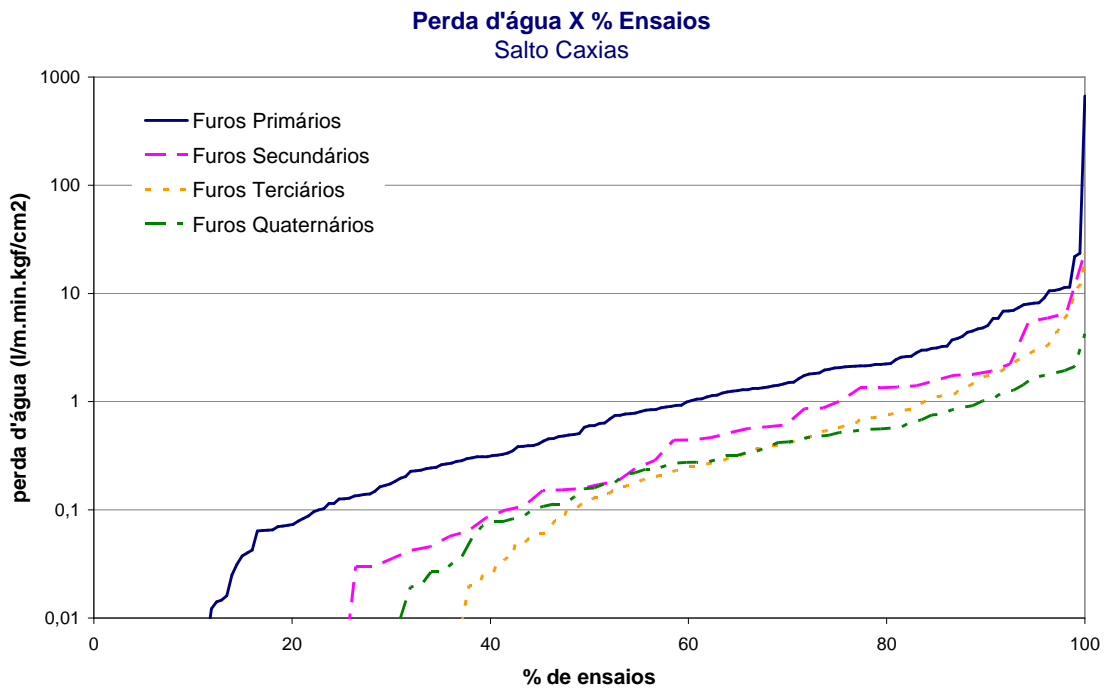


(b)

Figura 5.1. Derivação do Rio Jordão – Gráficos de absorção de: (a) cimento X ensaios realizados e (b) água X ensaios realizados



(a)

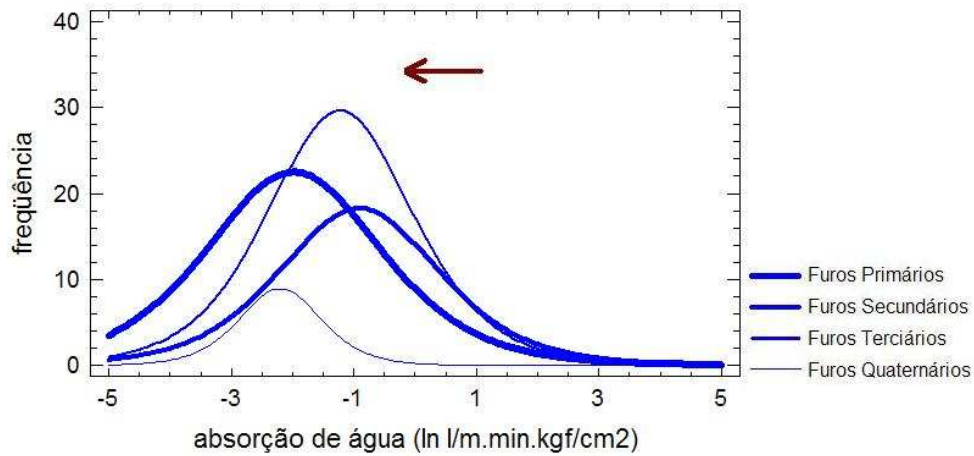


(b)

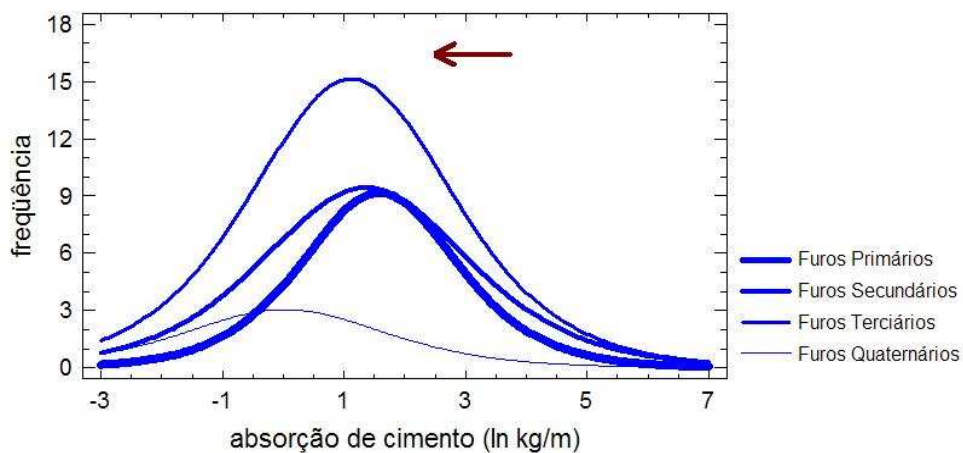
Figura 5.2. Salto Caxias – Gráficos de absorção de: (a) cimento X ensaios realizados e (b) água X ensaios realizados

Além da utilização de gráficos como os anteriores, também é possível correlacionar a eficácia dos trabalhos de injeção com as distribuições estatísticas apresentadas anteriormente, de acordo com Tashiro et al. (1995).

Na Barragem do Rio Jordão, pode-se averiguar melhor a tendência de decréscimo das médias das absorções a partir da classe de furos secundários. Os valores encontrados para as duas primeiras classes de furos encontram-se muito próximos, com a média, inicialmente, chegando a aumentar. Os gráficos da Figura 5.3 mostram as curvas de distribuição logística para os valores logarítmicos, não nulos, de absorções de água e de cimento, dos furos primários aos quaternários, nesta barragem.



(a)



(b)

Figura 5.3. Derivação do Rio Jordão – Distribuições logísticas de: (a) absorções de água e (b) absorções de cimento, de diferentes classes de furos

Nas tabelas 5.1 e 5.2 são apresentadas as médias de absorções de água e de cimento encontradas a partir da curva de distribuição de Bernoulli. Nestas, também se pode perceber o decréscimo de absorções a partir dos furos secundários. Os valores de -4,61 e -2,30 são os logaritmos de 0,01 e 0,1, respectivamente, como visto no item 4.1.

Tabela 5.1 – Médias dos valores de absorções de água para as diferentes classes de furos – Derivação do Rio Jordão

TIPO DE FURO	DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA			P (Y=-4,61)	MÉDIA GLOBAL (BERNOULLI)	ABSORÇÃO MÉDIA ( $e^{\mu_{global}}$ l/m.min.kgf/cm <sup>2</sup> )
	MÉDIA ( $\mu$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	P (Y>-4,61)			
Primário	-1,98	1,74	0,57	0,43	-3,11	0,045
Secundário	-0,91	1,59	0,65	0,35	-2,21	0,110
Terciário	-1,22	1,44	0,58	0,42	-2,64	0,071
Quaternário	-2,20	0,81	0,52	0,48	-3,36	0,035

Tabela 5.2 – Médias dos valores de absorções de cimento para as diferentes classes de furos – Derivação do Rio Jordão

TIPO DE FURO	DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA			P (Y=-2,30)	MÉDIA GLOBAL (BERNOULLI)	ABSORÇÃO MÉDIA ( $e^{\mu_{global}}$ kg/m)
	MÉDIA ( $\mu$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	P (Y>-2,30)			
Primário	1,58	1,56	0,51	0,49	-0,32	0,73
Secundário	1,36	2,07	0,60	0,40	-0,10	0,90
Terciário	1,13	2,02	0,53	0,47	-0,48	0,62
Quaternário	0,02	2,02	0,40	0,60	-1,37	0,25

Para a Barragem de Salto Caxias, os valores de absorção de água e cimento foram separados em seus diferentes derrames e contatos de basalto. Neste caso, o decréscimo das médias pode, em sua maioria, ser observado já a partir dos furos primários. O exemplo mais característico é o do Derrame D3, a seguir:

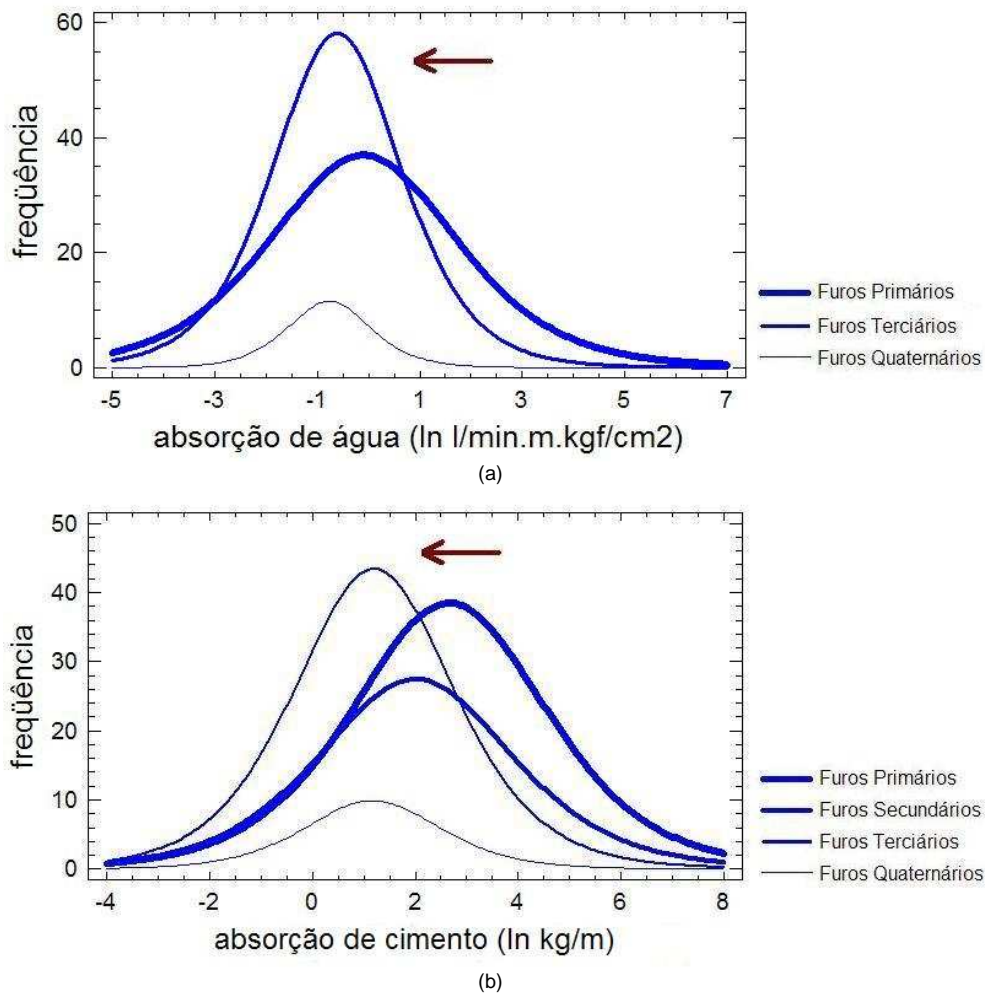


Figura 5.4. Salto Caxias (Derrame D3) – Distribuições logísticas de: (a) absorções de água e (b) absorções de cimento, de diferentes classes de furos

As reduções nas médias das absorções de água e cimento nos demais derrames podem ser vistas nas tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3 – Médias dos valores de absorções de água para as diferentes classes de furos e derrames – Salto Caxias

	TIPO DE FURO	DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA			P (Y=-4,61)	MÉDIA GLOBAL (BERNOULLI)	ABSORÇÃO MÉDIA ( $e^{\mu_{global}}$ l/m.min.kgf/cm <sup>2</sup> )
		MÉDIA ( $\mu$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	P (Y>-4,61)			
DERRAME 1	Primário	-1.11	1.94	0.72	0.28	-2.08	0.125
	Terciário	-0.87	1.42	0.59	0.41	-2.40	0.091
	Quaternário	-	-	-	-	-	-
CONTATO D1/D2	Primário	-1.03	1.23	0.76	0.24	-1.87	0.154
	Terciário	-0.87	1.48	0.72	0.28	-1.92	0.146
	Quaternário	-1.49	0.85	0.60	0.40	-2.73	0.065
DERRAME 2	Primário	-1.24	1.53	0.43	0.57	-3.16	0.042
	Terciário	-1.58	1.10	0.21	0.79	-3.98	0.019
	Quaternário	-0.59	0.90	0.40	0.60	-3.00	0.050
CONTATO D2/D3	Primário	-0.32	1.96	0.74	0.26	-1.44	0.237
	Terciário	0.18	1.27	0.63	0.38	-1.62	0.199
	Quaternário	-0.74	0.58	0.90	0.10	-1.13	0.323
DERRAME 3	Primário	-0.10	2.23	0.62	0.38	-1.81	0.163
	Terciário	-0.61	1.52	0.45	0.55	-2.83	0.059
	Quaternário	-0.77	0.98	0.37	0.63	-3.18	0.041
DESCONT. D3	Primário	-0.90	1.63	0.67	0.33	-2.13	0.118
	Terciário	-0.76	1.62	0.42	0.58	-2.99	0.050
	Quaternário	-1.17	0.80	0.60	0.40	-	-
CONTATO D3/D4	Primário	0.28	2.08	0.85	0.15	-0.44	0.642
	Terciário	-0.74	1.55	0.73	0.27	-1.79	0.167
	Quaternário	-0.88	1.44	0.89	0.11	-1.29	0.274
DERRAME 4	Primário	-1.16	1.78	0.44	0.56	-3.11	0.045
	Terciário	-2.83	1.03	0.58	0.42	-3.57	0.028
	Quaternário	-	-	-	-	-	-
CONTATO D4/D5	Primário	-1.44	1.85	0.56	0.44	-2.84	0.059
	Terciário	-1.56	1.21	1.00	0.00	-1.56	0.210
	Quaternário	-	-	-	-	-	-
DERRAME 5	Primário	-1.83	1.52	0.54	0.46	-3.11	0.044
	Terciário	-	-	-	-	-	-
	Quaternário	-	-	-	-	-	-

Tabela 5.4 – Médias dos valores de absorções de cimento para as diferentes classes de furos e derrames – Salto Caxias

	TIPO DE FURO	DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA			P (Y=-2,30)	MÉDIA GLOBAL	ABSORÇÃO MÉDIA ( $e^{\mu_{global}}$ kg/m)
		MÉDIA ( $\mu$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	P (Y>-2,30)			
DERRAME 1	Primário	2.12	1.82	0.79	0.21	1.17	3.23
	Secundário	1.53	1.36	0.88	0.13	1.05	2.86
	Terciário	0.80	1.90	0.57	0.43	-0.53	0.59
	Quaternário	-	-	0.33	0.67	-	-
CONTATO D1/D2	Primário	1.49	2.18	0.65	0.35	0.17	1.18
	Secundário	1.50	2.38	0.68	0.32	0.28	1.32
	Terciário	1.06	1.80	0.62	0.38	-0.21	0.81
	Quaternário	-	-	0.40	0.60	-	-
DERRAME 2	Primário	1.51	2.12	0.58	0.42	-0.08	0.92
	Secundário	1.82	2.60	0.63	0.38	0.28	1.32
	Terciário	0.09	2.35	0.30	0.70	-1.58	0.21
	Quaternário	0.91	2.38	0.40	0.60	-1.02	0.36
CONTATO D2/D3	Primário	2.66	2.26	0.65	0.35	0.94	2.55
	Secundário	2.14	2.42	0.59	0.41	0.30	1.35
	Terciário	1.89	2.41	0.46	0.54	-0.38	0.68
	Quaternário	0.69	1.18	0.60	0.40	-0.51	0.60
DERRAME 3	Primário	2.66	2.30	0.66	0.34	0.99	2.70
	Secundário	2.01	2.28	0.50	0.50	-0.16	0.86
	Terciário	1.20	1.88	0.36	0.64	-1.04	0.35
	Quaternário	1.16	1.59	0.31	0.69	-1.22	0.30
DESCONT. D3	Primário	2.83	1.97	0.65	0.35	1.02	2.78
	Secundário	2.10	1.53	0.60	0.40	0.36	1.43
	Terciário	1.53	1.98	0.56	0.44	-0.17	0.84
	Quaternário	-	-	0.20	0.80	-	-
CONTATO D3/D4	Primário	3.93	2.13	0.72	0.28	2.16	8.70
	Secundário	2.66	2.21	0.60	0.40	0.66	1.94
	Terciário	2.01	1.95	0.57	0.43	0.16	1.18
	Quaternário	1.75	2.06	0.65	0.35	0.32	1.38
DERRAME 4	Primário	2.58	2.52	0.57	0.43	0.47	1.59
	Secundário	2.15	2.36	0.41	0.59	-0.49	0.62
	Terciário	1.53	2.17	0.50	0.50	-0.39	0.68
	Quaternário	-	-	1.00	0.00	-	-



Tabela 5.4 – Médias dos valores de absorções de cimento para as diferentes classes de furos e derrames – Salto Caxias (cont.)

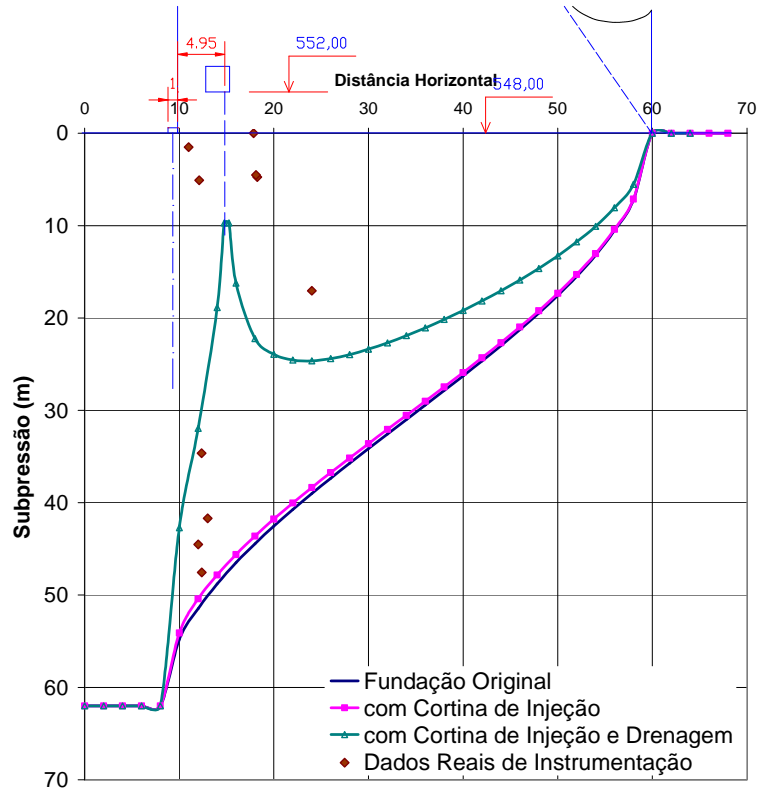
	TIPO DE FURO	DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA			P (Y=-2,30)	MÉDIA GLOBAL	ABSORÇÃO MÉDIA ( $e^{\mu_{global}}$ kg/m)
		MÉDIA ( $\mu$ )	DESVIO PADRÃO ( $\sigma$ )	P (Y>-2,30)			
CONTATO D4/D5	Primário	3.55	2.76	0.60	0.40	1.18	3.25
	Secundário	4.02	1.90	0.60	0.40	1.49	4.44
	Terciário	2.60	0.82	0.57	0.43	0.50	1.64
	Quaternário	-	-	0.00	1.00	-	-
DERRAME 5	Primário	1.09	2.26	0.58	0.42	-0.34	0.71
	Secundário	2.73	1.16	0.60	0.40	0.71	2.04
	Terciário	-	-	-	-	-	-
	Quaternário	-	-	-	-	-	-

## 5.2 EFICÁCIA DA CORTINA DE INJEÇÃO EM SIMULAÇÕES COM MEIO HETEROGÊNEO

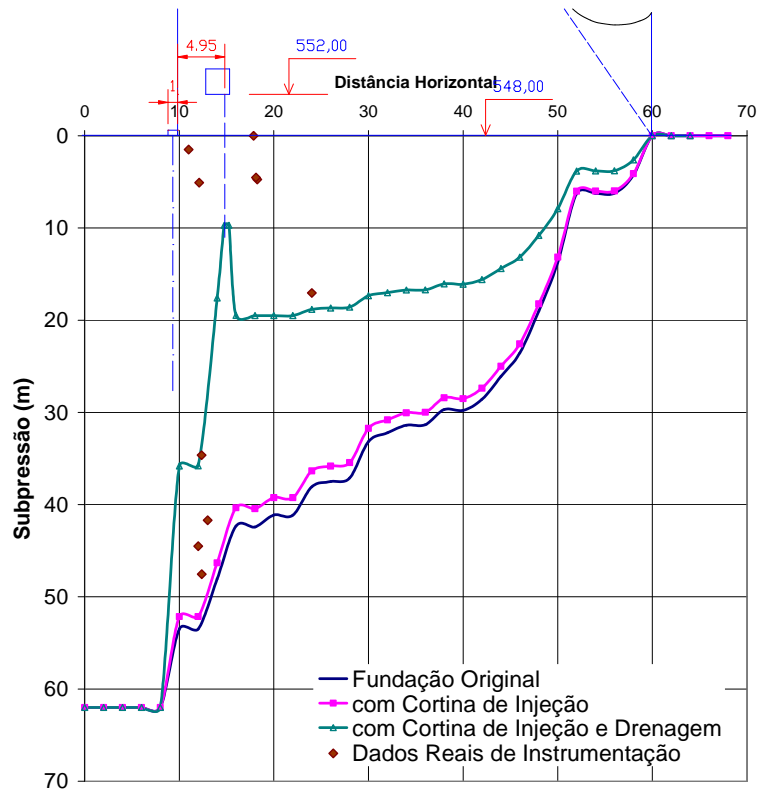
A partir das análises feitas em modelos com permeabilidades geradas aleatoriamente obedecendo às distribuições estatísticas, foram obtidos três diagramas de subpressão (Figuras 5.5b, c e d). A Figura 5.5a apresenta o diagrama para um meio homogêneo, com os valores de permeabilidades calculados a partir das médias das distribuições de Bernoulli encontradas.

Destes gráficos, pode-se perceber a pequena influência da cortina de injeção na diminuição da subpressão.

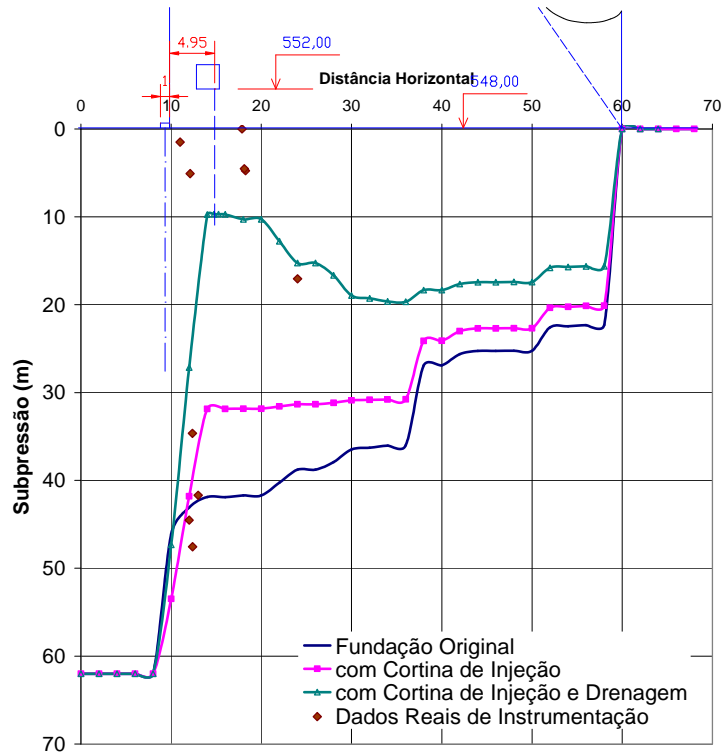
Além disso, foram plotados em cada gráfico, para efeito de comparação, as máximas pressões obtidas da instrumentação existente na barragem, em situações de níveis d'água compatíveis aos adotados nas análises. Foram considerados seis piezômetros a montante da cortina de drenagem e quatro a jusante, localizados nos blocos 8, 9, 13 e 17.



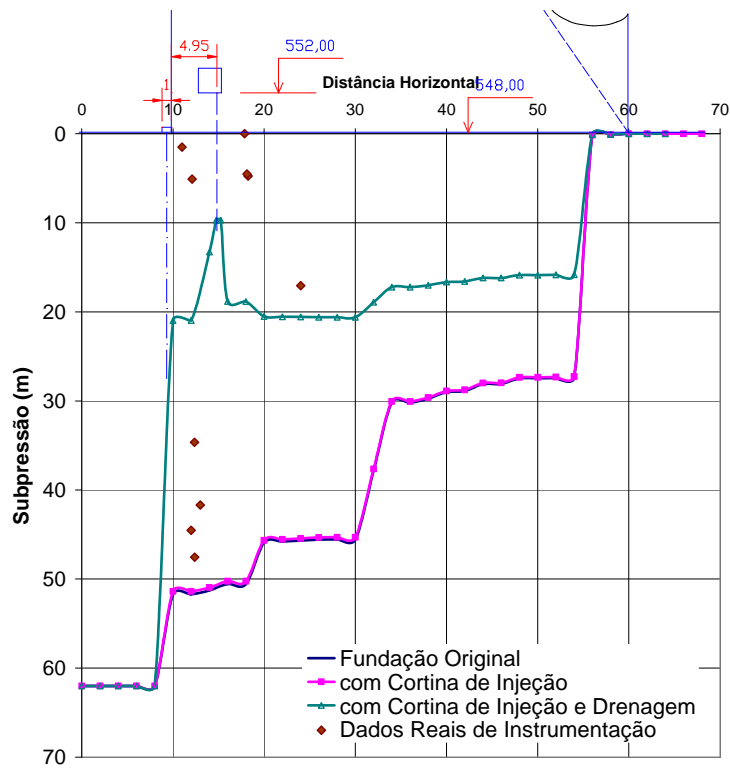
(a)



(b)



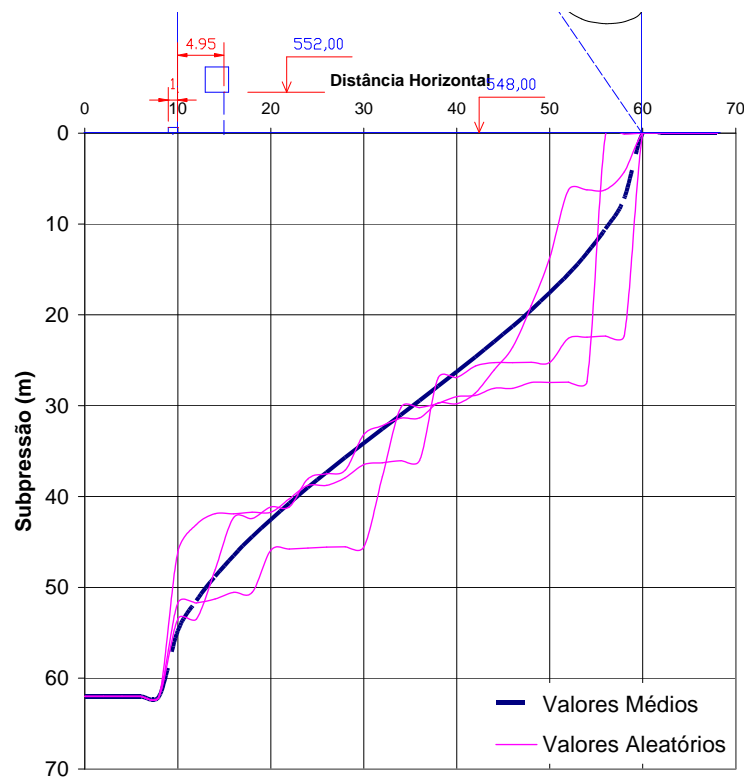
(c)



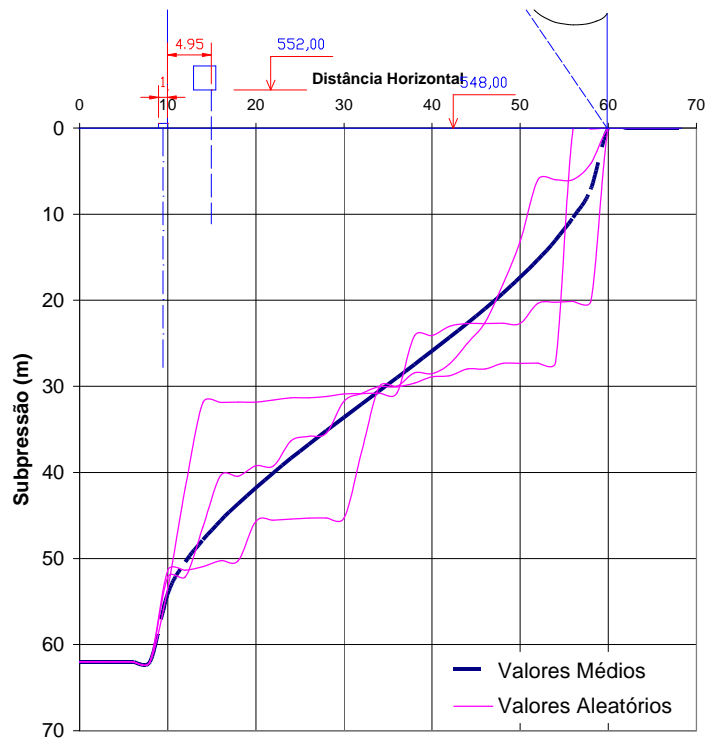
(d)

Figura 5.5. Diagramas de subpressão obtidos a partir de simulações numéricas (a) em meio homogêneo e (b, c e d) meios aleatórios

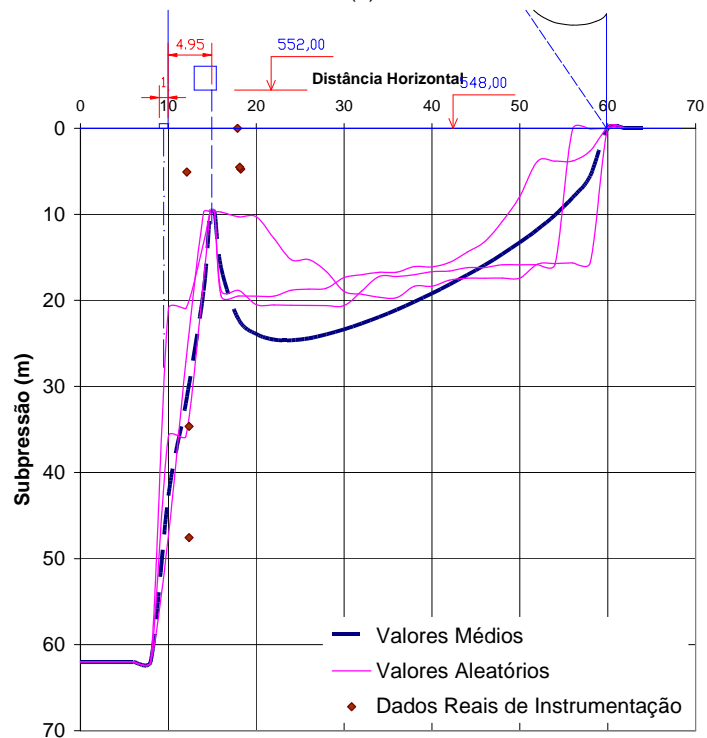
A Figura 5.6 compara os diagramas obtidos a partir das simulações de permeabilidades aleatórias com o calculado em meio homogêneo, para os três casos: de fundação original, com cortina de injeção e com cortina de injeção e drenagem. Os diagramas do meio homogêneo situam-se dentro das faixas formadas pelos diagramas de valores aleatórios.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.6. Comparações de diagramas de subpressão para valores de permeabilidade médios e aleatórios nos casos de: (a) fundação original; (b) com cortina de injeção e (c) com cortina de injeção e drenagem

A tabela 5.5 mostra os valores de subpressão dos diagramas da figura 5.6 e suas taxas de redução, em relação à fundação em seu estado original. Vê-se que as reduções das subpressões com a execução da cortina de vedação apresentam-se muito baixas, de 0,5 a 14,5%. Já com as injeções e a drenagem, a diminuição atinge mais de 50%.

Tabela 5.5. Redução da subpressão com execução de injeções e drenagem – Derivação do Rio Jordão

Maciço Rochoso	U com maciço original (kN/m)	U com cortina de injeção (kN/m)	Redução em relação ao original (%)	U com injeção e drenagem (kN/m)	Redução em relação ao original (%)
Aleatório 1	14308,90	13716,86	4,1	7858,76	45,1
Aleatório 2	15770,17	13483,95	14,5	8522,76	50,0
Aleatório 3	16787,91	16701,80	0,5	8328,79	50,4

A cortina de injeção mostrou que pode ser eficaz para reduzir a vazão através dos drenos. As reduções variaram de 0,6 a 53,5%, como se pode verificar na tabela 5.6.

Tabela 5.6. Diminuição das vazões com o efeito da cortina de injeção – Jordão (meio heterogêneo)

Maciço Rochoso	Vazão antes das injeções (l/min/m)	Vazão após as injeções (l/min/m)	Diferença	Redução (%)
Homogêneo	$3,22 \cdot 10^{-6}$	$3,05 \cdot 10^{-6}$	$1,71 \cdot 10^{-7}$	5,3
Aleatório 1	$4,34 \cdot 10^{-5}$	$3,51 \cdot 10^{-5}$	$8,31 \cdot 10^{-6}$	19,1
Aleatório 2	$9,60 \cdot 10^{-6}$	$4,47 \cdot 10^{-6}$	$5,13 \cdot 10^{-6}$	53,5
Aleatório 3	$3,37 \cdot 10^{-5}$	$3,35 \cdot 10^{-5}$	$2,00 \cdot 10^{-7}$	0,6

### 5.3 EFICÁCIA DOS SISTEMAS DE VEDAÇÃO E DRENAGEM EM SIMULAÇÕES COM MEIO HOMOGÊNIO

Da mesma forma que para as análises em meio heterogêneo, nas simulações em meios homogêneos, foram obtidos valores de subpressão na base da barragem e de vazões passantes através dos drenos, além de suas reduções com a aplicação de tratamentos.

Assim, com base nas equações 2.24 e 2.25, pôde ser calculada a eficácia das cortinas de injeção e de drenagem.

Ao todo, foram realizadas, para cada seção das barragens, 4000 simulações: 1000 com o maciço em suas condições originais, 1000 considerando-se somente cortina de injeção, 1000 com somente cortina de drenagem e 1000 com os dois dispositivos atuando em conjunto.

Como visto no capítulo 4, o Método de Monte Carlo permite o cálculo de probabilidade de ocorrência de valores pré-definidos, através das equações de 4.3 a 4.5 e das curvas de distribuição estatística dos resultados. Portanto, assumindo-se os 1000 valores de subpressão encontrados nas últimas simulações, calcularam-se as probabilidades de ocorrência de vários critérios normalmente utilizados em projeto: USBR, US Army Corps of Engineers e Cruz (1996). Também foram utilizados, a fim de comparação, os valores de atenção da instrumentação, os valores reais de subpressão encontrados e as subpressões obtidas através de simulações com os valores médios de permeabilidade das tabelas 4.1 e 4.2.

### **5.3.1 Barragem da Derivação do Rio Jordão**

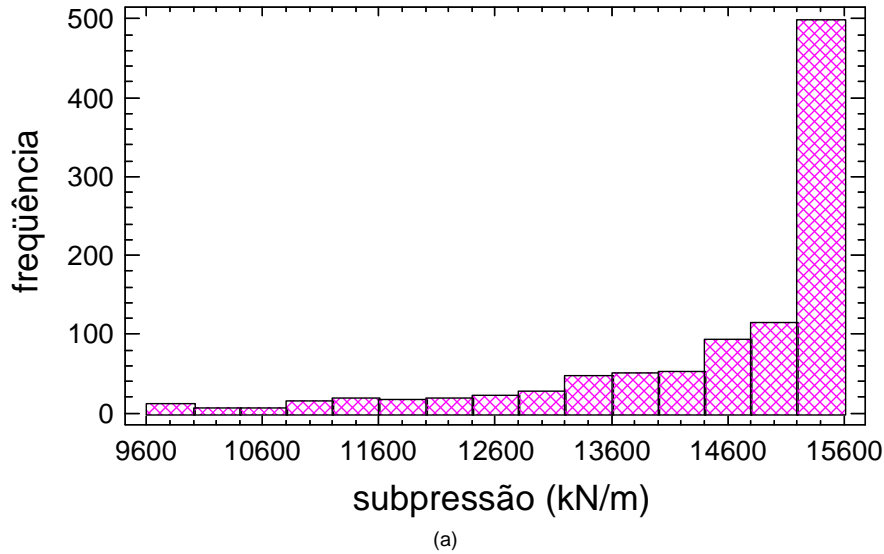
#### ***Redução da Subpressão***

Nas análises realizadas para a barragem da Derivação do Jordão, encontrou-se uma subpressão em sua base de 15457,31 kN/m, sem levar em conta dispositivos de vedação e de drenagem.

Para as 1000 simulações considerando-se somente a vedação, obtiveram-se as subpressões apresentadas nos gráficos da figura 5.7, os quais representam o histograma e a probabilidade acumulada desta situação. Nota-se a baixa eficácia da cortina, no que diz

respeito à redução da subpressão, pois em 41% dos casos o valor manteve-se de 15457,31 kN/m, não havendo nenhuma queda em relação à fundação original.

### Resultados com Injeção



### Resultados com Injeção

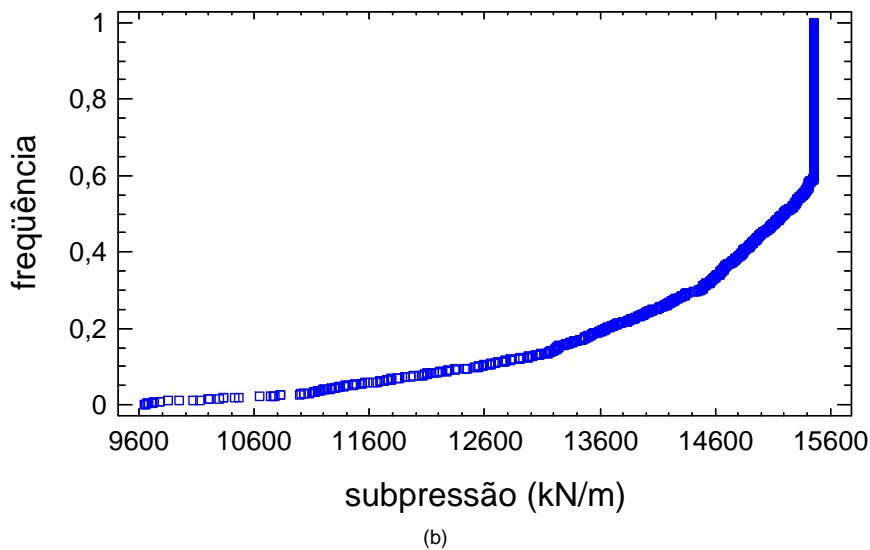
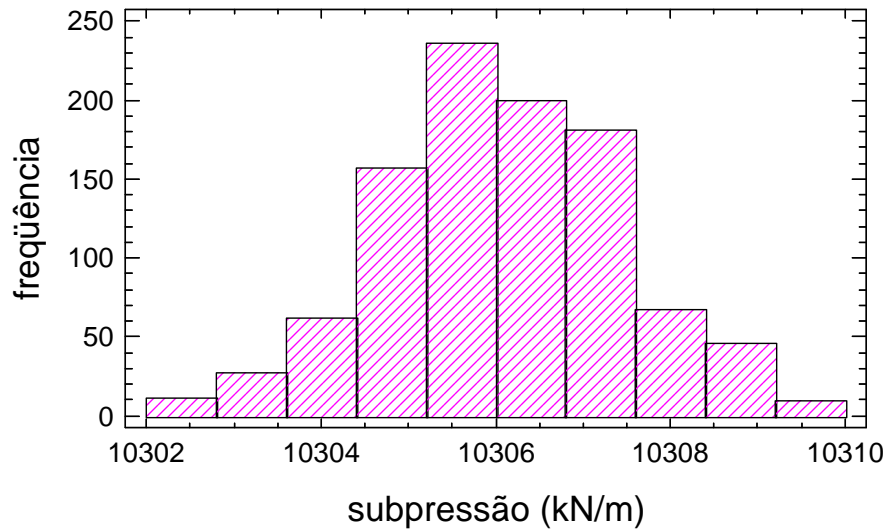


Figura 5.7. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de vedação – Derivação do Rio Jordão

O caso onde somente a drenagem foi considerada apresentou-se mais regular, em torno de 10306,10 kN/m, como mostra a figura 5.8.

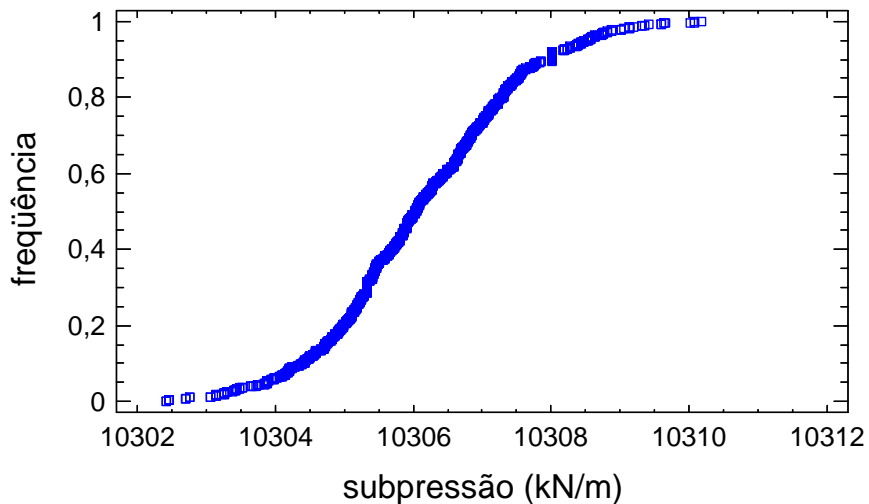


## Resultados com Drenagem



(a)

## Resultados com Drenagem

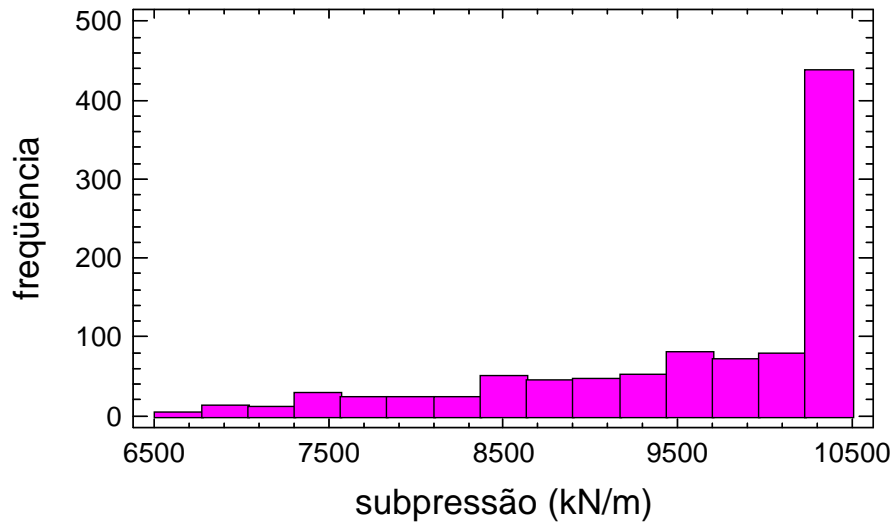


(b)

Figura 5.8. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de drenagem – Derivação do Rio Jordão

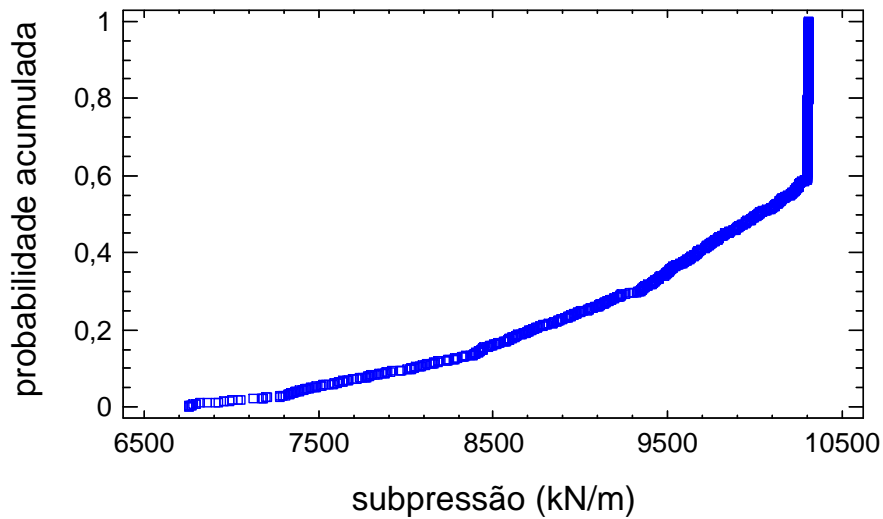
Na figura 5.9, a qual representa as subpressões para a fundação com sistema de vedação e drenagem, percebe-se uma grande concentração da subpressão em torno de 10306 kN/m, confirmando a ineficácia de 41% da cortina de injeções. Neste caso, as reduções variaram de 33,3 a 56,3%, com 38,1%, em média.

## Resultados com Injeção e Drenagem



(a)

## Resultados com Injeção e Drenagem



(b)

Figura 5.9. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação com cortinas de injeção e drenagem – Derivação do Rio Jordão

Na tabela 5.7 são apresentados os maiores e menores valores encontrados, a média das 1000 subpressões resultantes e a subpressão obtida a partir de simulação com os valores médios de permeabilidade, exibidos na tabela 4.1.

Tabela 5.7. Valores extremos e médios de subpressão encontrados nas simulações – Jordão

CASO	SUBPRESSÃO (kN/m)			
	MAIOR	MENOR	MÉDIA	COM <i>k</i> média
Fundação Original	15457,31	15457,31	15457,31	15457,31
Somente Injeções	15457,31	9645,62	14545,05	15173,73
Somente Drenagem	10310,18	10302,42	10306,10	10305,81
Injeções e Drenagem	10310,09	6750,20	9564,31	9997,88

Assim, pode-se verificar que a redução da subpressão com a implementação da cortina de injeção variou de 0 a 37,6%, com uma média, entretanto, de somente 5,9%. A redução com a cortina de drenagem manteve-se em torno de 33,3%. Com os dois dispositivos, de injeção e de drenagem, os valores de subpressão reduziram de 33,3 a 56,3%.

Na figura 5.10, são apresentados os diagramas de subpressão máximo e mínimo, encontrados dentre as 1000 simulações realizadas para a fundação com cortinas de injeção e drenagem, além do diagrama obtido na simulação com os valores médios de permeabilidade. Também foram incluídos, no gráfico, dados reais de subpressão, obtidos dos piezômetros instalados nos blocos 8, 9, 13 e 17; e diagramas de subpressão para os valores de atenção da piezometria e para os critérios do USBR e do US Army Corps of Engineers.

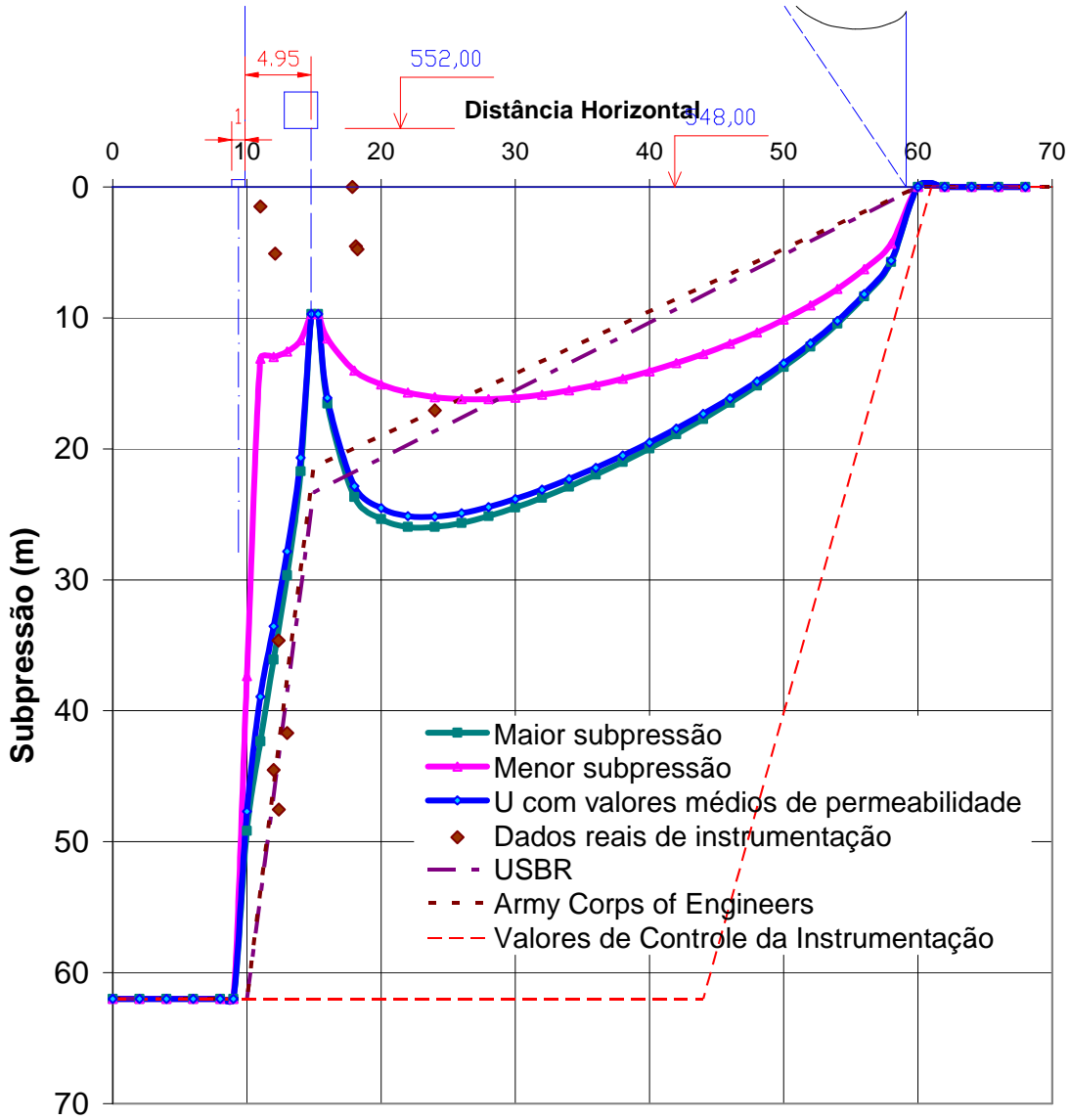


Figura 5.10. Diagramas de subpressão no caso de maciço homogêneo – Jordão

A tabela 5.8 apresenta as subpressões totais na base da barragem referentes aos critérios do USBR, do Army Corps of Engineers e de Cruz (1996) e aos diagramas dos valores reais de instrumentação, dos valores de atenção da piezometria e o referente à subpressão com valores médios de permeabilidade.

Tabela 5.8 – Subpressões referentes a diferentes critérios de projeto – Jordão

	Critério	U (kN/m)
A	USBR	7863,76
B	US Army Corps of Engineers	7385,09
C	Cruz (1996)	11540,07
D	Valores médios de permeabilidade	9997,88
E	Valores de Atenção	26144,53
F	Instrumentação Bloco 8	8922,68
G	Instrumentação Bloco 9	3910,11
H	Instrumentação Bloco 13	3090,27
I	Instrumentação Bloco 17	2433,91

### **Probabilidade de Ocorrência dos Critérios de Subpressão**

As estimativas de probabilidade de ocorrência dos valores de subpressão da tabela 5.8, em relação aos valores encontrados nas simulações com cortinas de injeção e de drenagem, foram obtidas através das equações de 4.3 a 4.5, do Método de Monte Carlo.

$$P_f = E[I_{Df}] \approx \tilde{P}_f = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N I_{Df}^r \quad (4.3)$$

$$I_{Df} = \begin{cases} 1 & \text{se } H(u_k) \leq 0 \\ 0 & \text{se } H(u_k) > 0 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\%erro = 196 \sqrt{\frac{1 - \tilde{P}_f}{N \cdot \tilde{P}_f}} \quad (4.5)$$

Este procedimento foi adotado devido à dificuldade de ajuste de curvas de distribuição estatística aos resultados da figura 5.11, pois esta apresenta 41% de seus valores iguais a 10306,10 kN/m. Nesta figura, são indicados alguns dos critérios da tabela 5.8. Os valores não indicados se encontram fora do intervalo de resultados encontrados e podem ser considerados dentro da faixa de precisão de 10% mencionada no item 4.5.

## Injeção e Drenagem

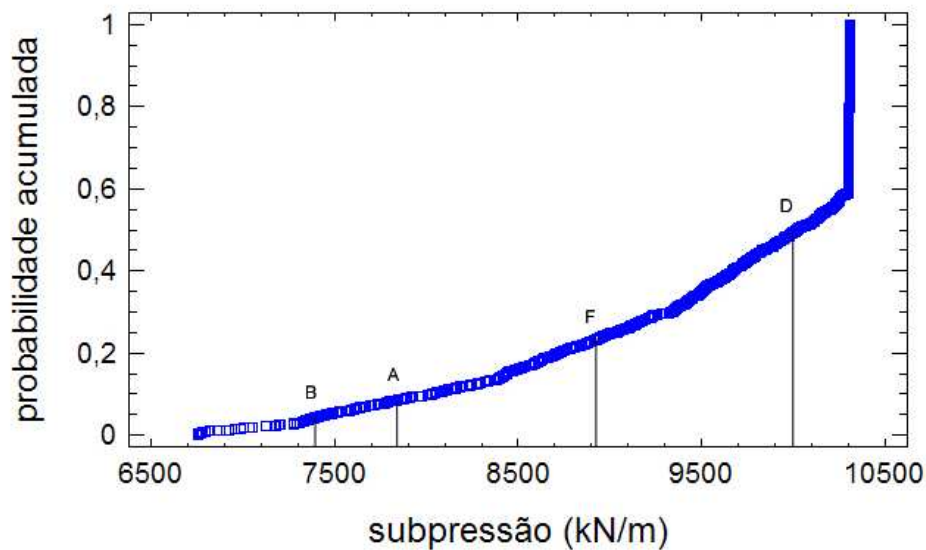


Figura 5.11. Critérios de subpressão relacionados à curva de probabilidade acumulada – Jordão

A tabela 5.9 apresenta a estimativa de probabilidade de ocorrência de valores inferiores aos indicados no gráfico e seus respectivos erros.

Tabela 5.9 – Probabilidade de ocorrência de diferentes critérios – Jordão

	Critério	U (kN/m)	Probabilidade de Ocorrência (%)	Erro (%)
A	USBR	7863,76	8,70	1,91
B	US Army Corps of Engineers	7385,09	4,10	1,28
D	Valores médios de permeabilidade	9997,88	49,40	6,12
F	Instrumentação Bloco 8	8922,68	23,20	3,41

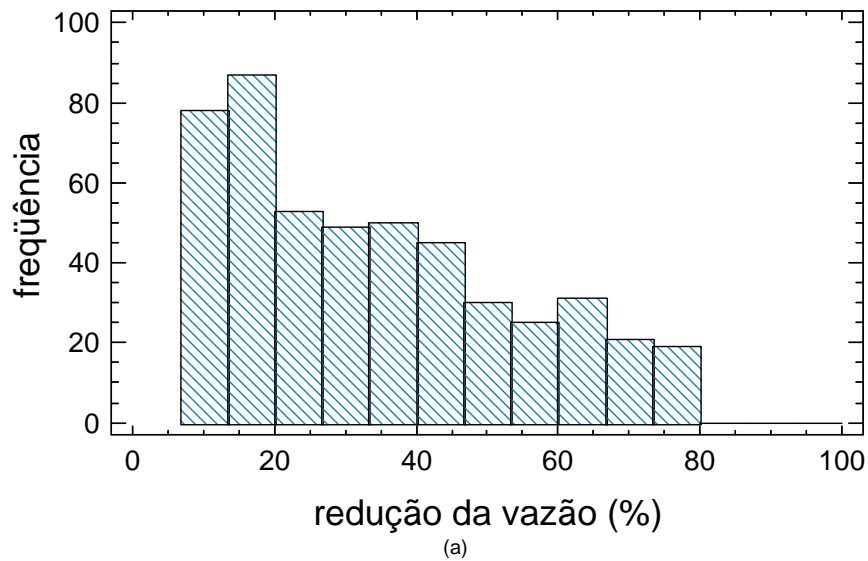
Assim, contrariamente ao que se imaginava, os critérios do USBR e do Army Corps of Engineers apresentaram-se menos conservadores que os valores médios de permeabilidade. Enquanto os dois primeiros alcançam probabilidades de ocorrência entre 2 e 10%, com os valores médios de permeabilidade obtém-se aproximadamente 50%.

Levando-se em consideração os valores de atenção da instrumentação, ou seja, os valores para os quais a barragem foi projetada, a probabilidade de falha é extremamente baixa, não indicando nenhum risco de rompimento pela fundação, no que diz respeito a estas análises de subpressão.

### ***Redução da Vazão***

No que diz respeito à vazão passante pelos drenos, houve uma redução de 0 a 79,5%, com média de 16,8%, na barragem da Derivação do Rio Jordão (Figura 5.12). Novamente, em 41% dos casos, a cortina de vedação não surtiu efeito.

### Redução de vazão pelos drenos com injeções



### Redução de vazão pelos drenos com injeções

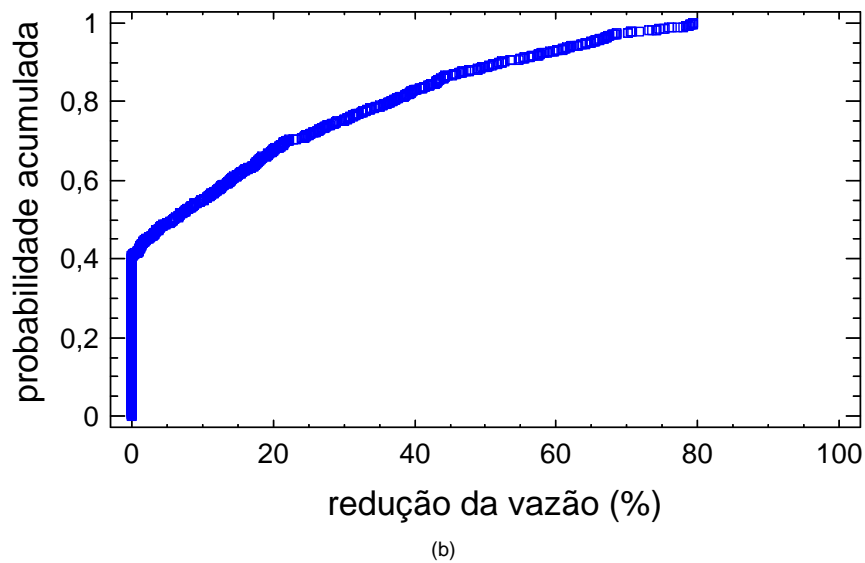


Figura 5.12. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada da redução da vazão através dos drenos, com inserção da cortina de injeção – Derivação do Rio Jordão

A tabela 5.10 mostra a maior e a menor redução e suas respectivas vazões antes e depois das injeções. Também são apresentados os valores para o caso de maciço com permeabilidade média.



Tabela 5.10. Diminuição da vazão passante pelos drenos com inserção de cortina de injeção – Jordão

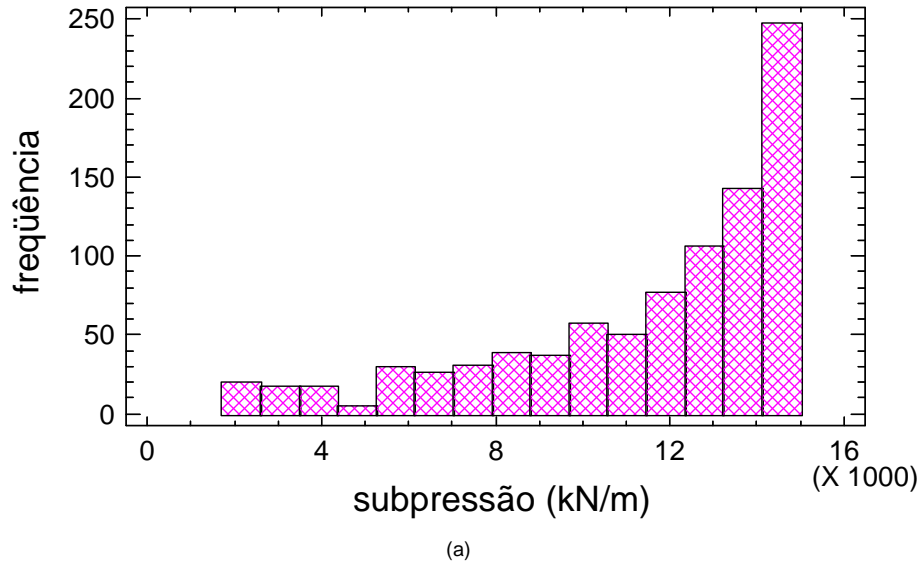
Condição	Vazão antes das injeções (l/min/m)	Vazão após as injeções (l/min/m)	Diferença	Redução (%)
MAIOR	$7,56 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-3}$	$6,01 \cdot 10^{-3}$	79,5
MENOR	$1,81 \cdot 10^{-8}$	$1,81 \cdot 10^{-8}$	0	0
COM <i>k</i> média	$3,40 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^{-6}$	$1,98 \cdot 10^{-8}$	5,8

### 5.3.2 Barragem de Salto Caxias – Seção no Leito do Rio

#### *Redução da Subpressão*

A cortina de vedação da barragem de Salto Caxias apresentou uma eficácia muito maior que a executada na Derivação do Rio Jordão, no que diz respeito à redução das subpressões. Para a seção do leito do rio, a subpressão na base da barragem reduziu de 0 a 88,8%, com média de 21,6%, com sua execução (Figura 5.13). Somente em 2% dos casos a cortina mostrou-se totalmente ineficaz, mantendo a subpressão de 15143,33 kN/m, encontrada no maciço com as condições iniciais.

### Resultados com Injeção



### Resultados com Injeção

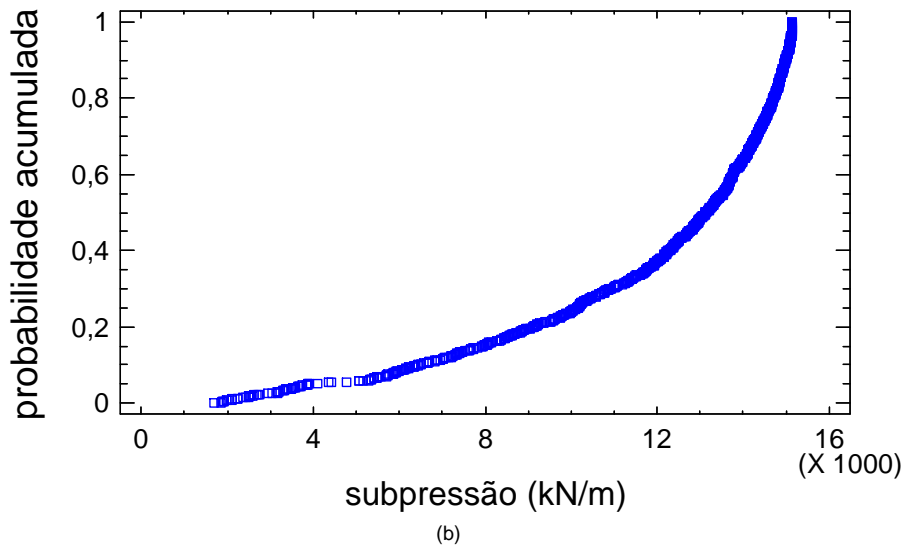
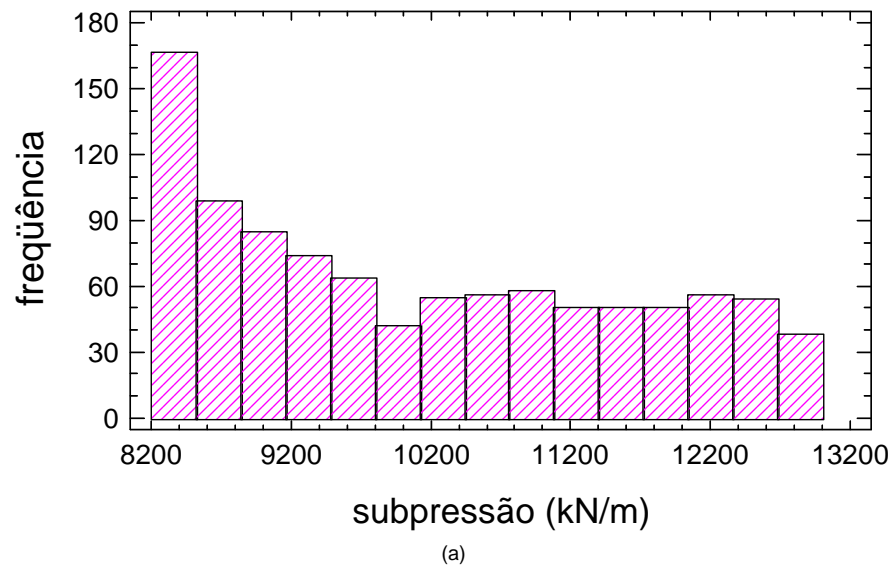


Figura 5.13. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de vedação – Salto Caxias / Leito do Rio

Com a execução da cortina de drenagem, a subpressão foi reduzida de 14 a 45,6%, 33,1%, em média (Figura 5.14).

## Resultados com Drenagem



## Resultados com Drenagem

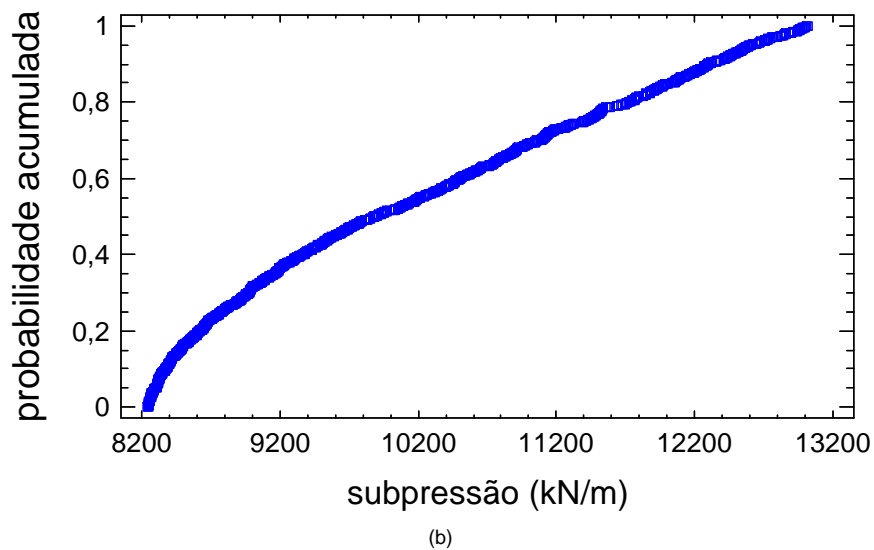
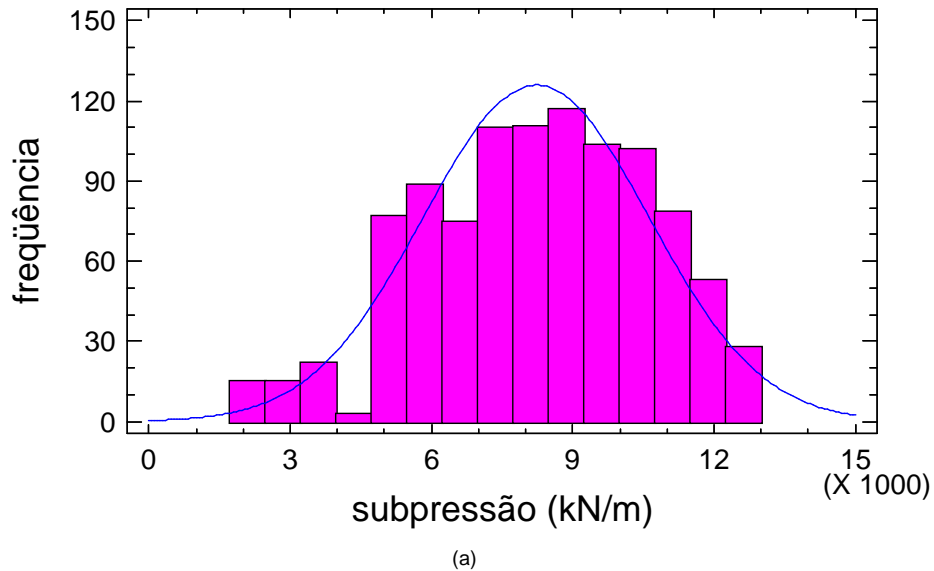


Figura 5.14. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de drenagem – Salto Caxias / Leito do Rio

As reduções de subpressão com execução de injeções e de drenagem variaram de 14,4 a 88,8%, com média de 45,7% (Figura 5.15).

## Resultados com Injeção e Drenagem



## Resultados com Injeção e Drenagem

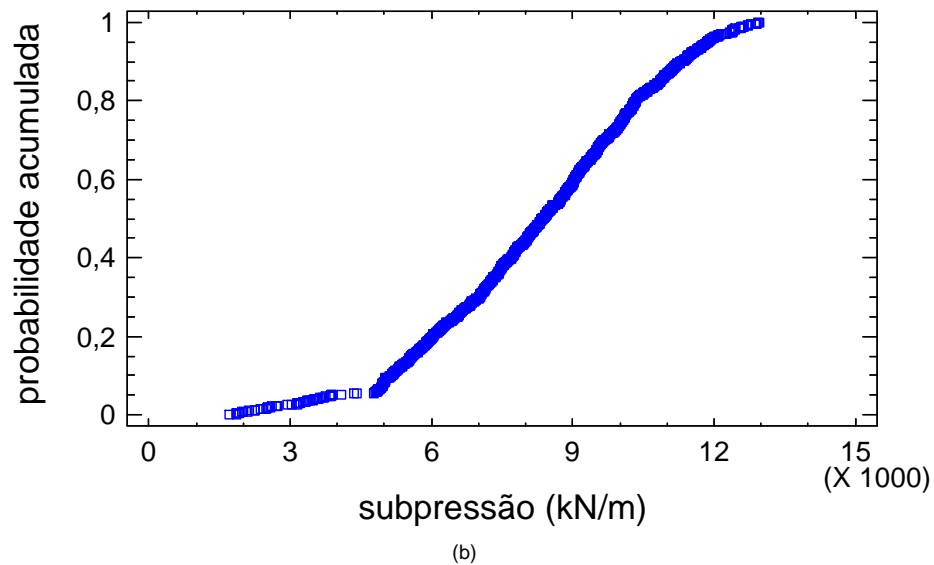


Figura 5.15. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação com cortinas de injeção e drenagem – Salto Caxias / Leito do Rio

A tabela 5.11 mostra os valores extremos e médios de subpressão encontrados, enquanto a figura 5.16 apresenta seus diagramas, para o caso de haver injeções e drenagem. Os dados reais de instrumentação foram obtidos a partir dos três piezômetros de

corda vibrante localizados no contato concreto-rocha, do bloco 8, em situações de níveis d'água compatíveis com os das análises.

Tabela 5.11. Valores extremos e médios de subpressão encontrados nas simulações – Salto Caxias / Leito do Rio

CASO	SUBPRESSÃO (kN/m)			
	MAIOR	MENOR	MÉDIA	COM <i>k</i> média
Fundação Original	15143,44	15142,80	15143,07	15143,04
Somente Injeções	15143,36	1701,63	11870,38	13805,41
Somente Drenagem	13025,09	8241,54	10135,96	9599,63
Injeções e Drenagem	12960,93	1701,63	8222,58	8539,04

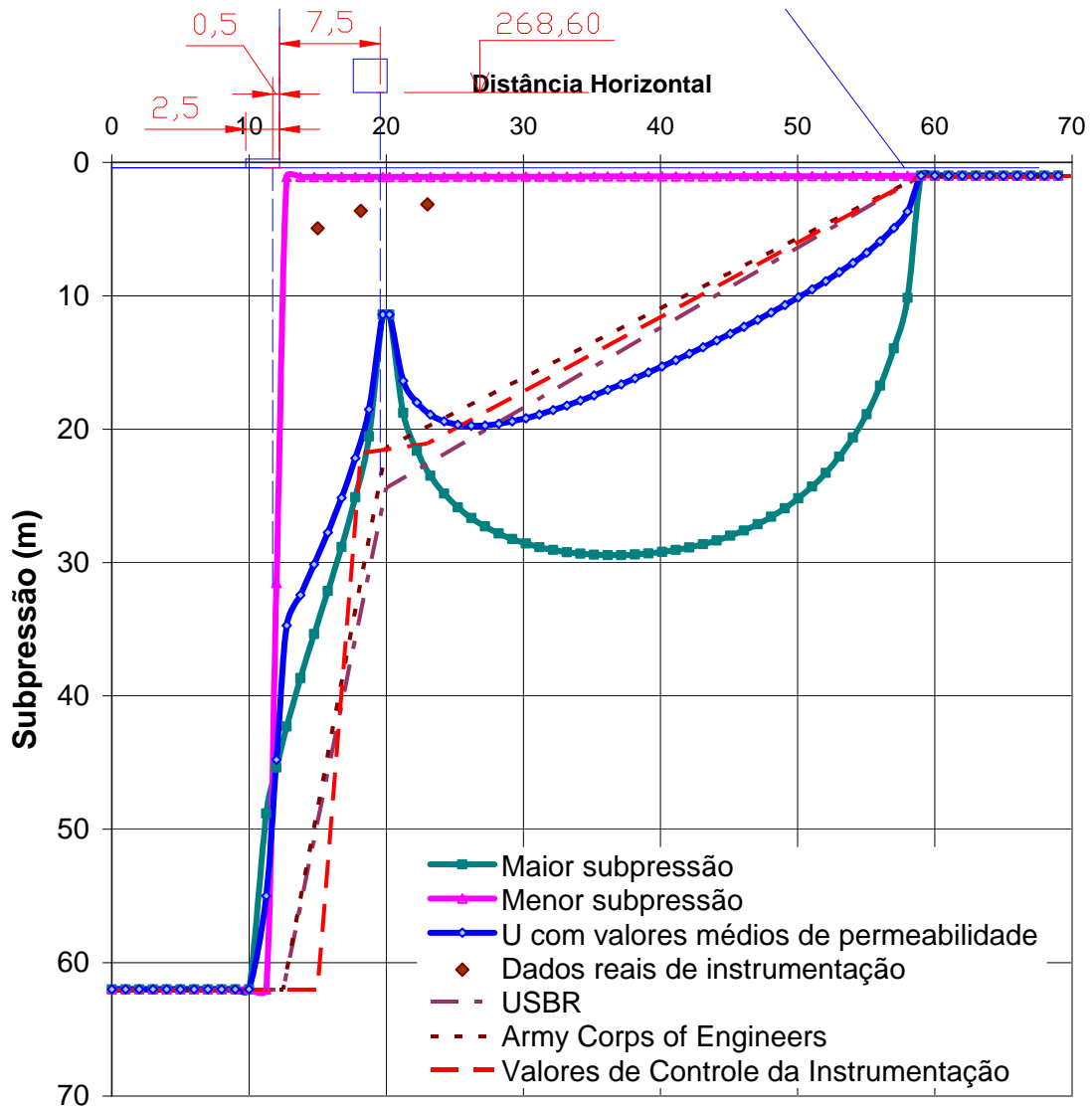


Figura 5.16. Diagramas de subpressão – Salto Caxias / Leito do Rio

A tabela 5.12 apresenta as subpressões totais na base da barragem referentes aos diferentes critérios e diagramas de subpressão.

Tabela 5.12 – Subpressões referentes a diferentes critérios de projeto – Salto Caxias / Leito do Rio

	Critério	U (kN/m)
A	USBR	9363,39
B	US Army Corps of Engineers	8672,02
C	Cruz (1996)	11429,16
D	Valores médios de permeabilidade	8539,04
E	Valores de Atenção	9249,63
F	Instrumentação Bloco 8	2644,46

### ***Probabilidade de Ocorrência dos Critérios de Subpressão***

Para a seção do leito do rio, da barragem de Salto Caxias, pôde-se obter as probabilidades de ocorrência de valores inferiores às subpressões da tabela 5.12 através de uma curva de distribuição estatística, ajustada aos resultados com injeção e drenagem. A distribuição que melhor se adequou aos dados foi a normal. Sua curva de probabilidade acumulada pode ser observada na figura 5.17, na qual são indicados os patamares supracitados.

## Injeção e Drenagem

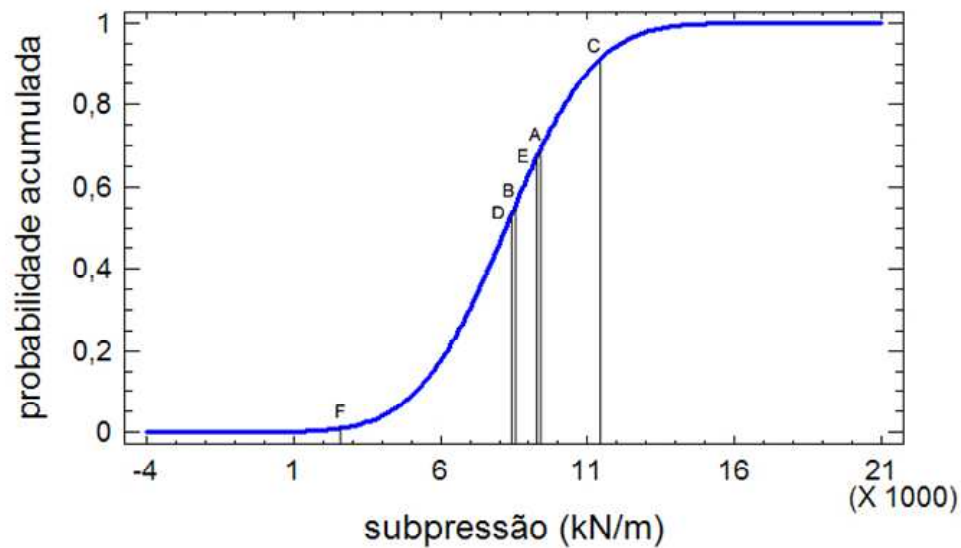


Figura 5.17. Critérios de subpressão relacionados à curva de probabilidade acumulada – Salto Caxias / Leito do Rio

A tabela 5.13 apresenta as probabilidades de ocorrência de valores inferiores a cada subpressão.

Tabela 5.13 – Probabilidade de ocorrência de diferentes critérios – Salto Caxias/Leito do Rio

	Critério	U (kN/m)	Probabilidade de Ocorrência (%)
A	USBR	9363,39	68,37
B	US Army Corps of Engineers	8672,02	57,47
C	Cruz (1996)	11429,16	91,05
D	Valores médios de permeabilidade	8539,04	55,28
E	Valores de Atenção	9249,63	66,66
F	Instrumentação Bloco 8	2644,46	0,97

No caso desta seção de Salto Caxias, o critério de Cruz (1996) apresentou-se mais conservador, abrangendo mais de 90% dos resultados obtidos nas análises.

No dimensionamento da barragem foram adotados como critérios de projeto o USBR e o US Army Corps of Engineers, como pode ser observado na tabela 5.13, onde suas probabilidades de ocorrência apresentam-se muito próximas às dos valores de atenção.

É interessante notar que, nesta situação, a subpressão com valores médios de permeabilidade aproxima-se da resultante dos critérios de projeto. Entretanto, encontram-se muito distantes da real subpressão obtida da piezometria, a qual apresenta menos de 1% de probabilidade de ocorrência, segundo o modelo proposto.

### **Redução da Vazão**

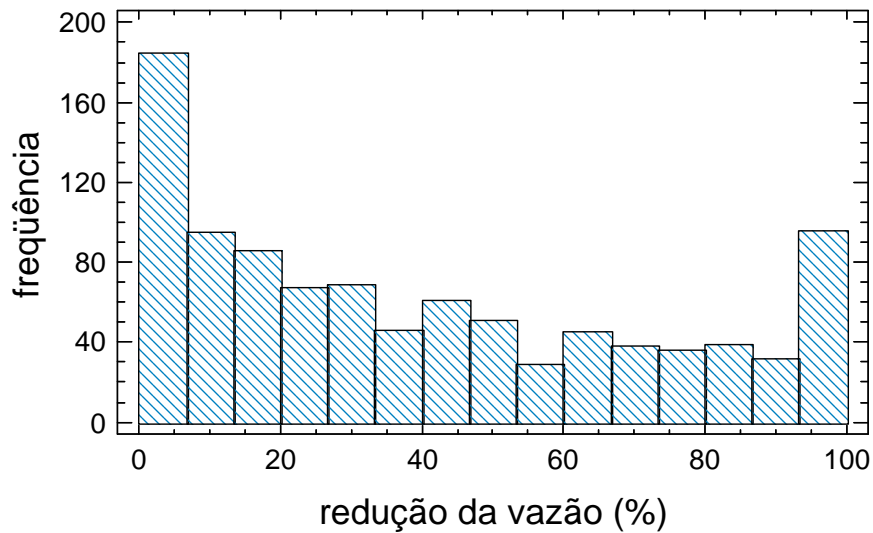
A cortina de injeção apresentou um importante papel no que diz respeito à redução das vazões passantes pelos drenos, variando de 0 a 100%, com média de 38,9%. A tabela 5.14 e a figura 5.18 mostram estes valores.

Tabela 5.14. Diminuição da vazão passante pelos drenos com inserção de cortina de injeção – Salto Caxias / Leito do Rio

<b>Condição</b>	<b>Vazão antes das injeções (l/min/m)</b>	<b>Vazão após as injeções (l/min/m)</b>	<b>Diferença</b>	<b>Redução (%)</b>
MAIOR	$2,95 \cdot 10^{-2}$	0	$2,95 \cdot 10^{-2}$	100
MENOR	$3,71 \cdot 10^{-9}$	$3,71 \cdot 10^{-9}$	0	0
COM <i>k</i> média	$1,37 \cdot 10^{-5}$	$1,10 \cdot 10^{-5}$	$2,75 \cdot 10^{-6}$	20

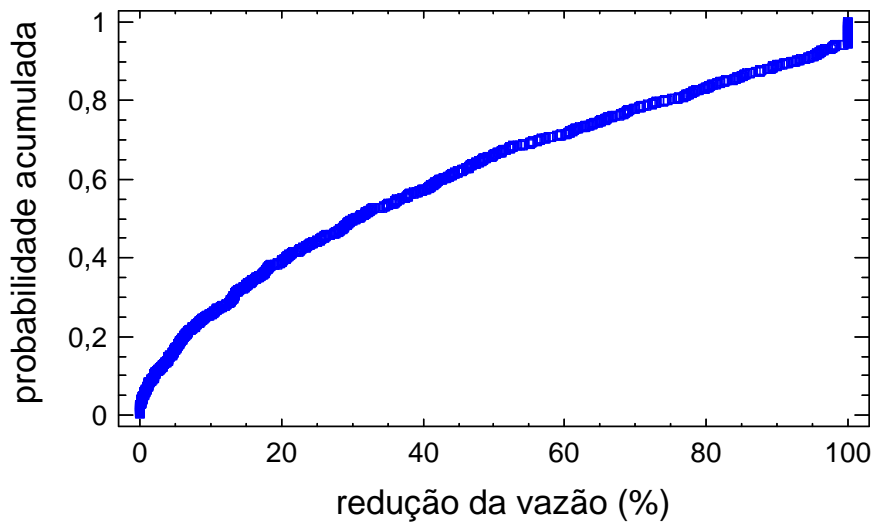


### Redução de vazão pelos drenos com injeções



(a)

### Redução de vazão pelos drenos com injeções



(b)

Figura 5.18. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada da redução da vazão através dos drenos, com inserção da cortina de injeção – Salto Caxias / Leito do Rio

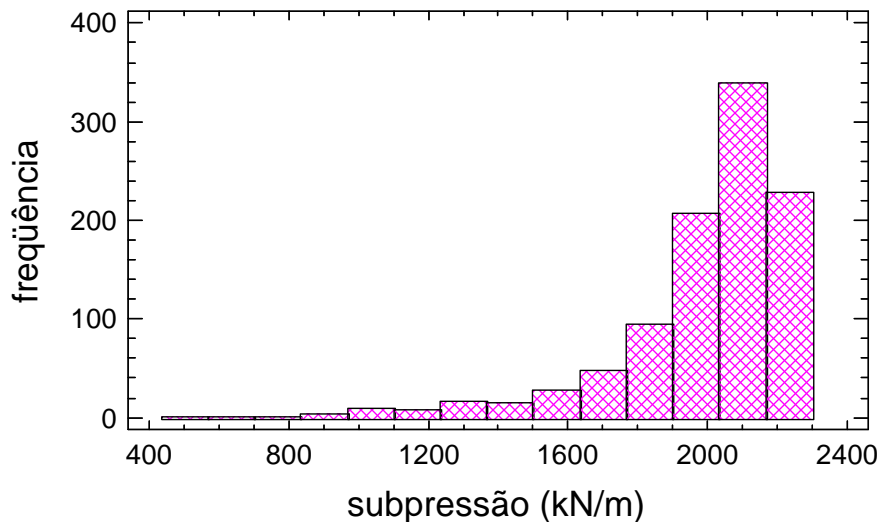
### 5.3.3 Barragem de Salto Caxias – Seção na Margem Esquerda

#### *Redução da Subpressão*

A seção na Margem Esquerda, na barragem de Salto Caxias, é uma seção mais baixa que as apresentadas anteriormente. Possui somente 26 m de altura, mas suas cortinas de vedação e de drenagem cortam dois derrames e dois contatos.

A redução na subpressão apresentada com a implementação da cortina de injeção foi de 10,6%, em média, com variação de 0 a 77,2% (Figura 5.19). O valor de 2230,03 kN/m, encontrado para o maciço nas condições originais, manteve-se em somente 1% dos casos, confirmando a boa eficácia da vedação no sentido de diminuição da subpressão.

### Resultados com Injeção



(a)

### Resultados com Injeção

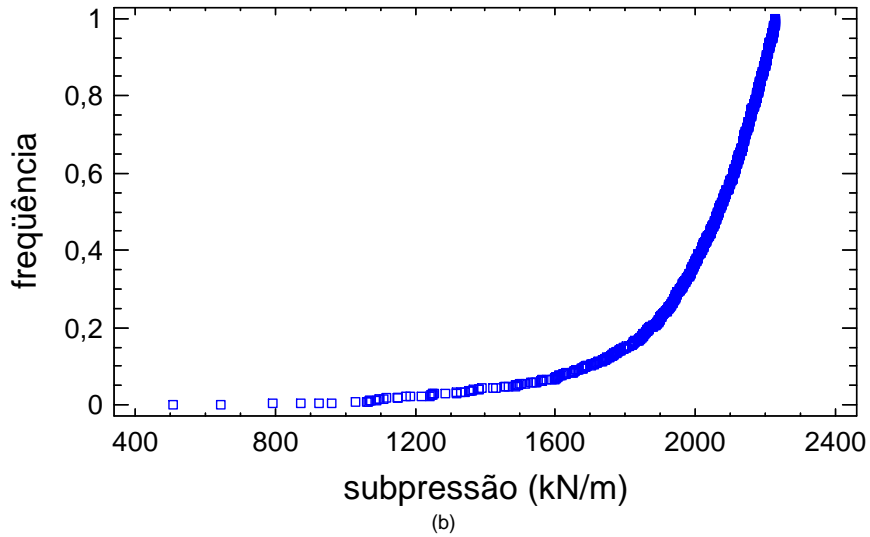
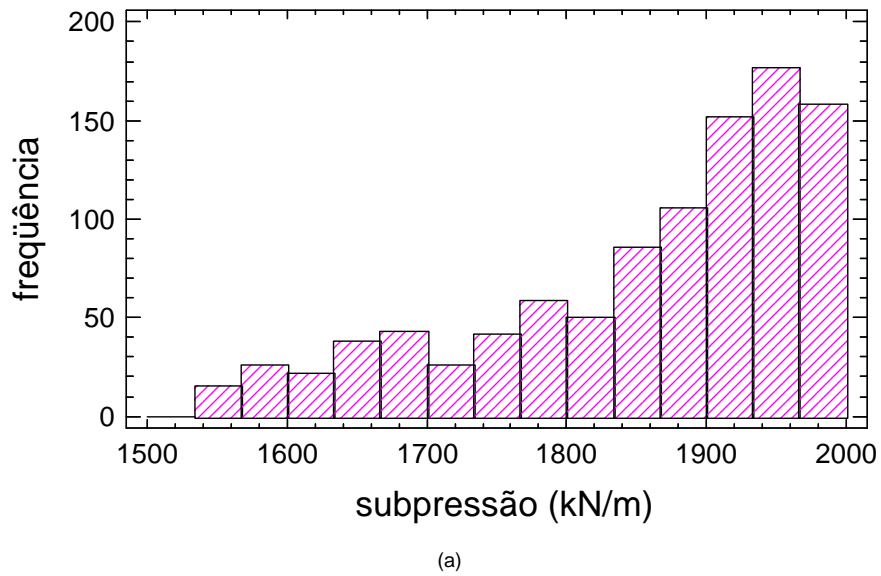


Figura 5.19. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de vedação – Salto Caxias / Margem Esquerda

Somente com a drenagem, sem as injeções, a redução deu-se em torno de 16,7%, variando de 10,6 a 30,8% (figura 5.20).

### Resultados com Drenagem



### Resultados com Drenagem

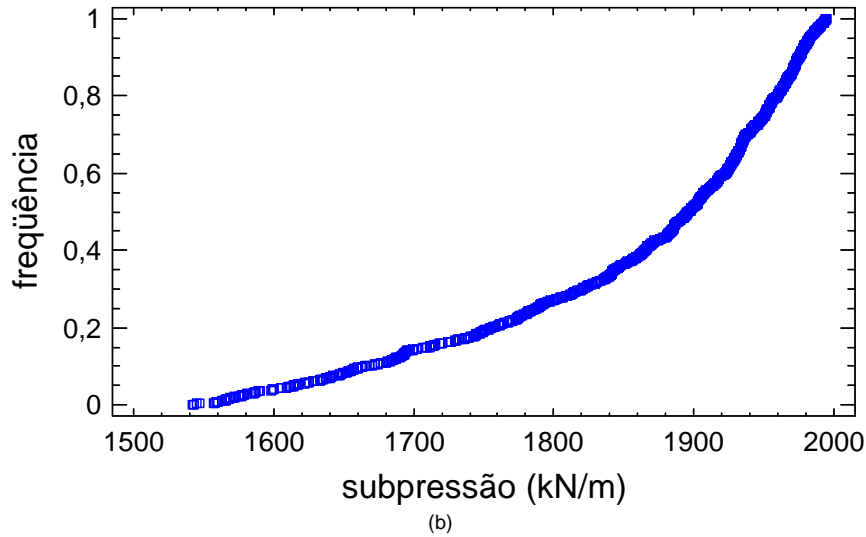
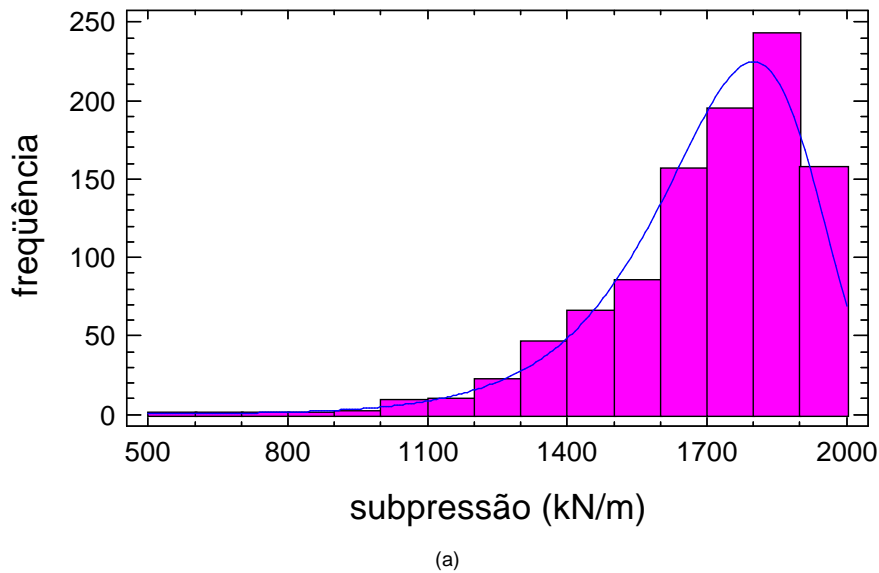


Figura 5.20. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação somente com sistema de drenagem – Salto Caxias / Margem Esquerda

Finalmente, com a presença dos dois sistemas, a subpressão foi reduzida de 10,7 a 77,2%, extremos já observados nos casos isolados, com média de 23,6%.

### Resultados com Injeção e Drenagem



## Resultados com Injeção e Drenagem

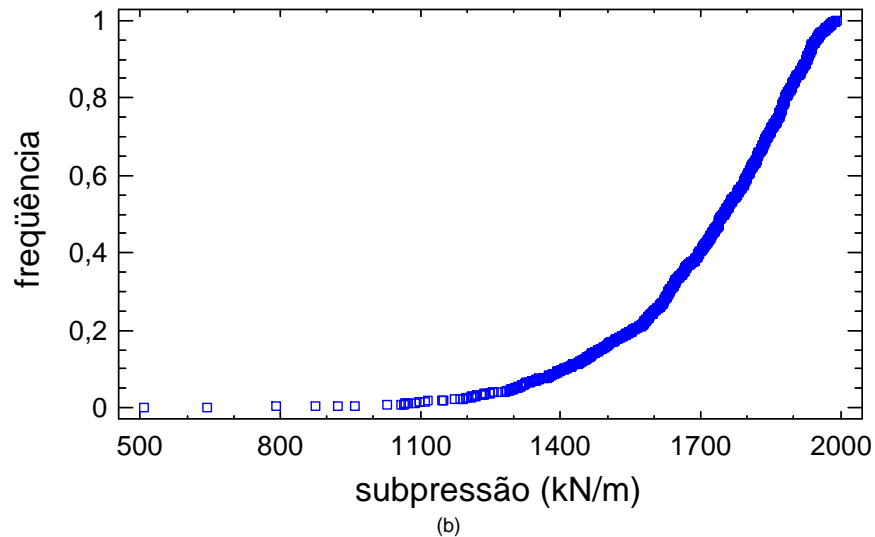


Figura 5.21. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada de subpressões para fundação com cortinas de injeção e drenagem – Salto Caxias / Margem Esquerda

A tabela 5.15 apresenta os valores extremos e médios de subpressão na base da barragem, encontrados dentre as 4000 simulações realizadas para esta seção. Pode-se perceber que os valores obtidos para a análise com as permeabilidades médias para cada derrame aproximam-se das subpressões médias das demais simulações.

Tabela 5.15. Valores extremos e médios de subpressão encontrados nas simulações – Salto Caxias / Margem Esquerda

CASO	SUBPRESSÃO (kN/m)			
	MAIOR	MENOR	MÉDIA	COM $k$ média
Fundação Original	2231,19	2229,37	2230,19	2230,23
Somente Injeções	2230,35	508,97	1994,34	2129,61
Somente Drenagem	1994,93	1541,92	1857,99	1879,25
Injeções e Drenagem	1991,30	508,97	1704,50	1804,91

A figura 5.22 resume os diagramas de subpressão obtidos para esta seção, além dos valores reais dos dois piezômetros de corda vibrante, localizados na base do bloco 14.

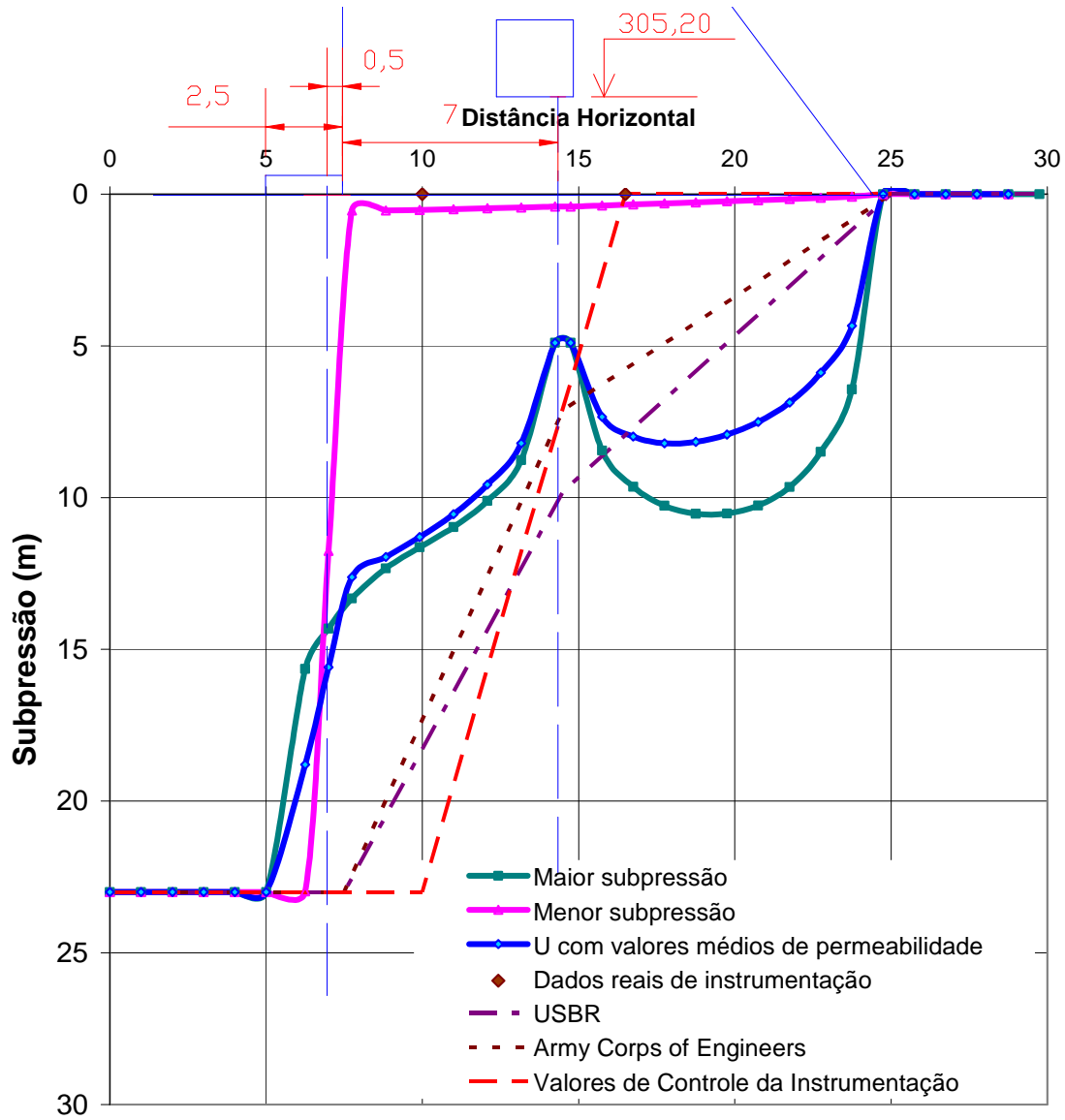


Figura 5.22. Diagramas de subpressão – Salto Caxias / Margem Esquerda

A tabela 5.16 apresenta as subpressões totais na base da barragem referentes aos critérios e diagramas de subpressão anteriormente mencionados.

Tabela 5.16 – Subpressões referentes a diferentes critérios de projeto – Salto Caxias / Margem Esquerda

	Critério	U (kN/m)
A	USBR	2182,27
B	US Army Corps of Engineers	1955,74
C	Cruz (1996)	1831,78
D	Valores médios de permeabilidade	1804,91
E	Valores de Atenção	1860,81
F	Instrumentação Bloco 14	563,88

### ***Probabilidade de Ocorrência dos Critérios de Subpressão***

Para a seção da margem esquerda, também se pôde obter as probabilidades de ocorrência de valores inferiores às subpressões através de uma curva de distribuição estatística. Neste caso, a distribuição que melhor se ajustou foi a de valor extremo. Sua curva de probabilidade acumulada, bem como a representação dos valores de subpressão da tabela 5.16, são apresentadas na figura 5.23.

## Injeção e Drenagem

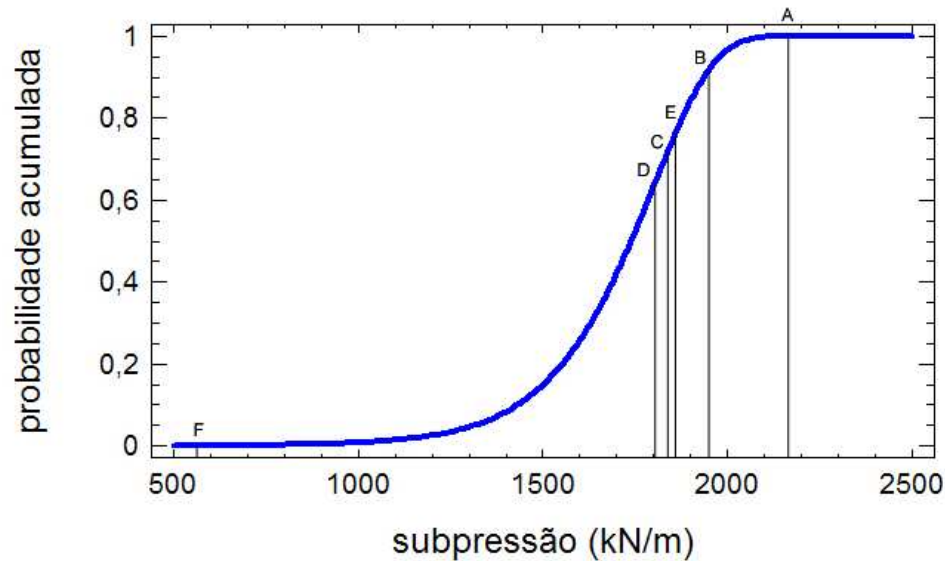


Figura 5.23. Critérios de subpressão relacionados à curva de probabilidade acumulada – Salto Caxias / Margem Esquerda

A tabela 5.17 mostra as probabilidades de ocorrência dos vários critérios e valores de subpressão estudados.

Tabela 5.17 – Probabilidade de ocorrência de diferentes critérios – Salto Caxias / Margem Esquerda

	Critério	U (kN/m)	Probabilidade de Ocorrência (%)
A	USBR	2182,27	99,99
B	US Army Corps of Engineers	1955,74	92,62
C	Cruz (1996)	1831,78	70,54
D	Valores médios de permeabilidade	1804,91	64,55
E	Valores de Atenção	1860,81	76,76
F	Instrumentação Bloco 14	563,88	0,053

Os critérios do USBR e do US Army Corps of Engineers mostraram-se mais conservadores que anteriormente. A probabilidade de ocorrência encontrada é maior que



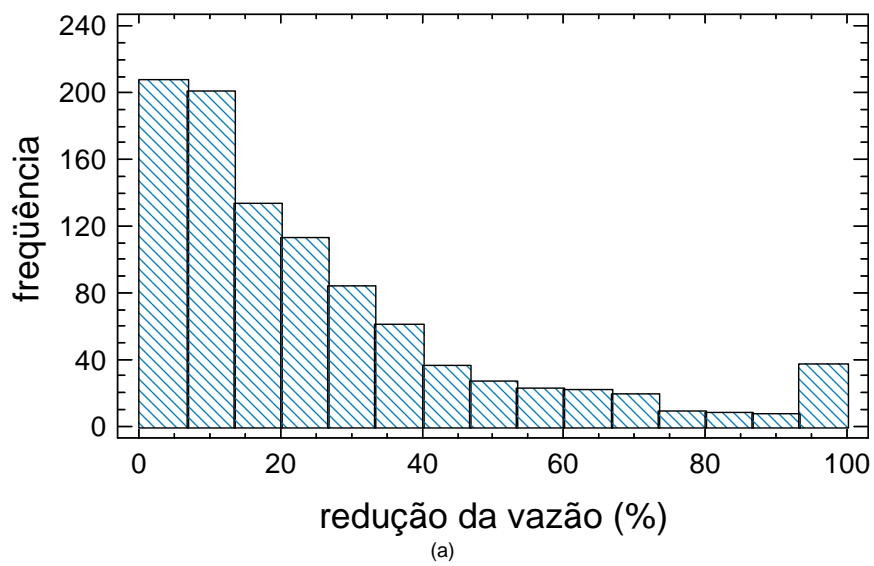
90% em ambos os casos. O critério de Cruz (1996) apresenta-se muito próximo dos valores de controle e dos valores com permeabilidades médias.

Novamente, a probabilidade de ocorrência do valor de subpressão calculado a partir de leituras da instrumentação é muito baixa, próxima de 0%.

### **Redução da Vazão**

A redução da vazão na Margem Esquerda da barragem de Salto Caxias também foi considerável, apresentando uma média de 24,9% (Figura 5.24).

#### **Redução de vazão pelos drenos com injeções**



### Redução de vazão pelos drenos com injeções

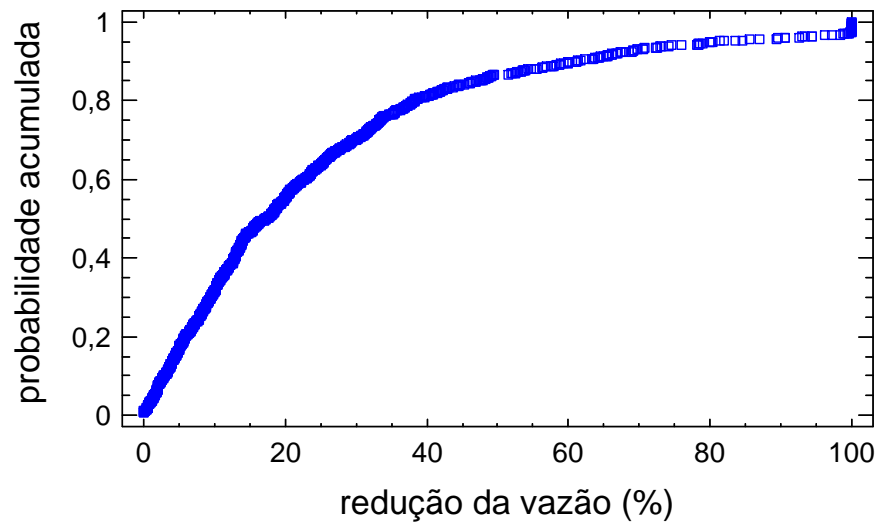


Figura 5.24. (a) Histograma e (b) probabilidade acumulada da redução da vazão através dos drenos, com inserção da cortina de injeção – Salto Caxias / Margem Esquerda

A tabela 5.18 mostra os valores extremos de vazão encontrados dentre as Simulações Monte Carlo e as vazões no caso de análise com permeabilidades médias.

Tabela 5.18. Diminuição da vazão passante pelos drenos com inserção de cortina de injeção – Salto Caxias / Margem Esquerda

Condição	Vazão antes das injeções (l/min/m)	Vazão após as injeções (l/min/m)	Diferença	Redução (%)
MAIOR	$1,05 \cdot 10^{-4}$	0	$1,05 \cdot 10^{-4}$	100
MENOR	$7,28 \cdot 10^{-12}$	$7,28 \cdot 10^{-12}$	0	0
COM $k$ média	$7,45 \cdot 10^{-7}$	$7,15 \cdot 10^{-7}$	$2,97 \cdot 10^{-8}$	4

## 6 CONCLUSÃO

Após realização das etapas de ajuste das curvas de distribuição estatística aos dados reais de absorção de água e cimento, obtidos em campo, e das simulações numéricas com intuito de se obter valores de subpressão mais próximos ao real, pôde-se analisar a eficácia dos elementos de vedação e de drenagem das barragens da Derivação do Rio Jordão e de Salto Caxias.

### 6.1 EFICÁCIA DOS TRABALHOS DE INJEÇÃO

Ao se tratar da eficácia dos trabalhos de injeção, percebe-se que estes foram bem executados, nas duas barragens. Da figura 5.2, pode-se ver que os valores de absorção, tanto de água como de cimento, na barragem de Salto Caxias, diminuíram a cada classe de furos executada. Na Derivação do Rio Jordão, esta queda iniciou-se somente após os furos secundários, apresentando-se, entretanto, da mesma maneira eficaz.

Além da verificação da diminuição dos valores de absorções obtidos diretamente em campo, as comparações de distribuições estatísticas apresentadas nas figuras 5.3 e 5.4 e nas tabelas de 5.1 a 5.4 demonstram a veracidade da hipótese de decréscimo das médias de absorção, defendida de forma teórica por vários autores.

## 6.2 EFICÁCIA DAS CORTINAS DE INJEÇÃO E DE DRENAGEM

Para as duas barragens ficou evidente a influência da permeabilidade original do maciço na eficácia da cortina de injeção. Em todos os casos de ineficácia, as permeabilidades do maciço encontravam-se muito baixas, inferiores a cerca de  $5 \times 10^{-6}$  cm/s.

De fato, a barragem da Derivação do Rio Jordão, onde ocorreram, via de regra, baixos valores de absorção nos ensaios de perda d'água, apresentou uma ineficácia do sistema de vedação de 41%, ou seja, 410 dos 1000 casos analisados não tiveram nenhuma redução de subpressão. Além disso, 49% das situações em que a cortina ajudou na redução, esta foi muito baixa, cerca de 5,9%. É interessante observar que as taxas de redução de subpressão para as análises obtidas em simulações de meios heterogêneos e de meios homogêneos, foram semelhantes.

Na barragem de Salto Caxias, a qual possui fundação mais complexa, com contatos mais permeáveis entre derrames de basalto, a ineficácia da cortina de injeção calculada através de modelos numéricos é de apenas 1% e 2%, para as seções da Margem Esquerda e do Leito do Rio, respectivamente. Os gráficos das figuras 5.16 e 5.22 mostram os dados reais de piezometria, os quais confirmam as baixas subpressões logo após a região das injeções.

A redução das vazões também depende das condições originais do maciço. Nos casos de fundações pouco permeáveis, logo pouco injetáveis, a redução na vazão passante pelos drenos é insignificante, já que inicialmente se encontravam muito baixas. Entretanto, nos casos em que realmente a função da cortina de injeção é necessária, para reduzir o volume de água bombeado da galeria de drenagem, ela a cumpre plenamente.

A influência da cortina de drenagem mostrou-se indispensável, no que diz respeito à diminuição das subpressões, na barragem da Derivação do Rio Jordão, sendo responsável

por aproximadamente 33% das reduções. Entretanto, pôde-se notar, nas tabelas 5.11 e 5.15, de Salto Caxias, que a atuação conjunta dos elementos das cortinas de drenagem e injeção mostra-se mais eficaz que o uso de apenas uma delas isoladamente.

### **6.3 PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA DE VALORES DE SUBPRESSÃO**

As probabilidades de ocorrência dos valores de subpressão encontradas para as duas barragens mostram que é necessário muito zelo ao escolher-se um critério de projeto. Tanto se pode deixar de considerar uma grande porcentagem de resultados (até 50% quando considerados valores médios de permeabilidade, na Derivação do Rio Jordão) como se pode optar por valores muito conservadores (USBR, para Salto Caxias / Margem Esquerda).

A metodologia aqui proposta permite a escolha de critérios mais coerentes com os aspectos geológicos do local, pois a probabilidade de ocorrência adotada no projeto obedecerá a uma distribuição estatística compatível com o material de sua fundação.

Deve-se, entretanto, ter em mente a existência de simplificações que podem culminar em imprecisões nas análises. As mais expressivas são: a caracterização dos materiais como meios homogêneos e isotrópicos, a consideração dos drenos como regiões de permeabilidades equivalentes e a limitação do número de simulações em  $10^3$ , por caso.

Apesar das limitações, observando-se os gráficos das figuras 5.11, 5.17 e 5.23, pode-se perceber uma grande coerência entre os valores encontrados nas simulações numéricas e os calculados através dos critérios de projeto e leituras de instrumentação.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS\*

ABREU, J.V.de; MEZZALIRA, F.deA.; CRUZ, L.O.M. Novas tecnologias em microcimentos para injeções de grautes e caldas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS, 1., 2004, São Paulo. **Anais eletrônicos...** São Paulo: CBT, 2004. 1 CD-ROM.

ANDRADE, R.M.de. **A drenagem nas fundações das estruturas hidráulicas: análise, interpretação, prática.** Rio de Janeiro: Engevix, 1982. 437p.

AOKI, N. Novo conceito de carga admissível de fundação profunda baseado em probabilidade de ruína. In: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL - GEOSUL, 3., 2002, Joinville. **Anais...** Porto Alegre: Editora Pallotti, 2002. v.1. p.131-139.

\_\_\_\_\_; CINTRA, J.C.A.; MENEGOTTO, M. L. Segurança e confiabilidade de fundações profundas. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 8., 2002, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2002. v.2. p.797-806.

AZEVEDO, A. **Análise do Fluxo e das Injeções nas Fundações da Barragem de Taquaruçu, Rio Paranapanema, São Paulo.** 1993. 206p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.

\_\_\_\_\_; OLIVEIRA, A.M.Z., SOARES, L. Injeções de vedação em fundações basálticas de barragens de gravidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2., 1978, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1978. v.1, p.17-34.

BAIN, L.J.; ENGELHARDT, M. **Introduction to probability and mathematical statistics.** Belmont: Duxbury Press, 2000. 644p.

BARBI, A.L. Comportamento de fundações de barragens de concreto: fatores condicionantes e desempenho dos tratamentos. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: AMBS/ABGE/CBMR, 1983. v.1B, p.209-231.

CAPUTO, H.P. **Mecânica dos solos e suas aplicações.** 6.ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1987. v.2, 498p.

\* De acordo com:

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6023: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

CASAGRANDE, A. Control of seepage through foundations and abutments of dams. First Rankine Lecture. **Geotechnique**, London, v.11, n.3, p.161-182, 1961.

CHAVES NETO, A. **Notas de Aula CE715: Probabilidade e Estatística Matemática I**. PPGMNE/UFPR, 2003.

COSTA NETO, P.L.O.; CYMBALISTA, M. **Probabilidades: resumos teóricos, exercícios resolvidos, exercícios propostos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1974. 144p.

COSTA NETO, P.L.O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 264p.

CORRÊA FILHO, D. **Ensaio de perda d'água sob pressão**. 1985. 134p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1985.

CRUZ, P.T.da. **100 barragens brasileiras: casos históricos, materiais de construção, projeto**. São Paulo: Oficina de Textos, 1996. 648p.

\_\_\_\_\_; BARBOSA, J. Supressões em barragens de concreto-gravidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3., 1981, Itapema. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v.2, p.163-178.

\_\_\_\_\_; SILVA, R.F.da Uplift pressures at the base and in the rock basaltic foundations of gravity concrete dams. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS RELATED TO DAM FOUNDATIONS, 1978, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ISRM/ABMS, 1978. v.1, p.III1-III25.

DEERE, D.U. Dams on rock foundations: some design questions. In: ROCK ENGINEERING FOR FOUNDATION & SLOPES, 1976, Boulder, Colorado. **Anais...** New York: ASCE, 1977. v.2, p.55-86.

ESTADOS UNIDOS. Army Corps of Engineers. **Gravity dam design: engineer manual**. Washington, D.C., 1995. (Paginação irregular). EM1110-2-2200.

EWERT, F.-K. **Rock grouting with emphasis on dam sites**. Berlin: Springer, 1985. 428p.

FOYO, A.; SÁNCHEZ, M.A.; TOMILLO, C. A proposal for a Secondary Permeability Index obtained from water pressure tests in dam foundations. **Engineering Geology**, v. 77, p.69-82, 2005.

GAIOTO, N. **Introdução ao projeto de barragens de terra e de enrocamento**. São Carlos: EESC-USP, 2003. 126p.



GUIDICINI, G.; ANDRADE, R.M.de. Considerações sobre o tratamento das fundações de estruturas hidráulicas em basaltos. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: AMBS/ABGE/CBMR, 1983. v.1A, p.319-350.

\_\_\_\_\_; SIGNER, S.; CRUZ, P.T.da. Uma forma de análise da eficiência de cortinas de injeção: o caso da barragem de Itaúba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 3., 1981, Itapema. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1981. v.2, p.225-241.

GUIMARÃES, M.C.A.B. **Análise de métodos de avaliação de subpressão em estruturas tipo gravidade.** 1987. 244p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, 1988.

HACHICH, W. Modelos Probabilistas em Análise de Riscos. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOTECNIA, 8., 2002, Lisboa. **Proceedings...** Lisboa: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, 2002.

\_\_\_\_\_; NEGRO JR, A. Retroanálise probabilística: medidas de convergência em túneis. In: SEMINÁRIO SOBRE INSTRUMENTAÇÃO DE CAMPO EM GEOTECNIA - SINGEO, 1990, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS-NRRJ, 1990. v.1. p.269-277.

HERRERA LÓPEZ, R. **Aplicação da mecânica de fratura à análise de fundações de barragens de concreto fundadas em rocha.** 2005. 187p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

HSIEH, P.A.; NEUMAN, S.P.; SIMPSON, E.S. **Pressure testing of fractured rocks: a methodology employing three dimensional crosshole tests.** Tucson: University of Arizona, Department of Hydrology and Water Resources, 1983. 176p. (Topical Technical Report, CR-3213).

HSIEH, P.A. et al. Field determination of the three-dimensional hydraulic conductivity tensor of isotropic media: methodology and application to fractured rocks. *Water Resources Research*, 21 (11), p.1667-76, nov., 1985.

HSU, S.J.C.; RE, G.; ONO, S. Alguns aspectos sobre o tratamento de fundações de barragens em obras hidroelétricas. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 2., 1970, São Paulo. **Anais...** São Paulo: APGA, 1970. v.2, p.449-469.

INFANTI Jr., N.; NITTA, T. Considerações para reavaliação dos critérios de injeções de cimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 2., 1978, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1978. v.1, p.35-43.

LEMAIRE, M.; CHATEAUNEUF, A.; MITTEAU, J-C. **Fiabilité des structures : couplage mécano-fiabiliste statique.** Paris: Hermes Science, 2005. 506p.

LEVIS, P.; SOARES, M.A.; ANDRADE, J. Comportamento da barragem da derivação do Rio Jordão, após dois anos de operação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 3., Foz do Iguaçu, 1998. **Anais...** Curitiba: COPEL, 1998. 420p.

LEVIS, P. et al. Aspectos geológicos das barragens da derivação do rio Jordão e de Salto Caxias. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE CONCRETO COMPACTADO COM ROLO, 3., Foz do Iguaçu, 1998. **Anais...** Curitiba: COPEL, 1998. 420p.

LEVIS, P. et al. Instrumentação da barragem de Salto Caxias – Aspectos relacionados ao sistema de automação. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE GRANDES BARRAGENS, 23., Belo Horizonte, 1999. **Anais...** Belo Horizonte: ABGE, 1999.

LOMBARDI, G. Selecting the grouting intensity. **Hydropower and Dams**, v.3, n.4, p.62-66, 1996.

\_\_\_\_\_. The use of additives in cement grouts. **Hydropower and Dams**, v.4, n.1, p.71-76, 1997.

\_\_\_\_\_. Idées reçues sur l'injection des roches. In: CONFERENCE POUR LE 60<sup>e</sup> ANNIVERSAIRE DU PROF. FR. DESCOEUDRES, Lausanne, 1998.

\_\_\_\_\_. Grouting of rock with cement mixes. In: ICOLD-SYMPOSIUM, Antalya, 1999.

\_\_\_\_\_; DEERE, D. Grouting design and control using the GIN principle. **Water Power and Dam Construction**, jun. 1993.

LOUIS, C. Fluxo de água a 3 dimensões em rochas fissuradas. São Paulo: ABGE, 1974. (Tradução. ABGE, 05)

MAIN brazilian dams: design, construction and performance. [Rio de Janeiro]: Comitê Brasileiro de Grandes Barragens, 2000. v.2, 496 p.

MARQUES FILHO, P.L. **Geologia de barragens e obras hidrelétricas**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1986. 230p. (Documento não publicado).

MARSAL, R.J.; RESENDIZ, D. **Presas de tierra y enrocamiento**. México: Limusa, 1975. 546p.

MORETTIN, L.G. **Estatística Básica – Probabilidade**. 7.ed. São Paulo: Makron Books, 1999. v.1. 185p.

MUNARSKI, C.J. Tratamento de Fundações. **Construção Pesada**, São Paulo, v.76, p.110-116, mar. 1977.

NUNES, A.J.C. Subpressão em barragens. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DE GRANDES BARRAGENS, 2., São Paulo, 1963.

OLAPADE, A.K. Some properties of the type I generalized logistic distributions. Department of Mathematics. **Obafemi Awolowo University**, Nigeria. Disponível em: <<http://www.komunikacija.org.yu/komunikacija/casopisi/kragmatj/25/d006/download>> Acesso em: 07 ago. 2005.

OLIVEIRA, R. Ensaio de Permeabilidade em Maciços Rochosos. S.L.S.P.C., 1972 p.65-73.

OLIVEIRA, A.M.S. **Estudo da percolação d'água em maciços rochosos para o projeto de grandes barragens**. 1981. 197p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

\_\_\_\_\_; SILVA, R.F. da; FERREIRA JÚNIOR, J. Ensaio de perda d'água sob pressão: Diretrizes. São Paulo: ABGE; IPT, 1975. (Boletim. ABGE, 02)

OSAKO, C.I. **A manutenção dos drenos nas fundações de barragens: o caso da Usina Hidrelétrica de Itaipú**. 2002. 114p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

PAPADAKIS, M. L'injectabilité des Coulis et Mortiers de Ciment. **Revue des Matériaux de Construction**, n.531, 1959.

PORTO, E.C. **Critério para determinação de vazões pela fundação de barragens com base nos ensaios de perda d'água: o caso da Usina Hidrelétrica de Itaipú**. 2002. 93p. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

RE, G.O. **Tratamento das fundações da Usina de Ilha Solteira e a análise de seu comportamento no controle das subpressões**. São Paulo: Themag Engenharia, 1976. 38p.

RISLER, P. Determination of the Permeability of Jointed Rock. Aachen: Institute for Foundation Engineering, Soil Mechanics, Rock Mechanics and Waterways Construction, v.5, 1977.

SAMPAIO, A.J.M. Síntese da evolução das principais técnicas empregadas no tratamento das fundações de vertedouros em barragens do tipo gravidade. In: SIMPÓSIO SOBRE A GEOTECNIA DA BACIA DO ALTO PARANÁ, 1983, São Paulo. **Anais...** São Paulo: AMBS/ABGE/CBMR, 1983. v.2B, p.289-313.

\_\_\_\_\_. **O emprego de injeção de calda de cimento no tratamento de fundações basálticas de barragens do tipo concreto-gravidade no Brasil Meridional: Aspectos práticos.** 1988. 118p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1988.

SEEP/W. Version 4.22. Calgary: Geo-Slope International, 1999. 1 CD-ROM.

SILVA, R.F. da. Ensaio com a Sonda Hidráulica Multiteste na Barragem de Juruá da Usina Hidroelétrica de Kararaô. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987, v.1, p.439-449.

SILVA FILHO, J.F.da; GAMA, E.M.da. Um modelo para análise do fluxo através das fundações de barragens de concreto. **REM: Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v.56, n.1, p.33-39, jan./mar., 2003.

SOARES, R.C.; MOHAMED, A.; VENTURINI, W.S.; LEMAIRE, M. (2002). Reliability analysis of non-linear reinforced concrete frames using Response Surface Method. **Reliability Engineering System Safety**, Oxford, v. 1, p. 1-16, 2002.

STATGRAPHICS Plus. Version 5.1. [S.l]: Statistical Graphics Corporation, 2001. 1 CD-ROM. [Student Edition]

TASHIRO, T.; HAYASHI, K.; MIHASHI, K.; TAKAHASHI, K. On a quantitative management of dam grouting by real time analysis. In: ROCK FOUNDATION, Amsterdam, 1995. **Proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema, 1995. p.375-380.

TRESSOLDI, M.; CELESTINO, T.B.; COSTA, S.M. Hydrogeological and hydrogeotechnical tests for Porto Primavera powerplant – Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 6., Amsterdam, 1990. **Proceedings...** Rotterdam: A.A.Balkema, 1990. v.2, p.1253-9.

TRESSOLDI, M. et al. Caracterização hidrogeológica e hidrogeotécnica de basaltos fraturados através de ensaios tridimensionais – o exemplo de Porto Primavera. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 6.; CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 9., 1990, Salvador. **Anais...** São Paulo: ABGE; ABMS, 1990. v.1, p.79-86.

VENTURINI, W.S.; SOARES, R. de C.; MOHAMED, A. Partial safety factors for homogeneous reliability of non-linear reinforced concrete columns. **Structural Safety**, v. 23, p. 137-156, 2001.

VERHULST, P.F. Recherches mathematiques sur la loi d'accresioement de la population. **Academie Royale des Science et Metres Bruxelee**. Series 2, 18, p.1-38, 1845.

ZEIGLER, T.W. **Determination of rock mass permeability**. Vicksburg: U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, 1976. 88p. (Technical Report, S-76-2).



# **ANEXO 1**

**Distribuições Estatísticas**





## DISTRIBUIÇÕES DE PROBABILIDADE

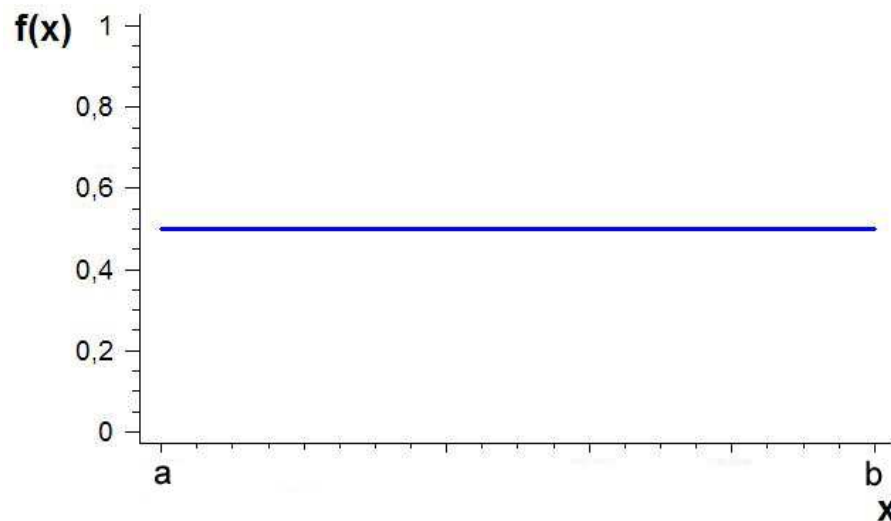
### DISTRIBUIÇÃO UNIFORME

A distribuição é considerada uniforme quando, em um intervalo  $[a,b]$ , a probabilidade de uma variável aleatória contínua cair em um subintervalo for a mesma para qualquer outro subintervalo de mesmo comprimento. Assim sua função densidade de probabilidade será:

$$f(x) = \frac{1}{b-a} \quad \text{para } a \leq x \leq b$$

$$f(x) = 0 \quad \text{para qualquer outro valor}$$

O gráfico da função para um intervalo  $[a,b]$ , é dado pela figura:



Distribuição Uniforme

A função de distribuição acumulada neste caso é:

$$F(x) = 0 \quad \text{para } x < a$$

$$F(x) = \frac{x-a}{b-a} \quad \text{para } a \leq x < b$$

$$F(x) = 1 \quad \text{para } x \geq b$$

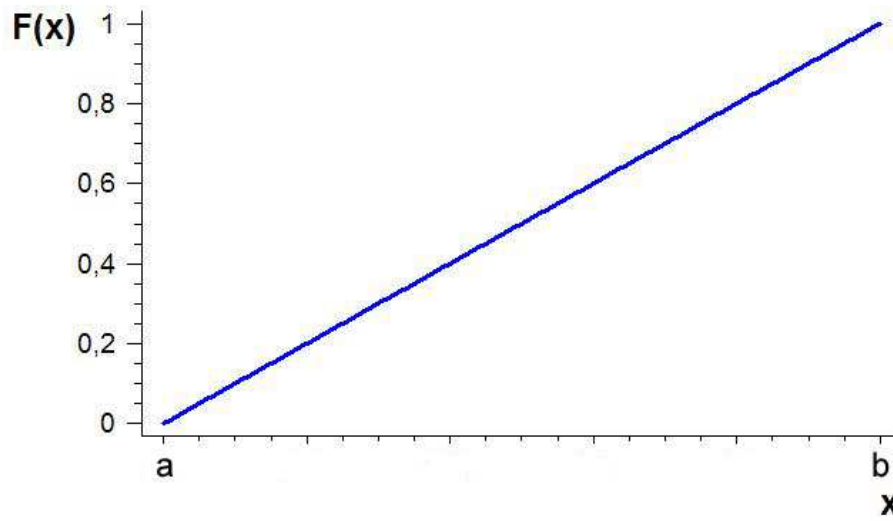


Gráfico da função de distribuição acumulada da distribuição uniforme

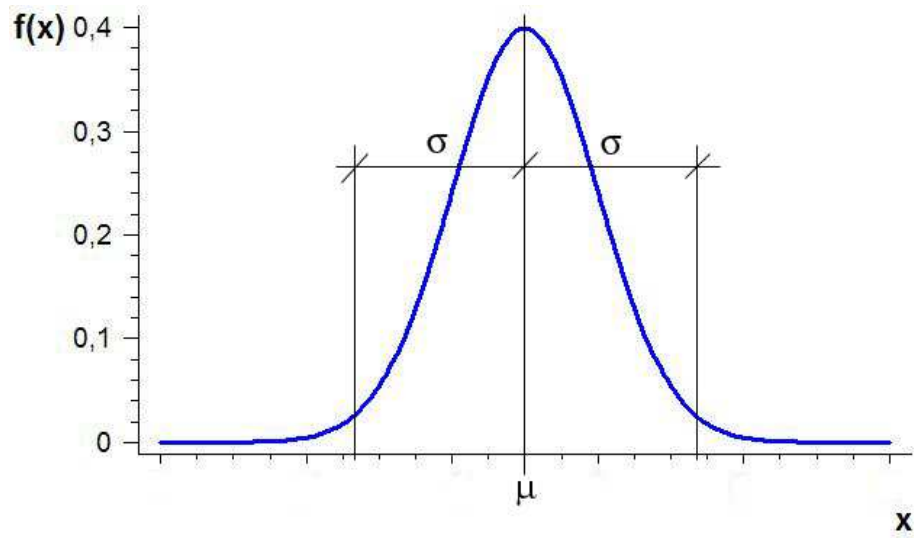
### DISTRIBUIÇÃO NORMAL OU DE GAUSS

A distribuição normal é uma das mais importantes da Estatística. Sua importância deriva do fato de inúmeras variáveis encontradas na realidade se distribuírem aproximadamente segundo o modelo normal que pode, então, ser usado para descrever seu comportamento. Ela é definida pela seguinte função densidade de probabilidade:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad \text{para } -\infty < x < +\infty$$

Onde  $\mu$  e  $\sigma$  são a média e o desvio padrão, respectivamente.

O aspecto característico da curva de distribuição normal é mostrado na figura a seguir. Seus pontos de inflexão são dados por:  $\mu - \sigma$  e  $\mu + \sigma$ .



Distribuição normal

A função de distribuição acumulada da distribuição normal é:

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty, x} e^{-[(u-m)/\sigma]^2/2}$$

Assim, da figura, pode-se perceber que:

$F(x)$  tende para zero se  $x \rightarrow -\infty$

$F(x)$  tende para um se  $x \rightarrow +\infty$

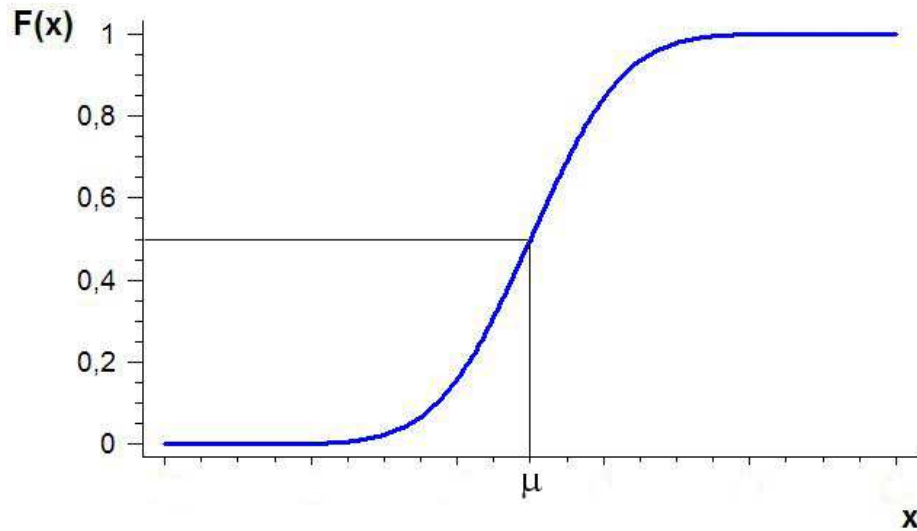


Gráfico da função de distribuição acumulada da distribuição normal

## DISTRIBUIÇÃO EXPONENCIAL

A distribuição exponencial tem importantes aplicações como, por exemplo, o estudo das falhas de componentes eletrônicos.

Nesta distribuição, o número de sucessos em um intervalo de observação  $t$  segue uma distribuição de Poisson (distribuição discreta) de média  $\mu = \lambda t$ . Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} \quad \text{para } x \geq 0$$

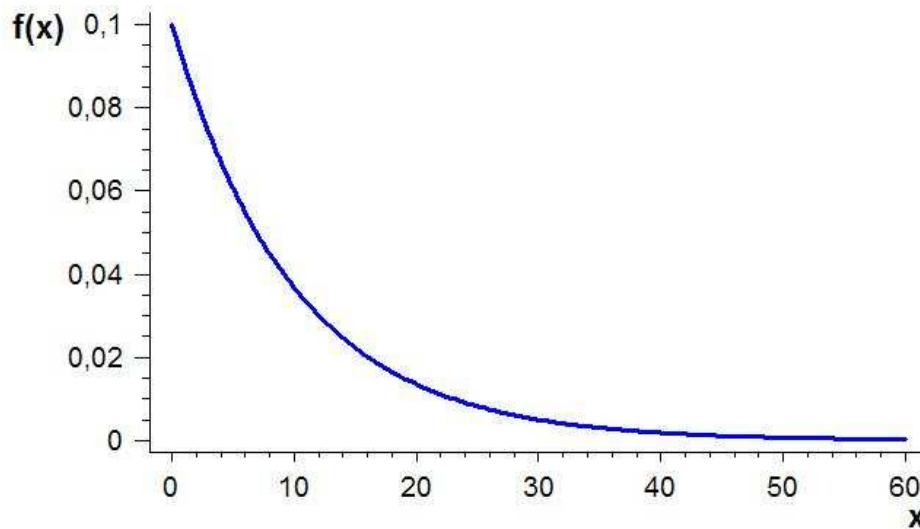
$$f(x) = 0 \quad \text{para } x < 0.$$

E sua função de distribuição acumulada por:

$$F(x) = 1 - e^{-\lambda x} \quad \text{para } x \geq 0$$

$$F(x) = 0 \quad \text{para } x < 0.$$

As figuras apresentam o gráfico de uma distribuição exponencial e sua função de distribuição acumulada.



Distribuição exponencial

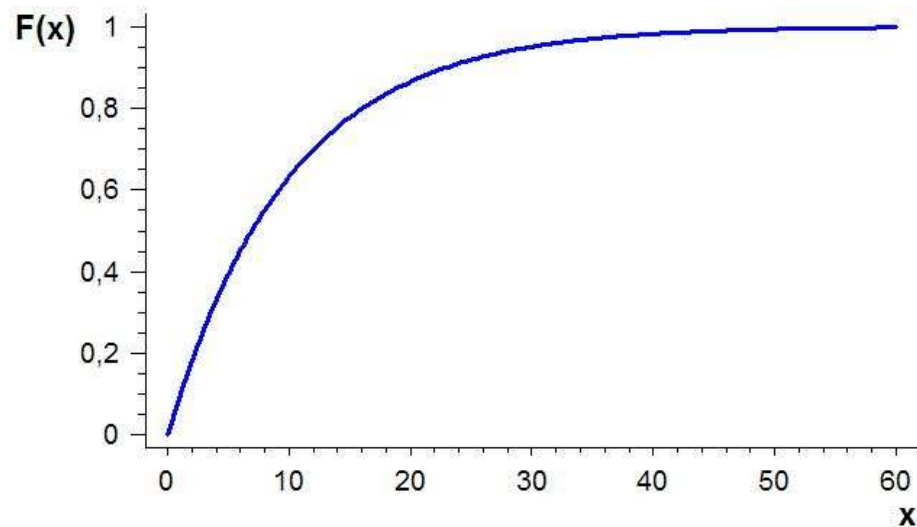


Gráfico da função de distribuição acumulada da distribuição exponencial

## DISTRIBUIÇÃO GAMA

A distribuição gama é usada para representar fenômenos limitados de um lado, tais como intervalos de tempos entre calibrações de instrumentos, intervalos de tempos entre compras de um item, etc.

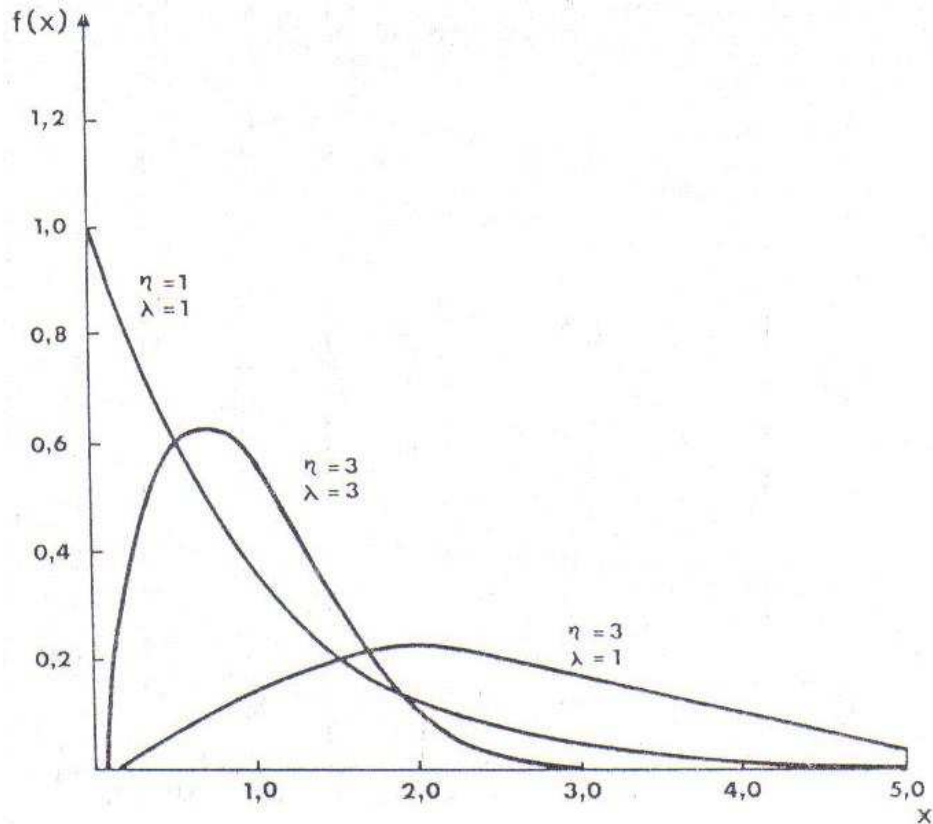
A função densidade de probabilidade da distribuição gama é dada por:

$$f(x) = \frac{\lambda^\eta}{\Gamma(\eta)} \cdot x^{\eta-1} \cdot e^{-\lambda x} \quad \text{para } x \geq 0;$$

$$f(x) = 0 \quad \text{para } x < 0.$$

Onde  $\Gamma(\eta)$  é a função gama definida por:

$$\Gamma(\eta) = \int_0^{+\infty} x^{\eta-1} \cdot e^{-x} dx \quad \text{ou} \quad \Gamma(\eta) = (\eta - 1)!$$



Algumas distribuições gama

Com  $\eta = 1$ , a função densidade de probabilidade da distribuição gama toma a forma da função densidade da distribuição exponencial. Assim, a distribuição gama pode ser considerada uma generalização da distribuição exponencial.

## DISTRIBUIÇÃO BETA

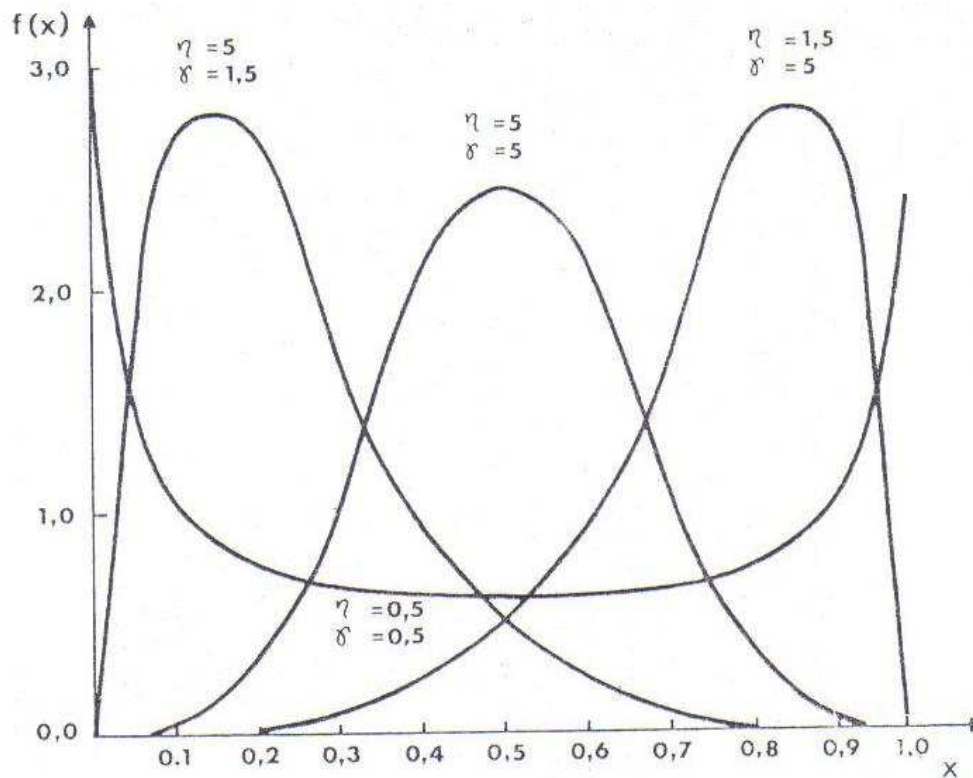
A distribuição beta é usada para representar fenômenos limitados de dois lados ( $a \leq x \leq b$ ), como a distribuição da proporção da população entre o menor e o maior valor da amostra.

A função densidade de probabilidade de uma distribuição beta é dada por:

$$f(x) = \frac{\Gamma(\gamma + \eta)}{\Gamma(\gamma) \Gamma(\eta)} \cdot x^{\gamma-1} (1-x)^{\eta-1} \quad \text{para } 0 \leq x \leq 1;$$

$$f(x) = 0 \quad \text{para } x < 0 \text{ e } x > 1.$$

Quando  $\eta = 1$  e  $\gamma = 1$ , a função beta toma a forma de uma distribuição uniforme.



Algumas distribuições beta

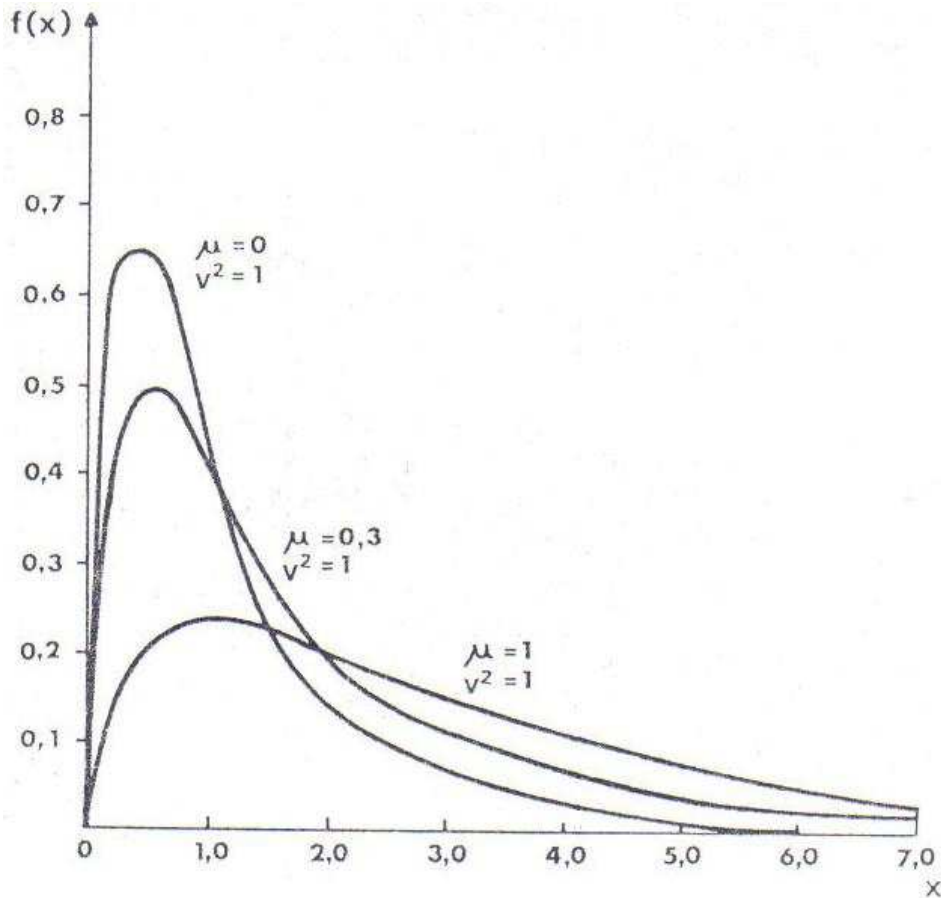
### DISTRIBUIÇÃO LOG-NORMAL

A distribuição de uma variável segue uma distribuição log-normal quando seu logaritmo segue uma distribuição normal.

Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \frac{1}{vx\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2v^2}(\log x - \mu)^2} \quad \text{para } x \geq 0;$$

$$f(x) = 0 \quad \text{para } x < 0.$$



Algumas distribuições log-normal

## DISTRIBUIÇÃO LOGÍSTICA

A distribuição logística deriva do trabalho de Verhulst (1845), professor da Escola Militar Belga, sobre o crescimento da população da Bélgica no início do século XIX. A descrição de Verhulst do crescimento da população segue a função de distribuição acumulada da distribuição logística, também conhecida como “ogiva logística”. A população cresce geometricamente para pequenas populações que possuem mais recursos do que necessitam, torna-se constante quando os recursos são totalmente utilizados e, quando a demanda por recursos excede a oferta, o crescimento populacional torna-se muito lento.

A função densidade de probabilidade desta distribuição é:

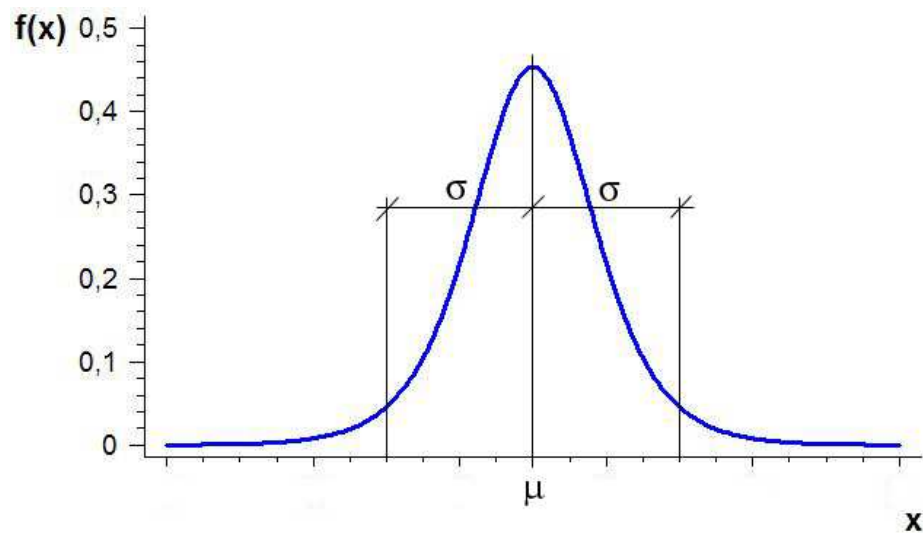
$$f(x, \mu, \sigma) = \frac{e^{-(x-\mu)/\sigma}}{\sigma \cdot (1 + e^{-(x-\mu)/\sigma})^2} \quad \text{para } -\infty < x < +\infty$$



E sua correspondente função de distribuição acumulada:

$$F(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{(1 + e^{-(x-\mu)/\sigma})} \text{ para } -\infty < x < +\infty$$

Os gráficos a seguir, os quais representam a distribuição logística, são semelhantes aos da distribuição normal. Entretanto, sua variância é igual a  $1/3 \cdot (\sigma \cdot \pi)^2$ .



Distribuição Logística

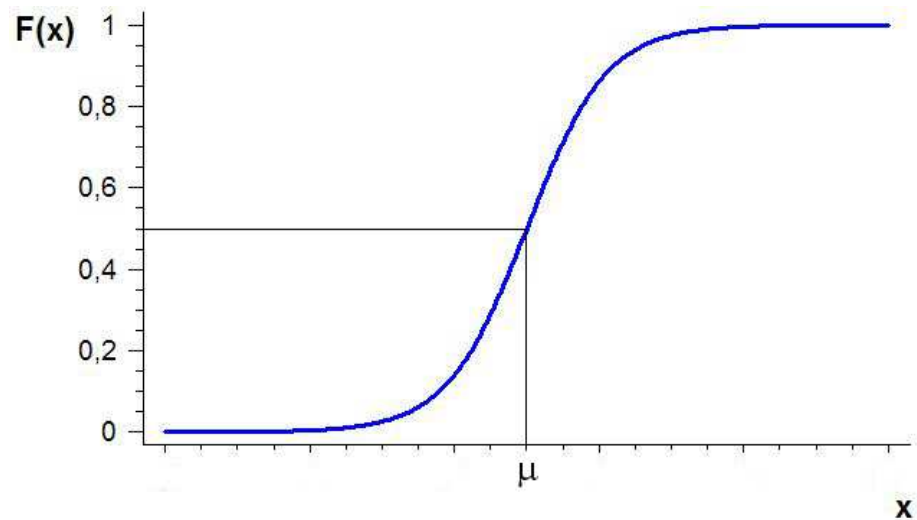


Gráfico da função de distribuição acumulada da distribuição logística

## DISTRIBUIÇÃO DE VALOR EXTREMO

A distribuição de valor extremo para valores máximos e mínimos é o modelo para as caudas esquerda e direita de distribuições do tipo exponencial. A distribuição de valor máximo é desviada para a direita e a de mínimo valor, para a esquerda.

As funções densidade de probabilidade desta distribuição, para valores máximos e mínimos são respectivamente:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{-\frac{1}{\sigma}(x-\mu) - \exp\left[-\frac{1}{\sigma}(x-\mu)\right]\right\}$$

$$f(x) = \frac{1}{\sigma} \exp\left\{\frac{1}{\sigma}(x-\mu) - \exp\left[\frac{1}{\sigma}(x-\mu)\right]\right\}$$

E suas correspondentes funções de distribuição acumulada:

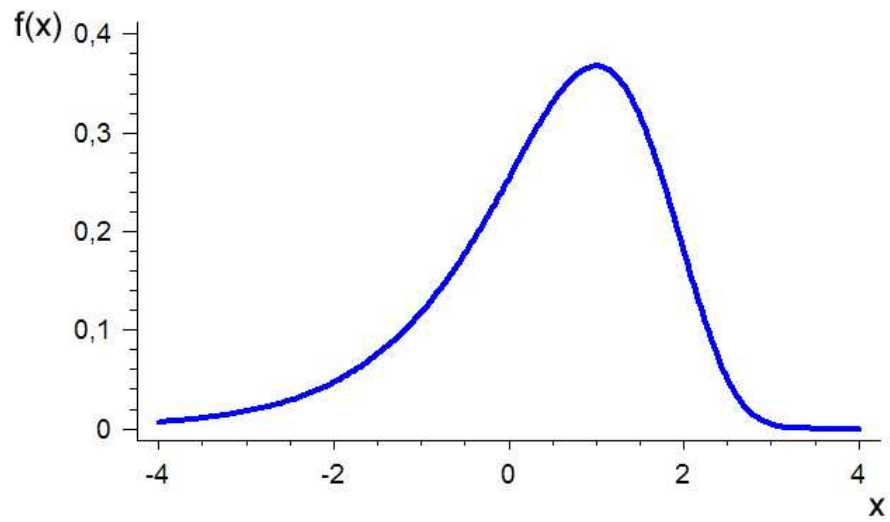
$$F(x) = \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]$$

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\exp\left(-\frac{x-\mu}{\sigma}\right)\right]$$

Onde:  $\mu$  = moda

$\sigma$  = escala

As figuras a seguir apresentam o gráfico de uma distribuição de valor extremo e sua função de distribuição acumulada.



Distribuição de Valor Extremo

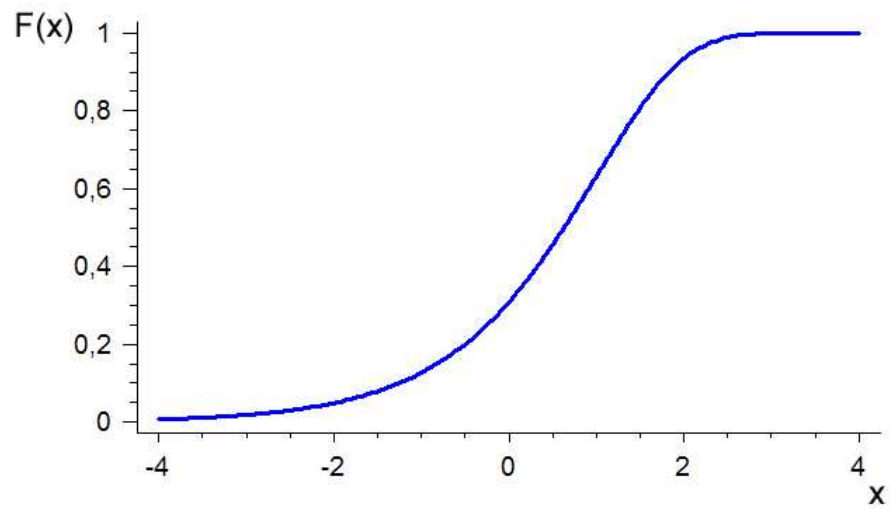


Gráfico da função de distribuição acumulada da distribuição de valor extremo