



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS  
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Ariel Henrique Pozzobon

**ANÁLISE DE INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO APLICADAS PELO MÉTODO  
GIN: ESTUDO DE CASO DO PROYECTO MÚLTIPLE MISICUNI**

Florianópolis  
2023

Ariel Henrique Pozzobon

**ANÁLISE DE INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO APLICADAS PELO MÉTODO  
GIN: ESTUDO DE CASO DO PROYECTO MÚLTIPLE MISICUNI**

Trabalho Conclusão do Curso de  
Graduação em Geologia do Centro de  
Filosofia e Ciências Humanas da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito para a obtenção do Grau de  
Bacharel em Geologia

Orientador: Prof. Dr. Murilo da Silva  
Espíndola

Florianópolis

2023

## Ficha de identificação da obra

Pozzobon, Ariel Henrique

Análise de Injeções de Calda de Cimento Aplicadas Pelo Método Gin: Estudo de Caso do Proyecto Múltiple Misicuni / Ariel Henrique Pozzobon ; orientador, Murilo da Silva Espíndola, 2023. 171 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Graduação em Geologia, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Geologia. 2. Barragem. 3. Método GIN. 4. Cortina de Injeção. 5. Barragens de Enrocamento com Face de Concreto.. I. Espíndola, Murilo da Silva. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Geologia. III. Título.

Ariel Henrique Pozzobon

**ANÁLISE DE INJEÇÕES DE CALDA DE CIMENTO APLICADAS PELO MÉTODO GIN:  
ESTUDO DE CASO DO PROYECTO MÚLTIPLE MISICUNI**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Geologia, e aprovado em sua forma final pelo Coordenador do Curso Geologia

Florianópolis, 11 de dezembro de 2023.

---

Prof.a. Manoela Bettarel Bállico, Dra.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora**

---

Prof. Murilo da Silva Espíndola, Dr.  
Orientador

---

Prof.(a) Rodrigo de Almeida Heringer, Dr.  
Avaliador  
UFSC

---

Roberto Borges Moraes  
Avaliador  
Nova Engevix Engenharia e Projetos S.A.

Florianópolis  
2023

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço profundamente à minha mãe, Adriane, e ao meu pai, Edenilson, assim como aos meus avós, que não apenas me apoiaram e incentivaram a prosseguir com os meus estudos, mas também desempenharam um papel fundamental na minha educação através de conversas e exemplos de trabalho, contribuindo significativamente para a pessoa que me tornei. Além disso, expresso minha gratidão pelo financiamento dos meus estudos na universidade federal quando essa necessidade surgiu.

Às minhas amigas, Maria Vitória e Gabrielly, que prestaram assistência inestimável nas adaptações de figuras e formatação de textos para esta dissertação, meu sincero agradecimento.

Aos meus amigos e irmãos da rocha, incluindo Gabriel Maccari, Celio, Jefferson Galletta, Fabio Siqueira, Thayná Guimarães, e tantos outros com quem tive o prazer de compartilhar o ambiente acadêmico, expresso minha profunda gratidão pela camaradagem e apoio ao longo dessa jornada.

Aos meus Colegas de LGA Bruno Osmar, Mateus Agostini, Willian Miguel, Nilo aos quais trabalhei academicamente nas incessáveis amostras de rocha que tínhamos que processar em nossos trabalhos.

Cada um de vocês desempenhou um papel vital no meu percurso acadêmico, e sou imensamente grato por todo o suporte e encorajamento que recebi.

A Empresa Misicuni por autorizar a utilização dos dados e a Nova Engevix pelo apoio e disponibilização dos dados dos resultados dos tratamentos de fundação que embasaram este trabalho. Em especial aos colegas Geólogos. Roberto Borges Moraes e Eduardo de Oliveira Germano, Eliane e André Bianchi Mattos que dispuseram da experiencia que tiveram no projeto desta barragem e em outros trabalhos com cortinas de injeção e fundação de barragens para auxiliar em incontáveis explicações sobre o tema.

Aos professores do curso de Geologia da UFSC. Dedicados educadores que dão o máximo de si todos os dias para ensinar essa ciência. Principalmente ao Prof. Dr. Murilo da Silva Espíndola, que me deu a oportunidade de trabalhar com ele, de aprender coisas indispensáveis para minha formação e me introduzir no universo da engenharia de barragens ao qual jamais imaginei fazer parte.

A todos que um dia pude ajudar ou receber ajuda, fica aqui o meu agradecimento.  
MUITO OBRIGADO!

*“Value is not intrinsic; it is not in things. It is within us; it is the way in which man reacts to the conditions of his environment. Neither is value in words and doctrines; it is reflected in human conduct. It is not what a man or groups of men say about value that counts, but how they act.”*

*(Ludwig Heinrich Edler von Mises, 1949)*

## RESUMO

O uso de caldas à base de cimento em fundações rochosas de barragens para melhorar suas propriedades mecânicas e hidráulicas é comum neste tipo de obras. Modernamente, entre os diferentes métodos de injeção, este trabalho desatacava o método GIN (*Grouting Intensity Number*) desenvolvido em 1993 e com poucos registros de aplicação em projetos no Brasil. O método é uma adaptação do modelo convencional de injeção de calda de cimento praticado desde 1838 na engenharia de barragens e consiste na adoção de uma calda de cimento estável única para toda a campanha de injeção, assim como do controle e monitoramento simultâneo da pressão de injeção da calda e do volume de calda injetada por metro de furo. Neste sentido, esta dissertação buscou avaliar o processo de tratamento do maciço de fundação da Barragem Misicuni, no âmbito do *Proyecto Múltiple Misicuni* em Cochabamba na Bolívia, no qual foi adotado o método GIN (*Grouting Intensity Number*) para as injeções de calda da fundação. O trabalho abordou detalhadamente os registros disponíveis do processo de injeção, desde as premissas iniciais utilizadas até o comportamento dos gráficos de injeção, estatísticas de consumo de calda, pressão de injeção e critérios de paralização da injeção. As discussões revelaram que as injeções foram eficazes e efetivas, com base nos resultados obtidos durante a fase de injeção e na avaliação da vazão específica de água pela barragem após o enchimento do reservatório.

**Palavras-chave:** Cortina de Injeção. Barragens. Tratamento de Fundações Rochosas. Método GIN. Barragens de Enrocamento com Face de Concreto.

## **ABSTRACT**

The use of cement-based grouts in the rocky foundations of dams to improve their mechanical and hydraulic properties is common in this type of construction. In modern times, among the various injection methods, this work discusses the GIN method (Grouting Intensity Number) developed in 1993, which has few records of application in projects in Brazil. The method is an adaptation of the conventional cement grouting model practiced in dam engineering since 1838 and involves the use of a stable cement grout throughout the injection campaign. It also includes simultaneous control and monitoring of the injection pressure and the volume of grout injected per meter of borehole. In this context, this dissertation aimed to evaluate the foundation treatment process of the Misicuni Dam within the scope of the Multiple Misicuni Project in Cochabamba, Bolivia. The GIN method was adopted for the foundation grout injections. The work extensively addressed the available records of the injection process, from the initial premises used to the behavior of the injection charts, grout consumption statistics, injection pressure, and criteria for injection cessation. The discussions revealed that the injections were effective and efficient, based on the results obtained during the injection phase and the evaluation of the specific water flow through the dam after the reservoir filling.

**Keywords:** Grout Curtain. Dams. Treatment of Rock Foundations. GIN Method. Concrete Face Rockfill Dams.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa de localização da Barragem Misicuni. ....	28
Figura 2.1 - Parâmetros de análise de um meio fraturado.....	35
Figura 2.2 - Influência da abertura (e) e do espaçamento (b) na estimativa do coeficiente de permeabilidade (k) com fluxo na direção paralela a um conjunto de descontinuidades lisas .....	36
Figura 2.3 - Variação de permeabilidade em função do RQD. ....	37
Figura 2.4 - Configurações típicas do ensaio de perda d'água.....	38
Figura 2.5 - Esquema de montagem para ensaio de perda de carga e perda d'água sob pressão proposto pelo manual da ABGE. ....	39
Figura 2.6 - Modelos de fluxo considerados na análise de ensaios de furo único.....	41
Figura 2.7 - Casos teoricamente esperados de comportamento do trecho ensaiado.....	42
Figura 2.8 - Comparação para as fórmulas de permeabilidade .....	45
Figura 2.9 - Relação de perda d'água com abertura de fraturas. ....	46
Figura 2.10 - Variação de permeabilidade de maciços rochosos fraturados, com a profundidade.....	47
Figura 2.11 - Barragem em terra com trincheira de vedação ou <i>cut-off</i> .....	49
Figura 2.12 - Estaca pranchas.....	49
Figura 2.13 - Diafragmas para interceptar o fluxo de água pelas fundações da barragem.....	50
Figura 2.14 - Barragem com tapete impermeável de montante.....	50
Figura 2.15 - Barragem com poços de alívio. ....	51
Figura 2.16 - Cortina de Injeção o seu papel em diminuir o gradiente hidráulico. ....	52
Figura 2.17 - Drenos de alívio e injeções a partir da galeria de drenagem...	53
Figura 2.18 - Design típico para um plinto. ....	54
Figura 2.19 - Exemplo de equipamento de injeção. ....	58
Figura 2.20 - Método do Espaçamento Divisional. ....	59
Figura 2.21 - Modelo espaçamento mais conveniente dos furos primários. .	60
Figura 2.22 Exemplo de divisão de uma cortina em seções e zonas. ....	61
Figura 2.23 - Método Ascendente.....	61

Figura 2.24 - Método Descendente. ....	62
Figura 2.25 - Representação gráfica das pressões (1) “escola europeia” e (2) “escola americana”.....	63
Figura 2.26 - Modelos reológicos de (a) fluidos newtonianos e (b) binghamianos.....	64
Figura 2.27 - Comportamento reológico das caldas injetáveis. ....	67
Figura 2.28 - A) Conceito de tixotropia; B) Comparação da tixotropia de caldas de cimento puras.....	73
Figura 2.29 - Velocidades médias de decantação de diferentes caldas à base de cimento com diferentes relações A/C.....	74
Figura 2.30 - Velocidades médias de decantação de caldas à base de cimento. ....	74
Figura 2.31 - Definição gráfica da curva GIN.....	82
Figura 2.32 - Esboço esquemático do desenvolvimento da pressão durante uma etapa de injeção em relação ao volume de rejunte tomado. ....	83
Figura 2.33 - O processo de rejunte pode ser interrompido a qualquer pressão final necessária ou ao atingir qualquer valor GIN exigido. ....	84
Figura 2.34 - Conjunto de curvas limitantes GIN "padrão" sugeridas pelo autor como diretrizes iniciais. ....	86
Figura 2.35 - Processo injeção de uma única etapa:.....	87
Figura 2.36 - Representação gráfica de (a) curva GIN e (b) curva de penetrabilidade correspondente.....	88
Figura 2.37 - Comparação dos métodos de injeção tradicional e GIN em termos de (a) relação A/C, (b) coesão, (c) pressão máxima e (d) pressão normalizada .....	90
Figura 2.38 - Absorções de cimento nas diferentes fases de perfuração. ....	93
Figura 2.39 - Perda d’água específica nas diferentes fases de perfuração. .	94
Figura 2.40 - Frequência de ensaios relacionada à unidade Lugeon (l/m.min.10kgf/cm <sup>2</sup> ).....	95
Figura 2.41 - Eficácia da cortina de injeção em obras dotadas de piezômetros. ....	96
Figura 3.1 - Mapa de localização da Barragem Misicuni. ....	101
Figura 3.2 - Vista da ombreira esquerda da Barragem Misicuni. ....	103

Figura 3.3 - Seção da Barragem Misicuni.....	103
Figura 3.4 – Representação tridimensional do projeto inicial da barragem.....	104
Figura 3.5 - Vista aérea da Barragem Misicuni.....	104
Figura 3.6 - Dimensões do plinto na planta topográfica.....	105
Figura 3.7 Mapa geológico simplificado do sítio da barragem e esquema geoestrutural das falhas. ....	107
Figura 3.8 - Resultados dos ensaios Lugeon, Margem Direita. ....	113
Figura 3.9 - Resultados dos ensaios Lugeon, Leito do Rio. ....	113
Figura 3.10 Resultados dos ensaios Lugeon, Margem Esquerda ....	114
Figura 4.1 - Curvas típicas do Método GIN adotado.....	118
Figura 4.2 - Distribuição geral de equipamentos de injeção no Método GIN. .....	122
Figura 4.3 - Tela de operação do equipamento de injeção.....	123
Figura 4.4 A) Tela de injeção durante a execução dos trabalhos; B) Gráfico exportado após a execução dos trabalhos.....	123
Figura 4.5 Variações na fluidez do pântano da pasta de injeção medida <i>in situ</i> .....	125
Figura 4.6 Variações do comportamento de fluidez pasta de injeção medida <i>in situ</i> .....	125
Figura 4.7 - Curva de resistência à compressão simples vs. idade da argamassa de injeção .....	126
Figura 4.8 – Sequência executiva dos trabalhos de injeção.....	127
Figura 4.9 – Exemplo de tabela de absorção de calda cimento .....	127
Figura 5.1 – Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços E5, P11, T21 e Q22A.....	130
Figura 5.2 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços E10, P7, S20, T40 e Q40A.....	131
Figura 5.3 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços Q30A em fases 1 a 5.....	133
Figura 5.4 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços Q30A nos Horizonte de Tratamento 10 a 8.....	134
Figura 5.5 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços Q30A em fases 1 a 5.....	136

Figura 5.6 Gráficos da curva GIN da linha EE-E14 a EE-T54. ....	138
Figura 5.7 Linha A – Dispersão dos valores GIN sobre a curva. ....	140
Figura 5.8 Linha A – Critérios de paralisação das injeções registrados .....	141
Figura 5.9 Linha A – Critérios de paralisação das injeções registrados segundo as margens e o leito do rio .....	141
Figura 5.10 Linha A – Absorções médias (l/m).....	142
Figura 5.11 Linha A – Pressões médias atingidas (Bar).....	142
Figura 5.12 Linha C – Dispersão dos valores GIN sobre a curva.....	143
Figura 5.13 Linha C – Critérios de paralisação das injeções registrados ...	144
Figura 5.14 Linha C – Critérios de paralisação das injeções registrados segundo as margens e o leito do rio .....	145
Figura 5.15 Linha C – Absorções médias (l/m).....	145
Figura 5.16 Linha C – Pressões médias atingidas (Bar).....	146
Figura 5.17 Linha B - Absorção média – Profundidade. 0,00 m á 10,00 m	147
Figura 5.18 Linha B - Pressão média das Injeções – Profundidade. 0,00 m á 10,00 m .....	148
Figura 5.19 Linha B – Dispersão dos valores GIN de todos as ordens de injeção na curva GIN.....	149
Figura 5.20 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções exploratórias .....	150
Figura 5.21 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções primarias. ....	150
Figura 5.22 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções secundarias. ....	151
Figura 5.23 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções terciárias. ....	151
Figura 5.24 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções quaternárias. ....	152
Figura 5.25 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções quinarias. ....	152
Figura 5.26 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções de verificação. ....	153
Figura 5.27 Linha B – Motivo que levaram a paralização de injeções. ....	153
Figura 5.28 Linha B – Motivo que levaram a paralização de injeções segundo a ordem de injeção.....	154
Figura 5.29 Linha B – Absorções medias segundo a ordem de injeção. ....	155

Figura 5.30 Linha B – Absorções medias de calda segundo a ordem de injeção nas ombreiras e leito do rio. ....	155
Figura 5.31 Linha B – Preções medias segundo a ordem de injeção.....	156
Figura 5.32 Linha B – Pressões medias segundo a ordem de injeção nas ombreiras e leito do rio. ....	156
Figura 5.33 Medidor de Vazão MV-01 – Leituras disponíveis entre outubro de 2016 e janeiro de 2021.....	160

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Parâmetros importantes na reologia de caldas de cimento. ....	76
Quadro 2.2 - Parâmetros do cimento.....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Equações frequentes no cálculo de permeabilidade .....	44
Tabela 2.2 - Classificação de maciço rochosos baseada no SPI e a considerações sobre tratamento por injeção.....	47
Tabela 2.3 - Caracterização dos diferentes tipos de cimento utilizados em calda de cimento. ....	68
Tabela 2.4 - Dimensão dos grãos de cimento e respectiva penetrabilidade.	69
Tabela 2.5 - Resumo dos vários aditivos, <i>fillers</i> e adjuvantes possíveis de utilizar na produção de caldas à base de cimento, bem como os seus efeitos e dosagem típica. ....	70
Tabela 2.6 - Orientação geral para análise das absorções de cimento. ....	93
Tabela 2.7 Medidas de vazão em 43 BEFCs .....	98
Tabela 4.1 - Propriedades de calda de Injeção 1. ....	120
Tabela 4.2 - Propriedades de calda de Injeção 2. ....	120
Tabela 4.3 Valores médios durante o tratamento de injeção. (Campo-Laboratório).....	124

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABGE: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental

A/C: Relação água/cimento

BEFC: Barragem de enrocamento com face de concreto

D.C.: Depois de Cristo

EPA: Ensaio de Perda d'Água

GIN: *Grouting Intensity Number*

HMG: *High Mobility Grout,*

IPT: Instituto de Pesquisas Tecnológicas

LMG: *Low Mobility Grout,*

PE: Perda d'água Específica

RQD: *Rock Quality Designation*

SPI: *Secondary Permeability Index*

USA: *United States of America*

USBR: *United States Bureau of Reclamation*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\eta$  - Viscosidade dinâmica;  
 $\eta'$  – Viscosidade aparente;  
 $\eta_B$  – Viscosidade plástica;  
A – Secção transversal do furo;  
c – Coesão;  
 $c_t$  – Coesão de teste;  
D – Recobrimento mínimo de terreno;  
 $D_{95}$  – Diâmetro da partícula a que corresponde 95% de material passado (mm);  
e – Energia específica;  
F – Impulsão;  
h – Espessura do *filter cake*;  
K – Fator de injectabilidade;  
 $K_{pc}$  – Coeficiente de crescimento do *cake*;  
 $K_{pf}$  – Coeficiente de pressofiltração;  
L – Comprimento do trecho de ensaio;  
N – Velocidade de rotação;  
p – Pressão de injeção;  
P – Pressão de água;  
 $P_0$  – Pressão de água inicial;  
 $P_F$  – Pressão final de injeção;  
 $P_n$  – Pressão normalizada;  
 $P_{MÁX}$  – Pressão máxima de teste;  
Q – Caudal;  
R – Velocidade de penetração;  
R – Penetrabilidade;  
 $R_t$  – Penetrabilidade de teste;  
t – Duração do ensaio;  
T – Torque;  
V – Volume de calda injetada por cada 1 m de furo tratado;  
 $V_i$  – Volume inicial da amostra;  
 $V_f$  – Volume do filtrado;  
 $V_F$  – Volume final de injeção.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>23</b>
1.1	OBJETIVOS .....	25
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>25</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>25</b>
1.2	JUSTIFICATIVA .....	26
1.3	LOCALIZAÇÃO .....	28
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>29</b>
2.1	CARACTERÍSTICAS HIDRAULICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS .....	29
<b>2.1.1</b>	<b>Características Geológicas</b> .....	<b>30</b>
2.1.1.1	<i>Tipo de litologia e suas estruturas locais</i> .....	30
2.1.1.2	<i>Orientação das fraturas</i> .....	31
2.1.1.3	<i>Características das fraturas</i> .....	31
2.1.1.4	<i>Hidrologia e escoamento subterrâneo</i> .....	32
<b>2.1.2</b>	<b>Permeabilidade de Maciços</b> .....	<b>32</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Ensaio de Perda D'Água</b> .....	<b>37</b>
2.2	TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO DE BARREGENS .....	48
2.3	TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO COM USO CORTINAS DE INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO .....	54
<b>2.3.1</b>	<b>Processo Projetivo e Executivo da Cortinas de Injeção</b> .....	<b>56</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Constituição e Reologia da Calda Cimento</b> .....	<b>64</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Método GIN (Grouting Intensity Number)</b> .....	<b>77</b>
2.3.3.1	<i>Definição da calda de cimento</i> .....	77
2.3.3.2	<i>Definição Teórica do GIN Aplicado em Maciços</i> .....	80
2.3.3.3	<i>Concepção teórica do Método GIN</i> .....	82
2.3.3.4	<i>Aplicação Prática de Injeções pelo método GIN</i> .....	86

<b>2.3.4</b>	<b>Comparação entre o Método Convencional e o Método GIN para injeção de calda de cimento.....</b>	<b>89</b>
2.4	ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS INJEÇÕES .....	91
<b>2.4.1</b>	<b>Eficácia dos Trabalhos de Injeção .....</b>	<b>92</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Eficácia da Cortina de Injeção.....</b>	<b>95</b>
<b>3.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS .....</b>	<b>101</b>
3.1	Barragem Misicuni.....	102
<b>3.1.1</b>	<b>Plinto .....</b>	<b>105</b>
<b>3.1.2</b>	<b>Condições geológico-geotécnicas da fundação .....</b>	<b>106</b>
3.1.2.1	<i>Estratigrafia .....</i>	106
3.1.2.2	<i>Geologia Estrutural.....</i>	107
3.1.2.3	<i>Zoneamento litoestrutural.....</i>	109
3.1.2.4	<i>Caracterização Geotécnica .....</i>	110
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....</b>	<b>115</b>
4.1	Projeto de Tratamento Adotados.....	115
<b>4.1.1</b>	<b>Furo de injeção executados. ....</b>	<b>116</b>
<b>4.1.2</b>	<b>Procedimentos.....</b>	<b>117</b>
4.1.2.1	<i>Curva GIN .....</i>	117
4.1.2.2	<i>Calda de Cimento.....</i>	119
<b>4.1.3</b>	<b>Equipamentos e Procedimentos .....</b>	<b>121</b>
4.1.3.1	<i>Equipamentos e configuração das injeções. ....</i>	121
4.1.3.2	<i>Procedimento de preparação da calda durante o trabalho de injeção....</i>	124
4.1.3.3	<i>Controle de qualidade da mistura de injeção. ....</i>	124
4.1.3.4	<i>Protocolo de execução das injeções pelo Método GIN de Injeções. ....</i>	126
<b>4.1.4</b>	<b>Crítérios de Qualificação das Injeções.....</b>	<b>127</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>129</b>
5.1	COMPORTAMENTOS DA CURVA GIN APRESENTADOS .....	129

<b>5.1.1</b>	<b>Análise da Ombreira Direita.....</b>	<b>129</b>
5.1.1.1	<i>Caso 1, Ombreira Direita.....</i>	129
5.1.1.2	<i>Caso 2, Ombreira Direita.....</i>	131
5.1.1.3	<i>Caso 3, Ombreira direita.....</i>	132
5.1.1.4	<i>Caso 4, Ombreira Direita.....</i>	134
5.1.1.5	<i>Caso 5, Ombreira Direita.....</i>	135
<b>5.1.2</b>	<b>Análise do Leito do Rio.....</b>	<b>137</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Análise da Ombreira Esquerda.....</b>	<b>137</b>
5.1.3.1	<i>Caso 1, Ombreira Esquerda.....</i>	137
5.2	COMPORTAMENTO DO CONSUMO DOS FUROS DE INJEÇÃO.....	139
<b>5.2.1</b>	<b>Plinto – Linha A.....</b>	<b>140</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Plinto – Linha C.....</b>	<b>143</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Plinto – Linha B – Injeções de Impermeabilização.....</b>	<b>146</b>
5.2.3.1	<i>Horizonte de tratamento de 0,00 m a 10,00 m.....</i>	147
5.2.3.2	<i>Horizonte de tratamento de 0,00 m a 70,00 m. (total).....</i>	149
<b>5.2.4</b>	<b>Resumo Estatísticos das Injeções do Plinto.....</b>	<b>157</b>
5.3	Influência Geológica-Geotécnica.....	158
5.4	EFETIVIDADE DAS INJEÇÕES.....	159
<b>CONCLUSÕES.....</b>		<b>162</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>		<b>164</b>
<b>ANEXO A - Mapa Geológico/Geomecânico Margem Direita.....</b>		<b>168</b>
<b>ANEXO B - Mapa Geológico/Geomecânico Margem Esquerda.....</b>		<b>169</b>
<b>ANEXO D – Perfil Geológico/Geomecânico na seção do plinto.....</b>		<b>170</b>
<b>ANEXO D – Perfil Geológico simplificado na seção do plinto.....</b>		<b>171</b>

## 1. INTRODUÇÃO

As barragens desempenham um papel fundamental na infraestrutura e no desenvolvimento de um País, são responsáveis pelo represamento e armazenamento da água superficial, para diversos usos (uso múltiplo), e possuem a característica única de permitir o armazenamento de potencial energético limpo e em grande escala, conhecido pelo ser humano para a produção de energia elétrica.

As primeiras barragens projetadas e construídas remontam pelo menos 5.000 anos atrás, como evidenciado no berço de civilizações na Babilônia, Egito, Índia, Pérsia e no Extremo Oriente. A grande maioria destas estruturas foram construídas a partir de conhecimentos empíricos concebidos no berço destas civilizações com o objetivo de regularização de cheias e armazenamento hídrico para a irrigação agrícola. Ao longo das gerações, estas estruturas acabaram caindo em desuso pois o conhecimento de seus projetistas e construtores não foi adequadamente preservado pelas gerações futuras, e sem água as civilizações que ela havia sustentado desapareceram (USBR 1983).

Segundo Jansen na USBR (1983), no período pré-romano os esforços de engenharia possibilitaram o desenvolvimento de barragens com largura de 50 a 150 m e alturas de 10 a 15 m essencialmente constituídas de terra e enrocamento. O ápice da engenharia de barragens da antiguidade se deu com a ascensão do império romano e das políticas de infraestrutura pública, um período em que ocorreria a multiplicação de barragens com altura de até 10 metros, apresentando técnicas construtivas modernas com emprego de enrocamento, concreto e alvenaria.

A partir da virada para o primeiro milênio (D.C.) os romanos iniciaram projetos mais audaciosos com alturas de 15 a 25 metros, como o caso da barragem de Prosperina e Cornalbo, na Espanha. Prosperina é um clássico do modelo utilizado à época, constituída de núcleo de concreto revestida em alvenaria com 19 metros de altura, foi construída nas primeiras décadas do século I e, apesar de longos períodos de abandono no período medieval há informações sobre reparos e modificações realizados nos anos de 1617, 1689, e 1791, estando em serviço até os dias atuais.

Após o declínio do império romano, a engenharia de barragens estacionou e com a regressão da engenharia de materiais subsequente, técnicas consideradas mais rudimentares foram observadas nos poucos projetos que se seguiram. Alguns projetos interessantes foram feitos entre os séculos X e XII no sul da Índia e no império

mongol, com alturas de até 27 metros, constituídas de núcleo de terra e revestimento de enrocamento.

No final do século XIII, no sudoeste de Teerã, na Pérsia, a barragem de Saveh foi erguida para irrigação das terras dominadas pelos mongóis. A obra pode ser considerada um símbolo do fracasso da engenharia hidráulica da época, sua principal fama é que seu reservatório nunca reteve água, embora a estrutura tenha sobrevivido até os dias atuais. A barragem possui uma estrutura gravitacional de alvenaria bruta, sem qualquer faceta de pedra cortada, com altura de 18 metros e um comprimento de 46 metros. Acontece que a estrutura foi assentada sobre aluvião do rio, ocasionando uma grande vazão de água pela fundação na entrada dos primeiros volumes de água no reservatório o que impossibilitou o enchimento do mesmo e deixou a barragem com o reservatório seco (USBR 1983).

Depois da Era Romana e dos escassos projetos desenvolvidos na Índia e Império Mongol, o próximo grande desenvolvimento aconteceu do século XVII, quando os espanhóis começaram a construir grandes barragens para irrigação.

Para Yang *et al.* (1999), no século XVII a construção civil espanhola foi superior a todas as outras civilizações. Este avanço na engenharia hidráulica, alinhada com técnicas modernas de perpetuação de experiências ao longo do tempo e da demanda por infraestrutura requisitada pela primeira revolução industrial, possibilitou a engenheiros europeus refinarem seus conhecimentos de projeto e construção no século XIX, propiciando a construção de barragens com altura de 45 a 60 metros (Campos Junior 2012).

Nesse período alguns desastres aconteceram como a acidente de 1874 da barragem de Williamsburg em Massachusetts nos Estados Unidos, onde, inúmeras falhas de projeto e construção levaram a infiltração generalizada da fundação, fazendo com que o talude da jusante entrasse em colapso, fragilizando a parede central da barragem que possuía um suporte inadequado para resistir à carga de água, vindo subitamente a ruir, o evento seguiu-se com a formação de uma onda de inundação que varreu as cidades a jusante de *Williamsburg*, *Skinnerville*, *Haydenville* e *Leeds* deixando pelo menos 139 vítimas fatais (Wooten *et al.* 2014).

O desenvolvimento desses projetos hidráulicos, o surgimento de problemas de estanqueidade dos reservatórios semelhantes a barragem de Saveh, e dezenas de rompimentos semelhantes como os registrados em Williamsburg forçaram um

estudo mais aplicado sobre as fundações das barragens, em especial as técnicas práticas para resguardar os projetos de graves problemas que levassem a inoperância ou destruição das barragens.

Hsu *et al.* (1970 *apud* LEVIS, 2006) afirmam que, para a fundação de barragens, a permeabilidade é uma das características mais importantes da fundação, e sugerem que para os materiais de baixa resistência e alta permeabilidade, estes devem ser removidos. Já, quando o maciço ou fundação possui resistência e deformabilidade aceitável, mas seja muito permeável, torna-se necessário o tratamento.

Este trabalho apresenta uma avaliação do resultado parcial das injeções de calda de cimento utilizadas para redução da permeabilidade da fundação da barragem Misicuni, localizada no Departamento de Cochabamba, Bolívia, executadas através do método GIN – “*Grouting Intensity Number*”, desenvolvido por Lombardi & Deere (1993).

## 1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

### 1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho:

- Avaliar processo de execução das injeções de calda de cimento para tratamento do maciço de fundação da Barragem Misicuni do *Projecto Múltiple Misicuni* com utilização do método GIN – “*Grouting Intensity Number*”, a fim de promover uma análise crítica sobre a utilização deste método, a necessidade de novas injeções durante o desenvolvimento dos trabalhos e da sua viabilidade para projetos nacionais.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são divididos nos seguintes itens:

- Prospectar, revisar, analisar e interpretar os dados geológicos-geotécnicos disponíveis do empreendimento relacionadas a fundação da barragem;
- Avaliar as condições de percolação da fundação anteriores a execução da cortina de vedação e durante a sua execução (ensaios de permeabilidade);
- Avaliar o comportamento das vazões e pressões de injeção e o comportamento e resposta do maciço face a injeção da calda (injetabilidade);
- Identificar as condicionantes geológico-geotécnicas e hidrogeotécnicas e suas principais influências no projeto, tendo como foco destacar a importância de investigações geológico-geotécnicas nas fases iniciais do projeto frente a previsibilidade de custos de engenharia e segurança de projetos construtivos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O estudo da estanqueidade de fundações de barragens possui relevante interesse acadêmico e prático, pois permite analisar os mecanismos de percolação de água em subsuperfície e a revisão e melhoria dos procedimentos práticos utilizados na mitigação das perdas de água pela fundação de estruturas hidráulicas. Estes processos não podem ser negligenciados no âmbito do projeto e da execução, pois podem induzir riscos de ineficiência ou mesmo a ruína de estruturas hidráulicas projetadas.

A barragem Misicuni é do tipo de enrocamento com face de concreto (EFC), na qual o plinto tem uma exigência relativamente alta com relação a qualidade da fundação, e os enrocamentos admitem maiores deformações, permitindo seu lançamento sobre fundações mais deformáveis. Por esse motivo, as barragens EFC podem ser utilizadas sobre fundações menos competentes, quando comparadas as barragens de concreto, resultando em menores preocupações relacionadas as condições do maciço rochoso no que se refere ao grau de fraturamento, presença de falhas, rocha alterada ou solos residuais que possam condicionar a deformabilidade, permeabilidade e suscetibilidade dos materiais presentes na fundação.

Durante a operação os condicionantes devem ser monitorados através da instrumentação de auscultação (piezômetros, inclinômetros, medidores de recalque,

de vazão etc.), comparando-se os dados obtidos com as especificações de projeto, o que permite avaliar o comportamento e a segurança da estrutura de barramento. Caso haja valores além dos estipulados, medidas de remediação devem ser implementadas para restabelecer as condições normais de segurança da estrutura.

Com relação à percolação pela fundação, elevadas perdas de água são indesejáveis pois, além da perda de volume acumulado, estas podem induzir subpressões indesejadas nos maciços das ombreiras, afetando sua estabilidade, bem como, eventualmente, ocasionar carreamento de materiais finos da fundação. Em casos extremos, há relatos de rupturas de estruturas hidráulicas de barramentos devido à atuação desses processos.

Em decorrência da alta taxa de percolação faz-se necessário a aplicação de tratamentos de fundação, sendo as cortinas de injeção com calda de cimento uma ferramenta usual para o tratamento na fundação de barragens.

Isto posto, uma das soluções existente consiste na implementação de um sistema de vedação, conhecido como cortina de injeção, sob a fundação do barramento e ombreiras, o sistema consiste na construção de uma cortina com pontos sucessivos e escalonados de injeções de calda de cimento no solo e no maciço, a partir de furos perfurados para melhorar as condições de permeabilidade do maciço.

As cortinas de injeção são uma solução amplamente utilizada na engenharia de barragens para o tratamento de fundações. Munido das condições de permeabilidade conhecidas da fundação, um projeto de cortina de injeção deve estabelecer critérios básicos sobre a vedação necessária para a estabilização dos fluxos internos e os critérios de operação para a construção dela, doravante, adaptações podem ser necessárias, dadas as condições do meio constatadas durante a fase executiva da obra.

O método GIN (*Grouting Intensity Number*) desenvolvido por Lombardi e Deere (1993) é uma adaptação do modelo convencional de injeção de calda de cimento praticado desde 1838 na engenharia de barragens. Consiste na adoção de uma calda de cimento estável única para toda a campanha de injeção, assim como do controle e monitoramento simultâneo da pressão de injeção da calda e do volume de calda injetada por metro de furo. O GIN em si representa o produto da pressão final de injeção pela calda injetada por metro e é estabelecido através de testes laboratoriais a partir da análise geológica-geotécnica da fundação, assim como da definição da

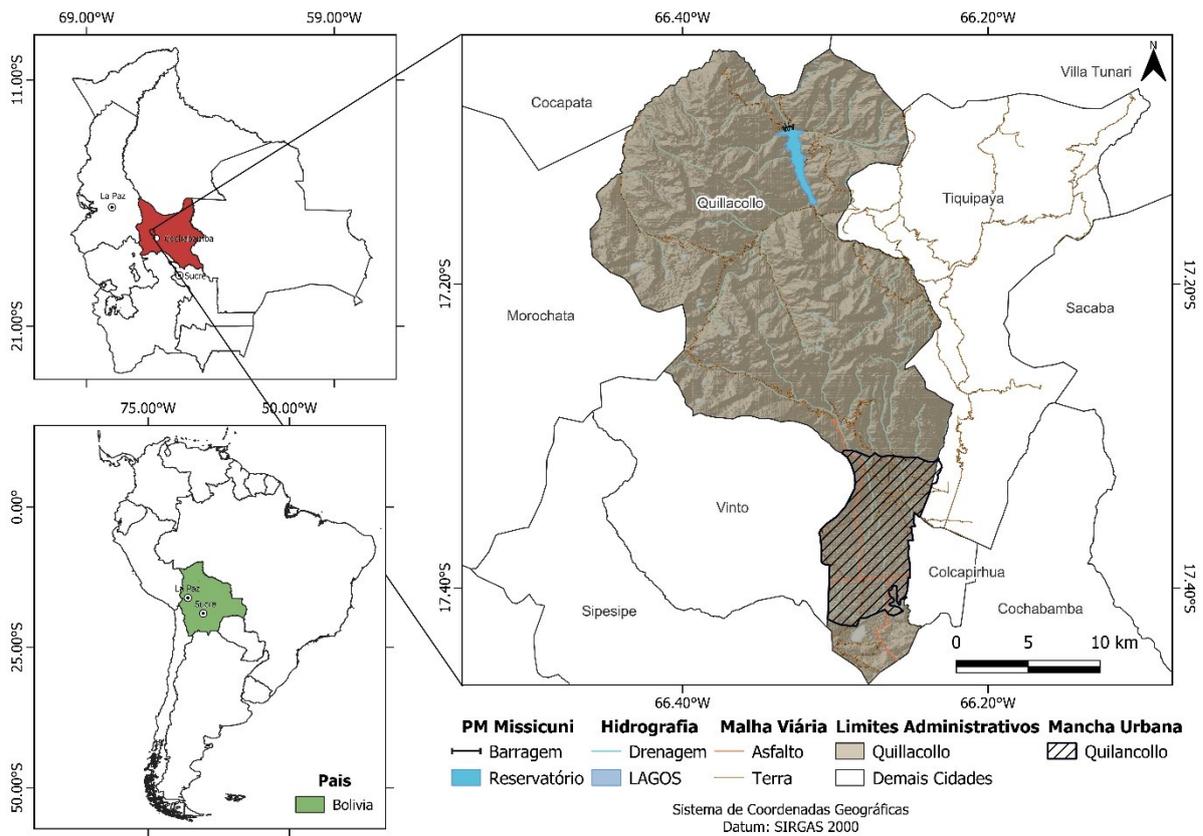
calda de cimento utilizada, que leva em consideração os objetivos da cortina de injeção para a fundação e do meio ao qual será injetada.

### 1.3 LOCALIZAÇÃO

O *Projecto Múltiple de Misicuni* consiste numa série de infraestruturas hídricas na região do departamento de Cochabamba, Bolívia.

A barragem alvo deste trabalho se localiza ao norte da cidade de Quillacollo no estreito de *Sivingani* na serra de Tunari (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Mapa de localização da Barragem Misicuni.



Fonte: Mapa elaborado pelo Autor.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta unidade são levantados conceitos, através de referências bibliográficas relacionadas ao tema do trabalho, alguns conceitos das quais se obtém uma fundamentação teórica para compreender o comportamento geotécnico da fundação, da concepção dos ensaios realizados e do comportamento da cortina de injeção frente à percolação d'água.

### 2.1 CARACTERÍSTICAS HIDRAULICAS DE MACIÇOS ROCHOSOS

A condutividade hidráulica é principal característica observada em maciços rochosos sob barragens, pois a capacidade de carga das rochas é mais alta na esmagadora maioria dos casos, comparada a fundações sob solos. Porém a permeabilidade advinda da interconectividade da porosidade das rochas aumenta o coeficiente de permeabilidade e, conseqüentemente o efeito de subpressão, que reduz a estabilidade global da estrutura, e reduz a capacidade de retenção de água do reservatório, que a depender do gradiente hidráulico pode impedir a infraestrutura de atingir o objetivo para o qual foi projetada.

Para Gama (2012) o estudo preliminar do maciço de fundação é fundamental para a execução de projeto de tratamento eficaz, sendo imprescindíveis os estudos das características geológicas e do comportamento hidráulico sobre o maciço.

Nesse sentido, o estudo das características hidráulicas da fundação de barragens passa por três pontos, um ao qual é realizada a caracterização geológica da região, onde se observar a litologia e a estrutura da formação rochosa, a existência e características de fraturas, principalmente sua orientação, espaçamento e densidade. Em casos especiais de rochas sedimentares e derrames vulcânicos também deve ser levado em consideração as características de porosidade primária (porosidade intersticial entre os grãos minerais da rocha), que pode variar com os estratos, e por fim o estudo das características hidrológicas e de escoamento subterrâneo do maciço através da realização de ensaios de perda d'água *in situ*.

Para obter um mínimo de compreensão das características hidráulicas de maciços, abordaremos alguns tópicos de discussão importantes a seguir. Esses tópicos incluem as características importantes a serem observadas na geologia dos

maciços, o atual estado da arte sobre permeabilidade e os ensaios de campo para realizar estudos de hidráulica no terreno.

### **2.1.1 Características Geológicas**

A ampla variedade de litologias existentes e de tipos de maciços rochosos formados a partir destes traz consigo a conjunção de diferentes propriedades e defeitos que podem ser prejudiciais ou benéficas para o comportamento desejável do maciço. No nosso caso é necessário que se tenha um conhecimento do tipo, da orientação e da condição dos defeitos existentes na litologia e na estrutura do maciço rochoso, requerendo comumente, uma prospecção ampla da cartografia do terreno, execução de furos de sondagem, ensaios de caracterização dos litotipos e ensaios *in-situ* dentro dos furos.

As informações produzidas através da prospecção devem conter dados sobre a orientação, frequência e condições das diversas falhas e outras particularidades do maciço, de modo a compreender o comportamento mecânico do mesmo e os critérios de utilização como fundação de barragens.

Destaca-se a importância de uma avaliação minuciosa da prospecção, pois a partir desta são estabelecidos os critérios construtivos e de intervenções que porventura sejam necessários, nesse caso a eficácia de qualquer infraestrutura implementada sobre o maciço se encontra totalmente dependente de conhecimento adequado do substrato que o suporta.

A seguir será abordado um resumo dos aspectos importantes a considerar na realização deste tipo de estudo

#### **2.1.1.1 Tipo de litologia e suas estruturas locais**

Existem três grandes grupos litológicos, definidos no processo formacional aos quais as rochas, ígneas associadas a resfriamento termal de massas magmáticas (origem intrusiva) e lavas vulcânicas (origem extrusiva), sedimentares associadas processos sedimentares de erosão, sedimentação e litificação de sedimentos clásticos-químicos-biogênicos e metamórficas associadas a processos físico-químicos de alteração mineralógicas de protólito para um novo arranjo mineral.

Embora existam algumas semelhanças e que sejam expectáveis variações entre os diferentes tipos, a natureza dos defeitos também irá variar em termos de extensão e características dentro de rochas do mesmo tipo e/ou idade. Pois, o

contexto geológico ao qual uma rocha evolui ao longo da sua formação é permeado de diferentes sequencias de eventos e processos restritos a determinadas regiões e propiciam independente dos litotipos rochosos e desta forma o desenvolvimento de características únicas inclusive para rochas do mesmo tipo e/ou idade.

Apesar disso, o litotipo da rocha, a idade geológica da formação e o contexto geotectônico da região, permitem ao especialista obter uma ideia das principais características do maciço, sendo o estado de meteorização, a abertura das fissuras e sua orientação as mais essenciais.

O estado de meteorização influencia na condição física e química das superfícies da rocha e podem induzir a cimentação de discontinuidades, em consequência da desagregação físico-química dos minerais da rocha devido à exposição aos agentes atmosféricos e/ou à sua dissolução por percolação de água. O material erodido pode ser sedimentado nas fissuras e discontinuidades, obturando-as superficialmente, sendo susceptíveis à erosão em condições de alta carga hidráulica ou desenvolvimento de subpressões indesejadas.

As superfícies de discontinuidade são afetadas pelo tipo litológico e estado de meteorização, podendo ser completamente lisas ou, inversamente, muito rugosas, e ambas as configurações afetando a mecânica de fluidos que a percolam e influenciando na carga hidráulica e subpressões associadas.

#### 2.1.1.2 Orientação das fraturas

A atitude das principais fraturas em qualquer terreno deve ser conhecida de modo a permitir o entendimento da geomecânica do maciço, e do percurso pelo qual a água pode percolar.

A orientação das discontinuidades também indica o acúmulo de pressões internas do maciço e de acordo com a sua atitude a gama de pressões que podem ser usadas durante fases subsequentes de tratamento do maciço. Pois, fissuras horizontais estão sujeitas a forças de levantamento hidráulico a partir de pressões mais reduzidas do que fissuras verticais.

#### 2.1.1.3 Características das fraturas

A capacidade de percolação de água pelas discontinuidades depende da respectiva abertura, espaçamento e rugosidade das superfícies. O grau de

interligação entre os vários defeitos existentes no maciço tem também uma grande influência na capacidade da água de percorlar, sendo, portanto, condicionado pela persistência das descontinuidades.

A água irá viajar mais facilmente por vazios de grandes dimensões do que pelos pequenos, da mesma maneira que viajarão mais facilmente através de uma superfície lisa e regular do que por uma ondulada e rugosa. A resistência imposta à movimentação da água varia tanto quanto a diversidade dos defeitos existentes, que influenciaram diretamente no comportamento do escoamento dela, que pode ser laminar ou turbulento.

Como já mencionado, a interligação entre os vários defeitos exerce uma grande influência na capacidade de penetração hidráulica: grandes fissuras interligadas serão, geralmente, capazes de transmitir grandes volumes de água, provocando o aumento da vazão hidráulica e o aumento de subpressões internas do maciço, sendo necessário portanto o tratamento da fundação, seja para aumentar a estanqueidade do maciço, para drenar a água interna evitando escoamento turbulento da mesma, ou ainda para homogeneizar a porosidade de modo a não permitir o fluxo turbulento e o acúmulo excessivo de subpressões.

#### 2.1.1.4 Hidrologia e escoamento subterrâneo

O regime hidráulico aéreo e a condutividade entre as várias descontinuidades presentes no terreno são de importante conhecimento e compreensão. Pois implicam diretamente nos resultados de ensaios de condutividade hidráulicas e permeabilidade do terreno, à vista disso, são fundamentais para as análises realizadas sobre o maciço e das intervenções ao qual possa sofrer no período construtivo para apresentar uma maior previsibilidade no seu comportamento hidráulico e geotécnico.

#### **2.1.2 Permeabilidade de Maciços**

Segundo Massad (2003) permeabilidade, ou coeficiente de permeabilidade, é o coeficiente que mensura a resistência "viscosa" ao fluxo de água do meio e varia numa faixa muito ampla de valores. Este fato, acrescido a sua grande variabilidade para uma mesma rocha ou depósito de solo, torna para o autor à "determinação experimental problemática", por esse motivo o coeficiente não varia em termos

percentuais, mas sim em magnitudes ou em ordens de grandeza (por exemplo,  $10^{-2}$  ou  $10^{-3}$ ) representando intervalos de permeabilidade.

Para maciços rochosos, a permeabilidade pode assumir duas formas principais: primária e secundária. A permeabilidade primária está relacionada às propriedades intrínsecas do material, especificamente à sua porosidade. Por outro lado, a permeabilidade secundária está vinculada ao grau de fraturamento ou carsificação da rocha.

Frequentemente, visto que a permeabilidade da matriz rochosa geralmente é bastante reduzida, a permeabilidade secundária tende a desempenhar um papel mais significativo no controle do escoamento. Essa característica se evidencia como o fator predominante que influencia a capacidade de fluxo em maciços rochosos.

Neste caso, a permeabilidade é a medida da capacidade que um maciço tem de transmitir um fluido e o seu coeficiente é definido pela velocidade de percolação do líquido através do maciço, chamado de escoamento hidráulico. Este depende das propriedades do meio, da viscosidade e densidade do líquido que o atravessa.

A lei de Darcy, válida para meios porosos, é também válida simplificada para meios fraturados, embora seja uma lei que assume escoamento laminar através de superfícies planas e paralelas. Pode enunciar-se como:

$$V = k * i \quad 2.1$$

Onde:

V = velocidade de escoamento darciana;

k = condutividade hidráulica;

i = gradiente hidráulico.

Para escoamento turbulento ou para altas velocidade a equação 2.1 não se aplica. Por esse motivo o limite da utilização válida da equação de Darcy é definido pelo coeficiente de Reynolds (abreviado como Re). O Re é um número adimensional usado na mecânica de fluidos para o cálculo do regime de escoamento de um determinado fluido e expressa a relação entre forças de inercia e viscosidade da água (FARINHA, 2010 *apud* LOPES, 2020). O valor é calculado pela equação:

$$Re = \frac{Dh * \bar{v}}{\nu} \quad 2.2$$

Onde:

Dh = Diâmetro hidráulico da fissura;  
 $\bar{u}$  = Velocidade média do fluxo na fissura;  
 $\nu$  = Viscosidade cinemática da água.

Azevedo e Alborque Filho (1998 *apud* Lopes, 2020), baseados na lei de Poiseuille, definem que a determinação do escoamento pode ser calculada como:

$$q = \frac{g * e^3}{12 * \mu} * i * \frac{1}{[1 + C * (\frac{Ra}{DH})^{\frac{1}{5}}]} \quad 2.3$$

Onde:

q = vazão específica;

g = Gravidade

e = Abertura da descontinuidade;

Ra = Rugosidade absoluta;

Ra / DH = rugosidade relativa;

C = Constante empírica (associada às perdas de carga no escoamento e depende o material);

$\mu$  = Viscosidade dinâmica da água.

Para fluxos laminares, a rugosidade Ra é nula, dessa forma, a vazão específica (q) e a condutividade hidráulica na fratura (kf) podem ser escritas pelas Equações 2.4 e 2.5 (Azevedo e Albuquerque Filho, *op. Cit.*).

$$q = \frac{g * e^3}{12 * \mu} * i \quad 2.4$$

$$Kf = \frac{g * e^3}{12 * \mu} \quad 2.5$$

De acordo com os autores, a aplicação de teorias de fluxo em meios fraturados confirmou que a vazão específica e o gradiente hidráulico são proporcionais, podendo nesta condição ser correlacionado a condutividade hidráulica (kf) com a abertura da fratura, seguindo a Equação 2.5.

$$Kf = C * e^{\beta} \quad 2.6$$

Onde:

C = Constante empírica que depende o material (Concreto = 8,8; Granito =20,5);

$\beta$  = Índice em função do regime de fluxo e da rugosidade (variando de 1,0 e 3,0);

Os autores (*op. Cit.*) afirmam que a partir de uma determinada escala de análise, densidade de descontinuidade e condutividade é admissível assumir o conceito de maciço homogêneo, dessa forma simplificada é possível determinar a condutividade hidráulica do maciço (Figura 2.1) a partir da Equação 2.7.

$$k_m = \frac{e}{l} * k_f + k_r \quad 2.7$$

Onde:

$k_m$  = Condutividade hidráulica do maciço

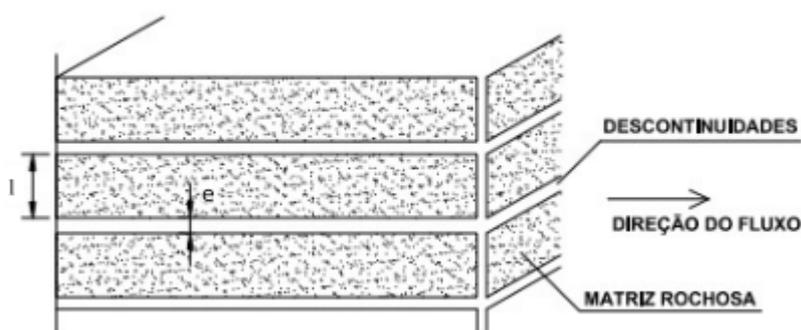
$l$  = Espaçamento entre descontinuidades

$e$  = Abertura das fraturas;

$k_f$  = Condutividade das fraturas;

$k_r$  = Condutividade hidráulica da matriz rochosa (condutividade da porosidade primária da rocha, geralmente desprezada em rochas ígneas e metamórficas devido aos baixos valores apresentados);

Figura 2.1 - Parâmetros de análise de um meio fraturado

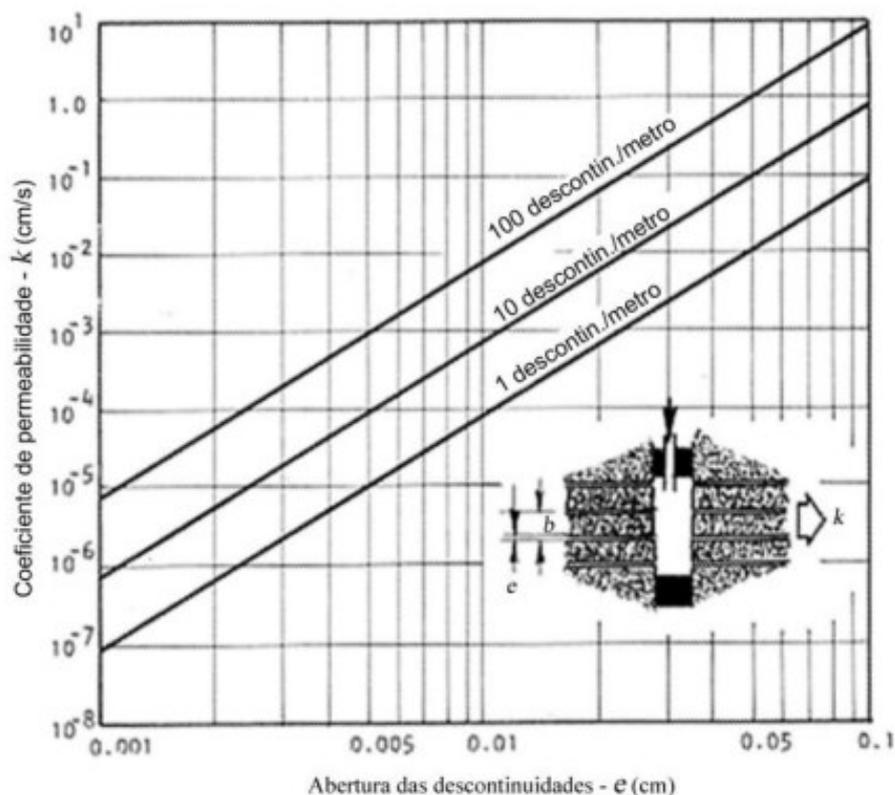


Fonte: Levis (2012)

Zhang (2017) dispôs de uma série de análises estatísticas em sua obra sobre a variação da permeabilidade intrínseca (primária)  $K$  nos maciços rochosos dependendo que o coeficiente de permeabilidade aumenta, praticamente, de modo linear com o aumento da porosidade  $n$  da matriz rochosa.

Da mesma forma, Hoek e Bray (1981 *apud* LOPES, 2020) apresentam (Figura 2.2) a relação entre o coeficiente de permeabilidade e a espessura da descontinuidade possui o mesmo comportamento crescente linear.

Figura 2.2 - Influência da abertura ( $e$ ) e do espaçamento ( $b$ ) na estimativa do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) com fluxo na direção paralela a um conjunto de descontinuidades lisas

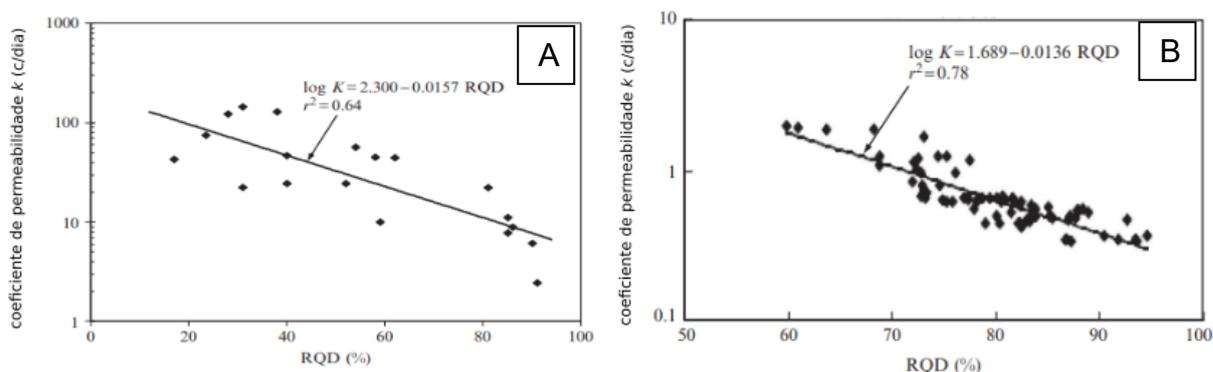


Por fim, Zhag (*op. Cit.*) cita que na avaliação de El-Naga em 2001 (Figura 2.3A) e, Zhag *et al* em 2019 (Figura 2.3B), a relação entre coeficiente de permeabilidade e o RQD é decrescente linear, ou seja, de forma geral, tanto mais alterado é o maciço rochoso, linearmente crescente é sua condutividade hidráulica.

Na prática Lopes (2020), indica que a determinação da abertura de fissuras e condutividade de fraturas em maciços é extremamente difícil e imprecisa, sendo assim, recomenda-se utilizar o conceito de transmissividade (utilizado na hidrogeologia para descrever a capacidade de um aquífero) para realizar ensaios *in situ* de parametrização do maciço.

Os ensaios *in situ* tem como objetivo medir o coeficiente de permeabilidade ( $k$ ) do maciço rochoso. Dentre estes ensaios, o mais adotado é o ensaio de perda d'água sob pressão (furo único), porém existem casos de aplicação do ensaio de perda d'água tridimensional (múltiplos furos) (LOPES, 2015).

Figura 2.3 - Variação de permeabilidade em função do RQD.



Fonte: Adaptado de Zhang (2017)

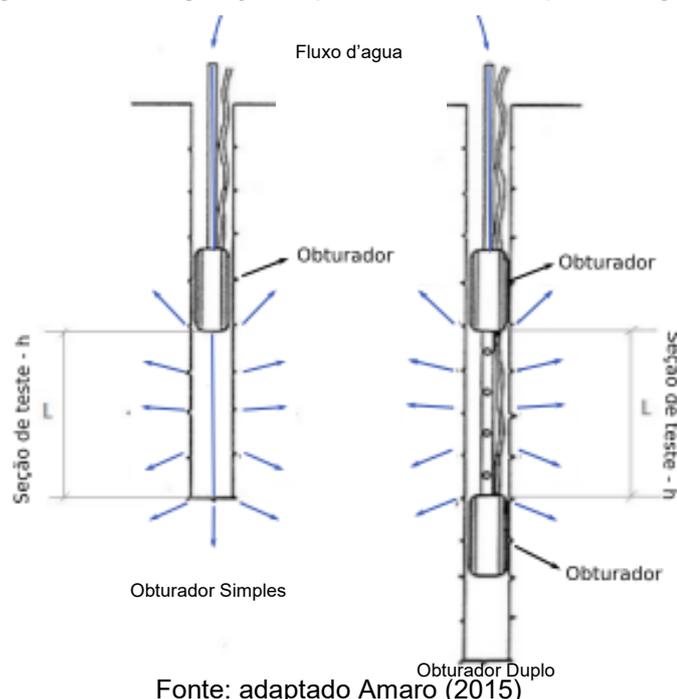
### 2.1.3 Ensaios de Perda D'Água

O Ensaio de Perda d'Água (EPA), ou ensaio de Louge, surgiu da necessidade de determinar a permeabilidade de maciços rochosos de fundação em barragens. O ensaio foi proposto inicialmente pelo geólogo francês Maurice Lugeon em 1930 na reunião da sociedade suíça dos Engenheiros e Arquitetos em 1932, a obra "*Barrages et Géologie. Méthodes de recherches – terrassements et foundations*" e posteriormente editada pela *Librairie de l'Université* (Lugeon, 1933).

Na época, Lugeon constatou que as análises feitas através de testes de absorção de caldas de cimento durante a execução de cortinas de injeção eram inconsistentes devido à dificuldade de avaliar e correlacionar a absorção de caldas na fundação. Isso ocorria, pois, na grande maioria das vezes, elas possuíam composições, texturas e viscosidades diferentes. Lugeon propôs realizar injeções com água previamente à execução das injeções com calda de cimento para solucionar o problema.

A execução do ensaio compreende a selagem de sucessivos trechos de um furo longitudinal com um ou dois obturadores (Figura 2.4), seguido de injeções de água sob pressão por um determinado tempo. O ensaio obtém o valor de pressão de injeção, o volume d'água injetada e o tempo de execução do mesmo (LEVIS, 2006).

Figura 2.4 - Configurações típicas do ensaio de perda d'água



O ensaio original de Lugeon consistia em aplicar em todos os trechos ensaiados, qualquer que fosse sua profundidade injeções d'água sob a pressão de 1 MPa (10 kgf/cm<sup>2</sup>) e medir a vazão penetrante no maciço. A unidade Lugeon corresponde à 1,0 l/m.min.10atm, ou seja, é a 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, a partir do ensaio, adotaram-se as seguintes hipóteses para avaliar a injetabilidade do maciço rochoso (PORTO, 2002 *apud* LEVIS 2006):

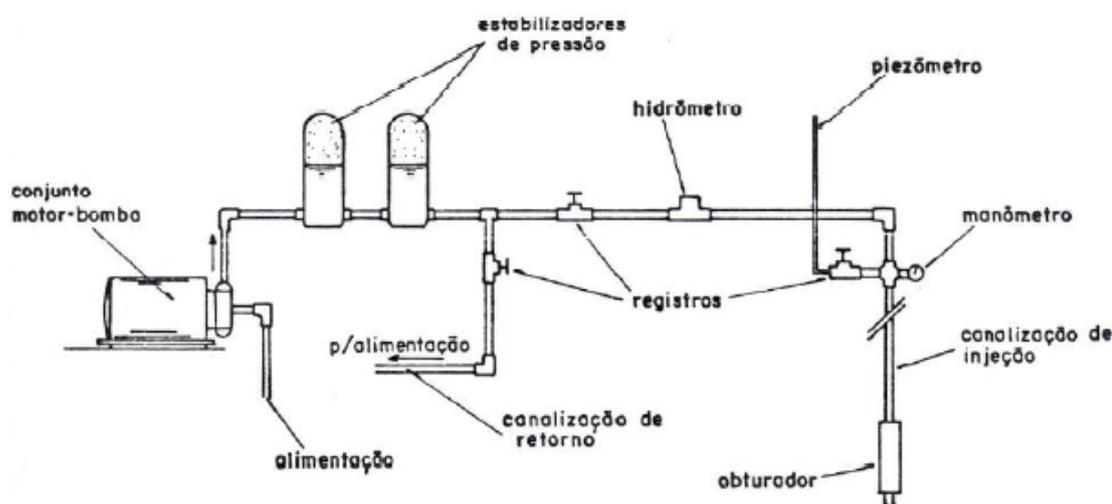
- a) A rocha do maciço é considerada estanque ou de baixa permeabilidade, quando o ensaio de perda d'água apresentar um resultado menor que a unidade Lugeon (1l/min.m.10atm);
- b) A rocha do maciço é considerada permeável quando o ensaio de perda d'água apresentar resultado maior do que a unidade Lugeon (1l/min.m.10atm);

A aplicação do Ensaio de Lougen foi utilizada a partir da década de 50 no Brasil, porém com importantes modificações conforme descritas por Corrêa Filho e Lyomasa (1983 *apud* Lopes, 2015):

- a) Em 1954, as pressões de injeção de água passaram a ser relacionadas com a profundidade, sendo aplicado 10 kPa (0,1 kgf/cm<sup>2</sup>) de profundidade do trecho ensaiado, correspondendo a 2 kPa (0,2

- kfg/cm<sup>2</sup>) por metro de profundidade de furo, aproximadamente. Desta forma, para o ensaio realizado nessa nova condição de pressão foi introduzida uma nova unidade expressa em litro/(min.metro.kgf/cm<sup>2</sup>), a unidade de perda d'água específica (PE). Esse critério de pressão máxima do ensaio relacionado com a profundidade do trecho ensaiado é aplicado até hoje. O objetivo do critério é que para definir a pressão máxima do ensaio, a pressão aplicada em uma hipotética fissura plana da rocha deve ser menor à pressão provocada pelo peso do bloco de rocha situado acima dessa fissura, evitando, assim, alterações dos parâmetros geomecânicos e hidrogeológicos das fraturas da rocha;
- b) Em 1968, as pressões efetivas de cálculo do valor da perda d'água passaram a levar em consideração os efeitos do atrito exercido pela água nas paredes internas das tubulações e conexões utilizadas na composição do ensaio;
  - c) Em 1975, a ABGE editou a diretrizes para execução dos ensaios de perda d'água, no intuito de padronização os procedimentos de execução, equipamentos (Figura 2.5), cálculos, interpretação e comparação dos resultados obtidos nos ensaios de diversas obras em território brasileiro;
  - d) Desde então, pouco foi acrescentado aos procedimentos do ensaio.

Figura 2.5 - Esquema de montagem para ensaio de perda de carga e perda d'água sob pressão proposto pelo manual da ABGE.



Fonte: Oliveira, Silva e Ferreira Jr (1975)

Porto (2002, *apud* Lopes, 2015) orienta a execução do ensaio durante a perfuração dos furos de sondagens e em trechos descendentes (3 m a 6 m), interrompem a perfuração para a executa-se o ensaio ao se atingir o trecho a ser ensaiado, e em seguida, retoma-se a perfuração, até a conclusão do próximo trecho. Há também a execução do ensaio no modelo de trechos ascendentes, utilizando dois obturadores e, perfurando o furo de sondagem antes do início dos ensaios. Para o autor, a confiança no ensaio descendentes é maior, quando comparada com os ensaios executados com a utilização de obturadores duplos. Esses obturadores dificultam a percepção na superfície de qualquer vazamento ou fuga de água do ensaio, devido a vedação imperfeita entre a borracha do obturador e a parede do furo.

Segundo Porto (*op. cit*), o EPA utiliza critérios pressões de ensaio baseados em baixas pressões, as quais devem ser aplicadas em cinco estágios, sendo dois estágios de pressão mínima, dois estágios de pressão intermediária e um estágio de pressão máxima. É exatamente este critério que foi descrito por Oliveira, Silva e Ferreira (1975, *apud* Lopes 2015) no manual da ABGE com as orientações do ensaio de perda d'água. É recomendada a aplicação de 25 kPa por metro de profundidade do obturador para determinar a pressão máxima do ensaio. A partir desta pressão, são determinados os demais estágios.

Assim, as condições de pressões são as seguintes:

- 25 kPa por metro de profundidade do obturador;
- Pressão intermediária: 50% da pressão máxima;
- Pressão mínima: 10 kPa

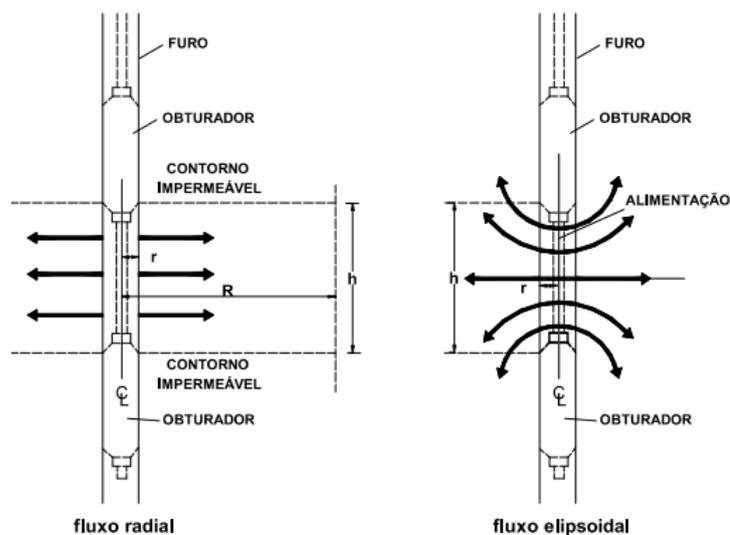
Para o autor, a utilização de baixas pressões é justificada pela consideração do peso específico médio dos maciços rochosos ensaiados ser de 27 kN/m<sup>3</sup>. Para que seja então definido a aplicação da pressão em 25 kPa por metro de profundidade do obturador e assim evitar a ruptura do maciço por hidro fraturamento.

Além do ensaio em um único furo (EPA), é possível obter uma rede tridimensional de condutividade com o monitoramento da pressão nos demais furos de sondagem no momento da execução do ensaio. Neste caso, a água é injetada em um trecho de um dos furos, enquanto a pressão é monitorada nos trechos e furos próximos. Desta forma é possível investigar a orientação e interconectividade diferentes fraturas e poros (LEVIS, 2006).

O EPA possui dois modelos de comportamento fluxo frequentemente utilizados (Figura 2.6), o modelo radial ou elipsoidal. No caso radial, assume um fluxo perpendicular e simétrico ao eixo do furo contido por limites impenetráveis acima e abaixo do trecho ensaiado e, no caso elipsoidal, assume-se um fluxo uniforme a partir da linha de alimentação no eixo do furo formando equipotenciais em elipsoides com focos nas extremidades do trecho (LEVIS, *op. Cit.*).

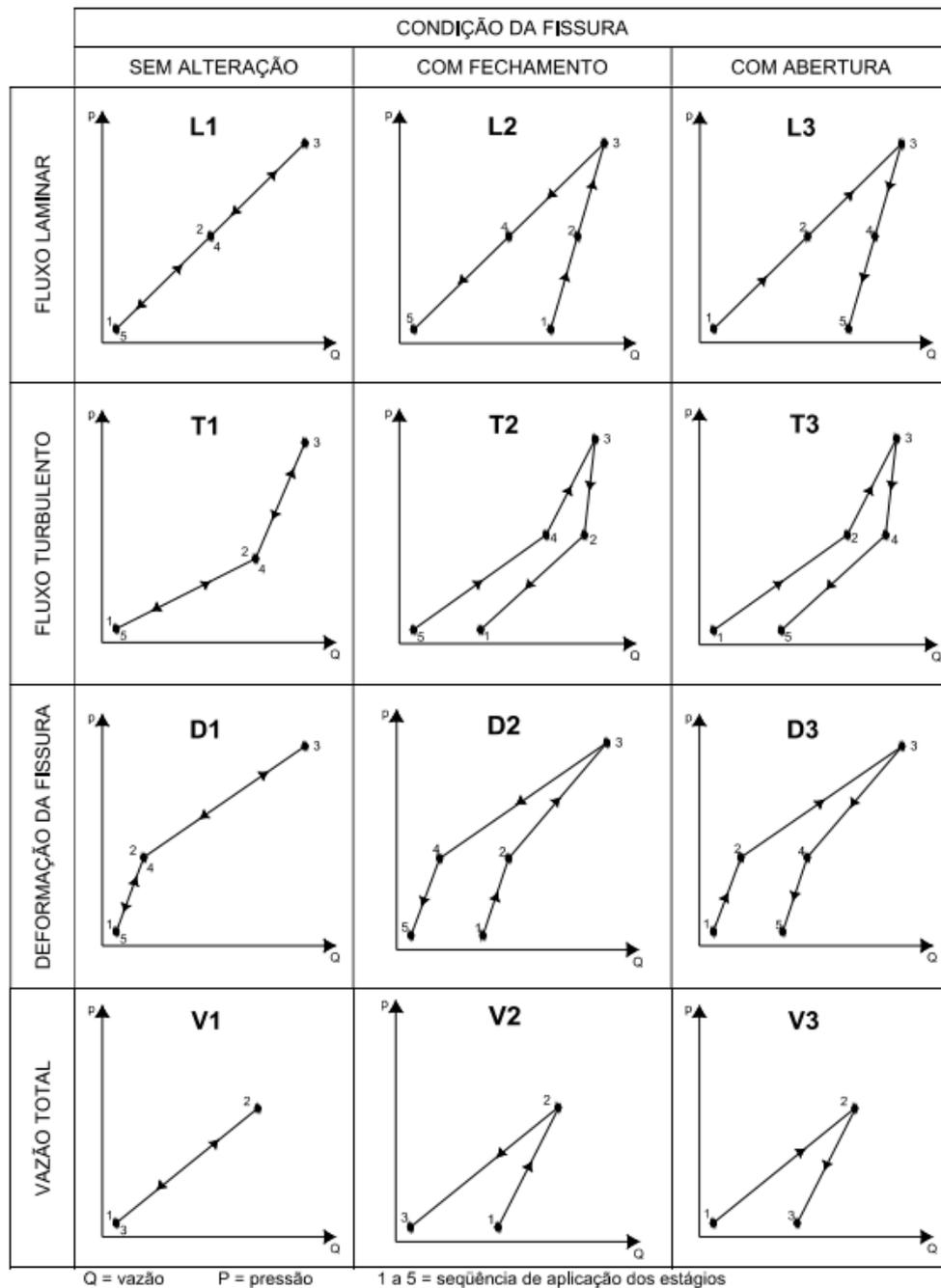
A partir da observação dos gráficos de carga efetiva x vazão obtidos no ensaio, LEVIS (2006) indica quatro casos prováveis de comportamento do maciço, mostrados na Figura 2.7. O autor indica que Oliveira, Silva e Ferreira Jr (1975) definem o regime laminar sem alteração das condições físicas das fissuras (caso L1) como a condição necessária para o cálculo do coeficiente de permeabilidade. Para os demais casos, os autores sugerem a adoção dos valores do primeiro estágio de pressão.

Figura 2.6 - Modelos de fluxo considerados na análise de ensaios de furo único



Fonte: Levis (2006)

Figura 2.7 - Casos teoricamente esperados de comportamento do trecho ensaiado



Fonte: Levis (2006)

Somente considerando as condições do caso L1, procede-se à análise quando não se dispõe de leituras de pressão de um transdutor instalado no trecho de ensaio, mas apenas de um manômetro na superfície, como mostrado abaixo.

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

$$p_e = \frac{H_a}{10} + H_m + p_c \quad (\text{kgf/cm}^2) \quad 2.8$$

Onde:

$H_a$  = carga da coluna d'água (m);

$\rho_m$  = pressão manométrica medida no topo do furo (kgf/cm<sup>2</sup>);

$\rho_c$  = perda de carga na canalização (kgf/cm<sup>2</sup>).

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

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

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

$H_a = -h'_{NA} * h_m \rightarrow$  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) com a Equação 2.9:

$$PE = \frac{Q}{h * p_e} \text{ (l/m.min.kgf/cm}^2\text{)} \quad 2.9$$

Onde:

$Q$  = vazão (l/min);

$p_e$  = carga efetiva aplicada no trecho (kgf/cm<sup>2</sup>).

Com o PE determinado para se obter o valor do coeficiente de permeabilidade ( $k$ ), é necessário utilizar o fator de conversão  $1,66 \times 10^4$  e aplicar dedução da equação 2.9. Portanto:

$$k = \frac{Q}{2 * \pi * h * p_e} * \ln \frac{0,66 * h}{r} \quad 2.10$$

$$k = \frac{1,66 * 10^{-4} * PE}{2 * \pi} * \ln \frac{0,66 * h}{r} \quad 2.11$$

Chamando  $F_f = \ln \frac{0,66 * h}{r}$  de fator de forma, tem-se: 2.12

$$k = \frac{1,66 * 10^{-4} * PE}{2 * \pi} * F_f \quad 2.13$$

E, ainda, considerando:

$$F = \frac{1,66 * 10^{-4}}{2 * \pi} * F_f \quad 2.14$$

Resulta na equação 2.14, no qual o coeficiente de permeabilidade (k) em cm/s é determinado dado por:

$$k = PE * F \quad 2.15$$

Onde:

Q = vazão (l/min);

$p_e$  = carga efetiva aplicada no trecho (kgf/cm<sup>2</sup>).

Zeigler (1976 *apud* LEVIS, 2006) compilou as principais equações utilizadas para o cálculo do coeficiente de permeabilidade (k). 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 frequentes no cálculo de permeabilidade

EQUAÇÕES DE PERMEABILIDADE			
Autor	Ano	Permeabilidade	
Hvorslev	1951	$k = \frac{Q}{h*H_c} \left\{ \frac{1}{2*\pi} * \ln \left[ \frac{h}{2*r} + \sqrt{1 + \left( \frac{h}{2*r} \right)^2} \right] \right\}$	2.16a
		$K = \frac{Q}{h*H_c} \left[ \frac{1}{2*r} * \ln \left( \frac{R}{r} \right) \right]$	2.15b
USBR	1965	$k = \frac{Q}{h*H_c} \left[ \frac{1}{2*r} * \sin h^{-1} \left( \frac{h}{2*r} \right)^2 \right], \text{ para } 10 > \frac{h}{r} > 1$	2.17a
		$k = \frac{Q}{h*H_c} \left[ \frac{1}{2*r} * \ln \left( \frac{h}{r} \right) \right], \text{ para } \frac{h}{r} > 10$	2.16b
Moye	1967	$k = \frac{Q}{h*H_c} \left\{ \frac{1}{2*\pi} \left[ 1 + \ln \left( \frac{h}{2*r} \right) \right] \right\}$	2.18

Fonte: Modificado de Zeigler (2010, *apud* LEVIS 2006)

Onde:

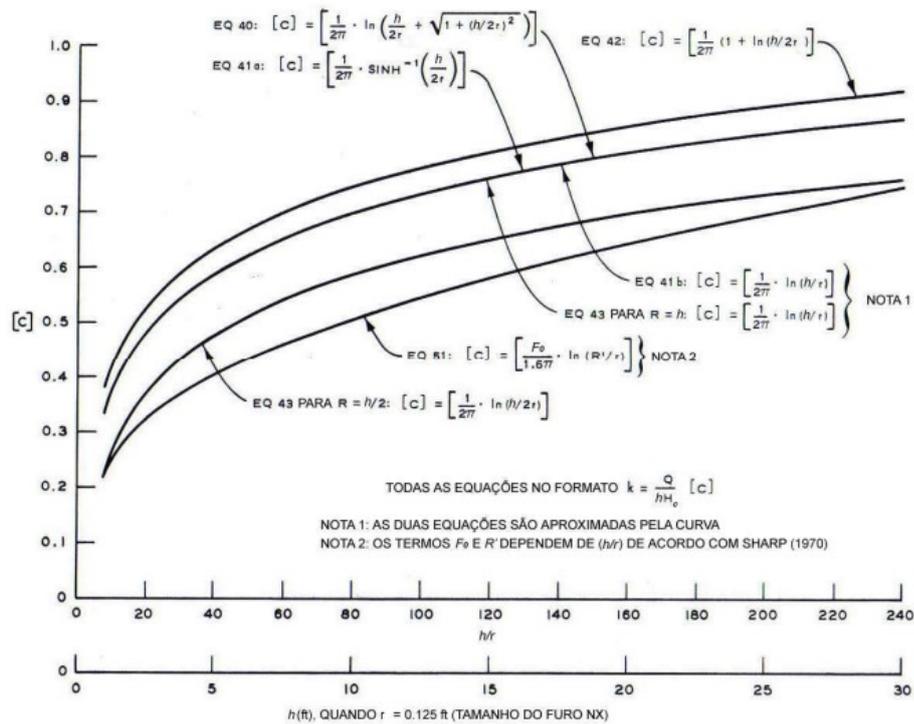
$H_c$  = carga piezométrica no centro do trecho ensaiado (L);

r = raio do furo (L);

R = raio de influência do ensaio (L), distância radial a partir da seção ensaiada correspondente a perda total de carga piezométrica.

Como todas as equações apresentadas por Zeigler (1976 *apud* LEVIS, 2006) são no formato  $k = \frac{Q}{h*H_c}$ , o autor apresentou o gráfico comparativo das permeabilidades encontradas para as fórmulas (Figura 2.8).

Figura 2.8 - Comparação para as fórmulas de permeabilidade



Fonte: Modificado de Levis (2006).

Para Cruz (1979 *apud* LEVIS, 2006), como é comum o EPA interceptar feições com elevada permeabilidade, com natureza de fluxo em condição turbulenta, ou pelo menos transicional as equações acima não são validas, dessa forma, o autor propõe uma perda d'água específica turbulenta ( $PE'$ ) e uma permeabilidade turbulenta ( $k$ ):

$$PE' = 2,4 * 10^{-5} * a\sqrt{a} * N_f \text{ (l/m.min.(kgf/cm}^2\text{)}^{-2}) \quad 2.19$$

$$k' = 4\sqrt{g * a} \quad 2.20$$

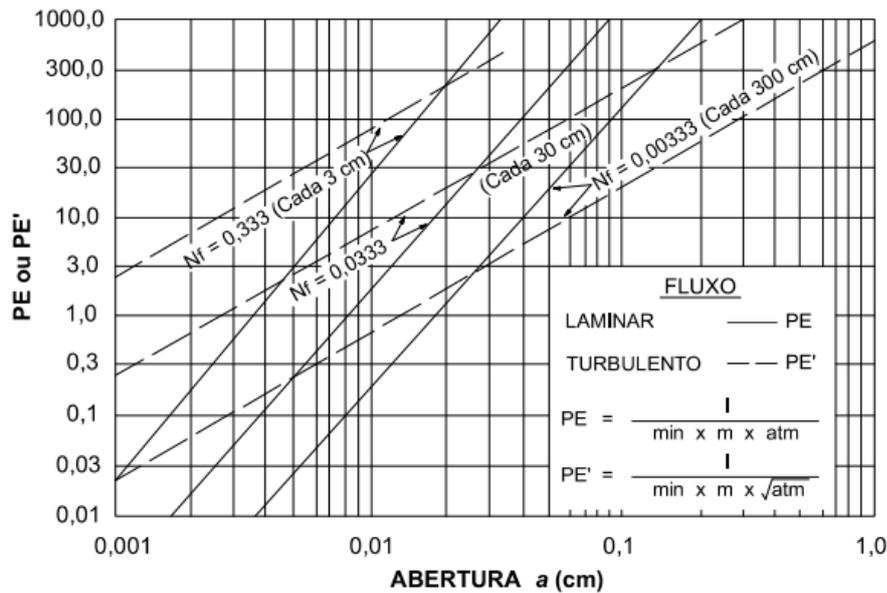
Onde:

$N_f$  = número de fraturas por centímetros no trecho ensaiado;

$g$  = aceleração da gravidade.

O autor também elaborou o gráfico presente na Figura 2.9, contrastando o regime laminar e turbulento em função a perda d'água no maciço ensaiado.

Figura 2.9 - Relação de perda d'água com abertura de fraturas.

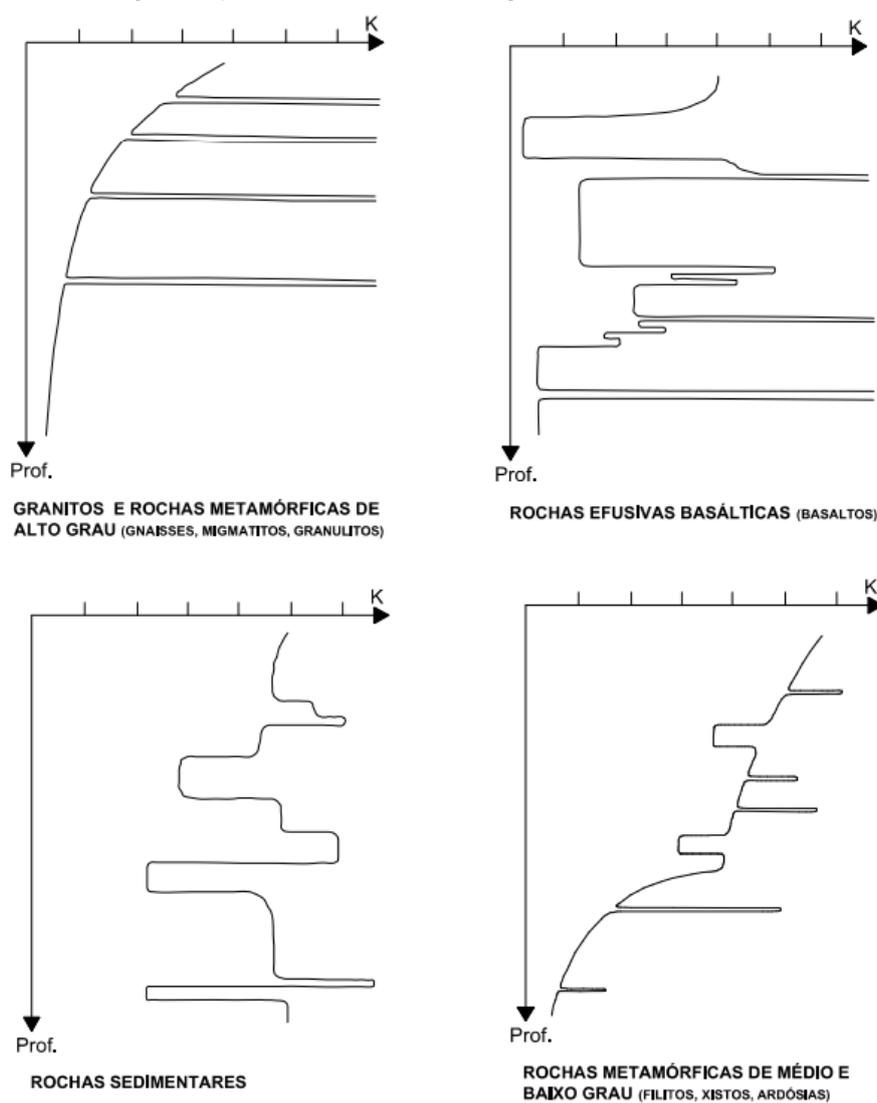


Fonte: Cruz (1979 *apud* LEVIS, 2006).

Levis (*op. Cit.*) ainda apresenta as afirmações de Azevedo e Albuquerque Filho (1998) que os maciços rochosos fraturados são meios heterogêneos e que possuem grande variação da permeabilidade com a profundidade. Para os autores rochas basálticas são as mais heterogêneas, com tendência de aumento da condutividade hidráulica nas juntas dos derrames, porém essa observação também é válida para as superfícies estratigráficas de rochas sedimentes.

Foyo *et al* (2005 *apud* LEVIS, 2006) indicam que o EPA não possibilita a definição da persistência da junta. Ainda, segundo os autores, é frequente que uma área do maciço rochoso contendo um baixo grau de juntas revele uma alta absorção de água devido a persistência da junta ou ao intemperismo do preenchimento. Em resposta a esse problema, apresentam um método de classificação do maciço rochoso através do Índice de Permeabilidade Secundária (SPI). Este índice (Tabela 2.2) corresponde 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<sup>2</sup>). Portanto, a classificação proposta não reflete a resistência da rocha intacta, mas define a qualidade da rocha baseada nas feições de permeabilidade do maciço.

Figura 2.10 - Variação de permeabilidade de maciços rochosos fraturados, com a profundidade



Fonte: Azevedo Albuquerque Filho (1998 *apud* LEVIS 2006)

Tabela 2.2 - Classificação de maciço rochosos baseada no SPI e a considerações sobre tratamento por injeção.

<b>MACIÇOS ROCHOSOS BASEADOS EM SPI E TRATAMENTO POR INJEÇÃO</b>				
		<b>Índice de Permeabilidade Secundaria "SOI" (l/s*m<sup>2</sup>)</b>		
		<b>2,16x10<sup>-14</sup></b>	<b>1,72x10<sup>-13</sup></b>	<b>1,72 x10<sup>-12</sup></b>
<b>Maciço Rochoso</b>	<b>Classe A</b>	<b>Classe B</b>	<b>Classe C</b>	<b>Classe D</b>
<b>Classificação</b>	Excelente	Bom-Médio	Pobre	Muito Pobre
<b>Tratamento por injeção</b>	Não necessário	Local	Necessário	Extensivo

Fonte: Modificado de Foyo *et al.* (2005, *apud* LEVIS 2006)

## 2.2 TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO DE BARREGENS

Para fundações o material ideal desejado é aquele que apresente pouca permeabilidade, elevada resistência e baixa deformabilidade. Todavia, na grande maioria dos casos, os materiais divergem muito destas características (LEVIS, 2006).

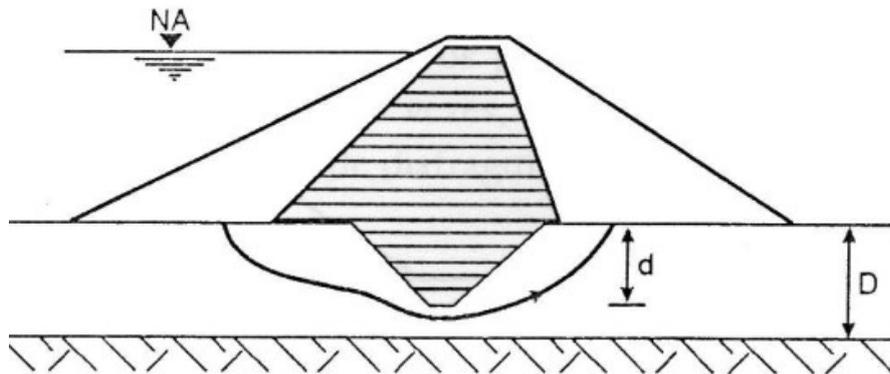
Segundo Hsu, Re & Ono (1970 *apud* LEVIS, 2006), a principal propriedade do maciço de fundação da barragem é a permeabilidade. Geralmente os materiais que apresentam altas permeabilidades e baixa resistência, são removidos. Mas, quando as características como a resistência e deformabilidade são aceitáveis e a permeabilidade do maciço apresenta-se insatisfatória dada as necessidades, torna-se proveitoso o tratamento da fundação com sistemas de vedação ou impermeabilização.

Para Cruz (1996) maciços com permeabilidade média inferior a  $5 \times 10^{-4}$  cm/s são satisfatórios e não necessitam de tratamentos, porém, essa avaliação deve ser desenvolvida junto a necessidade da barragem. Sendo recorrente exemplos de projetos que utilizam permeabilidades menores na fundação assim como de valores infinitamente maiores.

Massad (2003) apresenta os principais sistemas de tratamento de fundação utilizados no Brasil:

- Trincheira de vedação ou “*cut-off*” (escavada e recompactada): Representa a escavação dos materiais sob a base do núcleo da barragem, requerendo sua substituição ou recompactação, de modo a construir um aterro compactado com condições semelhantes do núcleo (Figura 2.11). É uma das soluções mais efetivas quando intercepta integralmente a feição permeável onde se deseja cessar o fluxo de água;

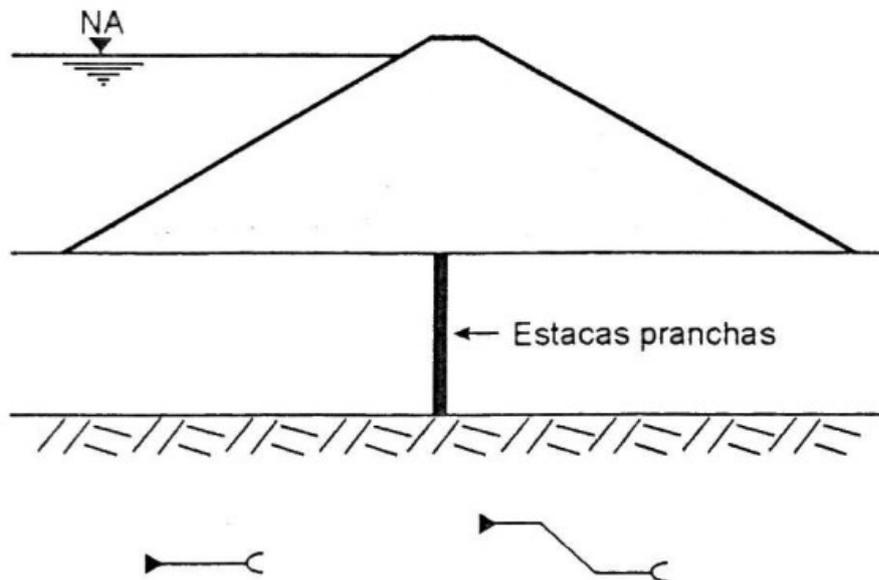
Figura 2.11 - Barragem em terra com trincheira de vedação ou *cut-off*.



Fonte: Massad (2003)

- Cortina de estacas-prancha: Esta solução, muito comum por volta de 1950, consistia na cravação de estacas-prancha metálicas, feitas de chapas bastante delgadas e formas variadas, até atingir o substrato impermeável (Figura 2.12). Entretanto, essa solução se mostrou ineficaz dada a dificuldade de construir uma sequência de estacas pranchas sem “brechas” para a percolação da água.

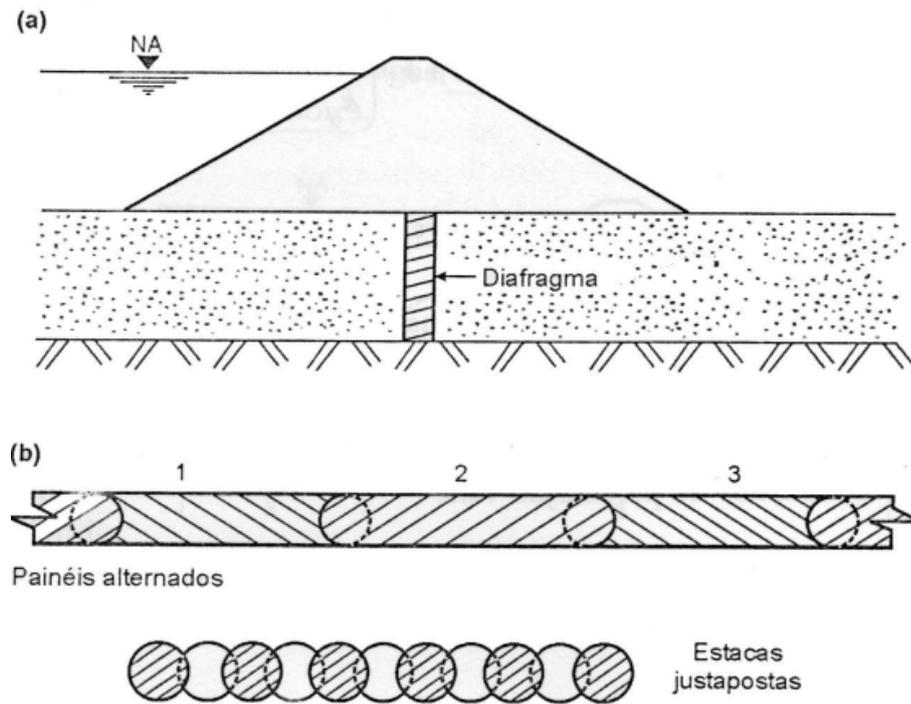
Figura 2.12 - Estaca pranchas.



Fonte: Massad (2003)

- Parede Diafragma: Pode ser rígida, plástica, colunas injetadas, colunas secantes de concreto etc. É construída sob a zona do núcleo das barragens e utilizadas em formações arenosas e cascalhosas, consiste na escavação de uma vala estreita ou "ranhura" e seu preenchimento com uma mistura de solo, cimento ou com concreto (Figura 2.13);

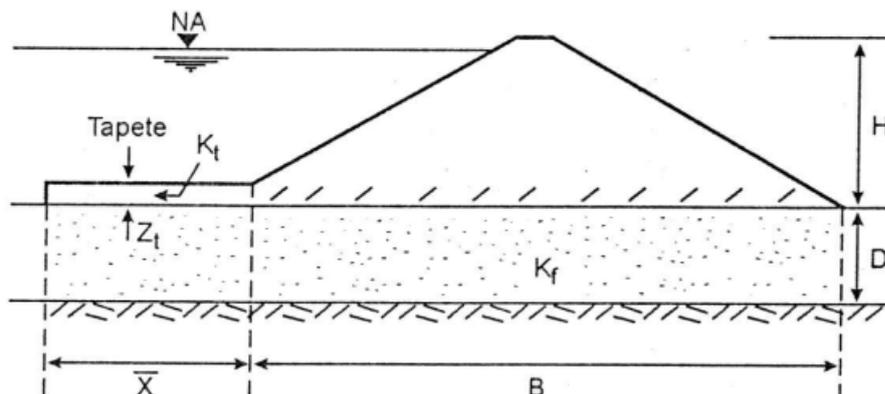
Figura 2.13 - Diafragmas para interceptar o fluxo de água pelas fundações da barragem.



Fonte: Massad (2003)

- Tapete Impermeável: Construído a montante e conectado à seção impermeável da barragem, em combinação com um sistema de drenagem a jusante (Figura 2.14). Seu objetivo é reduzir o gradiente hidráulico através da fundação, adicionando um caminho de percolação sob a barragem;

Figura 2.14 - Barragem com tapete impermeável de montante.

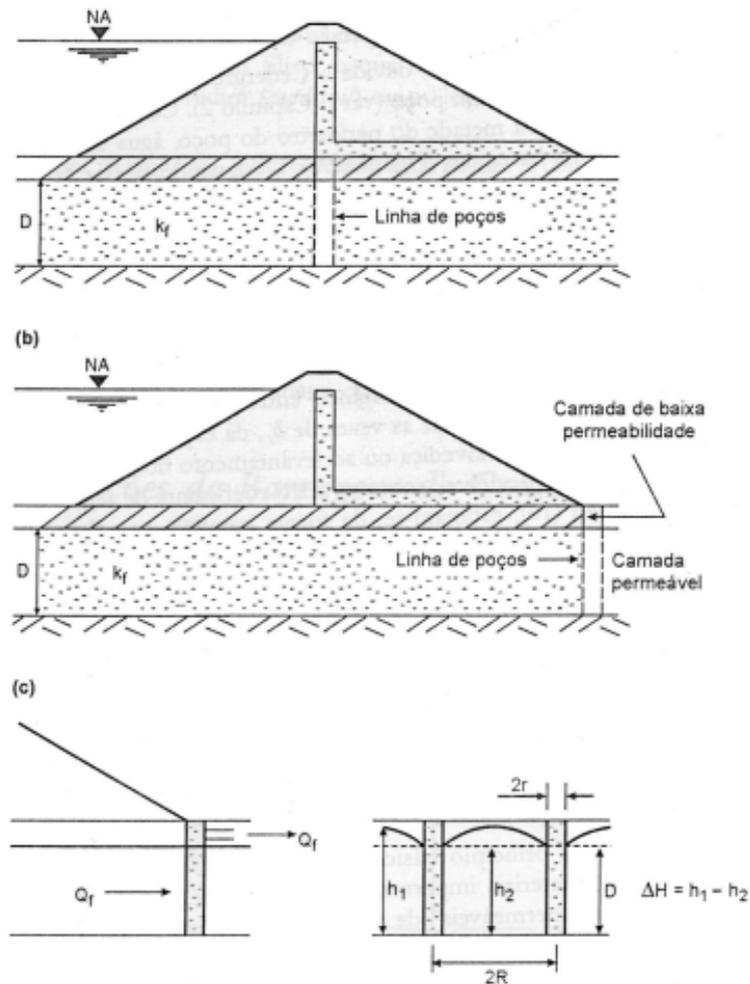


Fonte: Massad (2003)

- Poços de alívio: Construído sob a barragem, trata-se de poços abertos e preenchidos com material granular, mais permeável que o solo de fundação. Com o objetivo de controlar a saída d'água, (Figura 2.15).

este sistema impede a saída ascendente do fluxo junto ao pé do talude de jusante, que pode levar a formação de poro-pressão elevadas e, conseqüentemente, tornar o solo suscetível a uma situação colapsável.

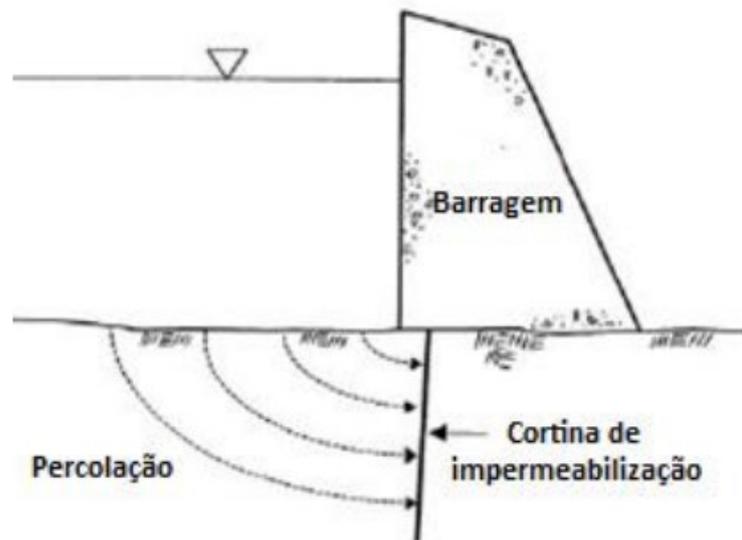
Figura 2.15 - Barragem com poços de alívio.



Fonte: Massad (2003)

- **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 com injeção de calda de cimento. Para Mello (1975 *apud* GAMA, 2012) esta técnica tem a função de preencher os principais poros e fissuras da fundação, “homogeneizando” a fundação do maciço afim de melhorar as condições de estanqueidade aceitáveis (Figura 2.16).

Figura 2.16 - Cortina de Injeção o seu papel em diminuir o gradiente hidráulico.

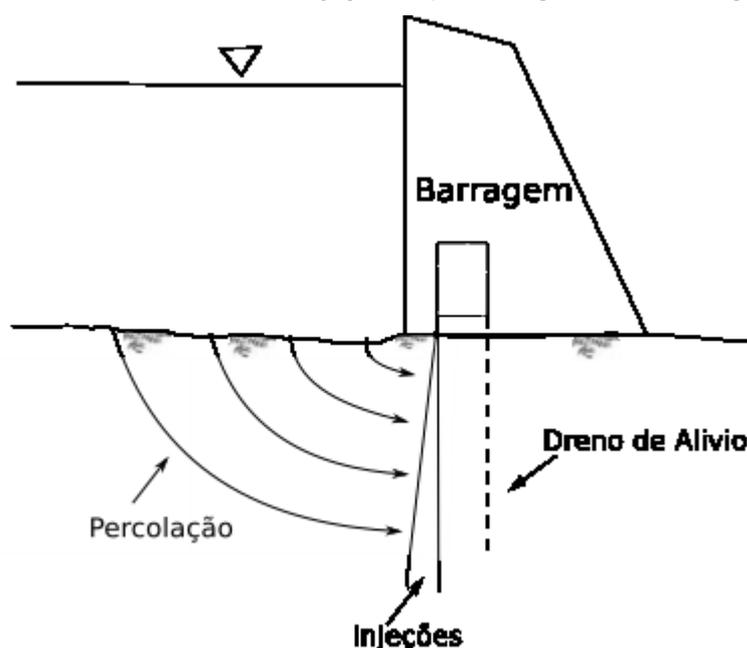


Fonte: Gama (2012)

No caso das injeções de calda de cimento, deve-se complementar o tratamento com a execução de drenos, visando controlar a percolação de água de remanescente e reduzir as subpressões nas zonas do maciço. A importância desta questão reside no fato de que, mesmo quando as injeções se revelam eficazes, os valores correspondentes podem potencialmente comprometer as condições de estabilidade da barragem (ANA, 2016; LEVIS, 2006).

Segundo Porto (2002 *apud* LEVIS 2006), as cortinas de drenagem são formadas em uma linha sequencial de furos igualmente espaçados e dispostos a jusante da cortina de injeção. Seu objetivo consiste em drenar as águas que fluem através do maciço e aliviar as supressões impostas pela carga hidráulica do reservatório (Figura 2.17).

Figura 2.17 - Drenos de alívio e injeções a partir da galeria de drenagem.



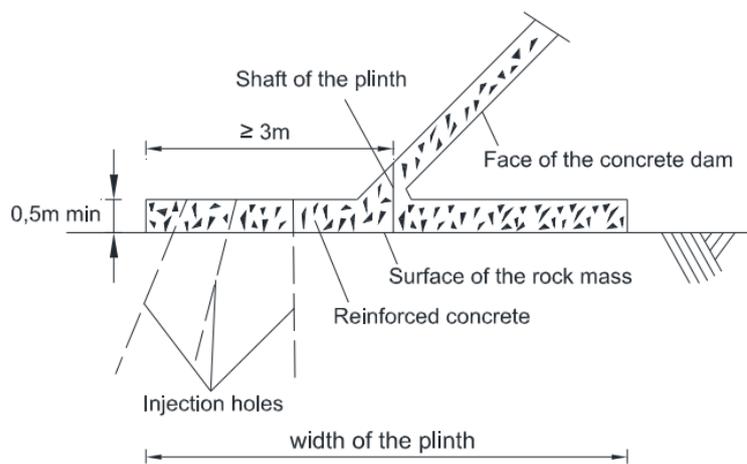
Fonte: Adaptado de Gama (2012).

A profundidade dos drenos deve ser definida de modo a interceptar as principais zonas permeáveis do maciço de fundação, com o espaçamento entre os drenos, geralmente, variando entre 3 m e 5 m. No evento em que uma cortina de injeção é planejada para ser executada a partir da mesma galeria na qual os drenos serão instalados, conforme ilustrado na Figura 2.17 é fundamental que o processo de injeção seja realizado antes da instalação dos drenos. Essa sequência é adotada com o propósito de prevenir a colmatagem dos drenos, que poderia ocorrer caso eles fossem instalados primeiro (COSTA, 2012).

- Plinto: As Barragens de Enrocamento de Face de Concreto (EFC) possuem, geralmente, em seu pé de jusante um bloco rígido de concreto não erodível (Figura 2.18) conhecido como Plinto (SIACARA *et. al.*, 2016). A construção desse bloco requer a escavação cuidadosa de uma trincheira no pé de jusante do barramento, a fim de evitar perturbações e fraturamentos no maciço rochoso da fundação. Posteriormente, é realizado um dimensionamento estrutural do bloco, baseado em análises visuais e estruturais na base de fundação, além da aplicação de procedimentos específicos para o lançamento do concreto, visando garantir uma aderência adequada entre o concreto e

a fundação rochosa (COOKE & SHERAR, 1987 *apud* SIACARA *et al.*, 2016).

Figura 2.18 - Design típico para um plinto.



Fonte: Adaptado de CHAU, 2004.

O plinto desempenha um papel fundamental no controle do fluxo de água que permeia a barragem, bem como na redução da permeabilidade da fundação. Isso resulta na diminuição da poropressão interna e no aprimoramento do desempenho global da barragem (SIACARA *et al.*, 2016). Em casos em que a barragem não é construída sobre uma rocha sólida, são necessários tratamentos adicionais, como injeções de consolidação, a fim de garantir a estabilidade da estrutura. Essas medidas visam assegurar que o bloco plinto tenha a capacidade estrutural adequada para resistir aos esforços e deformações causados pela presença do reservatório, pelas ações do barramento e pela poropressão na estrutura e sua fundação, prevenindo possíveis falhas (CHAU, 2004; USACE, 2004).

### 2.3 TRATAMENTO DE FUNDAÇÃO COM USO CORTINAS DE INJEÇÃO DE CALDA DE CIMENTO

A primeira evidência do uso do tratamento de fundação com o uso das cortinas de injeção ocorreu na França, em 1802, quando o engenheiro Charles Bérigny fez o uso do procedimento para consolidação da fundação da Eclusa do porto marítimo de Dieppe, visando a sua recuperação, empregando uma argamassa pozolânica para tratar um estrato de cascalho muito permeável. Em barramentos, a primeira aplicação

ocorreu em 1838 para o tratamento de trincas no paramento de jusante da Barragem de Grosbois, no canal de Bourgogne na França.

Entre as décadas de 50 e 80 do século XIX, a Inglaterra aprofundou o uso da injeção de calda de cimento, disseminando o processo para uma série de projetos como minas francesas e alemãs, túneis londrinos, docas escocesas e maltesas e barragens na Inglaterra (Gama, 2012). Conforme mencionado pelo autor, o primeiro documento técnico relacionado à injeção de maciços rochosos para barragens foi publicado em 1915 por engenheiros americanos, com o propósito de ser aplicado nas obras da Barragem de Estacada, localizada em Oregon, nos Estados Unidos. Entretanto, um ponto de grande relevância foi o ano de 1935, durante as obras da Barragem de Hoover, quando ocorreu o marco definitivo que impulsionou a sistematização das cortinas de injeção nos projetos de tratamento de fundações de barragens.

No Brasil, segundo Levis (2006), a primeira experiência de estudos do método foi realizada na década de 50, pelo IPT durante construção da Barragem de Barra Bonita, no Rio Tietê no estado de São Paulo. Foi somente na década de 60 que estudos extensos sobre o tema foram realizados, principalmente durante a construção da Barragem de Ilha Solteira, no Rio Paraná entre o estado de São Paulo e Mato Grosso do Sul.

Segundo Marques Filho (1986 *apud* LEVIS, 2006) as injeções podem ser executadas tanto sob depósitos sedimentares (solos) como em rochas, dependendo da finalidade da obra e, principalmente, dos métodos de execução. Em rochas, as injeções são utilizadas sob maciços fraturados (obturação de porosidade secundaria) e, raramente, sob rochas sedimentares permeáveis (obturação de porosidade primaria).

Para o autor as injeções podem ser divididas de acordo com suas finalidades:

- Injeções de Impermeabilização: São realizadas de modo a obturar fissuras e descontinuidades de qualquer tipo de rocha e porosidade primaria de depósitos sedimentares (solos), regularizando a carga hidrostática sobre a região da injeção assim reduzindo a percolação de água e as subpressões. A circulação de água em alguns casos pode ser interrompida, porém na maioria dos casos é apenas reduzida até um ponto que possa ser controlada por métodos de drenagem.

- Injeções de Consolidação: São realizadas de modo a obstruir regiões de rocha fraturada sob a fundação, a injeção tem como objetivo melhorar a resistência mecânica e seu modulo de elasticidade reduzindo assim a probabilidade de ocorrência de assentamentos que, de outra forma, poderiam ocorrer como resultado do fecho de fissuras previamente abertas, devido às ações impostas pela obra.
- Injeção de Colagem: São executadas no contato barragem-fundação com o intuito de aumentar a aderência entre a interface dos dois materiais, contribuindo para a redução da permeabilidade e da subpressão.

Para Levis (2006), os métodos utilizados na execução das cortinas de injeção devem ser elaborados visando os objetivos a serem atingidos pelo projeto. Por exemplo, em rochas maciças que apresentem porções com pequenas anomalias no gradiente hidráulico, uma linha simples de injeção é capaz de reduzir as infiltrações pela fundação, no entanto, em uma rocha fraturada com alto gradiente hidráulico uma sequência de linhas é necessária para reduzir a infiltração.

### **2.3.1 Processo Projetivo e Executivo da Cortinas de Injeção**

Segundo Marque Filho (1986) o processo de injeção geralmente implica em fases de perfuração, ensaio, injeção e de verificação. Os ensaios são os testes perda de água sob pressão (Lounge) realizados para avaliar a permeabilidade da rocha e as características das fraturas. Apesar de originalmente os ensaios serem utilizados em todos os furos de injeção o mais comum é concentrar-se nos furos iniciais e finais ou de verificação reduzindo assim a quantidade de ensaios e, conseqüentemente, simplificando o processo. Pode ser efetuando também, testes com apenas um estágio de pressão e/ou em trechos mais longos amentando a produtividade do serviço.

O equipamento de injeção convencional (Figura 2.19) geralmente consiste em:

- Misturadores: preparam a calda. São, em geral, de alta rotação com 1.000rpm ou mais, para dispersar bem os grânulos de cimento.
- Agitadores: mantem a calda homogênea.
- Bombas: injetam a calda sob pressão. Devem ter capacidade para injetar grandes vazões de calda a pressões elevadas de até 20kgf/cm<sup>2</sup>.

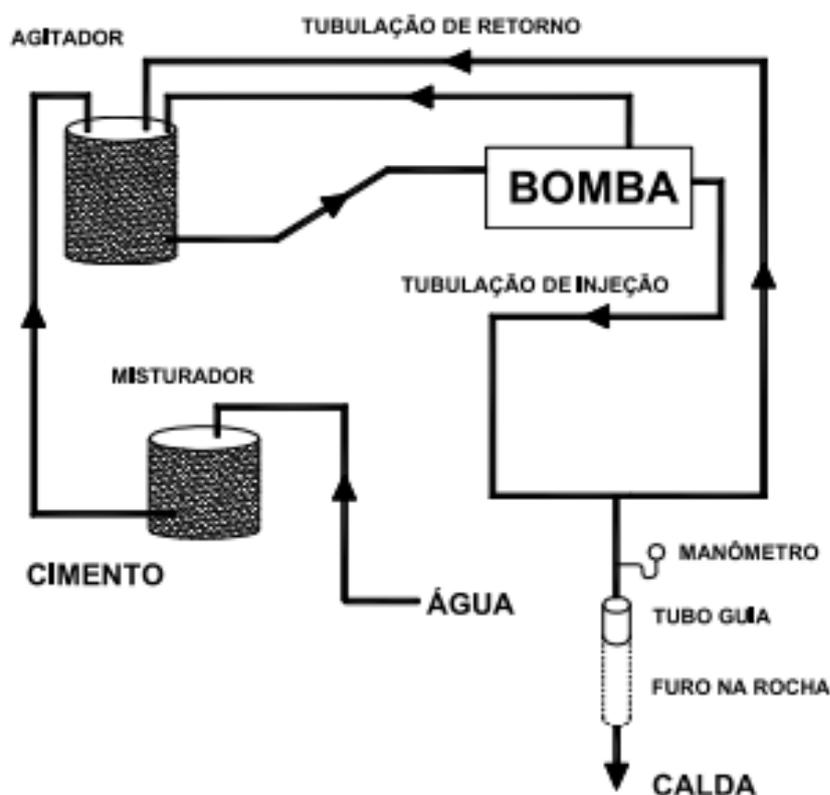
- Equipamentos complementares: mangueiras, engates rápidos, registros, manômetros e conjunto de hastes e obturador. que descem ao furo para efetuar a injeção em trechos mais profundos.

A técnica mais comum na execução de uma cortina de injeção abrange todos os trechos perfurados, realizando a injeção de maneira ascendente. Geralmente, os trechos de injeção têm uma extensão de 3,0 metros, medidos verticalmente, ou em trechos ainda mais curtos por metro.

Segundo Lopes (2020), em rochas, a injeção de calda é executada em furos abertos, geralmente, por equipamento roto-percussivo com injeção de água e ar simultaneamente para evitar detritos da perfuração impeçam a percolação da calda de cimento. Em furos executados em galerias e tuneis de drenagem podem ser utilizados perfuratrizes pneumáticas, dado o seu tamanho reduzido. Para furos executados a céu aberto, perfuratrizes hidráulicas podem ser utilizadas para aumentar a produtividade do serviço.

Os furos rotativos com retirada de testemunho são executados exclusivamente para furos exploratórios (utilizado na caracterização geológico geotécnica da rocha de fundação e estudos de permeabilidade antes do projeto de injeção) e de verificação (para verificar a condição da fundação após o tratamento), já que possuem custo na ordem de 4 a 6 vezes maior do que os roto-percussivos (MARQUE FILHO, 1986).

Figura 2.19 - Exemplo de equipamento de injeção.



Fonte: Levis (2006).

Os furos podem ser executados na vertical ou inclinados. Os trabalhos, em geral, na vertical são mais eficientes e baratos em relação aos furos inclinados, porém dependendo da disposição espacial de fraturas e trincas e das zonas de impermeabilização necessárias são requisitadas obturações inclinadas. O Comitê Suíço de Grandes Barragens indicou, no ano de 1985, que as injeções inclinadas devem ser executadas com ângulos maiores de  $30^\circ$ , no intuito de garantir que a calda atinja a maior quantidade possível de famílias de descontinuidades do maciço. (Weaver & Bruce, 2007)

A cortina de injeção na grande maioria dos casos é constituída por uma, duas ou até três linhas de furos sub-verticais ou levemente inclinadas em relação ao eixo da barragem. É frequente efetuar uma linha central que vai a maiores profundidades e duas linhas de furos mais rasos, a montante e a jusante da central.

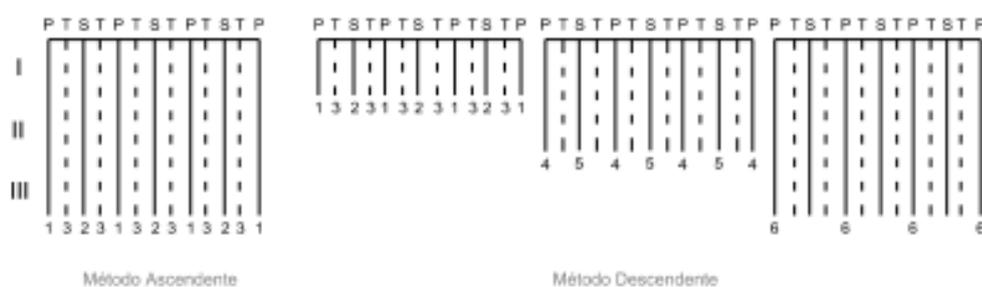
Nos primeiros 10 metros a 20 metros de injeção, os critérios devem ser mais rigorosos, e à medida que a profundidade aumenta, eles podem ser tornados menos rigorosos. Nesses trechos iniciais, o objetivo principal é identificar e vedar apenas as fraturas mais amplas e os grandes vazios.

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  $5 \times 10^{-3}$  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 hidráulica entre nível máximo 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.

Utilizando o princípio espaçamento divisional (Figura 2.20). A linha principal da cortina de injeção deve possuir e executar inicialmente os furos numa sequência espaçada com distancias relativamente e grandes uns dos outros (6 m a 12 m), chamados furos primários. Após a injeção, são abertos furos secundários, a meia distância entre os primários. E executados da mesma maneira. Se necessário, com base nas regras do projeto e resultados dos ensaios de permeabilidade podem ser abertos e injetados uma sequência de furos subsequentes (terciário, quaternários etc.) entre os furos anteriores. O espaçamento entre os furos de injeção é dividido até que se atinja o grau de impermeabilização estabelecido ou após a avaliação da execução de linhas de injeção complementares. Essa subdivisão ocorre em seções.

Figura 2.20 - Método do Espaçamento Divisional.

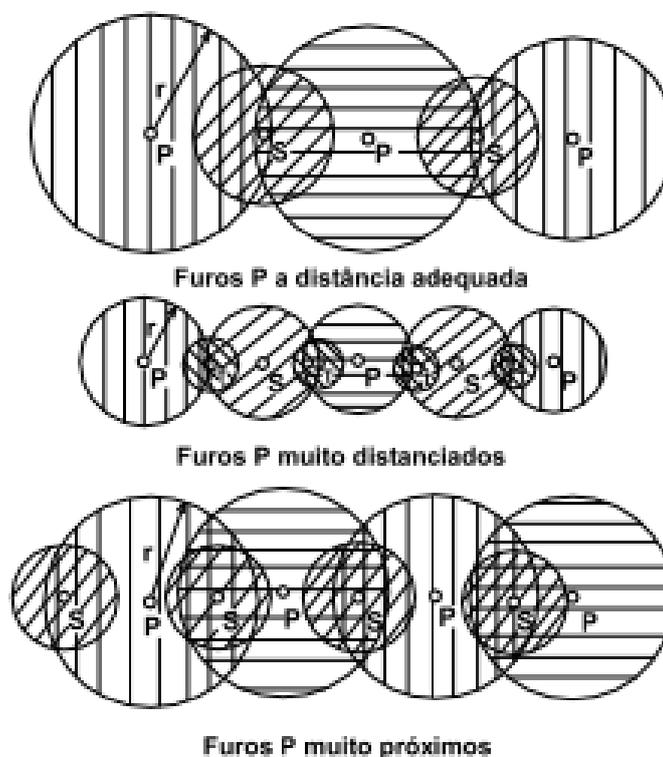


Fonte: Marques Filho (1986).

Levis (2006) afirma que a principal vantagem do método divisional é ser autoprovante, ou seja, permite avaliar a eficiência dos furos da fase anterior. No qual a cortina modelada para furos primários se distancie um pouco menos do que duas vezes o raio da seção circular de influência. Assim, os furos subsequentes são feitos quase como uma verificação e complementação conforme ilustra a Figura 2.21,

reduzindo em muito a quantidade de furos a serem executados, conseqüentemente o tempo de serviço e os custos associados.

Figura 2.21 - Modelo espaçamento mais conveniente dos furos primários.



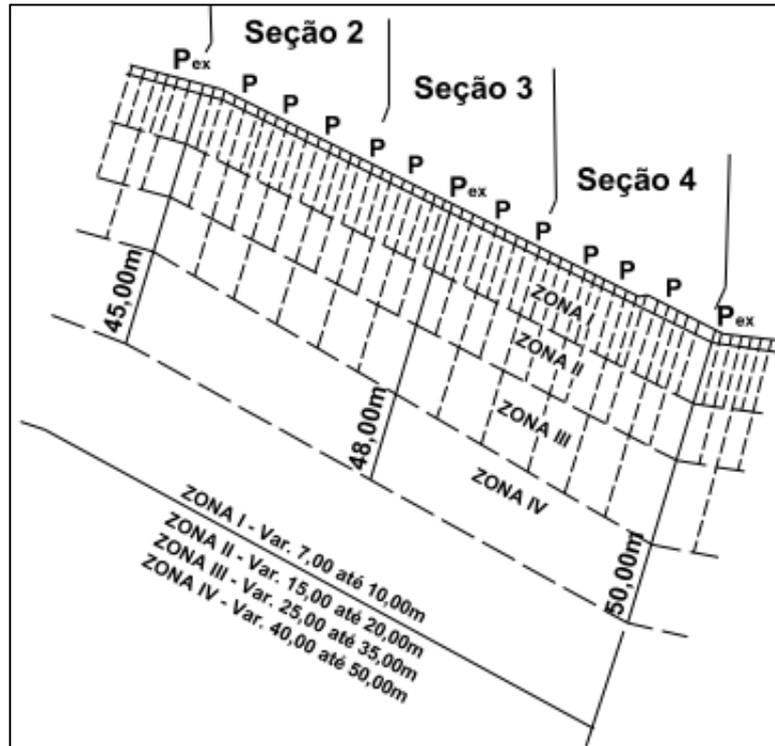
Fonte: Marques Filho (1986).

Geralmente, a programação da injeção é dividida em seções e zonas. As seções correspondem a subdivisões da cortina de injeção, representando espaços relativamente equidistantes entre uma determinada quantidade de furos primários. Em geral, essas seções representam trechos da cortina onde não é viável realizar simultaneamente os trabalhos de injeção, perfuração e ensaio. Por outro lado, as zonas são divisões feitas com base na profundidade como ilustrado na (Figura 2.22).

Existem dois métodos de execução de injeção: de maneira 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 2.23).

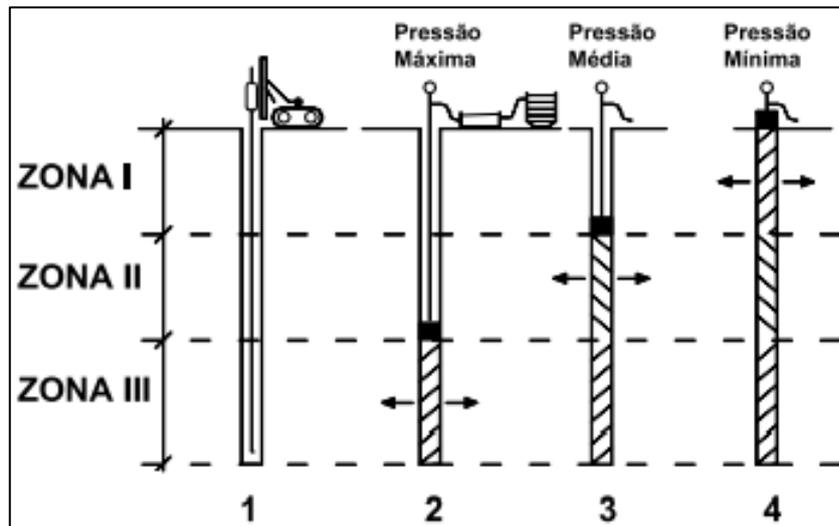
Os estágios, em geral, coincidem com a subdivisão das zonas, sendo que às vezes uma zona pode ser dividida em mais de um estágio, dependendo das suas características de permeabilidade.

Figura 2.22 Exemplo de divisão de uma cortina em seções e zonas.



Fonte: Marques Filho (1986)

Figura 2.23 - Método Ascendente.

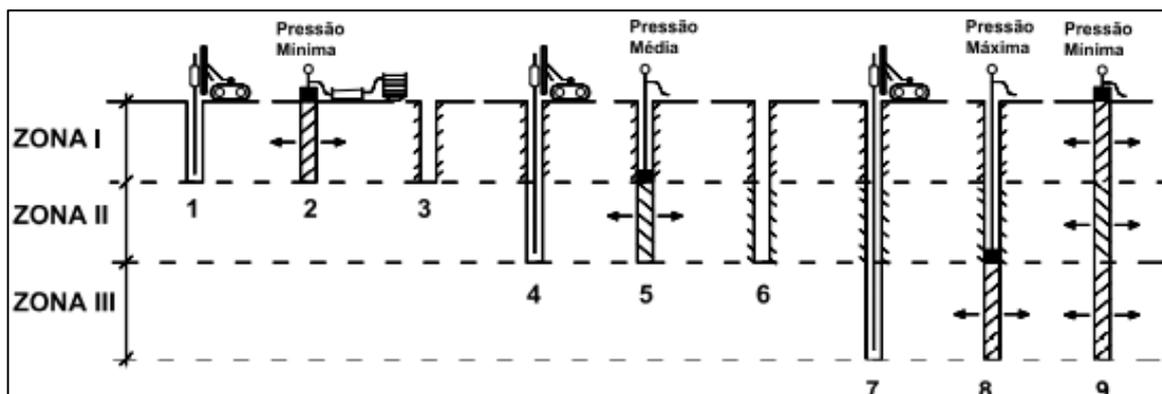


Fonte: Marques Filho (1986)

- (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 (Figura 2.24), segue-se a ordem inversa, realizando os furos até a zona subsequente, injetando-a, reabrindo o furo antes da pega final da calda, perfurando a zona seguinte e repetindo o processo até a profundidade definida em projeto para o furo.

Figura 2.24 - Método Descendente.



Fonte: 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; Perfuração da zona III (8) Injeção da zona III (pressão máxima); (9) Reinjeção e obturação.

Segundo Levis (2006), 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.

A respeito das pressões de injeção usadas, Levis (2006) apresenta duas práticas distintas comumente utilizadas, como visto na Figura 2.25.

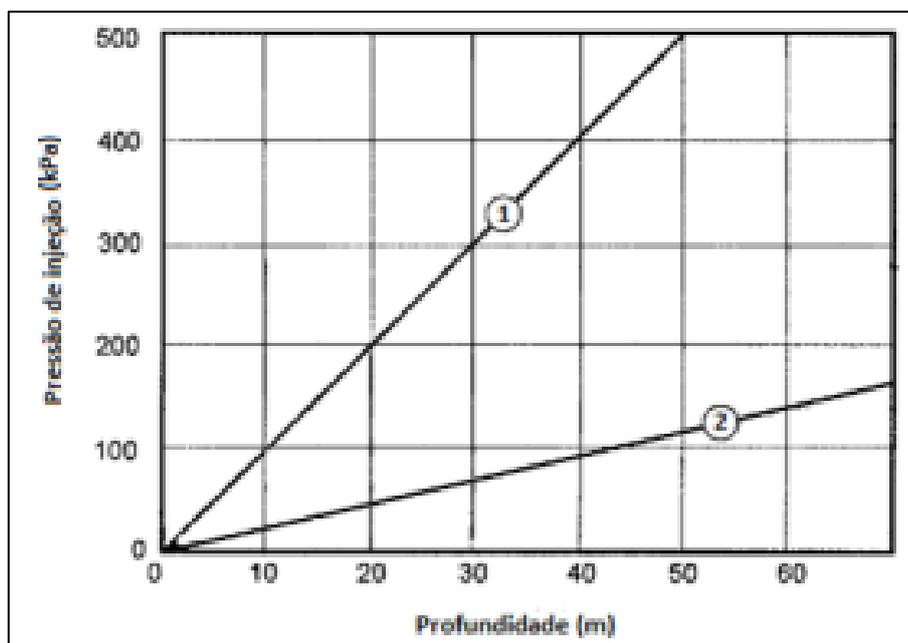
A primeira, oriundo da escola americana, utiliza de baixas pressões, em geral próximas as que podem ser calculadas pela regra prática « 1psi por pé de profundidade », o que corresponde aproximadamente a uma progressão de 0,25 kgf/cm<sup>2</sup> por metro de profundidade ou a  $\gamma h$ , ou seja, à densidade do maciço multiplicada pela profundidade da injeção.

A segunda, oriunda da escola europeia utiliza de altas pressões. Utiliza-se de gradientes na ordem de 1 kgf/cm<sup>2</sup>/metros de profundidade ou pressões ainda maiores. Neste caso a pressão é inversamente associada a vazão, deste modo, à medida que a pressão é aumentada a vazão de calda injetada é reduzida.

De acordo com Lopes (2020) a adoção de altas pressões pode gerar fraturamento hidráulico em zonas menos resistentes do maciço rochoso, além de abrir discontinuidades fechadas. Já baixas pressões reduzem a penetrabilidade da calda de cimento, diminuindo o raio de injeção e/ou o espessamento do cimento que criam caminhos preferenciais para a percolação d'água. Especialmente em rochas que possuem discontinuidades planares, como rochas sedimentares de baixa

profundidade, onde a pressão pode ocasionar desacamamento ou causar fissuras e trincas se o peso da calda ultrapassar o peso do maciço.

Figura 2.25 - Representação gráfica das pressões (1) “escola europeia” e (2) “escola americana”.



Fonte: Marques Filho (1986).

Levis (2006) sustenta que a água (presente nos ensaios de perda d'água) sob pressão é um mecanismo bastante efetivo para produzir abertura de fissuras previamente seladas, já que, a fluidez da água permite uma penetração muito mais fácil e com perdas de carga muito menores. Nas injeções com caldas, especificamente com caldas grossas, o risco reduz consideravelmente. A sensibilidade às pressões é reduzida devido à viscosidade e granulometria do cimento utilizado, o que dificulta a penetração da calda nas fissuras e limita as pressões elevadas às proximidades do furo. Isso resulta em pressões maiores no maciço do que aquelas que já produziram danos em ensaios com água.

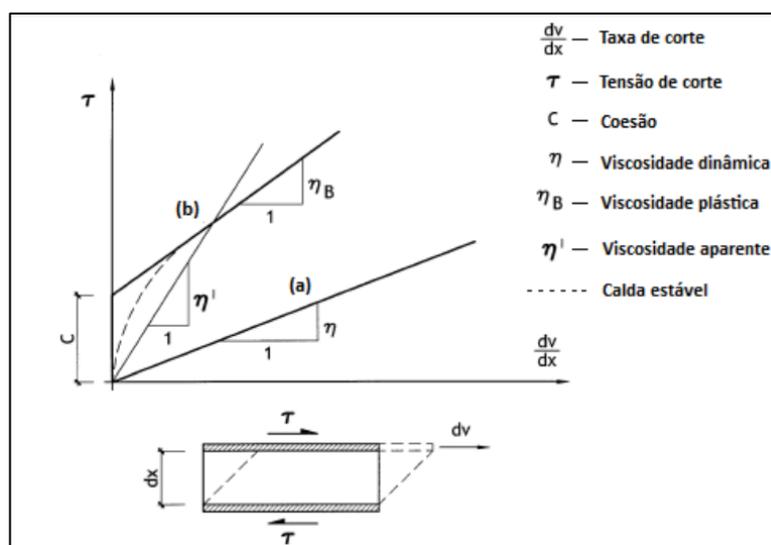
Injeções de controle fora do eixo principal são recomendadas em regiões com escasso conhecimento por Gama (2012). Ensaios servem para adquirir o coeficiente de redução de condutividade estimado para as injeções, adquirir uma estimativa média de consumo de cimento por trecho, confirmar ou adequar as ordens de furos indicadas em projeto e seus espaçamentos. Além de compatibilizar os escassos conhecimentos prévio da região com o processo de injeção, observando condições

específicas do comportamento da calda injetada e futuras dificuldades que o serviço possa possuir.

### 2.3.2 Constituição e Reologia da Calda Cimento

A Calda de cimento dependendo da composição utilizada segundo Gama (2012), pode apresentar um comportamento similar ao de fluidos newtonianos ou fluidos binghamianos como podemos ver na Figura 2.26. Nos fluidos newtonianos, a taxa de cisalhamento, ou seja, a força necessária para mover o líquido, é condicionada apenas pela viscosidade dinâmica. Isso significa que o fluido se deforma continuamente sob a aplicação de uma força tangencial, independentemente de quão pequena seja essa força. Os fluidos binghamianos exibem características como coesão, conhecida também como tixotropia, e viscosidade dinâmico-plástica. Isso implica que são fluidos com propriedades semelhantes às dos sólidos, com uma viscosidade significativa. Quando são submetidos a forças externas menores do que aquelas que mantêm sua estrutura coesa, eles se deformam de forma elástica. No entanto, quando são submetidos a forças externas suficientemente intensas para romper as forças de ligação entre as partículas, a estrutura colapsa, resultando em um comportamento líquido do fluido.

Figura 2.26 - Modelos reológicos de (a) fluidos newtonianos e (b) binghamianos.



Fonte: Gama (2012)

Fluidos como a água e gases, são ditos como soluções verdadeiras e apresentam um comportamento newtoniano, enquanto caldas estáveis e de chocolate

se comportam como fluidos binghamianos. A viscosidade, isto é, a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, de fluidos binghamianos pode ser mantida constante, porém esse comportamento pode mudar em resposta à tendência de um material para espessar ou se tornar mais fino, admitindo um comportamento sólido ou newtoniano conforme aquela taxa varia (GAMA, 2012).

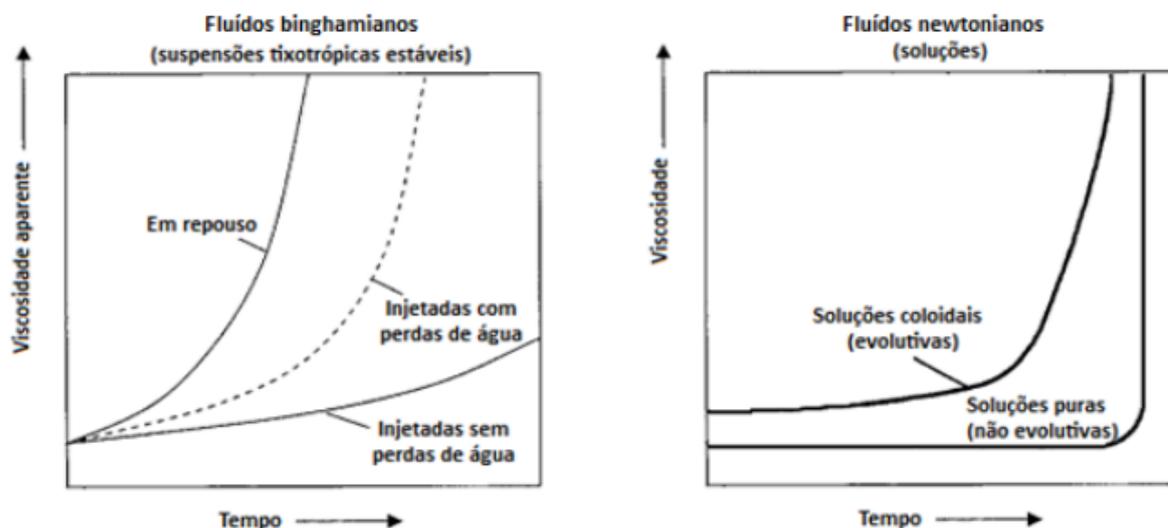
Bruce *et al.* (1997) considerando os comportamentos da calda de cimento, os agrupou em três categorias, podendo ou não ser considerada a existência de uma quarta, listando-as por ordem crescente segundo as suas características reológicas e custo de aplicação:

- I. **Caldas ou suspensões particuladas** (caldas à base de cimento). Nesta categoria encontram-se misturas de água com um ou mais tipos de sólidos particulados, como cimento, argilas ou areias e, dependendo da proporção utilizada, podem ser estáveis ou instáveis. Apresentam comportamento binghamianos e são as caldas à base de cimento mais utilizadas no tratamento de maciços rochosos (Bruce *et al.*, 1999), podem ser identificadas algumas subcategorias:
  - **Caldas de cimento puras**, compostas exclusivamente por água e cimento se apresentando geralmente instáveis, exceto quando apresentam relações água/cimento (A/C) inferiores a 0.4:1. Apresenta resistência e durabilidade elevada, sendo os valores exatos dependentes da quantidade de água utilizada e da dimensão dos grãos e constituição química do cimento;
  - **Caldas de cimento com bentonita**, compostas de água, cimento e argila se apresentam como uma solução estável, graças à adição da argila. Para além disso, esta adição confere um aumento de sua resistência à pressofiltração e aumento significativo da sua viscosidade;
  - **Caldas com fillers**. Compostas de água e cimento com adição de materiais não cimentícios para modificar as propriedades da calda e reduzir os custos da mistura. Os materiais adicionados são, na sua maioria, areias e/ou cinzas volantes.

- **Caldas para aplicações específicas**, caldas puras, com bentonita ou com *fillers* cuja reologia e evolução da hidratação são controladas pela adição de aditivos como aceleradores, retardadores, inibidores de hidratação e super plastificantes. Permitem atribuir comportamentos específicos para a calda no momento de injeção e sedimentação mantendo as propriedades do concreto quando curado.
- II. **Soluções coloidais**, são fluídos newtonianos evolutivos, cuja viscosidade aumenta com o tempo. São também conhecidas como caldas químicas, sendo diferenciadas das soluções puras pela química dos seus componentes. Estas soluções são constituídas à base de silicatos de sódio e soluções reagentes (orgânicas ou inorgânicos) que irão criar géis, mais ou menos duros, dependendo das concentrações utilizadas para a sua realização.
- III. **Soluções puras**, são fluidos newtonianos, mas cuja viscosidade é constante até ganhar presa, dentro de um determinado intervalo de tempo. Igualmente conhecidas como caldas químicas, distinguem-se das anteriores por terem como base resinas. Outro aspeto em comum com as soluções coloidais é o facto de serem raramente utilizadas em tratamentos de maciços rochosos, recorrendo-se principalmente à sua utilização em injeções em zonas com elevado caudal de percolação. Nesta categoria também pode ser incluído um grupo de caldas constituídas por materiais pouco comuns, geralmente compostos orgânicos e resinas como *epóxis*, *silicones* e *látex*.

Na Figura 2.27 é possível observar o comportamento reológico característico de cada uma das três categorias de caldas.

Figura 2.27 - Comportamento reológico das caldas injetáveis.



Fonte: Gama (2012)

A escolha da calda de cimento utilizada na cortina de injeção depende da sua compatibilidade com as características da fundação em questão e dos objetivos estabelecidos para o processo de injeção. Weaver & Bruce (2007) afirmam que caldas que pretendem tratar fundações rochosas com objetivo de reduzir a permeabilidade e/ou aumentar a resistência de maciços fraturados devem atingir uma combinação ótima de penetrabilidade, durabilidade, economia e resistência.

Neste sentido, as caldas químicas (soluções coloidais e puras) são, em termos teóricos, capazes de oferecer propriedades penetrativas em qualquer condição de pressão na injeção, no entanto, na prática são consideravelmente dispendiosas quando comparadas com as caldas à base de cimento, e a sua durabilidade e/ou toxicidade são muitas vezes questionáveis (*op. Cit.*).

Devido à sua elevada utilização, as caldas de cimento são também as caldas que mais evoluíram nos últimos anos. Inicialmente compostas apenas por cimento e água, e raramente com adição de areia e/ou aceleradores de presa. Com o tempo passou a ser utilizada como calda estável utilizando uma variedade de cimentos, proporção de água, aditivos e adjuvantes que controlam as características da calda de cimento.

Gama (2012) apresenta na Tabela 2.3 vários tipos de cimento disponíveis para diferentes utilizações com diferentes gradações das partículas, diferentes tempos de presa ou com formulações químicas específicas para serem resistentes a

determinados tipos de reações químicas. Na tabela são apresentados os diferentes tipos de cimento utilizados, com uma breve descrição das suas composições.

Tabela 2.3 - Caracterização dos diferentes tipos de cimento utilizados em calda de cimento.

<b>TIPOS DE CIMENTO E SUAS CARACTERISTICAS</b>		
<b>Notação</b>	<b>Tipos</b>	<b>Constituição</b>
CEM I	Portland	Um único constituinte principal - clínquer
CEM II	Portland composto	Pelo menos dois terços ( $\geq 65\%$ ) de clínquer
CEM III	De alto forno	Clínquer e (35-95%) de escórias de alto forno
CEM IV	Pozolânico	$\geq 45\%$ de clínquer e restante sílica de fumo, pozolana ou cinzas volantes
CEM V	Composto	Pelo menos 20% de clínquer e pelo menos 18% de escórias

Fonte: Gama (2012)

Em uma nota técnica, Multiurethanes (2010), uma líder de mercado no fornecimento de equipamentos de injeção e materiais de calda no mercado americano, relembra que Houlsby (1990), propôs os seguintes valores mínimos de aberturas de descontinuidades possíveis de serem injetadas, sob condições de tratamento típicas, com caldas à base de cimento Portland:

- 500  $\mu$ , para injeções realizadas sem qualquer cuidado especial;
- 400  $\mu$ , com utilizando caldas de qualidade elevada e cuidados especiais;
- Micro cimento, mais finas, quando a injeção é supervisionada por profissionais experientes.

Multiurethanes (2010), apresenta uma relação obtida através da seguinte equação:

$$\text{Groutng Ratio (GR)} = \frac{\text{Abertura da fissura}}{d_{95}(\text{cimento})} \quad 2.21$$

De acordo com a nota, é possível obter resultados satisfatórios de penetrabilidade da calda de forma consistente utilizando misturas de cimento cimentício estáveis em condições locais em que GR (índice granulométrico) seja maior que 5. Além disso, sugere-se a formulação de caldas de cimento que sejam estáveis (ou seja, que não apresentem sedimentação da fase sólida por um período significativo) e equilibradas com aditivos. Caldas estáveis ajudam a reduzir a exsudação excessiva nos poros e fissuras, proporcionando propriedades reológicas uniformes à calda. O uso de super plastificantes como agentes de dispersão eliminará a floculação das partículas de cimento e, assim, facilitará a injeção do rejunte.

A utilização de cimentos com diâmetro menor (micro cimento), resultou em diversos projetos no aumento do consumo de calda, com a mesma relação A:C e mesmo em pressões de injeção menores.

A nota ainda apresenta a relação vista na Tabela 2.4, a relação apresenta o diâmetro do cimento e as aberturas recomendadas a serem injetadas.

Tabela 2.4 - Dimensão dos grãos de cimento e respectiva penetrabilidade.

<b>DIMENÇÃO DOS GRÃOS E PENETRABILIDADE</b>		
<b>Tipo de cimento</b>	<b>D<sub>95</sub> de calda (μ)</b>	<b>Abertura das descontinuidades (μ)</b>
CEM I	80-100	> 400
De elevada resistência inicial (classe R)	40-60	> 200
Micro cimento	10-12	> 50

Fonte: modificado de Multiurethanes (2010)

O processo de formulação da calda envolve o controle do comportamento dos diversos materiais adicionados à mistura de cimento. A Tabela 2.5 apresenta um resumo dos diversos materiais frequentemente empregados na formulação de caldas à base de cimento, juntamente com uma breve descrição dos efeitos deles e das dosagens comuns.

Tabela 2.5 - Resumo dos vários aditivos, *fillers* e adjuvantes possíveis de utilizar na produção de caldas à base de cimento, bem como os seus efeitos e dosagem típica.

<b>ADITIVOS, <i>FILLERS</i> E ADJUVANTES NA PRODUÇÃO DE CALDAS DE CIMENTO</b>			
<b>Materiais</b>	<b>Descrição</b>	<b>Efeitos</b>	<b>Dosagem típica</b>
Super plastificantes	Vários	Reduzem a viscosidade da calda através da inibição da capacidade de aglomeração de partículas	0,5% a 2%
Bentonita	Montmorilonita de sódio	Estabilizam a calda, aumentam a sua resistência à pressofiltração e viscosidade	Inferior a 5%
Cinzas volantes	As de tipo C e F são materiais pozolânicos	Aumentam a resistência das caldas à pressofiltração, bem como a durabilidade da calda após a cura	Variável
Micro sílica	Pó micro fino (< 1 $\mu$ )	Aumentam a resistência das caldas à pressofiltração e a durabilidade e resistência das caldas após a cura	Inferior a 10%
Agentes tixotrópicos	Vários, geralmente argilas	Aumentam significativamente a resistência das caldas à pressofiltração e conferem características tixotrópicas às caldas	0,1% a 0,2%
Agentes hidrófobos	Vários	Aumentam a resistência das caldas ao arraste por percolação, reduzem o coeficiente de pressofiltração e conferem características tixotrópicas às caldas	0,2% a 1%
Controladores de hidratação	Aceleradores, retardadores e inibidores de hidratação	Permitem o controlo do processo de hidratação e a manipulação do início de presa	Variável

Fonte: Gama (2012)

Reologia é a ciência que trata a deformação e o escoamento de corpos sólidos ou fluídos (gases ou líquidos) sob a influência de uma força ou tensão, entre os materiais, inclui estudos sobre a deformação do cimento endurecido, o manuseamento e aplicação de cimento recém-misturado e o comportamento de lamas, argamassas e caldas. Houlsby (1990) afirma que “as partículas de cimento atuam de uma forma físico-química difícil de entender”, mas esse comportamento pode ser sintetizado nos parâmetros de viscosidade, coesão e atrito interno.

Os parâmetros já apresentados aqui como pressões de injeção, aberturas de fraturas e dimensões de partículas equivalentes (cimento + aditivos), bem como a viscosidade da calda (condição de plasticidade da calda) regem a velocidade e penetrabilidade da calda e, conseqüentemente, do tempo de injeção. A coesão (da calda) condiciona a pressão interna necessária para iniciar ou reiniciar o comportamento newtoniano de calda, desta forma, controlando também a máxima de penetração, já que, à medida que há descompressão, a calda volta a possuir comportamento binghamiano. O atrito interno entre os componentes sólidos (calda + maciço) irá, quando suficientemente elevado, bloquear as descontinuidades injetadas, devido aos requisitos exponenciais de pressão necessários para movimentar a calda através daquelas.

Estas características podem ser aplicadas a misturas estáveis, visco-plásticas (Lombardi, 1985), significando que o controle da reologia de uma calda é através da redução de sua coesão inicial e o atraso do seu aumento com o tempo irá aumentar significativamente a sua penetrabilidade.

Estas caldas são conhecidas como **caldas de mobilidade elevada** (*High Mobility Grout*, HMG) tendo como características principais possuir a reologia controlável, decatção mínima, capacidade superior de resistência a pressofiltração e maior penetrabilidade e durabilidade (CHUAQUI & BRUCE, 2003 *apud* GAMA, 2012).

Existem ainda as **caldas de baixa mobilidade** - LMG (Byle, 1997 *apud* Gama, 2012), que apresentam *slumps* muito reduzidos, frequentemente <25 mm, e um atrito interno elevado.

A utilização de HMG deve ser empregada em três fases (CHUAQUI & BRUCE, 2003 *apud* GAMA, 2012). Inicialmente um programa de ensaios laboratoriais deve ser desenvolvido a fim de obter formulações que retratem as condições do terreno onde será utilizada e da matéria prima disponível na região.

Posteriormente, em campo, são preparadas várias caldas com o objetivo de realizar ensaios que visam identificar possíveis alterações nas características decorrentes das diferenças nos materiais, equipamentos de mistura ou procedimentos entre os ensaios de laboratório e a produção *in situ* das caldas.

Por fim, durante a produção da calda, algumas características são avaliadas regularmente, de modo a assegurar que estas estão corretas e que as misturas

continuam a ser consistentes com as características da zona que a calda será injetada.

A importância de cada parâmetro varia de acordo com a aplicação desejada da calda, resumidamente podemos apresentar os parâmetros como:

- Viscosidade

A viscosidade é determinada pela relação A/C utilizada na sua elaboração e pelo conteúdo e natureza dos *fillers* e aditivos aplicados. Sua condição é alterada pelo tempo de hidratação (adição e perda de água) em reação à energia aplicada e à temperatura durante o processo de mistura, bem como pelas características das reações de hidratação do cimento sob a rocha injetada.

A viscosidade de uma calda estável é capaz de conservar em relativa constância por um período de 2 h a 3 h, até ao início de cura do cimento, aumentando rapidamente até à sua conclusão. A utilização de aditivos controladores de hidratação, plastificantes e catalizadores pode alterar bastante estes valores médios, bem como a existência de temperaturas extremas (Kutzner, 1996).

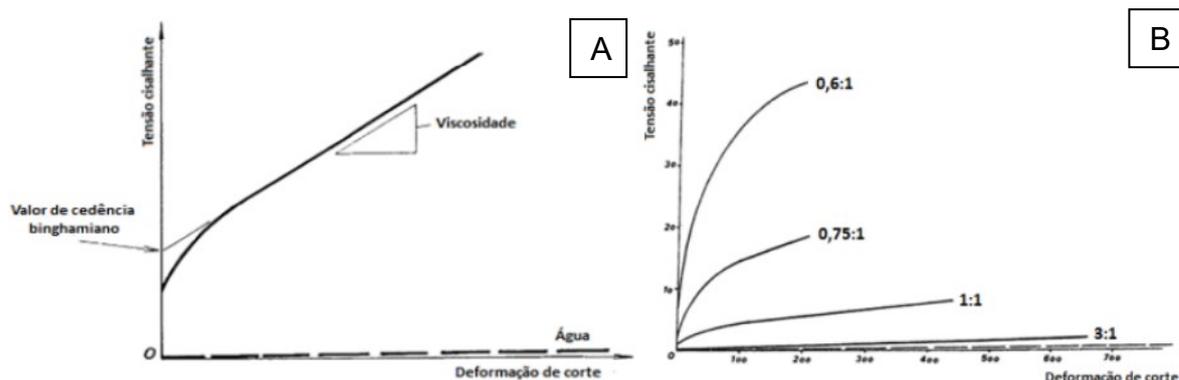
- Tixotropia e Coesão

O termo tixotropia foi usado pela primeira vez por Peterfi (1927 *apud* GAMA, 2012), para descrever o fenómeno por meio de que um protoplasma se “liquefazia” por agitação mecânica. A definição usual do termo foi proposta em *United States Department of Transport* (CORVEN & MORETON, 2004 *apud* GAMA, 2012), que define como a “propriedade de um material endurecer num curto espaço de tempo enquanto em repouso, adquirindo uma viscosidade mais reduzida quando agitado mecanicamente, sendo este processo reversível”.

Desta forma o valor deste parâmetro (Figura 2.28 A), é indiretamente associado ao grau de cisalhamento interno do fluido ou a pressão necessária para o início (ou reinício) do fluxo de fluido.

O termo Coesão foi utilizado pela primeira vez por Lombardi (1985), e representa o ponto limite para a mudança de comportamento da matéria. Tendo como exemplo o caso de caldas de cimento puras (Figura 2.28 B), é possível observar que a coesão aumenta com a redução da relação A/C, até ao ponto em que, para caldas com coesão elevada, as respetivas propriedades tixotrópicas irão ser mais importantes do que o desempenho reológico.

Figura 2.28 - A) Conceito de tixotropia; B) Comparação da tixotropia de caldas de cimento puras



Fonte: Gama (2012)

Todavia, em relações de A/C menores que 2:1 é apresentada alterações de viscosidade ínfimas, já no caso de caldas puras, elas apresentam exsudação excessiva e características de pressofiltração muito pobres que reduzem sua eficácia (WEAVER & BRUCE, 2007). É acordado que a eficácia de tratamentos em várias barragens demonstra que as cortinas de impermeabilização construídas com caldas com relações maiores a 2:1 são mais eficazes do que os tratamentos efetuados com caldas mais finas (*op. Cit.*).

- Decantação

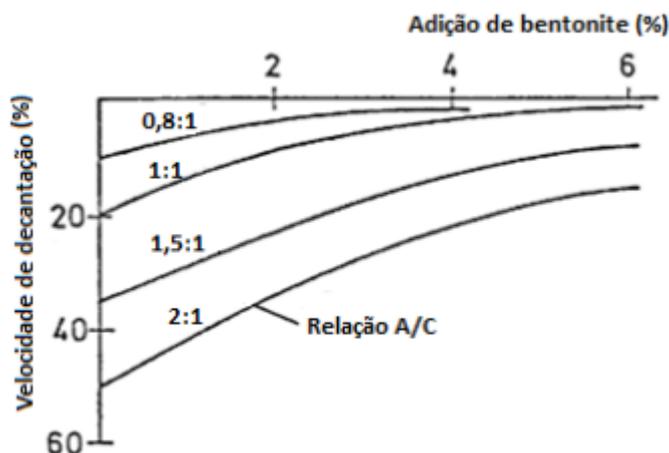
Por influência da gravidade, partículas sólidas individuais numa calda de cimento em repouso tendem a assentar, a velocidade do processo é função da densidade, da forma e volume das suas partículas. No caso de partículas esféricas, como é o caso de cinzas volantes, essa velocidade é governada pela lei de Stoke.

Com a utilização de pressões de maiores e de aditivos, a decantação pode ser minimizada em qualquer relação A/C (GAMA, 2012). A exsudação (expulsão de água da composição) de caldas de cimento puras encontra-se relacionado, essencialmente, com a finura do cimento, que pode ser alterada através da adição de bentonita, e a relação A/C como demonstrado na Figura 2.29. A velocidade de exsudação aumenta proporcionalmente com a relação A/C (Figura 2.30), enquanto o respetivo tempo diminui proporcionalmente com ela.

A percentagem de exsudação na cortina possui forte influência na obturação completa de discontinuidades. Pois a água exsudada perdura na região de injeção da calda, não participando das reações químicas de cura do cimento, nem sendo absorvida pelo maciço e assim impedindo o completo preenchimento dos espaços

existentes pelo cimento, com isso atribuindo uma característica porosa, permeável e suscetível a fenômenos de dissolução e erosão para o cimento enrijecido (GAMA, 2012).

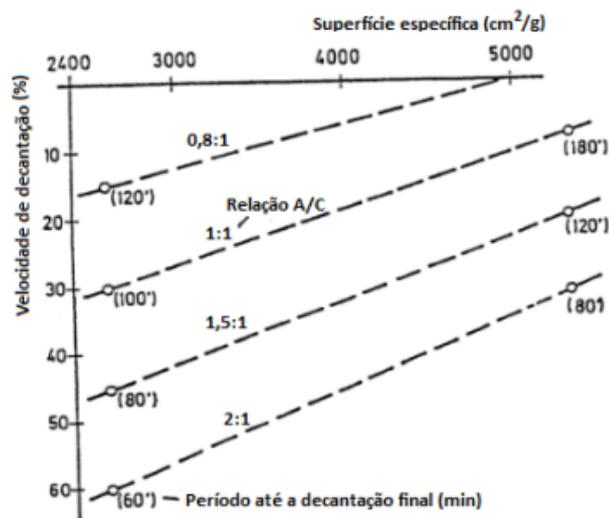
Figura 2.29 - Velocidades médias de decantação de diferentes caldas à base de cimento com diferentes relações A/C.



Fonte: Gama (2012)

Desta forma, Weaver & Bruce (2007), afirmam que caldas consideradas estáveis devem apresentar uma taxa de decantação inferior a 5%, sendo cada vez mais comum a utilização de valores na ordem dos 2% ou menores.

Figura 2.30 - Velocidades médias de decantação de caldas à base de cimento.



Fonte: Gama (2012)

- Pressofiltração

A compressão de caldas de cimento sobre a porosidade do maciço (primária e secundária) é análogo ao pressionar a calda contra um filtro espeço. Desta forma, a depender da formulação da calda, da pressão utilizada e da porosidade do maciço a água pode ser excretada da solução de cimento, provocando o aumento da concentração da calda e a respectiva sedimentação da argamassa de cimento nas paredes do furo. O que pode levar com o passar do tempo, o bloqueio da entrada nas descontinuidades com argamassa, obliterando injeções futuras.

De Paoli *et al.* (1992 *apud* GAMA, 2012) afirma que a tendência da calda para perder água durante a injeção é quantificada pelos termos “coeficiente de pressofiltração” ( $K_{pf}$ ), e “coeficiente de crescimento da mistura” ( $K_{pc}$ ). Calculados através das seguintes equações:

$$K_{pf} = \frac{V_f}{V_i} * t^{-\frac{1}{2}} \text{ (min}^{-1/2}\text{)} \quad 2.22$$

$$K_{pc} = h * t^{-\frac{1}{2}} \text{ (mm} * \text{min}^{-1/2}\text{)} \quad 2.23$$

Onde:

$V_f$  = Volume do filtrado (ml)

$h$  = Espessura da mistura (mm)

$V_i$  = Volume inicial da amostra (ml)

$t$  = Duração do ensaio (min)

Por esse motivo ao aumentar a penetrabilidade de uma determinada calda é necessário que esta apresente um baixo  $K_{pc}$ , para minimizar o aumento da viscosidade aparente (coesão e viscosidade real) associada.

Como já mencionado, a coesão da calda pode ser reduzida aumentando a relação A/C; no entanto, isso resultará em um  $K_{pf}$  elevado, o que diminuirá significativamente sua penetrabilidade (*Ibid.*). De acordo com De Paoli *et al.* (*op. cit.*), uma possível solução envolve a redução dos volumes de água e o uso de adjuvantes estabilizadores, plastificantes e aditivos. Isso resultará em uma calda adequada para pressões de injeção moderadas, com alta capacidade de penetração e eficácia, apresentando as seguintes características: maior mobilidade, maior volume específico (com preenchimento uniforme de descontinuidades) e maior resistência à erosão.

- Outros aspectos

Gama (2012), apresenta, além dos aspetos já abordados, outras características que devem ser consideradas para a formulação de caldas de cimento, resumidos no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 - Parâmetros importantes na reologia de caldas de cimento.

Parâmetro ou propriedade	Descrição
<b>Dimensão e forma dos grãos</b>	A dimensão e forma dos grãos constituintes de uma calda está diretamente relacionada com a injetabilidade da mesma. Mitchell (1981) apresentou a seguinte fórmula: <b>RI (relação de injetabilidade) = largura da descontinuidade / (D<sub>95</sub>) da calda</b> Se RI > 5, a injeção será possível e se RI < 2, a injeção será impossível; A adição de determinados <i>fillers</i> pode alterar a injetabilidade da calda
<b>Fenómenos de agregação de partículas</b>	O fator determinante da capacidade de penetração de uma calda é a dimensão máxima das partículas sólidas constituintes dela. Caso haja formação de aglomerados dessas partículas durante o processo de mistura da calda, a sua eficácia ficará comprometida. Como tal, é necessária a utilização de adjuvantes de modo a prevenir e mitigar estes fenómenos.
<b>Segregação do filler</b>	Para HMG que contenham areias como um dos seus constituintes, é essencial que estas se mantenham em suspensão e distribuídas uniformemente. Caso contrário, a areia não se ligará com a restante matriz da calda, segregando-se e tornando a calda difícil de bombear.
<b>Porosidade da matriz</b>	Caldas cuja porosidade da matriz seja reduzida, apresentam uma maior durabilidade, devido à maior dificuldade de penetração da água (Littlejohn, 1982 <i>apud</i> Gama, 2012). Esta propriedade torna-as adequadas para aplicações onde sejam necessárias baixas permeabilidades ou elevadas resistências a ataques químicos.
<b>Hidrofobia</b>	Quando uma calda é injetada abaixo do NF, a tendência para esta se diluir na água deve ser minimizada. Caso contrário a eficácia do tratamento será reduzida e poderá ocorrer a contaminação de aquíferos próximos. Esta característica é geralmente controlada pela adição de adjuvantes
<b>Controle da hidratação</b>	A capacidade de controle do tempo de presa é fundamental. Em casos de injeção em zonas com circulação de água, é preferível um tempo de presa reduzido para evitar a lavagem da calda. Por outro lado, quando é necessária a reinjeção de um trecho, tempos de presa mais elevados são preferíveis. Esta característica é controlada pela adição de aditivos
<b>Endurecimento da calda</b>	O processo de endurecimento tem início imediatamente após a mistura da calda. Os parâmetros que mais influenciam a velocidade do processo são a temperatura, o tipo de cimento, o teor de super plastificantes utilizados, a relação A/C e a agitação da calda. Esta característica é controlada pela adição de adjuvantes

Fonte: Modificado de Gama (2012).

### 2.3.3 Método GIN (Grouting Intensity Number)

Intensas discussões sobre pressões de injeção e o comportamento reológico das caldas de cimento na década de 80, juntamente com diversos casos experimentais de obras que aplicaram cortinas de injeção, proporcionaram o embasamento teórico para que Lombardi & Deere (1993) apresentassem um método para sistematizar a execução de cortinas de injeção.

Em particular, estudos de coesão (deformabilidade), viscosidade dinâmica de diferentes misturas de calda, estudos teóricos do fluxo de penetração de calda e o monitoramento de campo das pressões e do consumo de caldas levaram os autores a desenvolver o conceito de *Grouting Intensity Number* (GIN) ou Número de Intensidade de Injeção.

Para o autor, o método GIN não se limita a uma forma de definir e selecionar o valor da "intensidade da injeção". Ele é considerado uma filosofia ou um manual de boas práticas no tratamento com cimento de maciços rochosos fissurados, com o propósito de aprimorar sua resistência, reduzir sua deformabilidade e permeabilidade, ou mesmo combinar esses objetivos (LOMBARDI 1996; 1999).

O método compreende uma série de procedimentos técnicos que se iniciam com a definição da composição da calda de cimento que será utilizada em toda a cortina de injeção. Essa escolha leva em consideração a reologia da calda, as particularidades geotécnicas da área de execução e as pressões máximas de injeção que o maciço enfrentará durante a realização da cortina. Além disso, o método inclui o controle e o monitoramento simultâneo das pressões e do consumo de calda durante a execução da cortina (LOMBARDI & DEERE, 1993; LOMBARDI, 1996; 1999).

#### 2.3.3.1 Definição da calda de cimento

A seleção e dimensionamento da mistura de calda devem levar em consideração não apenas as características e a geometria dos vazios a serem preenchidos, mas também os objetivos específicos do trabalho de injeção. Atualmente, independentemente dos objetivos e do material a ser injetado, a tendência predominante é usar misturas espessas e estáveis, com um teor mínimo de água (BREMEN, 1997). Caldas estáveis, que apresentam menos de 5 por cento de sedimentação após 90-120 minutos, geralmente são preferidas em relação às caldas de baixa concentração, principalmente devido às propriedades do cimento após a cura

e ao comportamento imprevisível das misturas instáveis durante o processo de injeção (LOMBARDI & DEERE, 1993).

A distância máxima de penetração da calda de cimento é diretamente proporcional à pressão de injeção aplicada e à abertura das fissuras ocasionadas pelo tratamento, e é inversamente proporcional à coesão da calda. Portanto, para melhorar a penetração da calda nas fissuras da rocha, é necessário aumentar a pressão de calda ou reduzir a coesão da calda, ou ambos (LOMBARDI & DEERE, 1993).

Lombardi & Deere (*op. Cit.*), comentam que utilização de caldas diluídas em água para aproximar as misturas do comportamento de fluidos Bingham não é razoável, pois, as misturas se apresentam como suspensões instáveis de partículas de cimento em água que, durante o fluxo de calda através de fissuras rochosas, apresentam comportamento errático de sedimentação, erosão, res-suspensão e res-sedimentação. Sendo impossível nesse caso de prever e caracterizar a cimentação com as equações de fluxo de Bingham ou quaisquer outras.

A partir destes conceitos, a definição de caldas de cimentos estáveis deve ser formulada com base nos objetivos da execução da cortina de injeção. Como já mencionado, os autores recomendam a utilização de caldas estáveis grossas devido a sua coesão (BREMEN, 1997; LOMBARDI & DEERE, 1993), nestes casos as pressões de injeção necessárias para atingir a mesma distância de permeação em comparação com caldas ralas deveriam ser mais altas. Nesse contexto, o uso de pequenas quantidades de superplastificante pode proporcionar drásticas reduções nos parâmetros de coesão e viscosidade durante o período de injeção, ao mesmo tempo em que mantém as propriedades do cimento quando curado (BREMEN, 1997; LOMBARDI & DEERE, 1993; LOMBARDI, 2006; LOMBARDI, 1994;)

Na injeção de fissuras muito pequenas, é crucial levar em consideração que a penetração da calda de cimento depende mais das dimensões dos grãos e aglomerados de cimento do que da diluição da mistura com excesso de água (BREMEN, 1997; LOMBARDI & DEERE, 1993).

Testes de laboratório devem ser conduzidos antecipadamente para avaliar as propriedades de fluxo, sedimentação, tempo de pega e resistência de diversas misturas de argamassa, levando em consideração os variados componentes e diferentes tipos de superplastificantes em relação à configuração geológica específica

do local (LOMBARDI & DEERE, 1993). O autor recomenda a utilização dos seguintes parâmetros:

Quadro 2.2 - Parâmetros do cimento.

Cimento:	Testar cimentos disponíveis de finura variável
Proporção água-cimento:	0,8:1 a 0,6:1 (valor de Blaine)
Super plastificante:	Até 2%
Densidade da mistura:	1,5 a 1,67 t/m <sup>3</sup>
Decantação:	Até 5 % em 1,5 a 2 h
Tempo de fluxo do funil Marsh:	29 a 32 s
Coesão relativa (C/γ):	0,2 a 0,35 mm s/ plastificante 0,08 a 0,15 mm c/ plastificante
Resistência da mistura endurecida:	9 a 12 MPa aos 7 dias e 15 a 20 MPa aos 28 dias.

Fonte: Bremen (1997)

Bremen (1997), afirma que para obter um controle adequado do progresso de cimentação, a delimitação de princípios precisos de injeção, bem como da correta formulação da calda de cimento é essencial. É recomendado:

- Para a injeção de fissuras finas, o limite de escoamento das caldas estáveis deve ser mantido o mais baixo possível, para garantir a ótima penetrabilidade da mistura.
- O uso de misturas de bentonita de cimento não é recomendado para a injeção de fissuras finas em rochas e concreto devido aos altos valores de tensão de escoamento deste tipo de mistura.
- Em vez de usar bentonita, rejuntas estáveis podem ser facilmente alcançados com relações A/C entre 0,6 e 0,9 e uma adição de 0,6-2 por cento de super plastificantes, dependendo das características do cimento. Comparado com as pastas de cimento-bentonita, o limite de elasticidade das misturas de cimento estáveis com super plastificantes é significativamente menor, melhorando assim a penetrabilidade da argamassa.
- Para obter a melhor penetração possível sem o uso de micro cimentos relativamente caros, recomenda-se a adoção de cimentos de grão fino (tipicamente Cimento Portland Tipo III) com um valor de Blaine não inferior a 4500 cm<sup>2</sup>/g

- O uso de micro cimentos devem ser considerados para injeção de fissuras muito finas em rocha ou concreto. Micro cimentos com valores de Blaine superiores a 10 000 cm<sup>2</sup>/g podem ser usados para preencher fissuras até uma largura mínima de 0,2 a 0,3 mm. A bentonita nunca deve ser adicionada aos micros cimentos, pois as vantagens oferecidas pela maior penetrabilidade das partículas muito finas de cimento são prejudicadas pelo aumento da tensão de escoamento resultante da bentonita.

Outro ponto a se considerar é a perda potencial de água no rejuntamento de rocha seca acima do lençol freático, gradualmente a perda d'água engrossa a calda de cimento, aumentando a coesão (e o atrito interno) a ponto de não ser possível injetar mais calda. Neste caso Lombardi (1996) afirma que o prudente é injetar água por um período anterior a execução da injeção, para obter a saturação parcial do maciço rochoso. Da mesma forma o uso de Adjuvantes retentores de água também podem ser usados na calda.

Uma vez que uma mistura aceitável foi determinada por testes de laboratório, com suas propriedades mecânicas nas faixas desejáveis, essa mistura pode ser testada em campo em injeções exploratórias para avaliar o comportamento reológico da calda no maciço. Após a definição da calda a ser utilizada sobre toda a cortina de injeção do projeto principal devem ser assegurada produção em massa da mistura evitando desvios nas concentrações estabelecidas.

#### 2.3.3.2 Definição Teórica do GIN Aplicado em Maciços

Durante a execução de cortinas de injeção, uma grande variedade de situações pode levar à realização de injeções extensas que permeiam diversas juntas abertas, com deslocamentos consideráveis (algumas dezenas de metros). Em alguns casos, também podem surgir novas juntas e trincas devido à aplicação excessiva de pressão e volume de calda de cimento. Há razões práticas e econômicas para evitar isso. Existem três formas de fazer essa redução: usando uma calda menos penetrável (mais espessa e com maior coesão); limitando a pressão da injeção; ou, limitando o volume de calda injetada (LOMBARDI & DEERE, 1993).

Lombardi & Deere (*op. Cit.*) consideram as duas primeiras alternativas, prejudiciais ao processo de obturação de fissuras, pois, caldas menos penetráveis implicaria o não preenchimento de fissuras mais finas devido à alta viscosidade delas,

da mesma forma a utilização de pressões menores reduziria em muito a capacidade das caldas permeá-las devido ao efeito de descompressão. Neste caso a alternativa para os autores é a redução do volume de calda injetada.

Para o autor, com o uso de altas pressões e caldas de cimento moderadamente grossa de alta qualidade com super plastificante (seção 2.3.3.1) é possível realizar a obturação de fissuras menores. Ao mesmo tempo, o processo garante a integridade do maciço em relação ao hidro fraturamento, pois a pressão diminui rapidamente à medida que se afasta do furo, reprimindo a injeção de calda por longos percursos e, desta forma, impedindo a superação do peso de sobrecarga dos estratos rochosos (exceto nos 5-10 m superiores), à vista disso, altas pressões de injeção são aceitáveis (LOMBARDI & DEERE, 1993).

O limite superior de pressão de injeção, na faixa de 30 a 50 bar (3 a 5 MPa), é justificado considerando a geologia, a pressão da água após a implementação da coluna d'água a montante e o GIN desejado, conforme mencionado por Lombardi & Deere (*op. cit.*)

Outro fator a se considerar é a sucessão de injeções, de forma que, furos primários permeiam e obturam fissuras maiores, furos secundários e terciários podem aumentar gradativamente a pressão de injeção para otimizar a percolação de calda nas fissuras menores LOMBARDI & DEERE, *op. Cit.*

Dito isso, os três primeiros elementos do princípio GIN a serem considerados na execução de injeções são: a limitação do volume de calda injetada onde existe baixa resistência à percolação a baixas pressões, a limitação da pressão onde a calda apresenta dificuldade de penetração e o aumento progressivo da pressão de injeção à medida que o raio de influência do furo sofre interferência de ordens superiores.

Ao manter o valor GIN constante durante o processo de rejunte para todos os intervalos de injeção, obtém-se um alcance de injeção quase constante, o que automaticamente limita o volume em uma fissura aberta e larga, enquanto permite que as pressões aumentem em zonas de rejunte mais apertadas e menos acessíveis. Além disso, a combinação de alta pressão e alto volume são eliminadas, uma condição que levaria a enormes forças de soerguimento ou *hidrosplitting* (Hidrofraturamento). Da mesma forma, são eliminadas a combinação de baixa pressão com baixa tomada, que rejuntariam inadequadamente as fissuras finas.

### 2.3.3.3 Concepção teórica do Método GIN

O GIN é um valor teórico definido como o produto da pressão final de injeção pela absorção de calda por metro de furo no processo de injeção de um só estágio (LOMBARDI & DEERE, 1993):

$$GIN = p_f * v_f \quad 2.24$$

Onde:

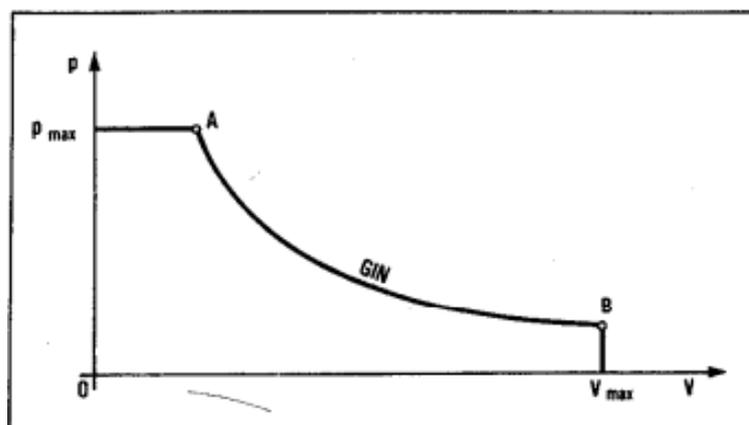
$p_f$  = Pressão final ( $M*L^{-1}*T^2$ );

$v_f$  = Volume final de calda de cimento absorvida por metro ( $L^3 / L$ )

Lombardi & Deere (1993) estabelecem que o GIN adotado na execução da injeção deve ser mantido constante ao longo da injeção, com aplicação de volumes maiores de calda a baixa pressão para obturar juntas maiores e mais abertas, bem como tomadas baixas e pressões mais altas para obturar fissuras mais finas.

A adoção do GIN constantes produz permeação de alcance constante, reduz a chances de hidro levantamento, hidro fraturamento ou de injeções inadequadas (fissuras não obturadas). Desta forma, associado a definição dos limites de injeção (vistos na Seção 2.3.3.2) produzira o que Lombardi & Deere (*op. Cit.*) chamam de curva GIN (Figura 2.31).

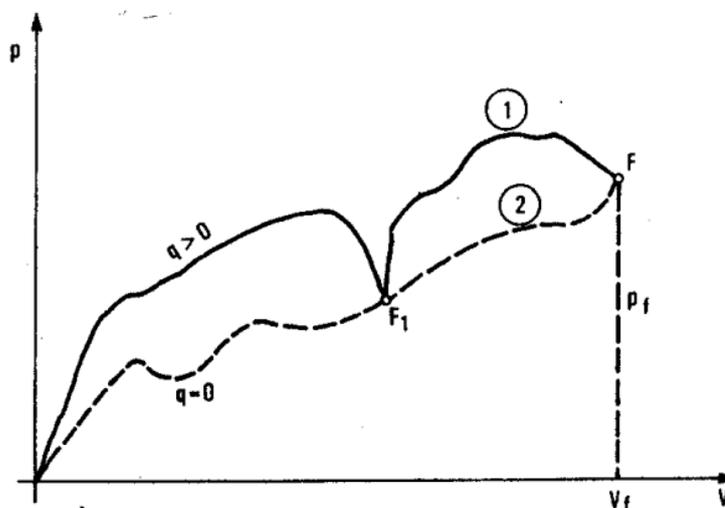
Figura 2.31 - Definição gráfica da curva GIN.



Fonte: Lombardi (1996)

Ao longo da execução de injeção, a interpolação da pressão pelo consumo de calda e outros fatores (volume cumulativo de calda e penetrabilidade) em função do tempo, gerará uma função gráfica de injeção conhecida como “trajetória de injeção” demonstrada na Figura 2.32.

Figura 2.32 - Esboço esquemático do desenvolvimento da pressão durante uma etapa de injeção em relação ao volume de rejunte tomado.



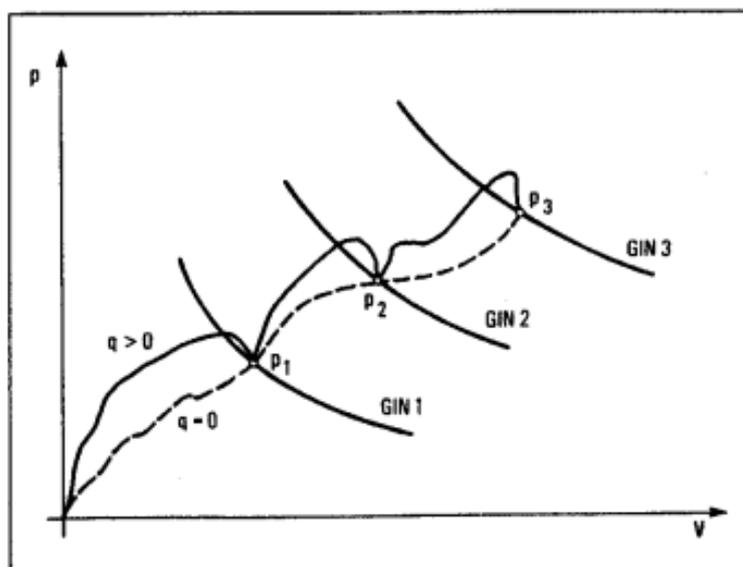
Fonte: Lombardi (1996)

Na Figura 2.32, é possível observar a curva 1 uma representação gráfica dos valores de pressão usados e a quantidade cumulativa de calda injetadas ao longo do furo. O ponto F, que resulta o fim da injeção, representa os valores de pressão finais, PF, e volume total de calda injetada, VF, aquando de um caudal nulo, ou seja, o final da injeção.

Conhecendo as variáveis existentes no processo, como o crescimento constante do volume de calda absorvida e as variações de pressões causadas pela abertura em microescala de junta, é possível a partir da trajetória de injeção produzir análises qualitativas do comportamento da calda no processo (LOMBARDI, 1996).

No momento de interrupção do processo, quando a vazão de calda é nula, a "pressão em repouso" depende essencialmente da coesão da mistura de calda e das propriedades do maciço rochoso. Portanto, interromper o processo implica em reduzir a pressão e, se necessário, retomar o seu aumento. Isso significa que a injeção pode, teoricamente, continuar indefinidamente com o aumento da pressão e, conseqüentemente, com um volume de calda continuamente crescente. Além disso, pode ser interrompida a qualquer momento, simplesmente diminuindo a pressão de injeção, e pode ser interrompida em qualquer nível de intensidade de injeção (GIN) selecionado, conforme ilustrado na Figura 2.33 (LOMBARDI, 1996).

Figura 2.33 - O processo de rejunte pode ser interrompido a qualquer pressão final necessária ou ao atingir qualquer valor GIN exigido.



Fonte: Lombardi (1996)

Desta forma, a partir do repouso, a pressão  $p$  é função da coesão  $c$  da mistura, da distância  $R$  percolada pela calda e da abertura equivalente "e" da junta. O autor define então:

$$p = \frac{(R \cdot c)}{e} \quad 2.25$$

O volume tomado por metro é, por aproximação:

$$V \cong R^2 * e \quad 2.26$$

logo para determinar o GIN é dada por:

$$GIN = p * V \cong R^3 * c \quad 2.27$$

Conseqüentemente para um determinado GIN, a calda de cimento percolará aproximadamente a mesma distância do furo, independentemente da abertura real das juntas (LOMBARDI, 1996).

Para obter a distância real  $R$  em função do valor GIN é necessário considerar fatores como a geometria dos vários sistemas de juntas, número de juntas por metro (RQD), a rugosidade da superfície da junta e as propriedades reológicas da massa (LOMBARDI, *op. Cit.*), o autor reduz esses fatores a um coeficiente ( $K$ ), chamado de fator de cimentação. Logo:

$$GIN = p * V = c * \frac{R^3}{K^3} \quad 2.28$$

Com,

$$K = R * \sqrt[3]{c/GIN} \quad 2.29$$

ou,

$$R = K * \sqrt[3]{c/GIN} \quad 2.30$$

Esta última fórmula mostra que, para uma dada estrutura rochosa, para a qual K pode ser considerado constante:

- o alcance R aumentará com  $\sqrt[3]{GIN}$
- e diminuir com  $\sqrt[3]{c}$ ,

Lombardi (2006) apresenta duas maneiras de para definir fator de cimentação (K):

O primeiro é experimental, em situações possíveis o autor recomenda realizar um teste de campo e medir a distância alcançada pelo rejunte durante o processo de injeção em função dos diferentes valores de GIN, porém, o método é classificado como dispendiosos pois necessita de um elevado número de medições devido à dispersão do trecho a ser medido em diferentes elevações e em várias direções, bem como para diferentes pressões de rejunte.

Casos esses ensaios sejam utilizados e, o R for definido com precisão satisfatória, então, de acordo com a Eq. (2.31):

$$K = R_t * \sqrt[3]{\frac{c_t}{GIN_t}} \quad 2.31$$

onde o sufixo t representa teste; e,

$$GIN = \frac{c * R^3}{K^3} = \frac{c * R^3}{c * R^3} * GIN_t \quad 2.32$$

será selecionado se R for o alcance necessário e c a coesão real da mistura de argamassa.

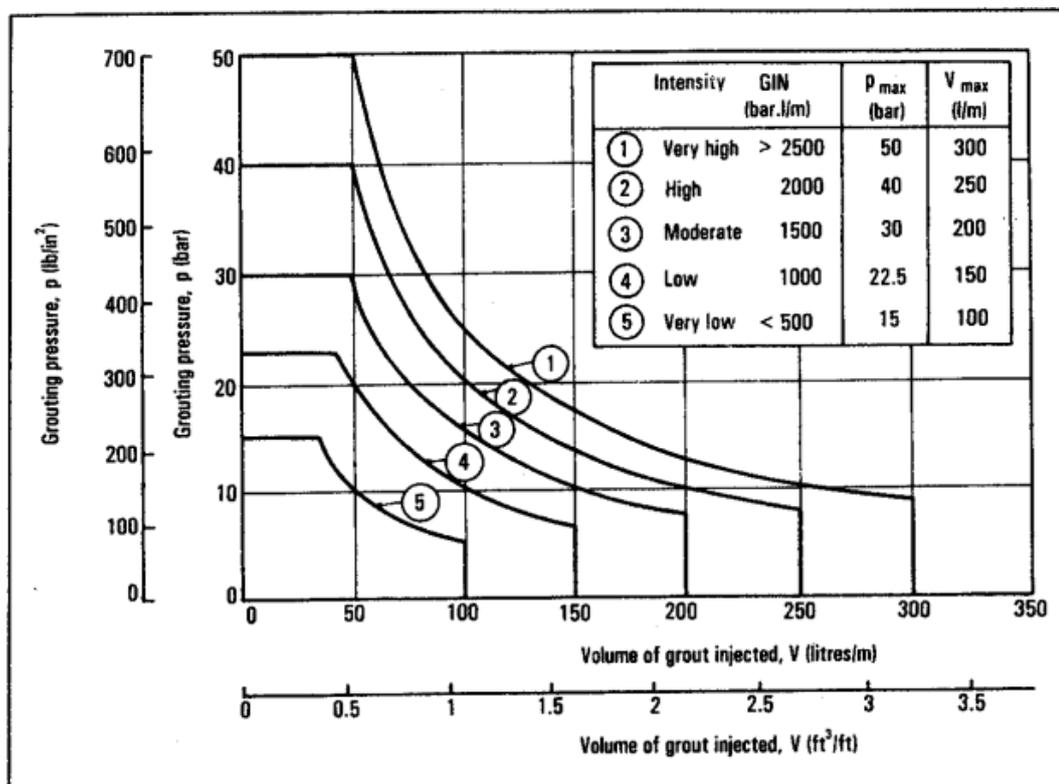
O segundo método é o observacional. Na qual se adora valores provisórios de GIN com base a experiência anteriores ou dados da literatura (Figura 2.34), que deve ser refinado durante a execução das injeções de acordo com os resultados obtidos em campo.

O autor exemplifica o método usando uma barragem qualquer, onde a execução das injeções está em andamento e sendo analisada continuamente usando o método espaçamento divisional (Figura 2.20). Onde se utiliza a taxa de redução de

tomada de calda de uma série para a seguinte como um critério conduzir a operação de injeção.

Se a taxa de diminuição observada for muito baixa, isso significa que o valor GIN usado também foi muito baixo para o espaçamento selecionado. Neste caso, deve se adotar um GIN maior ou reduzir a distância entre os furos. O oposto deve ser feito se esta taxa de diminuição for demasiadamente alta.

Figura 2.34 - Conjunto de curvas limitantes GIN "padrão" sugeridas pelo autor como diretrizes iniciais.



Fonte: Lombardi (1996)

#### 2.3.3.4 Aplicação Prática de Injeções pelo método GIN

A execução da injeção pelo método GIN é realizada e controlada em tempo real por computadores e outros equipamentos automatizados que registram os parâmetros de injeção mais importantes em cada trecho. Além disso, os equipamentos também fornecem gráficos referentes a relações entre vários parâmetros:

- Pressão versus (vs) tempo;
- Caudal vs tempo;
- Absorção vs tempo;
- Pressão vs absorção;

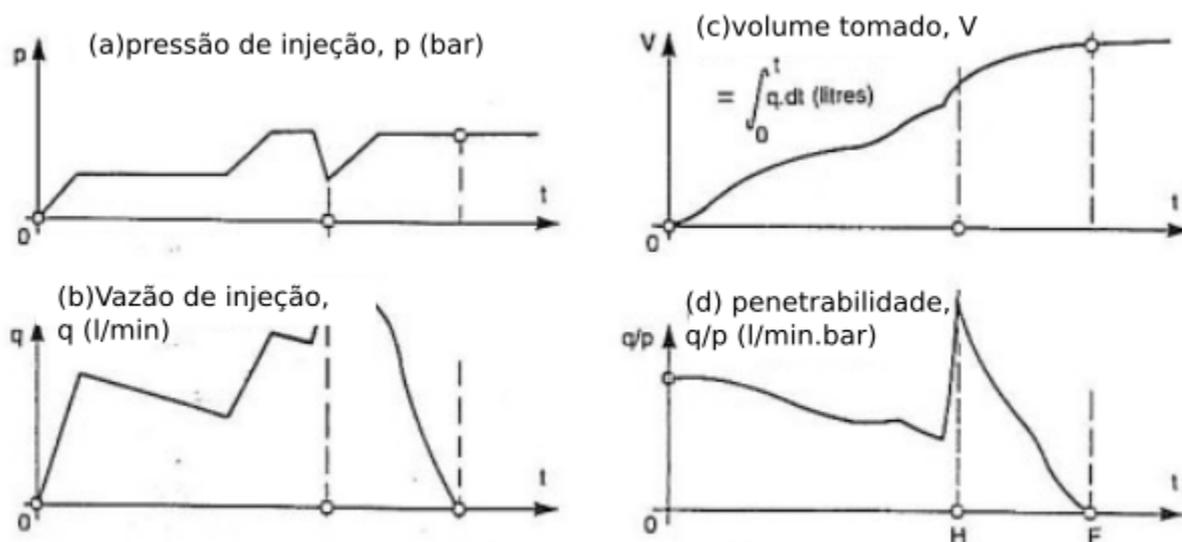
- Penetrabilidade vs absorção:

A Análise contínua dos gráficos em tempo real permite a caracterização do processo de injeção e a detecção momentânea de intercorrências no processo, como fenômenos de fraturação ou levantamento hidráulico, permitindo adaptação da injeção às características reais do maciço rochoso (GAMA, 2012).

Na Figura 2.35, a curva (d) que representa a vazão específica ( $q/p$ ) ou penetrabilidade (ou seja, a vazão dividida pela pressão) versus tempo. Esta curva mostra claramente o preenchimento progressivo de vazios e fissuras e o aumento da resistência da calda, causado principalmente pelo aumento da força coesiva total à medida que o fluxo da calda se estende ao longo das fissuras da rocha. No qual um evento de hidro fraturamento ou *hidrojacking* é observado através da presença de um pico agudo no gráfico.

Figura 2.35 - Processo injeção de uma única etapa:

(a) pressão de rejuntamento; (b) vazão de calda; (c) volume acordado; e, (d) penetrabilidade, tudo versus tempo. O = início da injeção; H *hidrojacking*; e, F = finalização do rejunte.



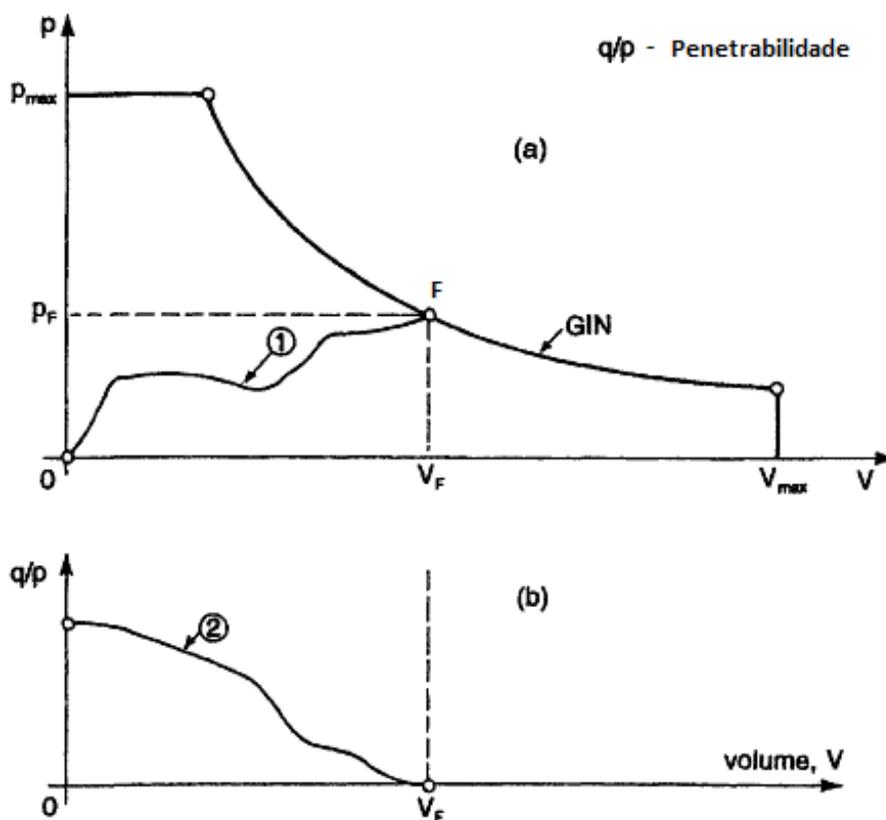
Fonte: adaptado de Lombardi (1996)

Destes parâmetros, apenas dois necessitam ser registados continuamente: a pressão de injeção no trecho e o consumo caudal, a partir dos quais o volume de calda injetado pode ser obtido por integração (LOMBARDI & DEERE, 1993).

Outro exemplo apresentado pelo autor é observado na Figura 2.36, o gráfico superior para além dos três limites escolhidos para um determinado projeto - a curva GIN, a pressão de injeção máxima (PMÁX) e volume máximo de calda a injetar

( $V_{M\grave{A}X}$ ), observado a curva 1, correspondente ao caminho de injeção. O ponto F, que resulta da interseção da curva 1 com a curva GIN, representa os valores de pressão finais,  $P_F$ , e volume total de calda injetada,  $V_F$ , aquando de um caudal nulo, ou seja, o final da injeção

Figura 2.36 - Representação gráfica de (a) curva GIN e (b) curva de penetrabilidade correspondente.



Fonte: Gama (2012)

No gráfico inferior, representa-se a curva de penetrabilidade da calda, importante ferramenta monitorização do processo de injeção, pois, ao longo do desenvolvimento desta curva observa-se uma redução na penetrabilidade, o que sinaliza a redução da eficácia do tratamento, o que é esperado acontecer com o desenrolar de todo o processo. A importância desta curva se encontra então na capacidade de identificação de anomalias durante a injeção através da observação do pendor da curva de penetrabilidade.

#### **2.3.4 Comparação entre o Método Convencional e o Método GIN para injeção de calda de cimento.**

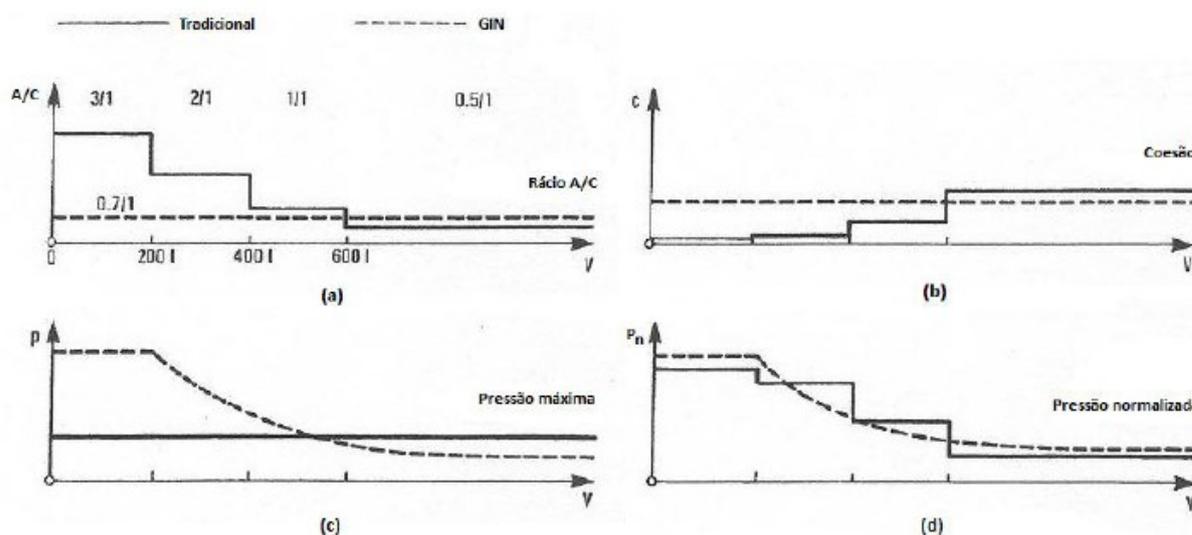
Os principais princípios do método são resumidos a seguir (LOMBARDI, 1996):

- Definição teórica-experimental (laboratório e campo) de uma única calda de cimento a ser utilizada na cortina de injeção;
- Utilização de Calda a base de cimento estáveis de boa qualidade com super plastificante e aditivos que garanta no curto prazo um bom comportamento reológico de injeção e a longo prazo as propriedades como resistência mecânica e resistência à lixiviação por percolações necessárias no projeto;
- Utilização do princípio espaçamento divisional com séries de perfurações, adequando os comprimentos das etapas de injeção às condições geológicas, na prática resulta na adoção de trechos de injeção maiores de acordo com profundidade do furo;
- Redução progressiva de absorções de série a série;
- Realizar a saturação prévia do maciço acima do lençol freático de modo a evitar que a calda perca água da mistura para a rocha seca;
- Evitar ensaios de perda d'água durante o processo de injeção. Entretanto, são válidos antes e após as injeções para checar os resultados;
- Aplicação de taxas constantes e crescentes de injeção de calda ao longo do tempo, atentando ao comportamento reológico da calda no escoamento e obturação de fissuras do maciço;
- Controle em tempo real dos parâmetros (pressão de injeção e Volumes de calda injetada), por meio de gravação contínua dos dados em computador;
- Definir critérios objetivos de paralisação de injeção;
- Não gerar hidro fraturamento por excesso de pressão na injeção de calda de cimento;

Enquanto o método GIN usa apenas uma única calda estável e reduz a pressão máxima de injeção conforme o volume de calda injetado aumenta, os métodos convencionais utilizam de várias misturas de calda, mantendo uma pressão máxima de injeção constante (GAMA, 2012).

Para Gama (2012) as metodologias não são tão diferentes. Se considerar o conceito de pressão normalizada, que consiste na razão entre a pressão de injeção ( $p$ ) e a coesão ( $c$ ) da calda injetada ( $P_n=p/c$ ), torna-se possível identificar semelhanças, como é possível observar na Figura 2.37.

Figura 2.37 - Comparação dos métodos de injeção tradicional e GIN em termos de (a) relação A/C, (b) coesão, (c) pressão máxima e (d) pressão normalizada



Fonte: Gama (2012)

O Autor constata que os dois métodos têm como objetivo evitar absorções elevadas de calda que são desnecessárias; apenas o caminho seguido é diferente.

Nos métodos convencionais, a limitação da absorção é obtida através do aumento da coesão das caldas utilizadas, das mais finas para as mais espessas, em função do volume já injetado. Já no método GIN; a coesão é mantida constante, até porque só se utiliza uma única calda, reduzindo a pressão de injeção em função do volume já injetado.

Em ambos os casos, o resultado é uma diminuição da pressão normalizada, em patamares, nos métodos convencionais, ou progressivamente, no método GIN, sendo a diferença apenas na qualidade e previsibilidade dos resultados obtidos. Para

além disso, o método GIN permite a utilização de pressões e volumes mais elevados sem qualquer risco.

Lombardi destaca que as vantagens do método GIN são:

- A simplificação do processo ao utilizar apenas uma mistura de calda, eliminando assim, ou pelo menos reduzindo, o desperdício de outras misturas não utilizadas;
- Redução ou mesmo eliminação do risco de ocorrência de fenômenos de fraturação e levantamento hidráulico através da remoção da combinação de pressões e volumes de injeção elevados;
- Distância de penetração aproximadamente constante ao longo de todos os trechos independentemente da qualidade do maciço, tornado todo o processo mais previsível;
- Obtenção de um conjunto de dados coerentes, que permitem a análise do progresso das injeções, bem como dos resultados obtidos e como os otimizar;
- Ser um método que se corrige e adapta por si próprio às condições encontradas, que compensa uma grande parte da heterogeneidade encontrada nas características dos maciços.

#### 2.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS INJEÇÕES

Segundo Azevedo (1993 *apud* LEVIS, 2006), o conceito de eficácia de injeções possui duas perspectivas de análise: uma da eficácia dos trabalhos de injeção e outra da eficácia da cortina de vedação. O primeiro deve ser compreendido como a capacidade que a injeção tem de reduzir gradativamente a condutividade hidráulica maciço injetado ao longo das diversas etapas executivas. O segundo é a eficácia da cortina de vedação no desempenho de sua função aos propósitos estabelecidos, ou seja, ao desempenho enquanto elemento de redução e regularização de vazões e/ou subpressões. Assim, uma cortina executada de maneira adequada pode não, necessariamente, ser considerada eficaz (OLIVEIRA, 1981 *apud* LEVIS, 2006).

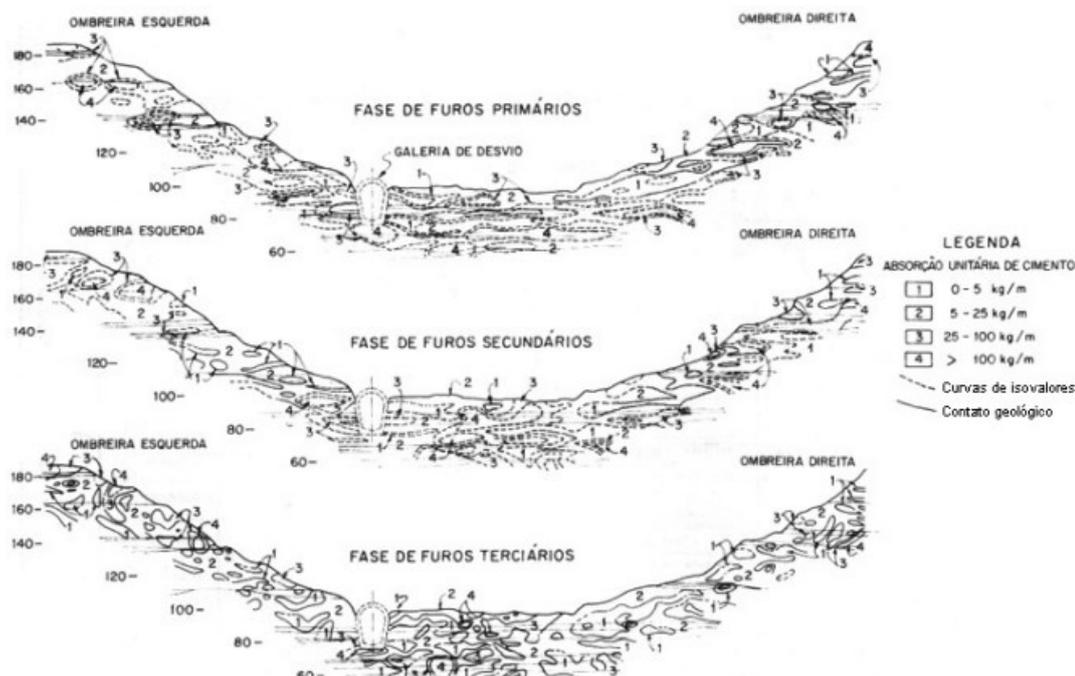
### 2.4.1 Eficácia dos Trabalhos de Injeção

O Cálculo da eficácia de um trabalho de injeções é difícil de ser executado. Em geral, os trabalhos que reduzem em 10 vezes a permeabilidade já são considerados eficaz, embora a margem de redução dependa da permeabilidade original e da permeabilidade residual definida em projeto. Esta eficácia pode ser definida através da diminuição das permeabilidades e das absorções de cimento até serem atingidos os critérios de estanqueidade especificados para cada zona (MARQUES FILHO, 1986 *apud* LEVIS, 2006).

Sendo uma das técnicas mais antigas e largamente empregadas para verificação dos trabalhos de injeção a análise das absorções de cimento se baseia-se no princípio de que, a execução das etapas de injeção, com a diminuição sucessiva do espaçamento entre furos, os vazios vão sendo sucessivamente preenchidos e conseqüente a redução do gradiente hidráulico.

Entretanto, por mais intensos e cuidadosos que os trabalhos sejam, as injeções jamais alcançarão uma eficiência de 100% (GUIDICINI; ANDRADE, 1983 *apud* LEVIS 2006). Na prática as etapas finais de injeção possuem absorções bastante elevadas ao lado de vários furos com absorções nulas (Figura 2.38). Dessa forma, Azevedo et al (1978 *apud* LEVIS 2006) observam que há um limite inferior de absorções denominado “absorção residual”, que consiste em um indicativo para suspensão dos trabalhos de injeção. Estas absorções poderiam atingir níveis mais diminutos, ao reduzir o espaçamento entre furos, porém, salvo em condições de altíssimo gradiente hidráulico são inviáveis financeiramente.

Figura 2.38 - Absorções de cimento nas diferentes fases de perfuração.



Fonte: Guidicini & Andrade (1983 *apud* LEVIS, 2006).

O critério moderno mais utilizado na análise das absorções de cimento foi proposto por Deere (1977), o autor define uma orientação geral para a análise de absorção (Tascasca). 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, aproximadamente, corresponde a perdas d'água perto de  $0,5 \cdot 10^{-5}$  cm/s ou pouco maiores.

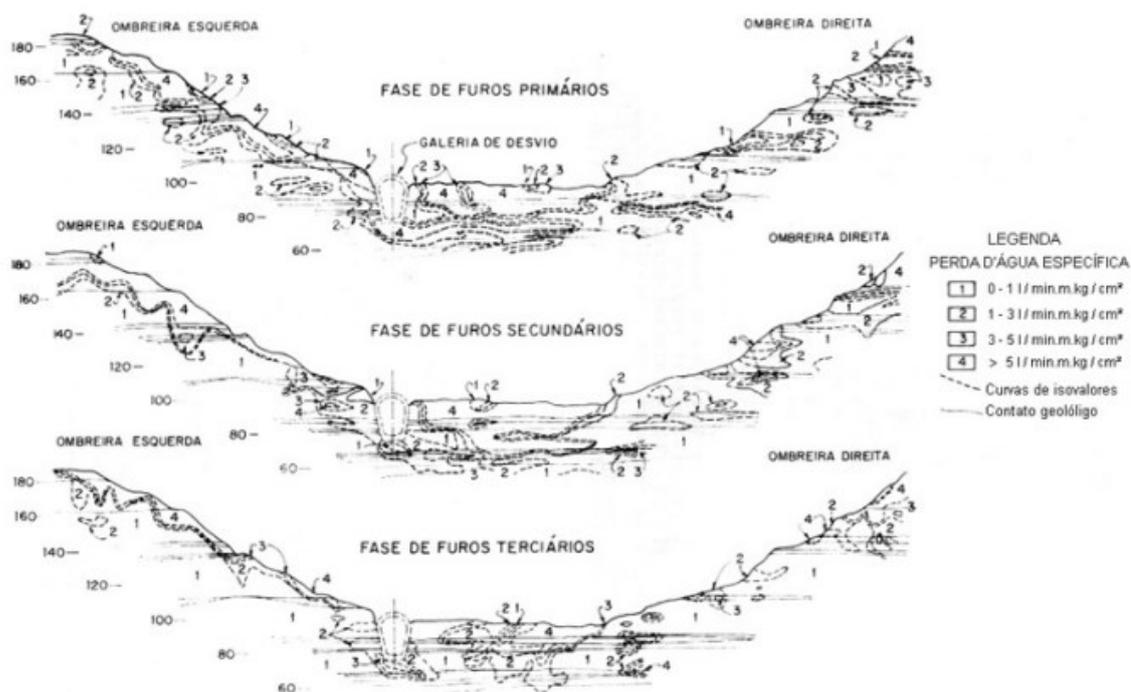
Tabela 2.6 - Orientação geral para análise das absorções de cimento.

<b>ABSORÇÃO DE CIMENTO</b>	
<b>Designação da Absorção</b>	<b>Peso de cimento absorvido por metro de furo (kg/m)</b>
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

Fonte: 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 2.39).

Figura 2.39 - Perda d'água específica nas diferentes fases de perfuração.



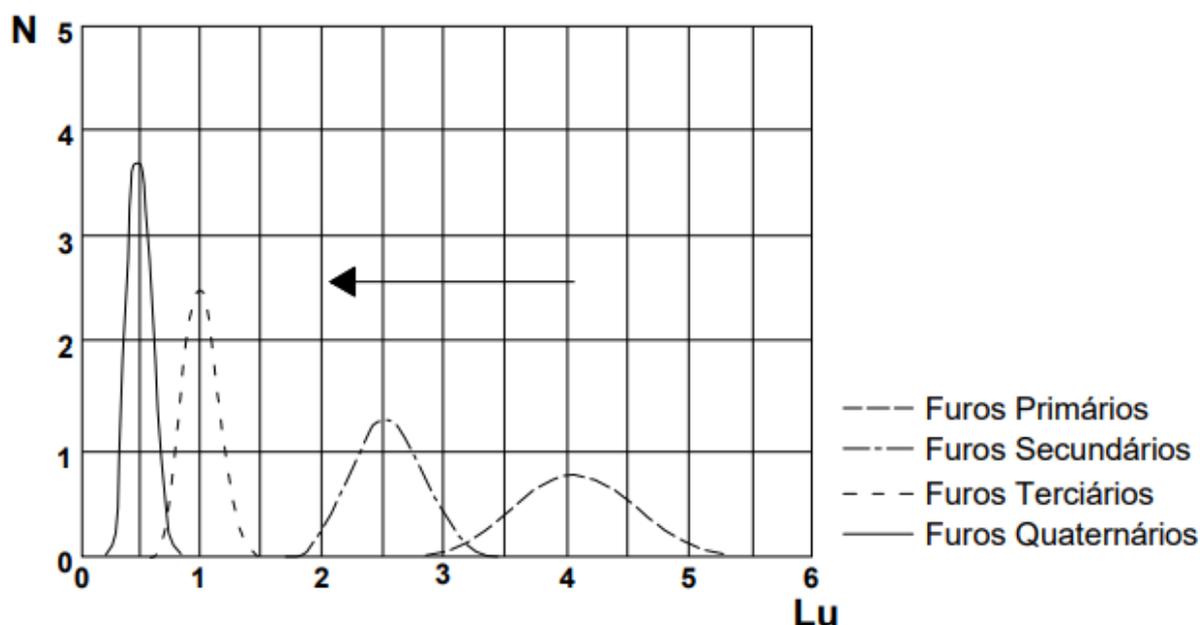
Fonte: Guidicini & Andrade (1983 *apud* LEVIS, 2006).

A técnica foi desenvolvida e apresentada por Lougen em 1933 (apresentado na seção 2.1.3) Tais ensaios têm sido realizados tanto como controle da injeção como orientativo do objetivo dos tratamentos, que buscam a impermeabilização do maciço (AZEVEDO, 1993 *apud* LEVIS 2006).

No caso de ser realizado os ensaios de perda d'água em todos os furos e em todos os trechos de injeção, existe a possibilidade de fazer um controle estatístico das reduções de permeabilidade com o andamento das injeções. Para as zonas superiores, os critérios devem ser mais rigorosos, com permeabilidade média por exemplo da ordem de  $0,5 \cdot 10^{-5}$  cm/s, embora sejam aceitáveis em alguns casos valores de até 10 x maiores que este. Para zonas inferiores, os critérios devem 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 *apud* LEVIS 2006).

As injeções podem ser consideradas efetivas quando a média das absorções d'água no ensaio Lugeon ou PE, nos diferentes tipos de furos, apresentam decréscimo progressivo, diminuindo seu desvio padrão (TASHIRO *et al.* 1995 *apud* LEVIS, 2006).

Figura 2.40 - Frequência de ensaios relacionada à unidade Lugeon (l/m.min.10kgf/cm<sup>2</sup>).



Fonte: Tashiro *et al.* (1995 *apud* LEVIS, 2006).

#### 2.4.2 Eficácia da Cortina de Injeção

Caso o objetivo da cortina de injeções seja exclusivamente a vedação das discontinuidades, para reduzir a seção de escoamento da água, na grande maioria dos casos, este objetivo será atingido. Entretanto, caso pretenda-se que ela desempenhe um papel significativo no controle de subpressões, os resultados tenderão a ser desanimadores (GUIDICINI & ANDRADE, 1983 *apud* LEVIS, 2006).

Para Marques Filho (1986 *apud* LEVIS, 2006), a análise de eficácia da cortina de vedação somente pode ser efetuada de forma mais congruente após o enchimento do reservatório, pois somente nesta situação as injeções são submetidas às condições de aplicabilidade aos quais foram projetadas.

A avaliação desta eficácia pode ser feita a partir de várias técnicas, Levis (2006) apresenta duas técnicas diretas de ensaio. Uma corresponde à execução de ensaios mecânicos de deformabilidade “*in situ*” prévios e posteriores às injeções, porém, estes acarretam custos elevados e resultados pontuais e somente utilizados em casos pontuais.

A segunda, consiste em avaliar a variação de velocidade de propagação de camadas por meios dinâmicos, antes e depois do tratamento, mas é de difícil realização.

Considerando as dificuldades práticas e financeiras destes métodos, Levis (2006) lembra que Marsal e Resendiz em 1975 demonstraram que por meio da equação 2.33 obras dotadas de piezômetros imediatamente a montante e a jusante da cortina (Figura 2.41), possibilitam a estimativas satisfatórias para a eficácia da cortina:

$$E_c = \frac{\Delta H}{H_m} \quad 2.33$$

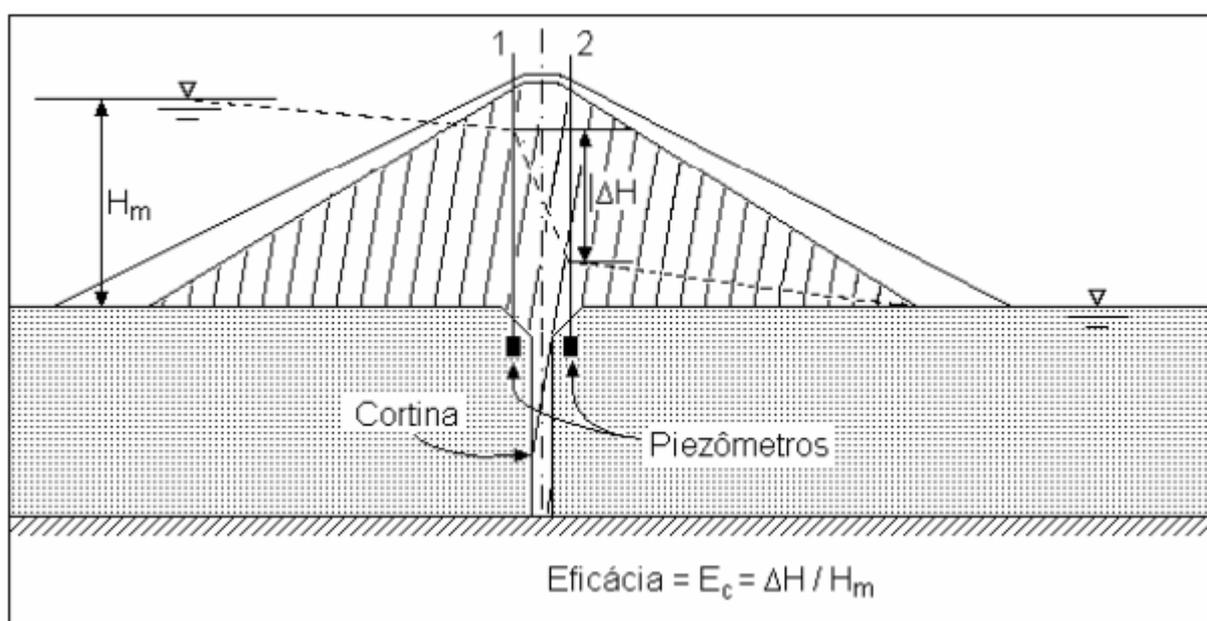
Onde:

$E_c$  = eficácia da cortina;

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

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

Figura 2.41 - Eficácia da cortina de injeção em obras dotadas de piezômetros.



Fonte: Marsal e Resendiz (1995 *apud* LEVIS, 2006).

Entretanto, Guidicini *et al.* (1981 *apud* Levis, 2006,) lembra que mesmo na presença de um bom sistema de instrumentação, a rede de drenos de dissipação das subpressões tende a mascarar o papel da cortina.

A eficácia de uma cortina de injeções também pode ser estimada por relações como a de Kratochvil e Halek (1961 *apud* Levis, 2006), mostrada na equação 2,34, que se baseia numa avaliação das permeabilidades e das vazões de infiltração antes e depois do tratamento:

$$Ec = \frac{Q_i - Q_f}{Q_i}$$

2.34

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).

Além da obtenção do coeficiente de eficácia, que é possível, em alguns casos, realizar uma comparação direta entre as vazões de total da barragem e da fundação da barragem medidos através de medidores de vazão estrategicamente posicionados a jusante da barragem e a vazões apresentadas em projetos similares disponíveis na bibliografia.

No caso das barragens de BEFCs, Cruz *et al.* (2014) afirma que os medidores de vazão a jusante podem não representar a vazão total da barragem e da fundação, pois a água pode percolar pelas fraturas rochosas e encontrar seus caminhos pela fundação, fora do sentido de escoamento dos medidores de vazão, porém, o autor defende que sem considerar essas perdas, eles podem dar uma boa estimativa da quantidade de água percolada pela face de concreto, pela junta perimetral e por eventuais trincas ou defeitos da face.

Cruz (*op. Cit.*) ainda destaca que a avaliação da quantidade de vazão depende diretamente da proporção da vazão de percolação em relação ao aproveitamento hídrico do reservatório, pois, segundo ele uma vazão pequena significa que apenas alguns l/s são perdidos em relação à geração e/ou ao volume do reservatório.

O Autor ainda destaca que há poucos dados referentes a BEFCs disponíveis na bibliografia, sendo observado nos dados disponíveis (Cruz *et al.* 2014) uma grande amplitude entre as vazões obtidas.

Tabela 2.7 Medidas de vazão em 43 BEFCs

Barragem	País	Ano	Material do enroca.	Fundação	Altura (m)	Extensão (m)	Área da face	L/H	A/H <sup>2</sup>	Ev MPa	Máx recal(m)	Vazão (l/s)		
												Inicial	Depois das injeções	atual
Paradela	Portugal	1956	Granito	Granito	112	540	55	4,82	4,38	72	-	1.760	50	720
New Exchequer	EUA	1966	Meta-andesito	andesito	148	427	21	2,88	0,96	-	4,9	14.000	230	-
Cethana	Australia	1971	Quartzo	Riolito	110	213	24	1,93	1,96	-	-	49	35	35
Alto Anchicayas	Colômbia	1974	Diorito	Xisto	140	240	22,3	1,71	1,13	145	0,77	1.800	>400	180
Bailey	EUA	1979	Arenito	Arenito	95	550	65	5,78	7,2	-	-	300	60	-
Foz do Areia	Brasil	1980	Basalto	Basalto	160	825	138	5,17	5,39	32	3,78	260	60	370
Salvagina	Colômbia	1984	Cascalho	Arenito	148	350	57,3	2,36	2,61	-	-	60	60	-
Khao Laem	Tailândia	1984	Calcário	Calcário	130	1.019	140	7,04	8,3	45	-	2.000	-	50
Golillas	Colômbia	1984	Cascalho	Arenito	130	120	15,2	1,04	0,9	200	0,39	1.080	650	200
Santa Juana	Chile	1985	Seixo/Cascalho	Seixo/Cascalho	113	390	39	3,19	3,05	-	-	-	250	-
Guanmenshan	China	1988	Andesito	Andesito	59	184	822	3,12	2,36	-	-	16	-	-
Chengping	China	1989	-	Tufo vulcânico	75	232	29,5	3,09	5,24	-	-	70	10	-
Zhushoqiao	China	1990	Ardósia Calcário	Ardósia Calcário	78	245	25	3,14	3,78	-	-	2.500	-	-
Xibeikou	China	1990	Cr-calcário	Carstico calcário	95	22,2	29,5	2,33	3,26	-	-	1.700	-	-
Longxi	China	1991	-	Tufo de lava-	59	141	7	2,38	2,01	-	-	2,6	-	-
Aguamilpa	México	1993	Cascalho	Riodacito	187	660	137	3,52	3,91	250,50	1,7	260	150	100

Barragem	País	Ano	Material do enroca.	Fundação	Altura (m)	Extensão (m)	Área da face	L/H	A/H²	Ev MPa	Máx recal(m)	Vazão (l/s)		
												Inicial	Depois das injeções	atual
Segredo	Brasil	1993	Basalto	Basalto	145	720	92	4,96	4,37	45		390	45	50
Xingó	Brasil	1994	Gnaisse	Gnaisse	140	850	112	6,07	6,22	37		200	135	-
Shiroro	Nigéria	1994	Granito	Granito	130	1.400	50	10,76	2,96	76		1,700	100	-
Santa Juana	Chile	1995	Seixo/ cascalho	Seixo/ cascalho	113	390	-	3,19	3,05	-		-	250	-
Itá	Brasil	1999	Basalto	Basalto	125	881	110	7,05	7,04	60		1.700	380	200
Puclaro	China	2000	Seixo/cascalho	Seixo/cascalho	80	640	68	8,00	-	-		-	-	-
Tianshengqiao	China	2000	Calcário	Calcário	178	1.137	156	6,38	4,92	45	3,39	180	-	-
Pichi Picún Leufú	Argentina	2000	Seixo/cascalho	Seixo/cascalho	48	1.050	-	22	36	-	-	-	13	-
Machadinho	Brasil	2002	Basalto	Basalto	127	700	77	5,6	4,93	40	1,60	900	700	600
Itapebi	Brasil	2003	Gnaisse	Granito-Gnaisse	120	583	67	4,85	4,65	-	1,55	902	127	37
Xiliushui	China	2004	-	-	145,5	190,6	-	,1,3	-	-		113	-	-
Hongjiadu	China	2004	Calcário	Calcário	179,5	465	76	2,59	2,35	24,07 172,40	1,14	59	28	-
Barra Grande	Brasil	2005	Basalto	Basalto	185	666	108	3,6	3,15	-	3,4	1.300	760	-
Campos Novos	Brasil	2005	Basalto	Basalto	202	592	106	2,93	2,59	-		1.500	1.000	650
ZipingPu	China	2006	-	-	156	635	-	-	-	-	-	51,2	s/ aum.	-
Mohale	Lesoto	2006	Basalto	Basalto	145	600	87	4,13	3,85	30-40	2,9	600	-	-
Messochora	Grécia	2006	Calcário	Calcário	150	337	51	2,25	2,27	44	-	-	-	-
El Cajon	México	2006	Ignimbrita	Ignimbrita	188	550	113,3	2,93	3,21	110	-	150	-	--

Barragem	País	Ano	Material do enroca.	Fundação	Altura (m)	Extensão (m)	Área da face	L/H	A/H <sup>2</sup>	Ev MPa	Máx recal(m)	Vazão (l/s)		
												Inicial	Depois das injeções	atual
Shuibuya	China	2007	Calcário	Calcário	233	675	120	2,38	2,21	120	-	40	-	-
Kárahnjúkar	Islândia	2007	Basalto	Basalto	196	730	93	3,57	2,42	90	-	<100	-	-
Bakún	Malásia	20082010	Grauvaca argilito	Grauvaca	205	730	127	3,6	3,02	80-120	2,27	117,7	-	-
Mazar	Equador	2009	Quartzito/xistos	Quartzito	166	340	45	2,05	1,7	90-130	1,54	480	-	400
Porce III	Colômbia	2010	Xisto	-	151	426	57	2,8	2,5	110	-	<100	-	-
Turimiquere	Venezuela	1998 2011	-	113	-	52	-	-	-	-	300 a 2500 e 9.800 (2007)	2500 (2011)	-	-
Nam Ngum	Laos	2011	Arenito	Arenito	182	470	44,8	2,1	2,7	30-70	-	250	-	-
Los Caracoles	Argentina	2010	Seixo/cascalho Enroca.	Seixo/cascalho e areia	136	620	110	4,5	5,9	-	-	--	-	-
La yesca	México	2012	Seixo/cascalho e ignimbrita	ignimbrita	208,5	628	129	3	3	163 66	0,92	< 160	-	-

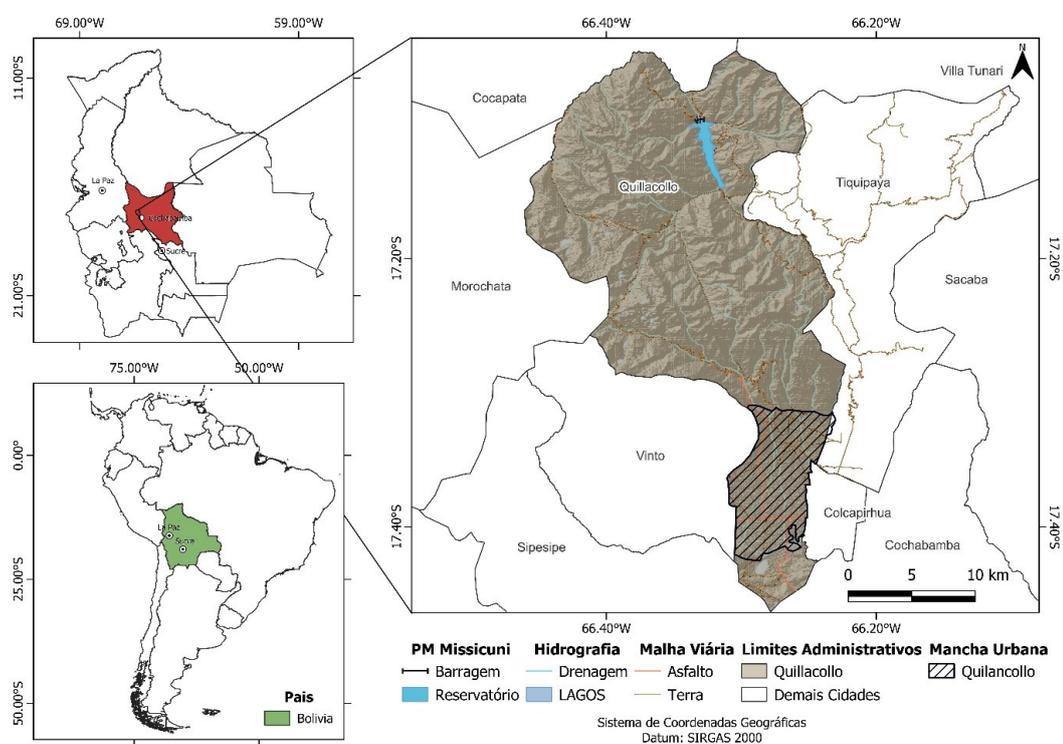
Fonte: Cruz *et. al.* (2014).

### 3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

O Projeto Múltiplo de Misicuni é uma iniciativa do governo boliviano que visa a construção de uma série de infraestruturas hídricas para a gestão sustentável da água no ambiente semiárido da serra de Tunari na região do departamento de Cochabamba. Através da construção de barragens, canais, estações de tratamento de água e outras instalações relacionadas para aproveitamento hídrico da água de degelo para abastecimento humano, irrigação agrícola e produção elétrica para atender as demandas do crescimento populacional significativo nas últimas décadas na região central do vale de Cochabamba (MUNOZ VARGAS *et al.* 2010).

Um dos principais componentes do projeto foi a construção da Barragem Misicuni, uma represa construída com capacidade para armazenar 180 milhões de metros cúbicos de água no estreito de *Sivingani* no Rio Misicuni (Figura 3.1), um afluente do rio Rocha, com objetivo de aproveitar a disponibilidade hídrica dos rios Misicuni, Viscachas e Putucuni, da serra de Tunari para prover o vale central de Cochabamba.

Figura 3.1 - Mapa de localização da Barragem Misicuni.



Fonte: Mapa elaborado pelo Autor.

O Empreendimento possui um papel importante na produção de energia elétrica na região com capacidade instalada final de 120 MW, através da construção de um túnel principal de adução até o Vale de Cochabamba com cerca de 20 km de extensão, uma chaminé de equilíbrio, uma câmara de válvulas, um conduto forçado, uma casa de força e um reservatório de compensação no setor Molle Molle, com capacidade de 370.000 m<sup>3</sup>, ao norte da cidade de El Passo (EMPRESA MISICUNI, 2016; 2020;).

Além disso, o projeto inclui a construção de um canal de irrigação com cerca de 130 quilômetros de extensão, que permitirá a distribuição da água armazenada na barragem para as áreas de cultivo da região. A estrutura conta com uma estação de tratamento de água, que garantirá a qualidade da água potável para fornecimento à população (EMPRESA MISICUNI, 2020).

Por fim o Projeto Múltiplo de Misicuni também tem como objetivo preservar a biodiversidade da região, criando áreas de preservação ambiental ao longo do canal de irrigação e da barragem. Estas áreas serão usadas para a criação de reservas ecológicas e para a promoção do ecoturismo na região (EMPRESA MISICUNI, 2020).

### 3.1 BARRAGEM MISICUNI

A Barragem Misicuni, ilustrada na Figura 3.2, trata-se de uma barragem de enrocamento com face de concreto (EFC), com altura máxima acima da fundação de 120 m, comprimento total na crista de 489,90 m e coroamento na elevação a 3782 m acima do nível do mar.

Os taludes possuem inclinação de 1,5H:1V, sendo protegidos a montante por face de concreto e a jusante por enrocamento arrumado, como visto na seção da barragem na Figura 3.3 e Figura 3.4 (EMPRESA MISICUNI, 2016; SIACARA *et. al.*, 2016).

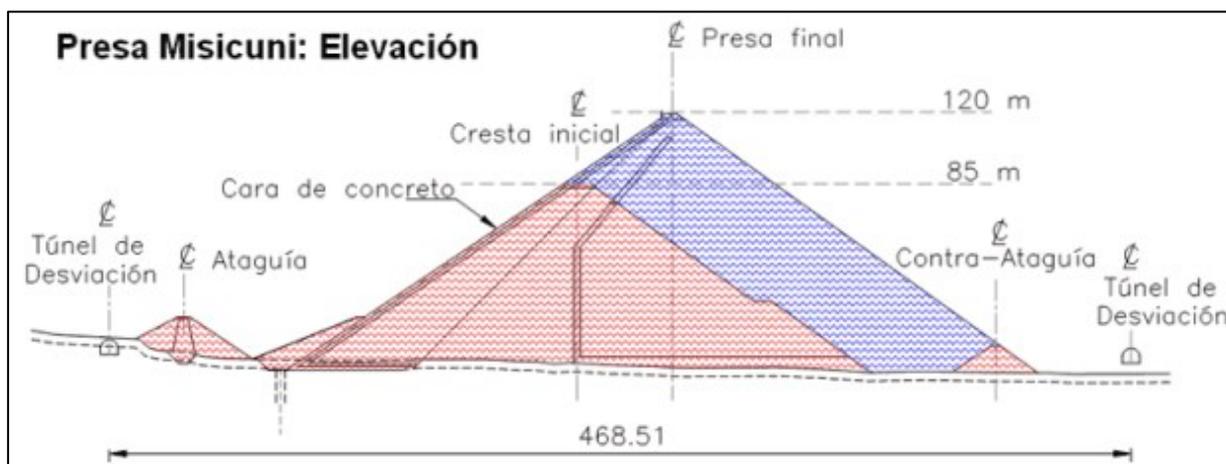
Figura 3.2 - Vista da ombreira esquerda da Barragem Misicuni.



Fonte: Disponibilizado por Nova Engevix.

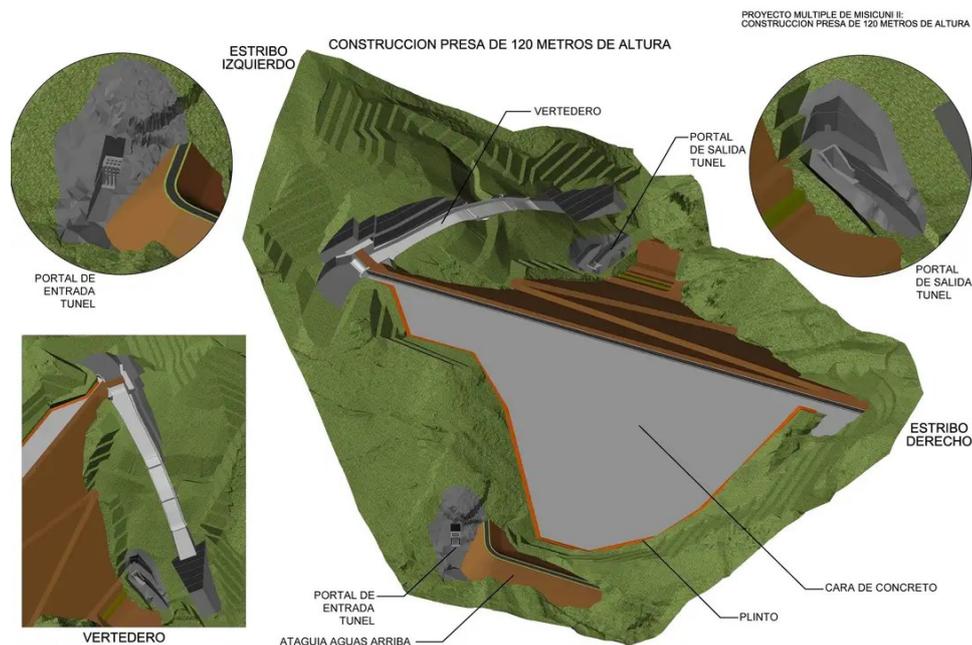
A construção do barramento envolveu a utilização de cerca de 3.767.172,00 m<sup>3</sup> de cascalho aluvionar natural utilizado como enrocamento, 38.465,00 m<sup>3</sup> de concreto (principalmente na constituição do Plinto) e ainda a escavação de 1.909.881,00 m<sup>3</sup> de material pétreo e solo do leito do Rio Misicuni e nas ombreiras da barragem (EMPRESA MISICUNI, 2016).

Figura 3.3 - Seção da Barragem Misicuni.



Fonte: EMPRESA MISICUNI (2016).

Figura 3.4 – Representação tridimensional do projeto inicial da barragem.



Fonte: Rede sociais da Empresa Misicuni.

O vertedouro é de soleira livre com perfil vertente na elevação 3.774,00 m, localizado na margem esquerda da barragem, permitindo uma vazão de 800 m<sup>3</sup> por segundo, apresentando um salto de esqui no segmento final na elevação de 3.618,00 m, como visto na Figura 3.5 (EMPRESA MISICUNI, 2016).

Figura 3.5 - Vista aérea da Barragem Misicuni.



Fonte: Disponibilizado por Nova Engevix.

Além disso, a estrutura conta com um canal de descarga que varia em largura de 24 m a montante para 18 m a jusante com uma câmara de válvula mariposa com

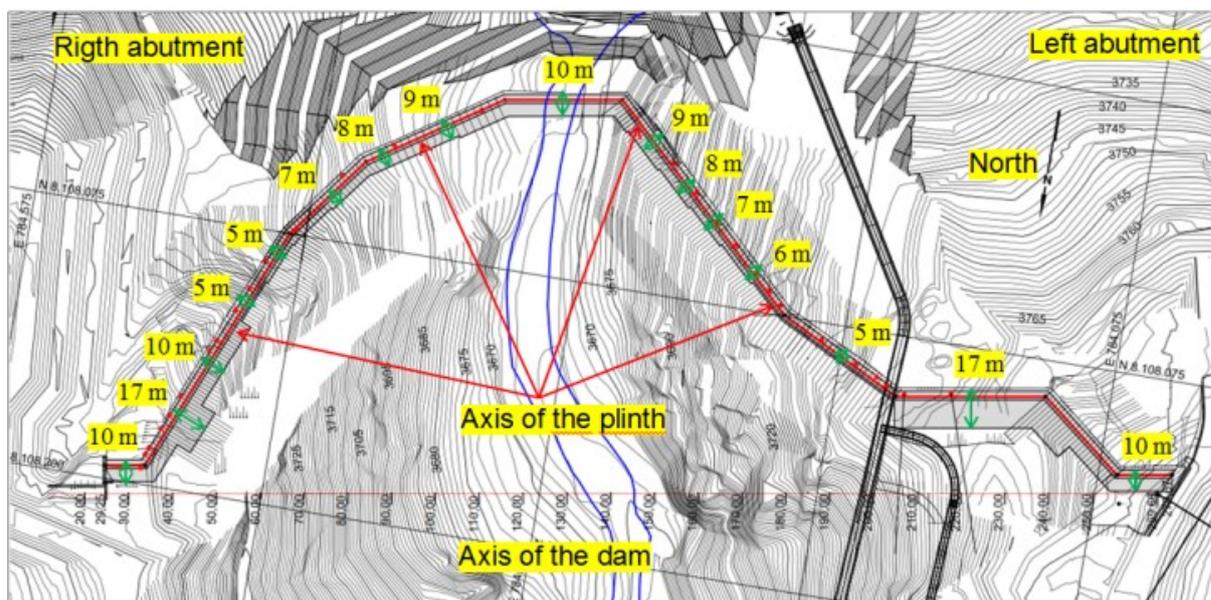
2 m de diâmetro e uma descarga caudal ecológica com válvula *Howell Bungler* de 1,5 m de diâmetro e vazão de 200 l/s (EMPRESA MISICUNI, 2016).

### 3.1.1 Plinto

Os resultados do dimensionamento do Plinto da fundação de Misicuni foram detalhados no artigo de SIACARA *et al.* (2016). Esse estudo descreve a concepção teórica do dimensionamento, que utiliza parâmetros obtidos em campo e ensaios de laboratório, com discussões mais aprofundadas no artigo de Torrico e Salinas (2016). Além disso, o artigo apresenta a aplicação prática dos critérios estabelecidos por Cruz (2009) no dimensionamento do Plinto.

Esses resultados são apresentados por meio de uma tabela segmentada pelos eixos das estruturas, proporcionando uma visão abrangente dos valores dimensionados. Além disso, os resultados também são representados graficamente na topografia, apresentado na Figura 3.6, fornecendo uma compreensão visual do posicionamento e da distribuição do Plinto em relação à barragem.

Figura 3.6 - Dimensões do plinto na planta topográfica.



Fonte: retirado de Siacara *et al.* (op. Cit.).

### **3.1.2 Condições geológico-geotécnicas da fundação**

Na seção a seguir faremos uma descrição geral das litologias e estruturas presentes na área da barragem de Misicuni, e apresentados tópicos descritivos mais detalhados sobre o zoneamento litoestrutural e geotécnico da fundação do plinto.

#### **3.1.2.1 Estratigrafia**

A área da barragem é composta por um vale de paredes rochosas com 300 a 400 m de altura em ambas as margens dispendo de uma sequência rochas e depósitos sedimentares de idade Quaternária, Siluriana e Ordoviciano (Figura 3.7).

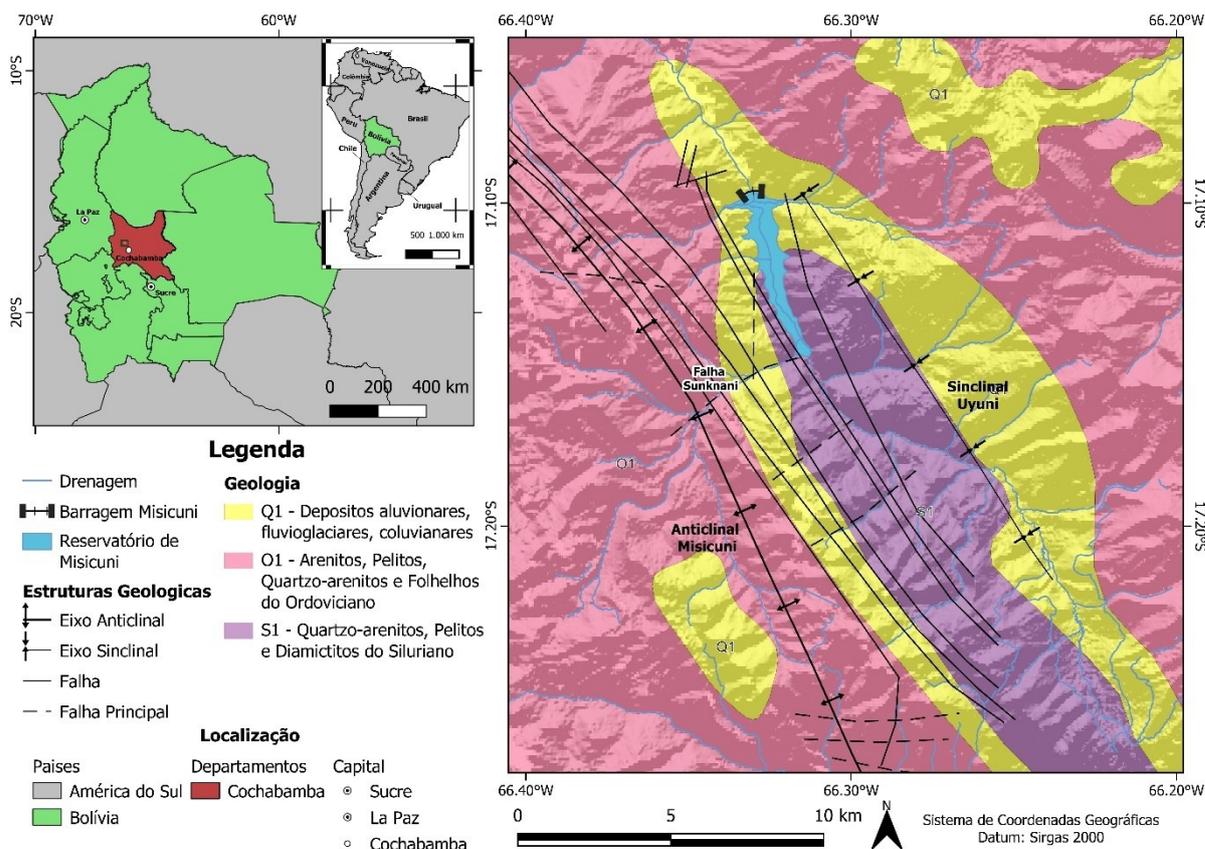
O sistema Quaternário, correspondente a depósitos de morainas e flúvio-glaciais do período Pleistoceno. Além disso, são encontrados depósitos aluviais como terraços nas margens dos rios, nos leitos aluviais e nos cones aluviais na foz dos riachos.

O sistema Siluriano é representado por rochas arenopelíticas das formações Cancañiri e Uncía, associadas a ambientes turbidíticos e de fluxos de gravidade marinho e glacio-marinho.

Já o embasamento, está disposto com conglomerados, arenitos, pelitos e diamictitos da formação Anzaldo, Ordoviciano superior, associadas à ambiente marinho de idades entre Arenigiano e Caradociano. Tendo-se observado veios de quartzo de origem hidrotermais com alguns centímetros de espessura. Tais veios são encontrados apenas nos folhelhos do núcleo do anticlinal Misicuni.

As rochas sedimentares da formação Anzaldo, foram fortemente influenciados pela atividade tectônica de falhas, especialmente da falha de impulso Misicuni. Essa falha, juntamente com a ação erosiva do rio, contribuiu para a formação do vale com paredes rochosas íngremes ao qual a barragem está encaixada.

Figura 3.7 Mapa geológico simplificado do sítio da barragem e esquema geoestrutural das falhas.



Fonte: adaptado de I. D. Clarke & W. Riemer (1987).

### 3.1.2.2 Geologia Estrutural

A área da barragem está localizada na parte intermediária da unidade morfoestrutural conhecida como cordilheira central e oriental. Na região, ocorre uma mudança na direção do bloco paleozoico, que passa de um curso geral de N40°W para um curso norte-sul a partir do paralelo 18.

O quadro estrutural da área inclui a presença de uma dobra anticlinal, duas sinclinais e várias falhas longitudinais inversas, além de falhas secundárias de tipo normal, que exibem traços perpendiculares e diagonais em relação às estruturas principais, com dobramentos localmente transversais.

Essas feições são resultado das tensões tectônicas hercínianas que foram posteriormente modificadas pelo ciclo andino. Esse ciclo andino causou o reajuste das falhas, que são representadas por falhas e lineamentos normais presentes na área da barragem.

A orientação predominante da estratificação nas rochas da área varia entre 250°N - 350°E, com mergulhos que diminuem de oeste para leste, apresentando ângulos médios de 470° a 130°. Entre os planos de estratificação e os principais sistemas de descontinuidade, é comum encontrar preenchimentos com espessura de até 40 cm. Esses preenchimentos são compostos principalmente por argila de média plasticidade e, em alguns casos, podem conter milonito e brecha. Essas características são consequência da atividade tectônica das falhas existentes na região.

- Anticlinal Misicuni

A dobra anticlinal Misicuni, que se estende longitudinalmente com uma direção geral de N35°W é caracterizada por ser uma estrutura positiva, com um flanco oeste apresentando um mergulho médio de aproximadamente 55° a 60°, e um flanco leste mais suave com ângulos variando entre 36° e 45°. Essa configuração resulta em um anticlinal assimétrico, com o seu plano axial inclinando-se para o oeste.

- Sinclinal de Uyuni

O sinclinal Uyuni está localizado no setor leste da área da barragem, também conhecido como sinclinal Sehuenca. É formado por rochas da formação Anzaldo na base, depois da formação San Benito e, finalmente, no topo, da formação Uncía de idade siluriana.

- Dobras Secundárias

As dobras transversais presentes na área da barragem são resultado do falhamento e da interação dos esforços das fases de dobramento hercínico e andino.

- Falhas

São observados dois sistemas principais de falhamentos na região. O primeiro sistema se desenvolveu simultaneamente com o dobramento principal e é resultado das forças de impulso tangencial. Essas falhas longitudinais possuem um caráter inverso, como é o caso da falha Misicuni. O segundo sistema corresponde a fraturas e lineamentos cujos traços são perpendiculares ou diagonais em relação às estruturas ou golpes das camadas. Essas falhas geralmente apresentam um caráter normal, como as falhas de Sivingani, Sunkhani e outras.

- Fraturas Regionais

As fraturas de origem tectônica na área da barragem de Misicuni estão intimamente relacionadas aos movimentos orogênicos que afetaram a Serra do Tunari, bem como à composição petrográfica das diferentes unidades litológicas. Foram identificados mais de três sistemas principais de fraturas regionais na área, formando sistemas conjugados.

As juntas observadas em campo geralmente apresentam-se como fraturas sem nenhum movimento evidente, mas em algumas áreas há deslocamentos de 6 a 12 cm preenchidos com milonito. Os principais golpes dessas fraturas são predominantemente nas direções Leste-Oeste (E-W), Norte-Sul (N-S) e alguns nordeste-sudoeste (NE-SW). As características dessas fraturas na área da barragem são altamente variáveis, destacando-se o fato de que elas não ocorrem isoladamente, mas formam sistemas conjugados. A distância entre as fraturas varia de alguns centímetros a vários metros, tanto na direção da estratificação quanto em direções transversais e diagonais, contribuindo para o padrão de drenagem presente na paisagem da barragem como um todo.

### 3.1.2.3 Zoneamento litoestrutural

Na seção anterior foi feita uma descrição geral das litologias e estruturas presentes na área da barragem de Misicuni, nesta seção é descrita com mais detalhes a sequência estratigráfica presente em cada área do plinto, no qual podem ser observadas em detalhe nos anexos C e D: ombreira direita, leito do rio e ombreira esquerda

Na área do plinto a sequência estratigráfica simplificada é a seguinte:

- a) Ombreira Direita: predomina a ocorrência de siltitos cinzentos muito micáceos, bastante duros, de granulação média a fina muito fraturados, sujeitos a descompressão e ligeiro intemperismo intercalados com quartzitos nas cotas superiores (3771 m á 3651 m). Nas cotas inferiores (3651 m á 3615 m), estratos de folhelhos e siltitos cinzentos de granulação fina, finamente laminados, muito micáceos, bastante friáveis e físseis se intercalam quartzitos e siltitos compactos, extremamente rígidos e com algumas zonas milonitizadas. Já próximo a fundo do vale, uma pequena quantidade de sedimentos aluvio-coluviais de idade quaternária, se intercala em diferentes elevações (geralmente nas cotas aflorantes) e preenchem as falhas existentes no maciço.

Esses sedimentos são compostos por cascalho grosso, com areia e silte/argila.

- b) Leito fluvial: No leito fluvial, nas cotas superficiais (3360 m a 3610 m) predomina folhelhos e siltitos cinzentos de granulação fina, finamente laminados, muito micáceos, bastante friáveis e físseis, intensamente intemperizados nos níveis menos competentes ou superficiais, nos quais tendem a se separar devido à estratificação, nas cotas inferiores (3610 m a 3587 m) predomina quartzitos compactos. Acima destes siltitos, encontram-se siltitos com teores variáveis de quartzo, que vão desde uma leve a alta fratura à medida que a sequência se eleva, além de serem bem estratificados. Intercalados em diferentes níveis, possui milonitos formados durante o processo orogênico andino, portanto, com idade no final do período Cretáceo-Oligoceno.
- c) Margem Esquerda: Nas cotas superiores (3775 m á 3724 m) possui Siltitos com textura micácea com intercalações de arenito, com diferentes graus de fraturamento, levemente a intensamente intemperizados da base para o topo e recobertos sedimentos quaternários, de origem aluvial-coluvial, compostos por cascalho grosso incrustado em areia com silte/argila.
- Nas cotas intermediarias (3724 m á 3706 m) há siltitos cinzentos de granulação fina, finamente laminados, muito micáceos, com alto teor de quartzo, pouco fraturados.
- Nas cotas inferiores (3706 m á 3604 m) há Siltitos e Argilitos verde-acinzentados finamente estratificados, micáceos, em partes de aspecto maciço, moderadamente intemperizados, com intercalações ocasionais de pelitos e ocasionais disposição de zonas milonizadas.

#### 3.1.2.4 Caracterização Geotécnica

A campanha de prospecção geológico-geotécnica do projeto incluiu a realização de 34 furos de sondagem exploratória. Desses, 27 foram distribuídos nas 10 seções do plinto da barragem, enquanto outros 6 foram concentrados nas seções 5 e 6 (plinto central e margem esquerda, respectivamente). Além disso, foi perfurado 1 furo no muro de fechamento, localizado na crista da barragem no talude direito.

A caracterização geotécnica baseou-se nos seguintes parâmetros: RQD, permeabilidade Lugeon e resistência à compressão simples (RCS).

As sondagens realizadas na margem direita apresentaram complexidades técnicas durante a sua execução, especialmente nas sondagens dos trechos 3, 2 e 1. Isso se deveu à elevada alteração do material rochoso nessas áreas, bem como à

presença de muitas famílias de descontinuidades no maciço. Como resultado, as sondagens em geral apresentaram testemunhos com baixas recuperações e uma qualidade entre ruim e muito ruim.

Nas descontinuidades e juntas presentes nessas áreas, foram observados diferentes tipos de material de preenchimento. Esses materiais incluíam argila, areia, cascalho e conglomerados, indicando processos de deposição e acumulação ao longo do tempo. Além disso, foi constatada uma presença significativa de saturação de água nessas descontinuidades.

No leito do rio, por outro lado, apresentou extração de testemunhos material muito friável e físsil com alta permeabilidade com uma importante presença de aterro entre as suas descontinuidades, sobretudo nas cotas altas (3659 m á 3641 m).

A margem esquerda apresentou rochas de qualidade superiores a margem direita, com trechos com boa recuperação e elevado RQD. Nas zonas superficiais, principalmente nas seções 8, 9 e 10, desta margem foi encontrado um material intensamente laxo, muito friável e físsil com alta permeabilidade.

Com base nos resultados das sondagens realizadas, foi realizada a caracterização geológica da fundação, que foi posteriormente mapeada e dividida no mapa geológico/geotécnico. Além disso, a caracterização geomecânica da rocha de fundação do plinto foi conduzida utilizando o método de *Rock Mass Rating* (RMR), cujos detalhes estão disponibilizados no ANEXO A e adicionalmente, um perfil geológico/geotécnico elaborado pela ao longo do eixo da fundação do plinto, fornecendo informações detalhadas sobre as características geológicas e geotécnicas encontradas nessa área específica. Esse perfil está disponível no ANEXO D – Perfil Geológico/Geomecânico na seção do plinto.

Na determinação da permeabilidade da fundação foi executado 376 ensaios de Lounge para estimar a absorção hidráulica nos blocos estudados nas diferentes seções do ensaio.

Os testes *in situ* foram realizados com a modalidade da aplicação de dois estágios para avaliação do consumo de absorvido em campo, sendo um estágio ascendente e outro descendente.

No primeiro estágio, são utilizados aumentos progressivos de pressão e, no segundo estágio, a pressão máxima suportada pelo solo é diminuída até retornar à pressão inicial.

O teste geralmente consiste em sete etapas de avaliação com um tempo de absorção nominal de aproximadamente 10 m.

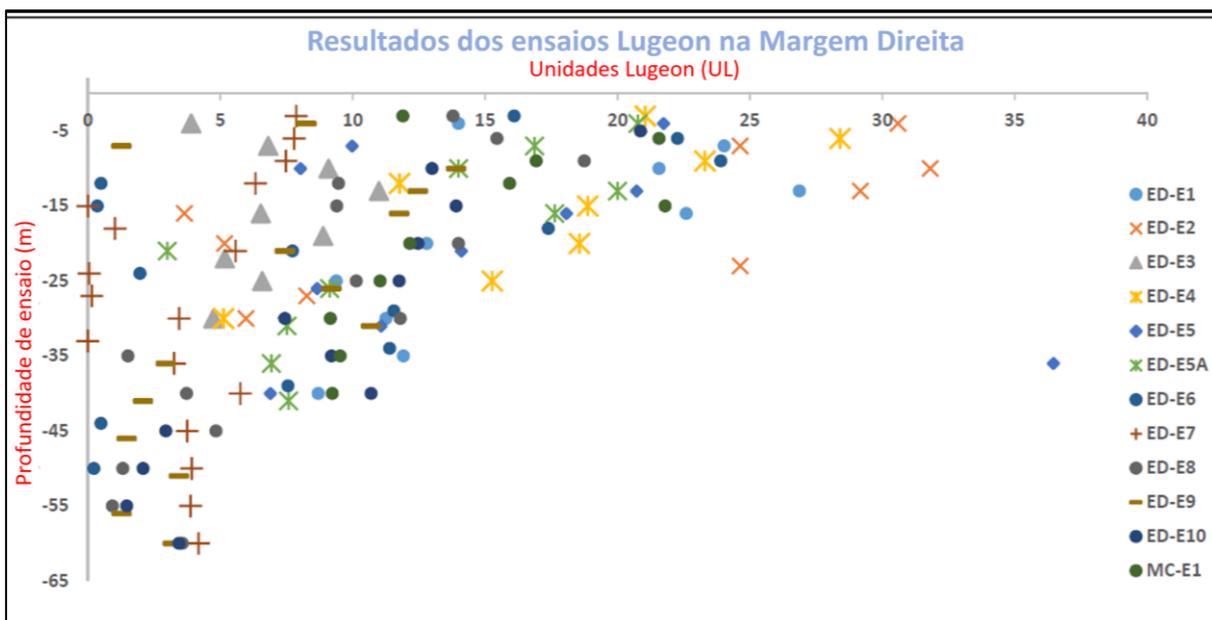
Em geral, os resultados demonstraram uma ampla variação no comportamento do fluxo, que vai desde laminar até turbulento entupido. É importante destacar que muitos dos testes conduzidos na parte superior da margem direita mostraram comportamento de absorção e escoamento com tendência a erosão.

Por outro lado, na parte central da margem esquerda ocorrem em alguns casos fluxos laminares a turbulentos, mas ambos de fluxo constante.

É importante observar que, frequentemente, não foi possível estabelecer uma relação clara entre os valores de % RQD e os resultados em Unidades Lugeon (UL) nos testes de condutividade hidráulica. Isso se deve a fatores como o número de famílias de fissuras presentes em rochas aparentemente intactas, por onde a água de ensaio pode fluir, bem como aos níveis de compactação do material de preenchimento em rochas mais fraturadas.

Os gráficos a seguir ilustra, o comportamento dos ensaios de permeabilidade hidráulica do tipo Lugeon realizados nas seções do plinto da barragem, distinguindo entre Margem Direita, Leito e Margem Esquerda.

Figura 3.8 - Resultados dos ensaios Lugeon, Margem Direita.



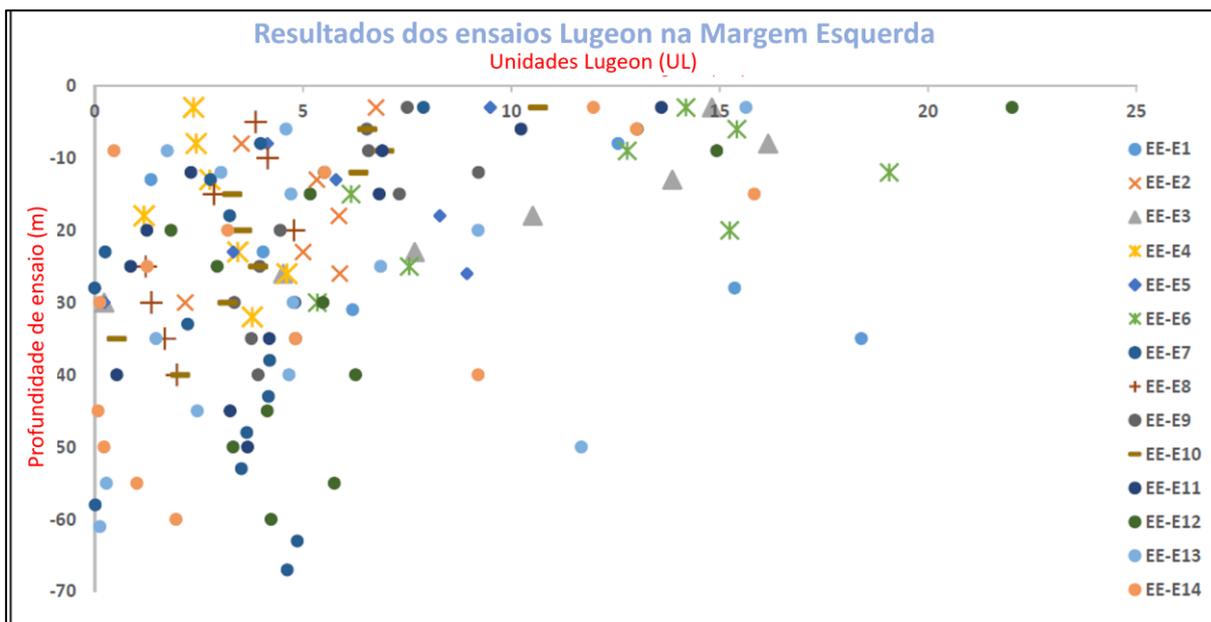
Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

Figura 3.9 - Resultados dos ensaios Lugeon, Leito do Rio.



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

Figura 3.10 Resultados dos ensaios Lugeon, Margem Esquerda



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

Nos gráficos anteriores pode-se observar como a permeabilidade hidráulica é maior nos primeiros metros medidos a partir da superfície do plinto, o que justifica os volumes máximos de injeção nos tratamentos dessas progressões.

#### 4. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

No projeto de Misicuni, o Método Gin foi amplamente aplicado na construção das cortinas de injeção, visando simplificar e otimizar todos os tratamentos realizados durante a obra e possuindo como objetivo principal:

- Reduzir a condutividade hidráulica do maciço de fundação, considerando a dificuldade e o alto custo de alcançar uma impermeabilização completa, é importante lembrar que nenhum ambiente natural é totalmente impermeável.
- Melhorar as propriedades mecânicas do maciço de fundação injetado, formando um bloco de tratamento com qualidade superior à rocha original.
- Preencher cavidades, estabilizar o terreno e a reduzir deformações na matriz rochosa.

O projeto de tratamento ressalta que o grau de conclusão dos tratamentos geotécnicos de injeção de cimento em barragens depende de vários fatores. Destacando a importância de reduzir o consumo de calda de cimento nas diferentes etapas de injeção para a execução de um bom tratamento. O que depende diretamente das condições geotécnicas do terreno tratado, incluindo a qualidade da rocha, o número de famílias de descontinuidades e outras condições geológicas presentes e da correta aplicação do método de injeção e dos cuidados especiais destinados a executar um bom selamento dos furos.

##### 4.1 PROJETO DE TRATAMENTO ADOTADOS

No aspecto geral os trabalhos no tratamento da fundação do PM Misicuni, foi realizado segundo a seguinte sequência:

- Definição da calda de cimento;
- Seleção das curvas de injeção a serem utilizadas no projeto;
- Definição das ordens de trabalho e plano de operação dos furos a serem tratados;
- Exploração Geológica – Geotécnica;
- Injeções de furos exploratórios com o Método GIN;

- Perfuração alternada por percussão dos furos da cortina de consolidação;
- Injeção da cortina de consolidação, com Método GIN;
- Perfurações e injeção com método GIN dos furos da cortina de Impermeabilização na ordem:
  - Primário, Secundário, Terciário, Quaternário, Quinário, conforme o caso.
- Avaliação e análise de resultados.

De acordo com a geometria do projeto, a disposição dos espaçamentos nas cortinas de consolidação e de impermeabilização são dispostos da seguinte forma:

- Furos de exploração a cada 24 m
- Furos primários a cada 24 m
- Furos secundários a cada 12 m
- Furos terciários a cada 6 m
- Furos quaternários \* a cada 3 m
- Furos quinários \*\* a cada 1,5 m

As profundidades previstas das cortinas e zonas, bem como o espaçamento entre os poços de injeção, são mostradas na seção 5.2.

#### **4.1.1 Furo de injeção executados.**

Sem contar as perfurações dos poços exploratórios, foram realizadas 988 perfurações ao longo do plinto usando sistemas de perfuração por percussão com equipamento do tipo *Down the Hole Hammers* (DTH *Hammers*).

A geometria do projeto é formada por três linhas de perfuração, as linhas extremas correspondem às cortinas de consolidação, tanto a montante quanto a jusante, depois a linha central é a correspondente à cortina de impermeabilização.

A geometria do projeto é formada por três linhas de injeção. As linhas extremas correspondem às cortinas de consolidação, tanto a montante quanto a jusante, depois a linha central é a correspondente à cortina de impermeabilização.

A profundidade do bloco de consolidação é constante em todos os trechos do plinto, com profundidade de 10,0 m, e a cortina de impermeabilização é de

profundidade variável de acordo com a carga hidráulica submetida a seção da barragem.

Os ângulos das perfurações estão orientados a NE na margem direita e a NW na margem esquerda com ângulos variáveis entre 5° e 15°, a parte central orientada nos mesmos sentidos a partir do seu centro.

No total, foram perfurados aproximadamente 21 km de poços de injeção na fundação do plinto da barragem, abrangendo as cortinas de consolidação e impermeabilização. Os problemas mais comuns encontrados incluíram a instabilidade das paredes dos poços nas seções da margem direita, devido ao colapso frequente dos poços ou dificuldades de perfuração em estratos com alto teor de argila.

É importante observar que, nas seções da barragem mencionadas anteriormente, foram necessárias combinações de injeções ascendentes e descendentes para estabilizar o terreno e permitir a continuação das perfurações nas áreas restantes, de acordo com a concepção do projeto.

#### **4.1.2 Procedimentos**

Os procedimentos e parâmetros para o tratamento por injeção GIN foram inicialmente definidos de acordo com as especificações do projeto. No entanto, ao longo do processo, foram realizadas alterações com base em recomendações de consultores externos, com o objetivo de aprimorar a eficácia do tratamento.

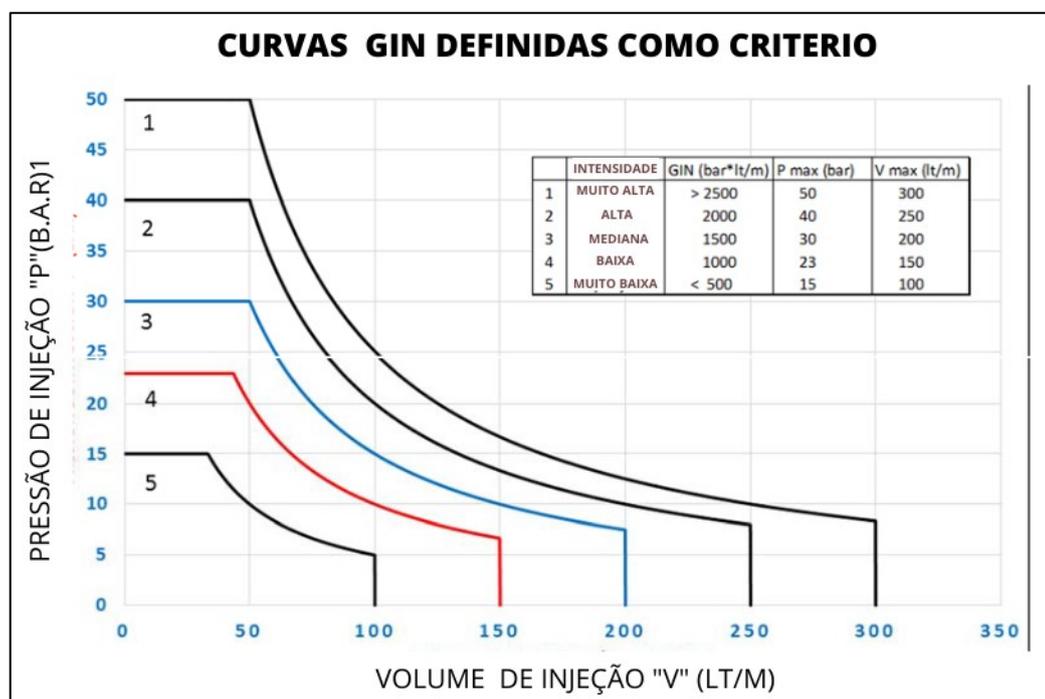
##### **4.1.2.1 Curva GIN**

Ao realizar o tratamento geotécnico de injeção de cimento, o método GIN exige uma pressão máxima de injeção que seja de dois a três vezes a pressão futura da água no local, ou seja, na foz do furo perfurado e injetado.

Assim, ao longo de quase todo o processo de tratamento, foram usadas curvas diferentes para as linhas da cortina de consolidação a montantes e a jusante, bem como uma envoltória diferente para a cortina de impermeabilização no eixo do plinto.

O gráfico a seguir mostra os gráficos típicos usados no método GIN ao longo de grande porção das injeções de cimento sob pressão realizadas na barragem.

Figura 4.1 - Curvas típicas do Método GIN adotado.



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

A curva de injeção GIN de baixa intensidade foi usada para a cortina de consolidação (P máx. = 23 bar, V máx. = 150 lt/m e um GIN = 1000 bar\*lt/m), marcada em vermelho no gráfico anterior.

Para a cortina de impermeabilização, foi utilizado o GIN de média intensidade, (P máx. = 30 bar, V máx. = 200 lt/m e GIN = 1500 bar\*lt/m), destacado no gráfico anterior em azul.

Em termos gerais o procedimento adotado consistia em injetar a calda de cimento até a injeção atingir algum destes parâmetros, seja por pressão máxima, volume injetado ou GIN máximo atingido e cessar os trabalhos imediatamente após atingir esses parâmetros.

Durante fases de consultoria externa realizadas em 2016, os critérios para o tratamento por injeção GIN foram flexibilizados, e recomendou-se adotar uma abordagem que considerasse o comportamento dos ensaios GIN para determinar o fechamento do poço ou a necessidade de fases adicionais de injeção posteriormente.

Como resultado, quando a pressão máxima foi atingida as injeções foram mantidas em fluxo constante por cinco minutos e as vazões foram registradas.

Nos casos em que foi registrado vazões inferiores a 1 litro/minuto/metro as injeções foram interrompidas e a seção foi considerada selada. Por outro lado, as pressões máximas para vazões superiores a 1 litro/minuto/metro foram reduzidas a 5,0 Bar e mantidas por cinco minutos. As vazões foram registradas e a pressão foi aumentada gradualmente de 5 em 5 Bar até que as vazões caíssem abaixo de 1 litro/minuto/metro.

Em situações em que a injeção apresentou um rápido aumento de pressão (múltiplo de 5,0 Bar) e interceptou a curva GIN em seu curso, a injeção foi mantida por cinco minutos na pressão máxima registrada. Em situações em que a vazão foi maior que 1 litro/minuto/metro, a pressão foi reduzida em 5 Bar para cruzar a curva. Foi mantida por cinco minutos e, em seguida, a pressão foi reduzida novamente até que a vazão voltasse a ser maior que 1 litro/minuto/metro. Este processo continuou a ser aplicado até que a vazão registrada fosse menor que 1 litro/minuto/metro, ou até que a vazão mínima necessária fosse atingida ou o volume máximo injetado atingido.

Nos episódios em que o volume máximo acumulado foi atingido, a injeção foi suspensa, e foi realizada a lavagem do trecho com água, deixando-o em repouso por seis horas. Após esse período, foram realizadas novas fases de injeção. Em situações em que a fase de injeção posterior não conseguiu selar o poço, foi aplicada uma terceira fase de injeção, seguindo o protocolo indicado acima

Caso uma das três condições mencionadas seja alcançada, uma vazão próxima ao mínimo necessário para selar um segmento é aplicada por um período de 5 a 10 minutos para verificar se a seção está prestes a ser vedada. Isso parece ser uma medida de verificação importante para garantir o sucesso do tratamento de injeção.

Para poços onde a terceira fase de injeção não atingiu selamento foi executado furos adicionais.

#### 4.1.2.2 Calda de Cimento

A calda de cimento para a injeção foi determinada em laboratório de acordo com as especificações técnicas do projeto, com base nos melhores resultados das misturas de injeção testadas e sob análise de comparações reológicas de melhor adoção no local. Os resultados e dosagens da calda de injeção utilizada para o

tratamento geotécnico de mitigação da condutividade hidráulica estão apresentados a seguir:

- Mistura 1.

Uma primeira mistura de injeção, realizada no período de dezembro de 2014 a abril de 2015. Esta argamassa foi introduzida nos furos da seção 5, (leito do rio), e na parte inferior da seção 4, (Encosta Direita), representou 13,44% de todo o volume de injeção ocupado neste empreendimento até a data de emissão deste laudo.

Tabela 4.1 - Propriedades de calda de Injeção 1.

<b>CALDA DE INJEÇÃO 1</b>	
<b>Propriedade</b>	<b>Magnitude</b>
Proporção água-cimento:	0.65
Tipo e fração de aditivo	0.4% de EUCO MR.360
Fração de água livre em 2 horas	4
Viscosidade plástica (mpa)	27
Índice de fluidez (seg)	40,65
Densidade (gr/cm <sup>3</sup> )	1,63
Coesão relativa (mm)	0,083
Ph da mescla	10
$f'c$ a em 7 dias (kg/cm <sup>2</sup> )	136,1
$f'c$ a em 14 dias (kg/cm <sup>2</sup> )	143,4
$f'c$ a em 28 dias (kg/cm <sup>2</sup> )	158

Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

- Mistura 2.

A mudança da calda de injeção foi efetuada desde o mês de maio de 2015 até às últimas injeções do mês de março de 2016, sendo oportuno referir que a mesma mistura de injeção foi utilizada no resto do projeto, ou seja, em todas as seções, exceto 5 e uma fração de 4, foi usada a mistura de injeção número 2.

Tabela 4.2 - Propriedades de calda de Injeção 2.

<b>CALDA DE INJEÇÃO 2</b>	
<b>Propriedade</b>	<b>Magnitude</b>
1,2	0.7
Tipo e fração de aditivo	0,3% de SIKAMENT N-100
Fração de água livre em 2 horas	5,5

CALDA DE INJEÇÃO 2	
Propriedade	Magnitude
Viscosidade plástica (mpa)	18
Índice de fluidez (seg)	35,71
Densidade (gr/cm <sup>3</sup> )	1,56
Coesão relativa (mm)	0,109
Ph da mescla	10
$f'c$ a em 7 dias (kg/cm <sup>2</sup> )	102,45
$f'c$ a em 14 dias (kg/cm <sup>2</sup> )	111,46
$f'c$ a em 28 dias (kg/cm <sup>2</sup> )	027

Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

### 4.1.3 Equipamentos e Procedimentos

O processo de injeção pode ser dividido em três etapas principais: preparar a calda de injeção, preparar as seções ou progressões de injeção e executar o tratamento.

#### 4.1.3.1 Equipamentos e configuração das injeções.

Para os procedimentos de injeção, duas Estações de Injeção foram localizadas estrategicamente às margens da barragem.

Os seguintes componentes constituíam os postos ou centrais de injeção:

- Um turbo misturador coloidal com velocidades de mistura > 1250 rpm
- Um agitador de polpa com capacidade de 400 l e < 90 rpm
- Uma bomba de cavidade progressiva de vazão,  $q = 70$  bpm
- Bomba Injetora de Pistão automática de simples efeito, com acionamento hidráulico, programável por meio de controladores lógicos (CLP), *touch screen* e sistema de comunicação local-remoto e com aquisição de dados em tempo real.

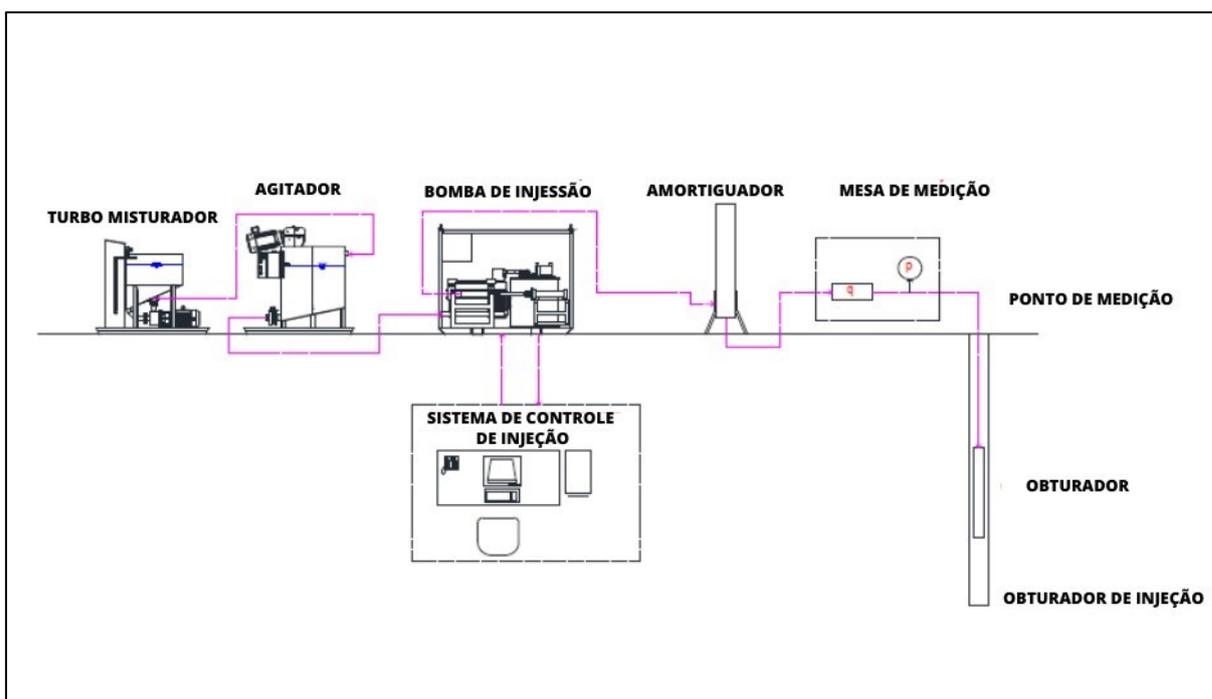
Com gráficos em tempo real do GIN *Intensity Number*, tendências de pressão efetiva, vazão ou vazão de injeção, penetrabilidade ( $q/p$ ) e volume acumulado, além de sua interface em tela para visualizar o comportamento das variáveis de interesse durante o desenvolvimento da injeção.

- Obturadores pneumáticos expansíveis até 70 kg/cm<sup>2</sup>.
- *Packers* mecânicos para tratamentos do furo.

- Cavalete ou mesa de medição, com sensores e transdutores eletrônicos alojados em pontos estratégicos da linha de injeção.

Pode-se observar na Figura 4.2, a disposição e distribuição comum dos equipamentos e sistema de injeção comumente utilizados no desenvolvimento do projeto de tratamento geotécnico para a mitigação da condutividade hidráulica da fundação da Barragem de Misicuni.

Figura 4.2 - Distribuição geral de equipamentos de injeção no Método GIN.



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

A operação genérica das bombas injetoras automatizadas consiste basicamente nas seguintes etapas: programação do equipamento, identificação do furo, progressão, seção e linha de injeção. A bomba injetora é capaz de coletar dados em intervalos de aproximadamente um segundo, por meio de sensores eletrônicos-analógicos alojados nas tabelas de medição de dados. Essas informações são então transferidas para o PLC, onde são realizados os cálculos pertinentes e gerados os gráficos necessários. As informações são armazenadas em sua unidade interna, tornando-as visíveis para revisão, consulta e controle por meio de uma LAN do sistema de controle de injeção.

Figura 4.3 - Tela de operação do equipamento de injeção.



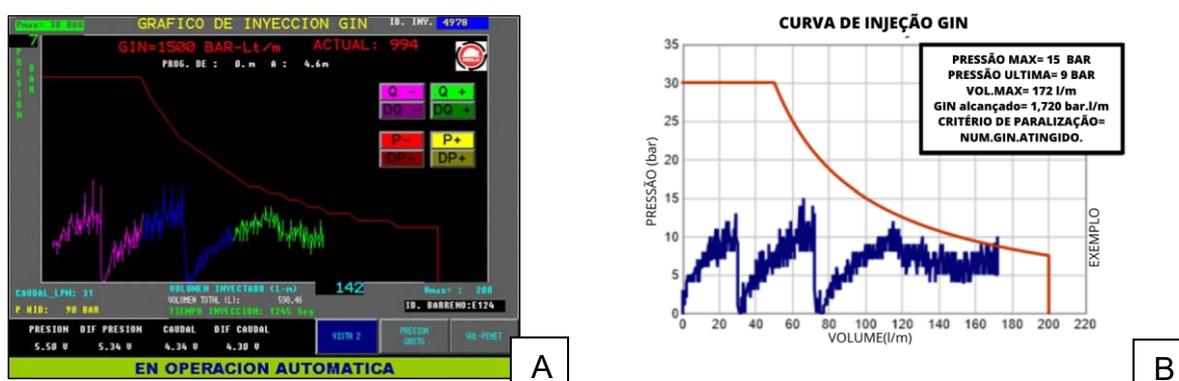
Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

Os relatórios são gerados com as informações geradas pelas bombas injetoras automatizadas e as mesmas informações são armazenadas em um sistema global que gerencia todas as informações de injeção das mais de 5 mil progressões de injeção.

Os relatórios contêm as informações mais vitais das seções de injeção de cada orifício injetado, ou seja, com os gráficos do Envelope da curva do *Injection Intensity Number* ou *GIN Number*, Pressão Efetiva - Tempo, Fluxo - Tempo, Penetrabilidade - Volume e Volume acumulado - Tempo.

Nas ilustrações a seguir é possível observar a concordância entre o desenvolvimento computadorizado dos equipamentos com sistemas de injeção e o *software* utilizado para a geração de relatórios gráficos de injeção Método GIN.

Figura 4.4 A) Tela de injeção durante a execução dos trabalhos;  
B) Gráfico exportado após a execução dos trabalhos



Fonte: adaptado de Tecnosuelo (2016).

#### 4.1.3.2 Procedimento de preparação da calda durante o trabalho de injeção.

A preparação da calda de injeção, foi realizada sob as seguintes orientações:

- Preenchido o misturador coloidal turbo, com água na graduação definida.
- Adicionados os sacos de cimento necessários para cumprir a relação A/C.
- Misturado em alta rotação por 3 minutos.
- Adicionado o aditivo superplastificante.
- Mantido a mistura por cerca de 1 a 2 minutos no misturador, deve se transferir a calda para o agitador.
- O agitador pode armazenar até 400 lt, de mistura suspensa desejada.
- Manter o abastecimento contínuo de calda para a bomba de injeção de forma automatizada, de acordo com o consumo e o comportamento do furo tratado.

#### 4.1.3.3 Controle de qualidade da mistura de injeção.

A equipe de tratamento manteve um acompanhamento constante dos procedimentos de preparação de caldas e dos programas de injeção em cada uma das estações de tratamento ao longo do processo de injeção. Posteriormente, a equipe de tratamento apresentou os detalhes desses ensaios e suas respectivas avaliações. Os valores médios do tratamento de injeção, tanto na coordenação de campo quanto no laboratório, podem ser vistos na tabela a seguir.

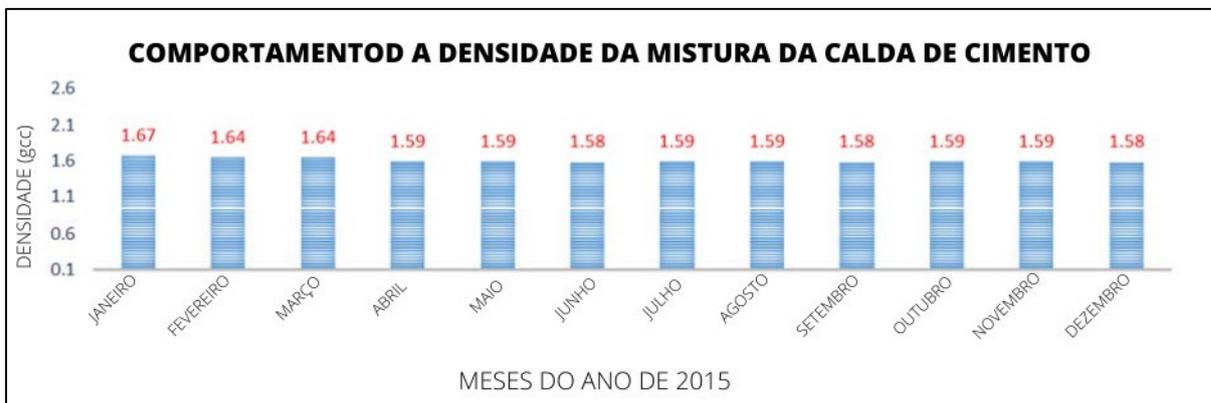
Tabela 4.3 Valores médios durante o tratamento de injeção. (Campo-Laboratório)

<b>VALORES MEDIOS DE INJEÇÃO</b>				
<b>Propriedade</b>	<b>Local</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidades</b>	<b>Frequência</b>
Índice de fluidez	Campo	1,58	seg	Diário
Densidade	Campo	36,5	gcc	Diário
% de água livre em 2 horas	Campo	5,5	%	Diário
pH da calda	Campo	10	-	Diário
Viscosidade plástica	Laboratório	18	mPa	Semanal
Coesão relativa (mm)	Laboratório	0,109	mm	Semanal
$f'c$ a em 28 dias	Laboratório	140	kg/cm <sup>2</sup>	A cada 20 m de tratamento

Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

A Figura 4.5 apresenta o registro dos valores de fluidez Marsh *in situ* durante o trabalho de injeção.

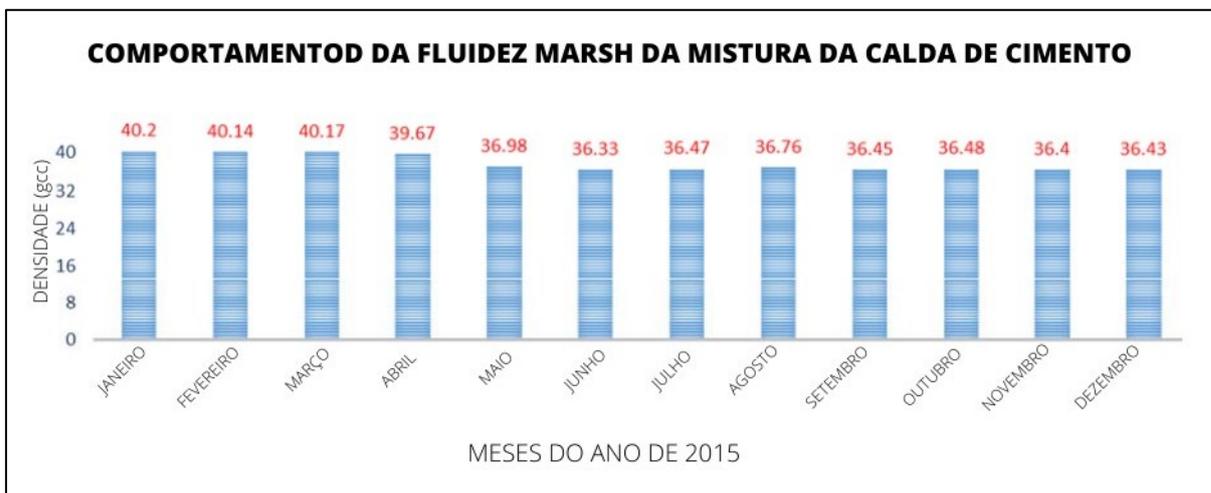
Figura 4.5 Variações na fluidez do pântano da pasta de injeção medida *in situ*



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

A Figura 4.6 apresenta o comportamento típico dos ensaios de Compressão Simples dos cilindros da calda de Cimento, utilizados nos trabalhos de Injeção.

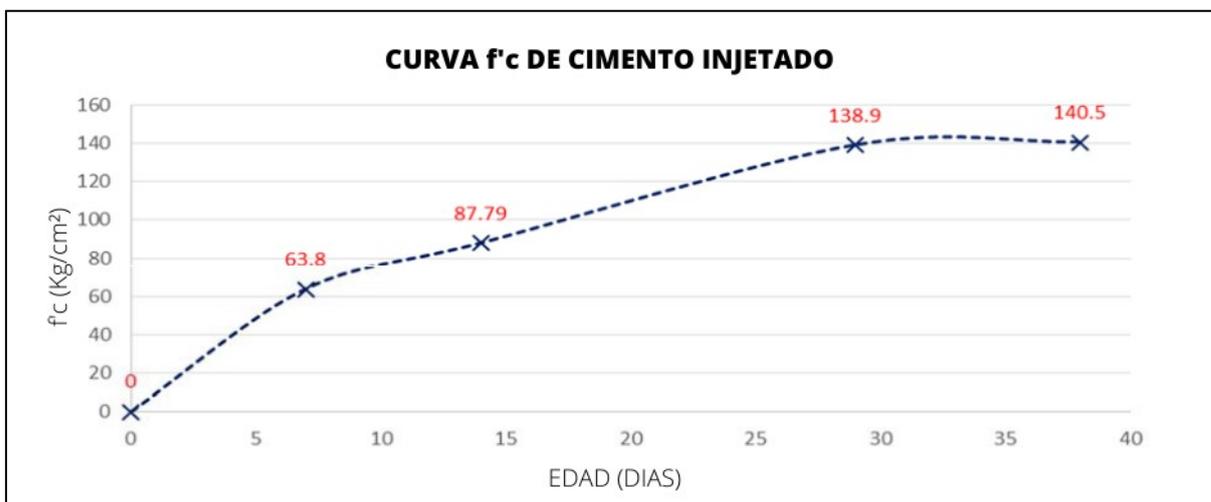
Figura 4.6 Variações do comportamento de fluidez pasta de injeção medida *in situ*.



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

A Figura 4.7 apresenta o Comportamento típico dos ensaios de Compressão Simples dos cilindros da calda de Cimento, utilizados nos trabalhos de Injeção.

Figura 4.7 - Curva de resistência à compressão simples vs. idade da argamassa de injeção



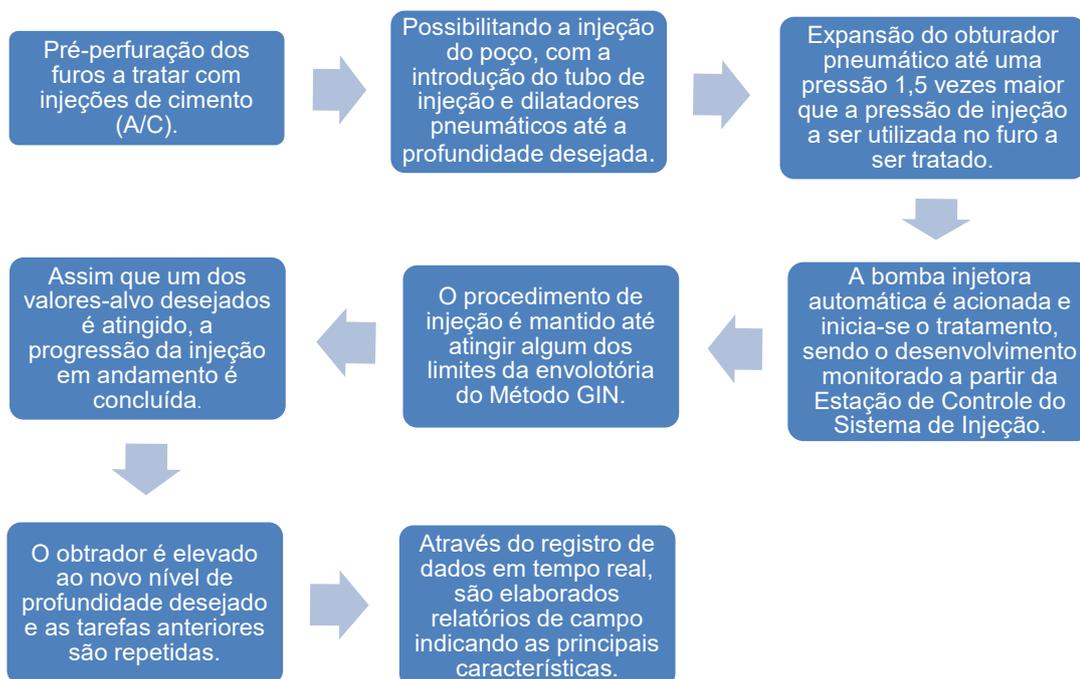
Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

É importante observar que, em alguns casos de PCS, foram obtidos valores até superiores a 140 kg/cm<sup>2</sup>, que são informados como a capacidade de carga nominal da calda de injeção utilizada no projeto. Portanto, podemos afirmar que a calda de injeção, conforme os indicadores de resistência à compressão simples, está significativamente acima dos 100 kg/cm<sup>2</sup>, que é o valor mínimo indicado pela fiscalização para este tratamento.

#### 4.1.3.4 Protocolo de execução das injeções pelo Método GIN de Injeções.

As injeções com o método GIN consistiam no seguinte protocolo de execução das injeções (Figura 4.8):

Figura 4.8 – Sequência executiva dos trabalhos de injeção.

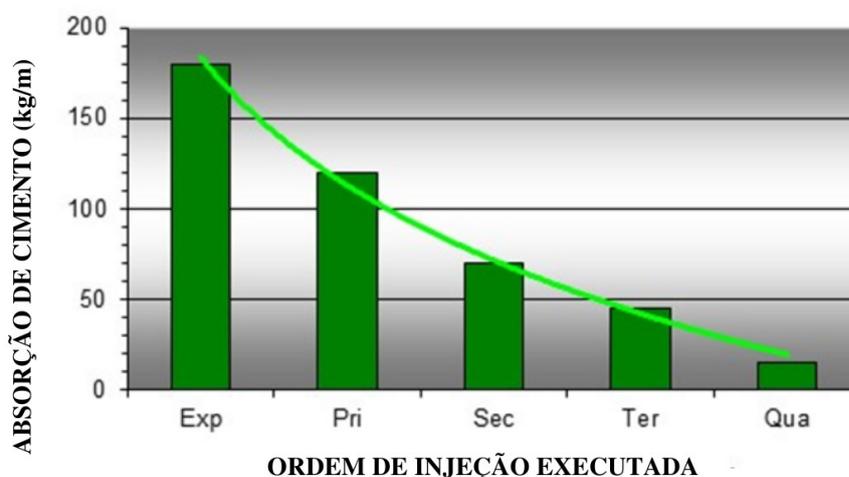


Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

#### 4.1.4 Critérios de Qualificação das Injeções.

Para cada módulo da cortina em análise são elaborados gráficos de absorção de cimento por metro com base na ordem das perfurações de injeção, de acordo com a Figura 4.9.

Figura 4.9 – Exemplo de tabela de absorção de calda cimento



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

A eficiência da cortina de injeção, ou da cortina como um todo, será satisfatória quando os gráficos mostrarem a redução da absorção de calda em função da injeção de perfurações de ordem subsequente até atingir o valor máximo especificado.

Para cumprir o critério de fechamento da cortina, perfurações de verificação devem ser realizadas nas áreas "críticas" da cortina de injeção, que são as áreas que absorvem mais calda de cimento para a seção em análise.

Uma vez concluídas as perfurações de verificação, os testes de permeabilidade devem ser realizados (Lugeon) e a cortina será considerada satisfatória quando a absorção dos ensaios de permeabilidade nas perfurações de verificação for igual ou inferior a 3 UL.

Posteriormente, a injeção das perfurações de verificação será realizada, seguindo os critérios de pressão e volume máximos estabelecidos para cada trecho ou zona, de acordo com os trechos de teste de permeabilidade conforme a Especificação Técnica.

Neste caso, o desempenho da cortina será considerado satisfatório quando a absorção de cimento para cada trecho injetado for igual ou inferior a 40 kg/m.

Em resumo, a correta avaliação e segurança de um tratamento eficaz consiste em uma análise adequada dos consumos com relação ao tempo e à ordem dos furos injetados.

O grau de absorção do fechamento está intimamente ligado às características do terreno, ou seja, à qualidade da rocha, ao número de famílias de descontinuidades e a outras condições geológicas.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS

Ao longo do tratamento, aproximadamente 21 km de perfuração e injeção foram distribuídos em mais de 1000 poços, abrangendo as 10 seções do plinto e produzindo uma quantidade substancial de informações gráficas sobre o comportamento da Curva GIN.

Por esse motivo para desenvolver uma análise consistente do tratamento de injeção é prudente sistematizar o comportamento da curva em grupos de comportamento observado, com o objetivo de simplificar a identificação de ocorrências durante os trabalhos e acelerar a integralização dos dados em relatórios de análise.

As informações serão categorizadas em horizontes de tratamento ou injeção, incluindo a extensão do tratamento de cada poço injetado e das perfurações na linha de impermeabilização de cada seção

### 5.1 COMPORTAMENTOS DA CURVA GIN APRESENTADOS

Nesta seção, a única intenção é descrever alguns casos particulares do comportamento da curva GIN na cortina de impermeabilização (linha B), observado durante a injeção e relatados nos relatórios de análise de injeção da Tecnosuelo e Engevix.

#### 5.1.1 Análise da Ombreira Direita

Neste tópico apresentam algumas situações dignas de nota sobre o comportamento do tratamento para as seções 1 a 4 na ombreira direita.

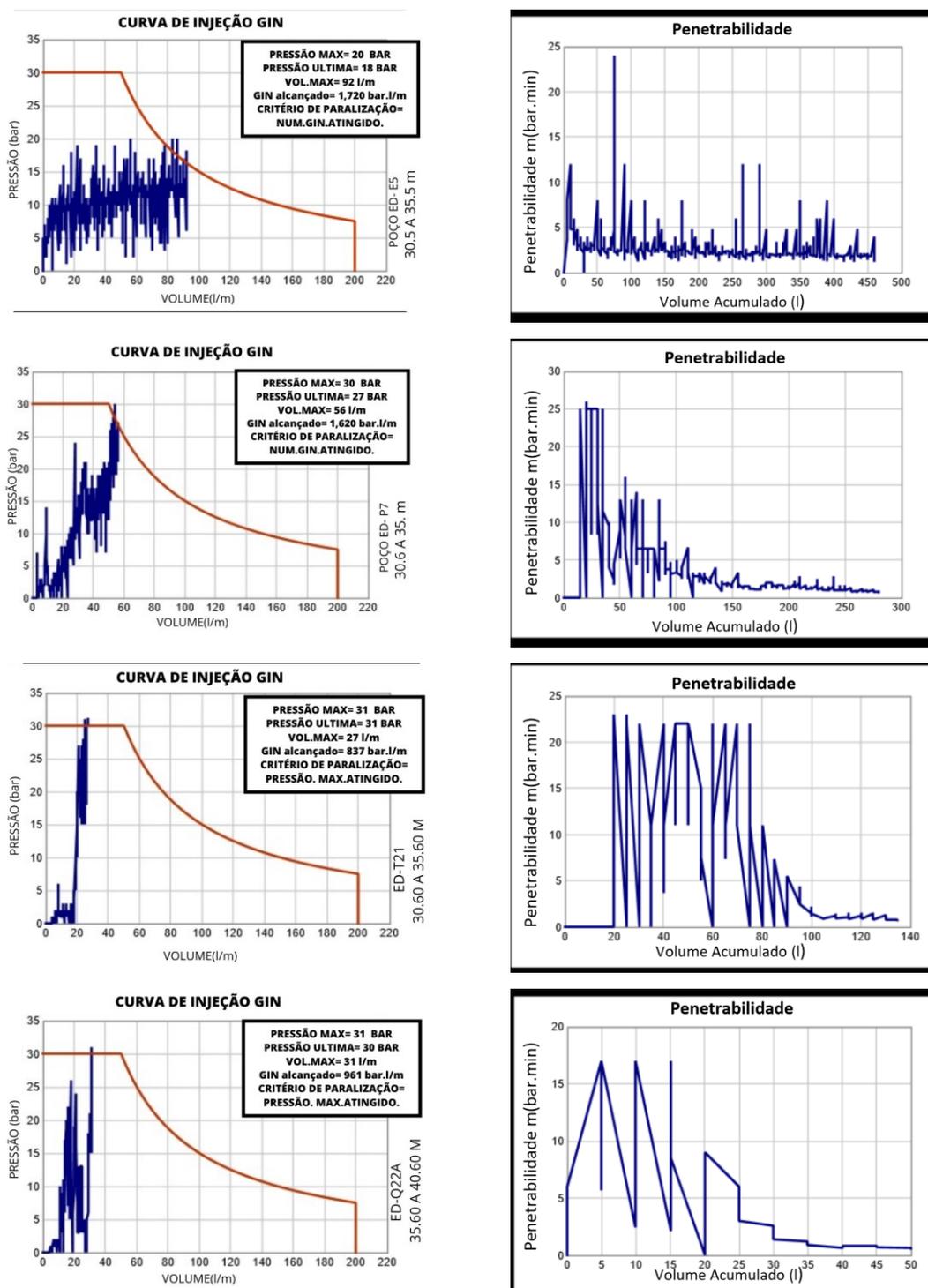
Durante a fase de projeto havia uma expectativa de que grandes consumos de calda fosse observado nessa margem, principalmente, movido pela pior condição geotécnica da área. Os casos corroboram em parte nessa observação de projeto e nos permite apresentar suposições dos motivos que levaram para acontecerem.

##### 5.1.1.1 Caso 1, Ombreira Direita

Este caso é crucial porque demonstra o comportamento ideal para reduzir o consumo de calda de cimento, com um rápido aumento da pressão máxima de injeção à medida que as ordens de injeção aumentam.

Pode-se observar nos gráficos de curva GIN da Figura 5.1 uma sequência de poços de injeção e da respectiva curva de penetrabilidade do poço. Os furos se localizam na seção 2, no Horizonte de Tratamento número sete (entre 30,6 e 35,6 m)

Figura 5.1 – Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços E5, P11, T21 e Q22A.

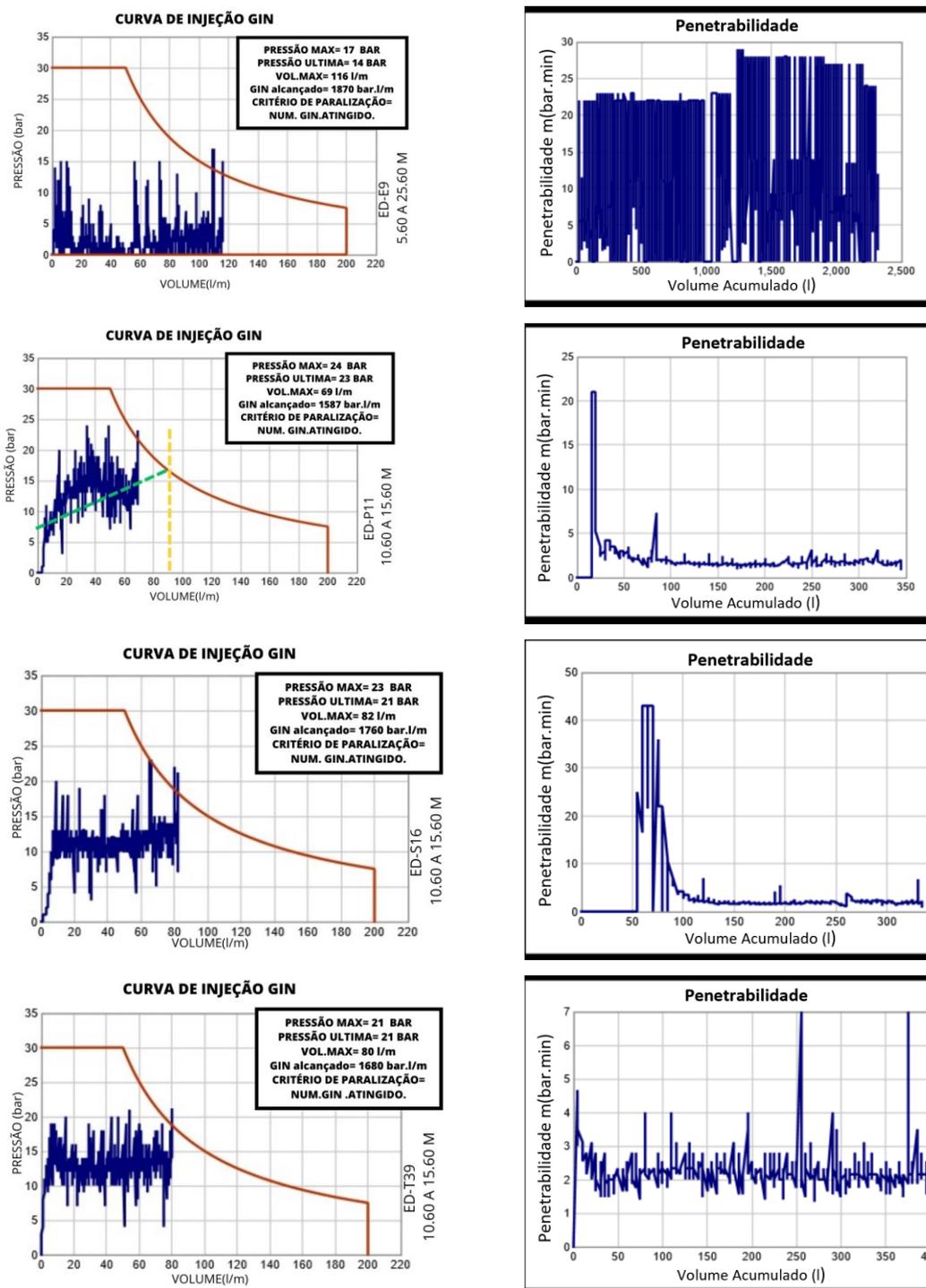


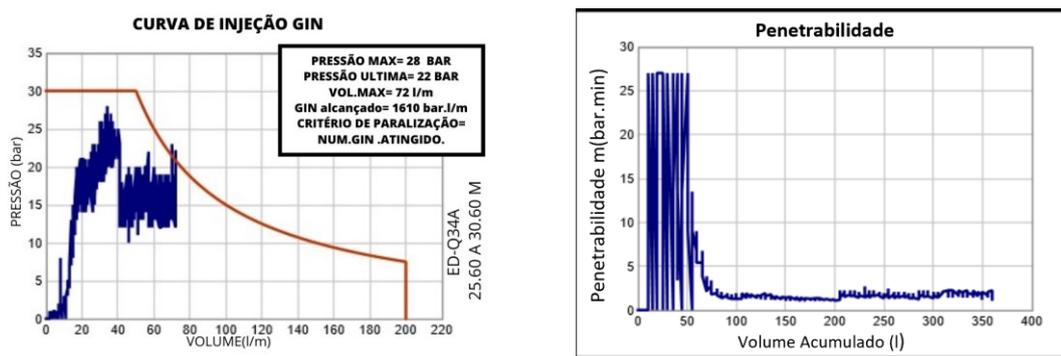
Fonte: adaptado de Tecnosuelo 2016.

### 5.1.1.2 Caso 2, Ombreira Direita

Nos gráficos da Figura 5.2, da seção 4, da Ombreira Direita, observa-se a paralisação da injeção de forma precoce, em todas as ordens de injeção.

Figura 5.2 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços E10, P7, S20, T40 e Q40A.





Fonte: adaptado de Tecnosuelo 2016.

Observe nos poços como o procedimento de injeção através do caminho GIN paralisa assim que intercepta a curva GIN 1500 p\*v. Isso ocorre devido ao fato de que o equipamento foi inicialmente programado para interromper o trabalho de injeção após 3 segundos, assim que uma das limitações do método de injeção do GIN fosse alcançada, conforme informes de análise de injeções da construtora.

A linha tracejada verde mostra a possível tendência da injeção destas seções e a linha tracejada em amarelo demarca o ponto da possível paralisação da injeção de calda seguindo a tendência e obtendo o melhor número GIN, no caso do furo P11 representa 17% a mais de consumo de injeção na referida progressão.

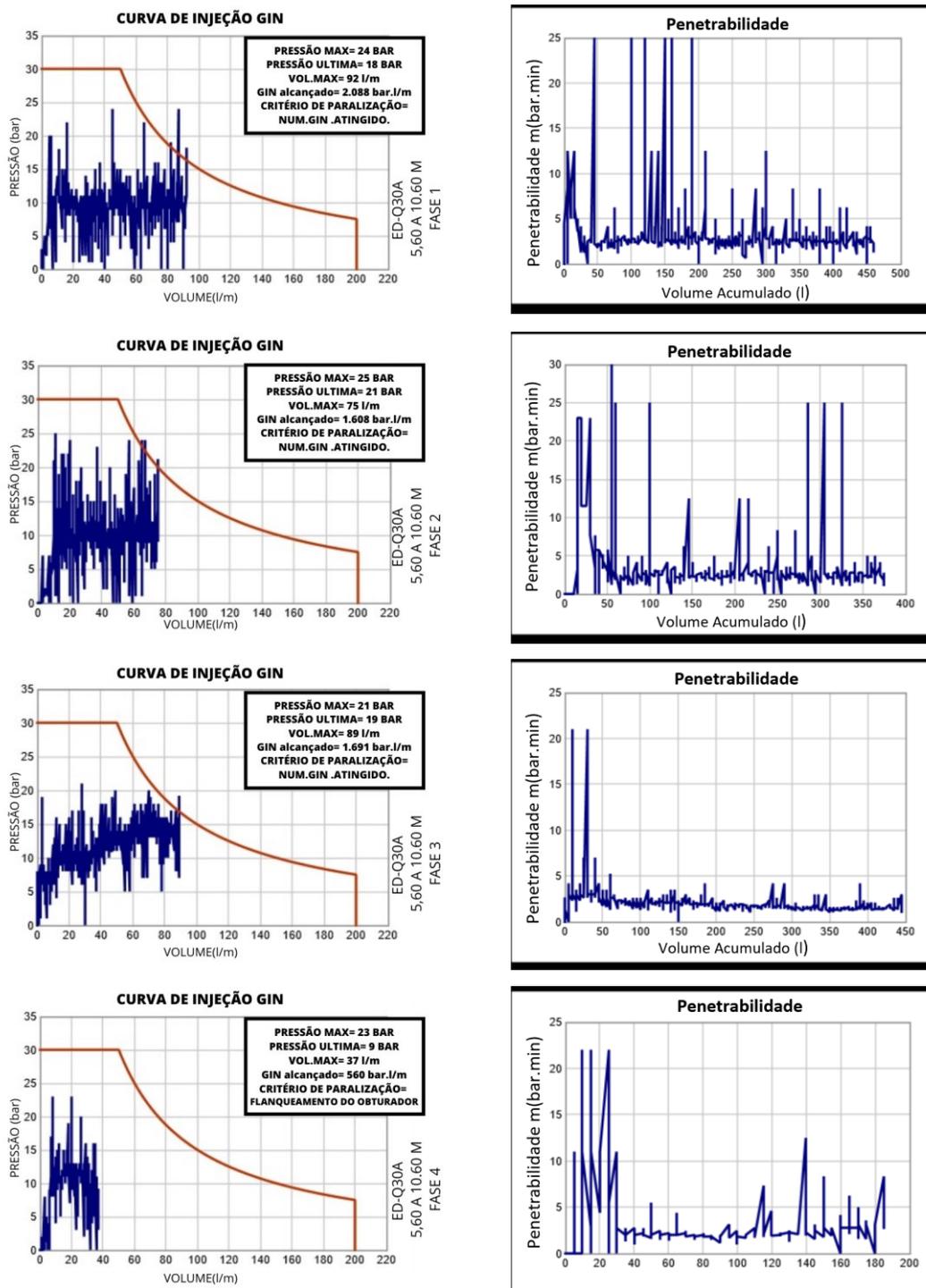
#### 5.1.1.3 Caso 3, Ombreira direita

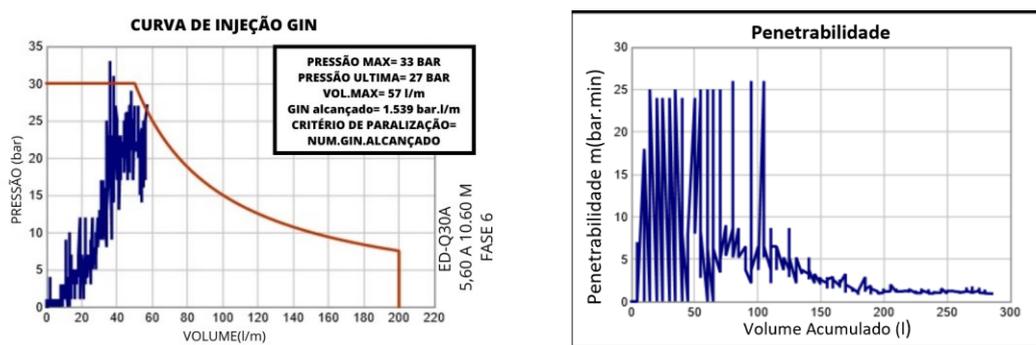
O terceiro caso ocorreu com alguma frequência no talude direito, sobretudo na parte superior da seção 4, seção 3 e parte de baixo da seção 2.

Do ponto de vista geológico, pode-se dizer que esta região é uma zona de transição entre estratos geológicos, com a presença de descontinuidades muito relevantes, sendo essa possivelmente uma das causas da ocorrência desses fenômenos.

Durante a primeira fase de injeção, as variações de pressão são muito drásticas (Figura 5.3 fase 1), seguidas de uma leve despressurização do furo e aumento de consumo de calda (interpretado como leve aberturas nas juntas) construindo uma oscilação no caminho de injeção. Durante as injeções de fases subsequentes, nota-se uma diminuição das oscilações a melhora progressiva no comportamento dos gráficos, até chegar à sua última fase, onde há uma possível obturação do furo, apesar de perceptível que há ainda uma junta que possa ser injetada.

Figura 5.3 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços Q30A em fases 1 a 5.





Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

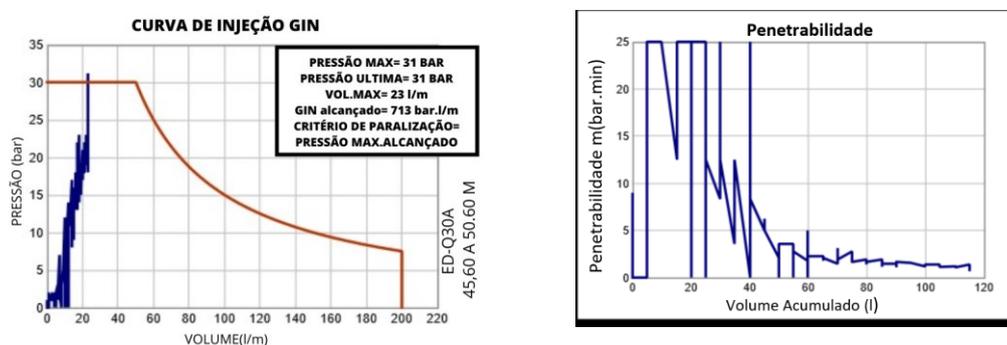
Comumente neste tipo de tratamento é necessário efetuar sistemas de injeção combinados (ascendente - descendente), de forma a estabilizar as paredes do poço e, sobretudo, realizar mais fases assim como furos de ordens de injeção subsequentes para conseguir completar os poços de injeção na sua totalidade.

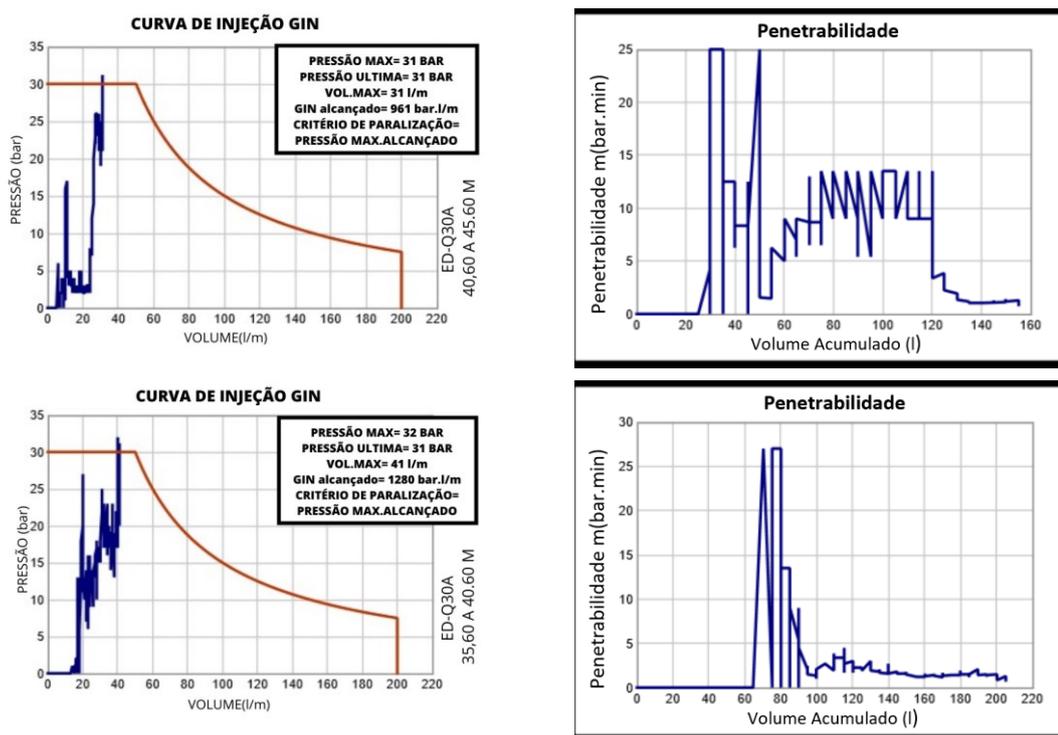
#### 5.1.1.4 Caso 4, Ombreira Direita

Assim como há casos em que diversas juntas ocasionam espaços de avanço da calda de cimento, em outros como no caso a seguir as juntas se encontram fechadas dentro do maciço rochoso e à medida que se regride nos Horizontes de Tratamento.

Por esse motivo, é possível observar que na Figura 5.4 os gráficos de caminhamento nos horizontes 10 a 8 (35.60 a 50.80 m) onde, aparentemente, as juntas estão mais fechadas de acordo com a profundidade. Com uma tomada de pressão cada vez menor de acordo com a redução da profundidade para atingir o GIN de 1500 bar\*lt/m.

Figura 5.4 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços Q30A nos Horizontes de Tratamento 10 a 8.





Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

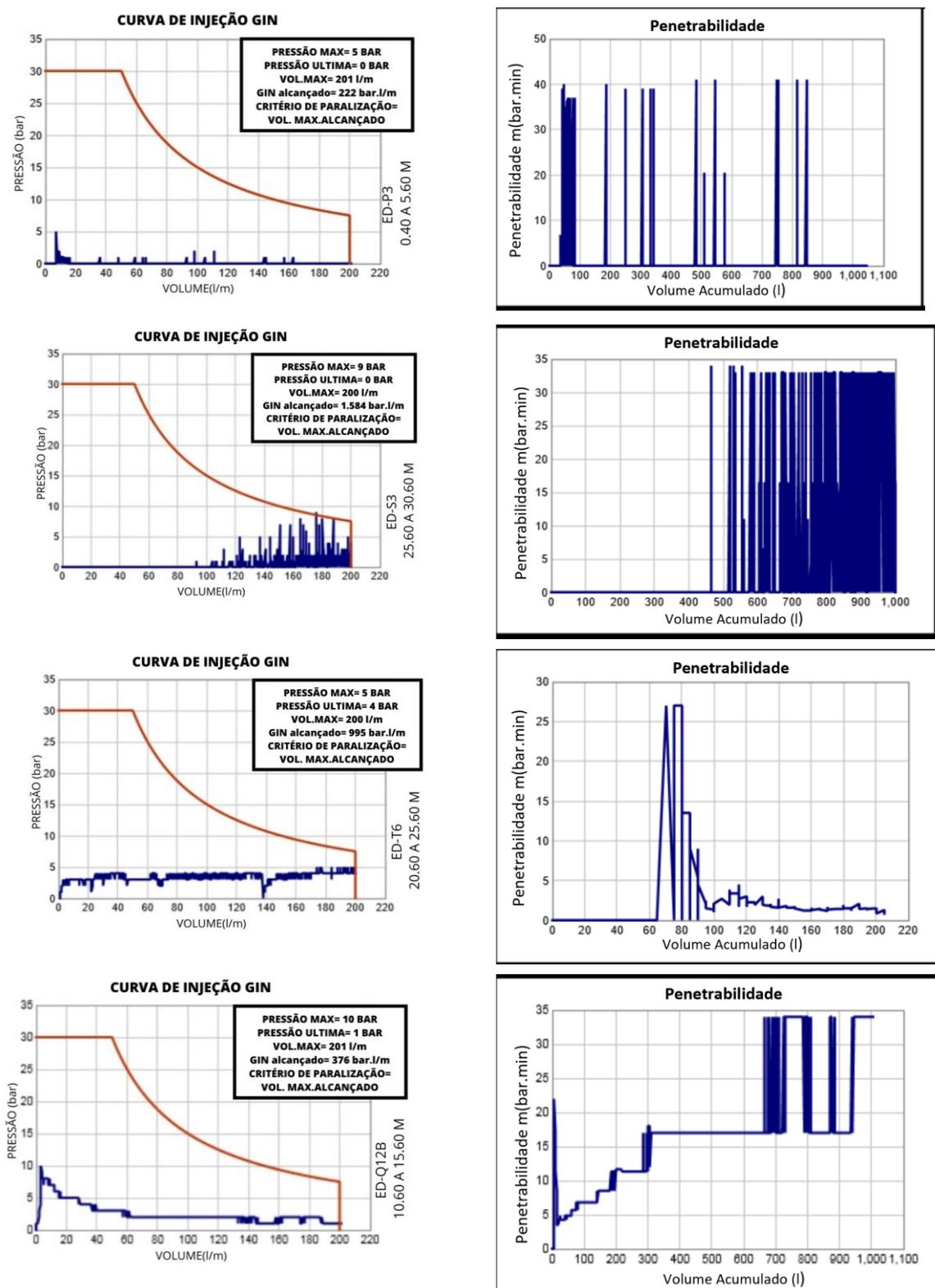
O mesmo pode ser compreendido como a presença de material quase impermeável entre as discontinuidades do maciço tratado, sendo também observado que nesses casos a presença de zonas de rocha com considerável RQD a grandes profundidades do maciço.

#### 5.1.1.5 Caso 5, Ombreira Direita

Na Figura 5.5, pode-se observar uma pressão muito baixa ou quase nula durante o trabalho de injeção; isso pode ser descrito como uma área no maciço com rochas muito lajeadas, desgastadas e com pouca resistência ao contato, fraturas abertas sem preenchimento ou preenchimento muito brando.

Nesses casos, dois fatores muito interessantes podem ocorrer para ocasionar esse consumo excessivo de calda. O primeiro pode indicar que a calda de injeção encontrou um material inadequado durante o processo de injeção do poço, preenchendo fraturas brandas ou não preenchendo-as. O segundo é que durante o processo de injeção, a calda de cimento pode ter encontrado novas fraturas que permitem o escoamento, ou seja, não possuem forças opostas que impeçam o escoamento da calda e, conseqüentemente, a geração de pressões no furo para o selamento do mesmo.

Figura 5.5 - Gráficos da curva GIN e penetrabilidade dos poços Q30A em fases 1 a 5.



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

### **5.1.2 Análise do Leito do Rio**

É importante lembrar que os tratamentos de injeção começaram na Seção 5, que corresponde ao leito do rio ou ao plinto central. Além disso, houve um período de teste de injeção durante o qual a utilização das curvas experimentais foi decidida por consenso com a supervisão do projeto, a fim de determinar os parâmetros futuros a serem utilizados para o tratamento da cortina de impermeabilização, bem como para as cortinas de consolidação.

Não há registros de comportamentos muito distintos dos já mencionados na ombreira direita, apenas considera-se que nesta seção houve menos intercorrências que geraram altos consumos de calda."

### **5.1.3 Análise da Ombreira Esquerda**

No caso da margem esquerda um comportamento diferente ocorreu comparado a margem direita ou pelo menos em grande parte das seções 6 a 10. Agora é muito importante enfatizar que isso não significa necessariamente que o consumo de injeção foi baixo.

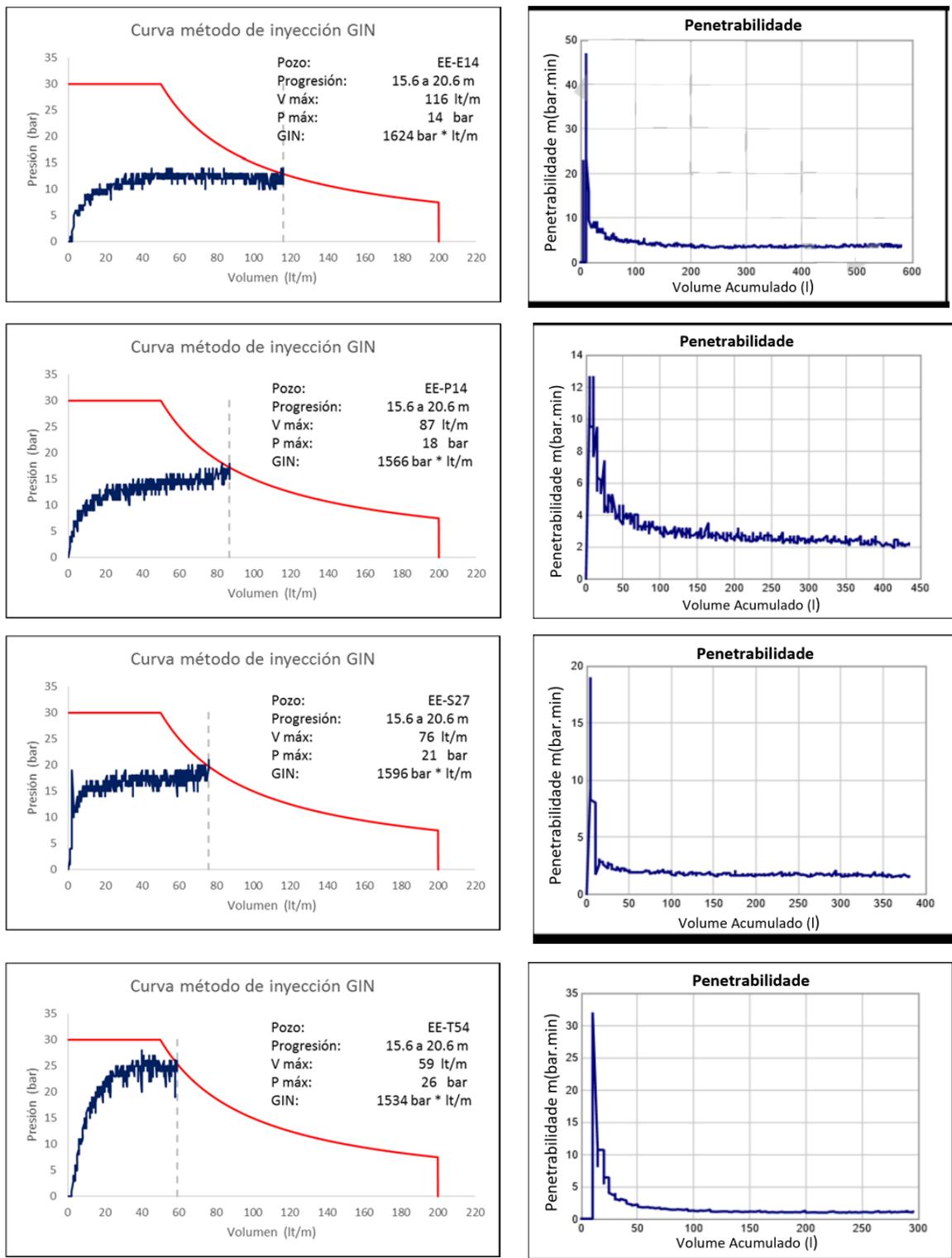
#### **5.1.3.1 Caso 1, Ombreira Esquerda**

Além disso, é possível observar a tendência do gráfico de injeção. No Gráfico 29, é possível notar que a tendência de consumo de injeção pode ser interpretada como um caso de alta absorção (116 lt/m), indicando a estabilidade do maciço rochoso não necessariamente resultará em baixas absorções, como mencionado anteriormente.

A realização destas observações é crucial devido às dificuldades que persistiram durante o processo de realização das sondas de exploração nesta seção.

As complicações ocorreram principalmente devido ao encontro de estratificações com concentrações elevadas de quartzito, o que prejudicou o desempenho da perfuração diamantífera na época.

Figura 5.6 Gráficos da curva GIN da linha EE-E14 a EE-T54.



Fonte: Adaptado de Tecnosuelo (2016).

## 5.2 COMPORTAMENTO DO CONSUMO DOS FUROS DE INJEÇÃO

O tratamento de injeção de cimento neste estudo foi dividido em sessões e visualmente subdividido por horizontes. Os horizontes correspondiam à metragem das manobras de injeção da cortina de impermeabilização, que foi estabelecida em 5 metros.

Os relatórios de análise das injeções disponíveis realizaram o cálculo da Estatística Descritiva dos dados do tratamento de injeção de cimento para conduzir uma análise abrangente. A análise estatística incluiu gráficos de colunas agrupadas, que apresentaram as faixas de consumo; gráficos de dispersão, que auxiliaram na identificação de padrões e comportamentos; e gráficos de tendência, que acompanharam o progresso do tratamento de acordo com a ordem dos furos

É importante destacar que, neste estudo específico, apenas as fases finais do tratamento foram levadas em consideração, apesar do fato de que essas fases apresentavam um consumo mais alto do que as fases anteriores. A escolha de concentrar-se nas fases mais recentes permitiu uma análise mais focada na condição de eficácia e eficiência do processo de tratamento, que foi considerada relevante para o objetivo proposto.

Os resultados das injeções nas linhas A, B e C do plinto foram analisados estatisticamente, com espaços específicos de 1,00 metro entre elas e 2,00 metros entre as perfurações nas linhas A e C. A linha B, por outro lado, chega a perfurações quaternárias com espaço de 1,50 metros entre elas conforme os critérios de espaçamento divisional.

Os objetivos das linhas A e C são consolidar os primeiros dez metros do maciço rochoso, preparando-o para a linha B. O objetivo principal da linha B é construir a cortina de impermeabilização ao longo da fundação do plinto e nas seções onde a carga hidráulica da barragem é mais alta.

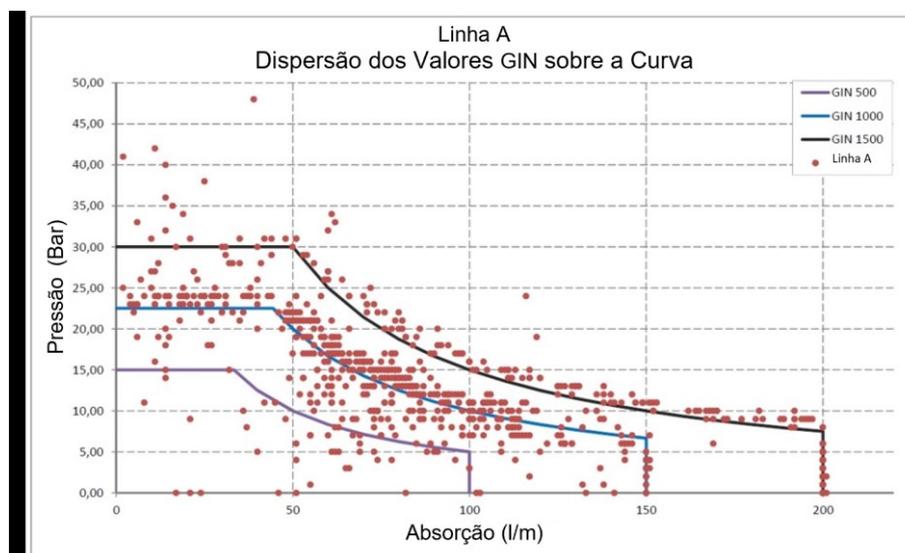
Para embasar as análises estatísticas das linhas A, B e C, foram usados dados coletados até novembro de 2015 para as linhas A e C e até abril de 2016 para a linha B. Essas informações abrangem um período relevante para entender a evolução do tratamento de injeção de cimento e suas tendências ao longo do tempo.

### 5.2.1 Plinto – Linha A

A linha A compreende as injeções de consolidação localizadas a montante da linha B. Essas injeções são realizadas em perfurações com um comprimento total de 10,00 metros, e espaçadas a cada 2,00 metros. Nos primeiros dez metros de profundidade, essas injeções visam estabelecer um confinamento lateral e aumentar a consolidação entre a laje do plinto e a rocha a montante da cortina de impermeabilização.

As curvas GIN 1000 e 1500 foram usadas como referência durante o processo de injeção da linha A. Os valores GIN foram distribuídos ao longo dessas curvas, como mostrado na Figura 5.7.

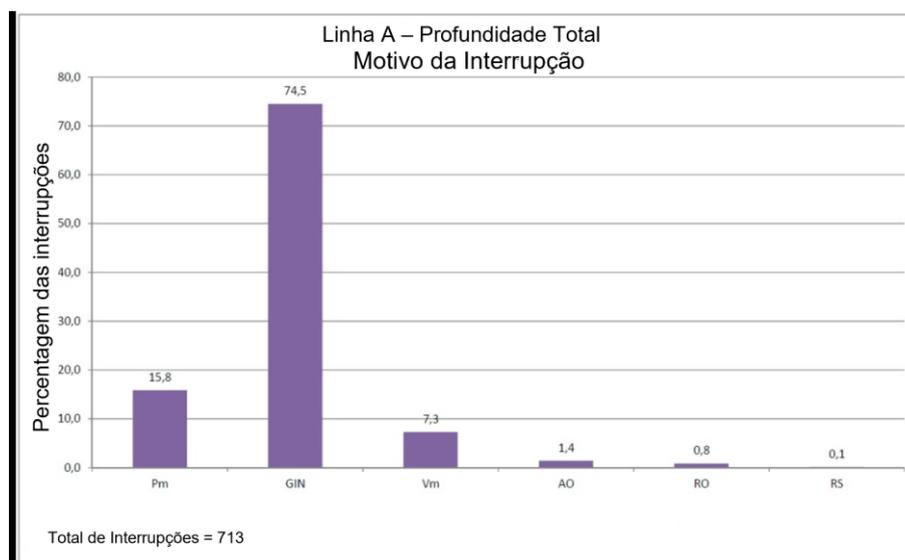
Figura 5.7 Linha A – Dispersão dos valores GIN sobre a curva.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

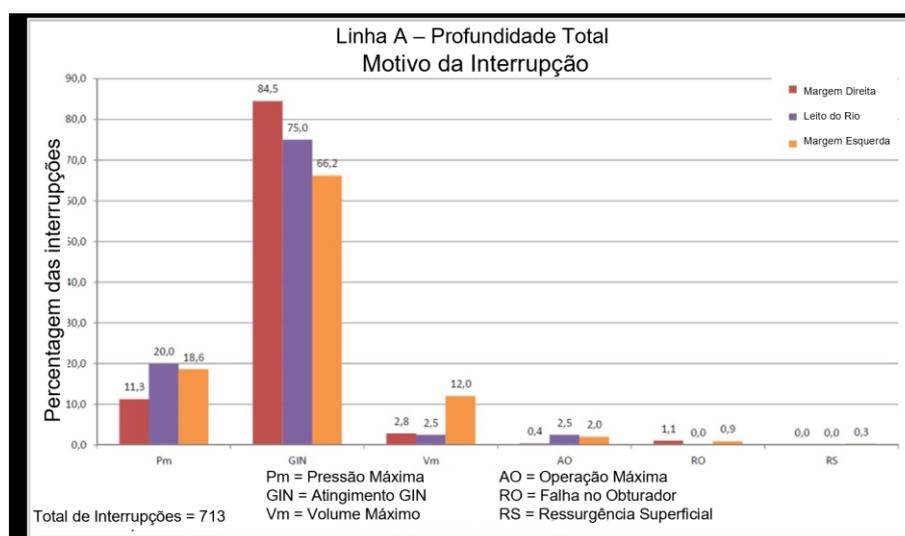
O gráfico aponta uma tendência de obstrução das manobras de injeção devido ao atingimento curva GIN ou atingir a pressão máxima. Esta observação é validada pela Figura 5.8 que apresenta os critérios de paralisação para as manobras, representando cerca de 90% dos critérios de paralisação, enquanto os outros 7% são ocasionados pelo atingimento do volume máximo de calda de cimento admitido. Além disso, a distribuição dos percentuais de paralisação nas ombreiras direita, esquerda e leito é detalhada na Figura 5.9.

Figura 5.8 Linha A – Critérios de paralisação das injeções registrados



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.9 Linha A – Critérios de paralisação das injeções registrados segundo as margens e o leito do rio

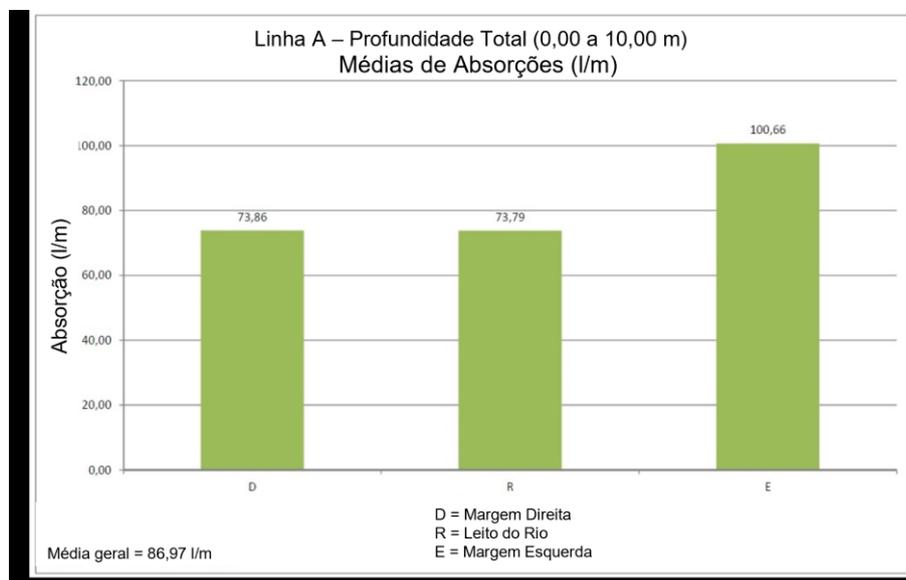


Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Ao examinar a distribuição dos critérios de paralisação por leito ou ombreira, descobriu-se que o leito do rio registrou 20% das paralizações devido ao atingimento da pressão máxima, enquanto a ombreira direita registrou apenas 11,3% dessas paradas. Devido ao cruzamento da curva GIN, 84,5% das paralizações ocorreram na ombreira direita. Já na ombreira esquerda, as paralizações devido ao volume máximo representaram 12%, com aproximadamente 2,5% ocorrendo no leito do rio e na ombreira direita.

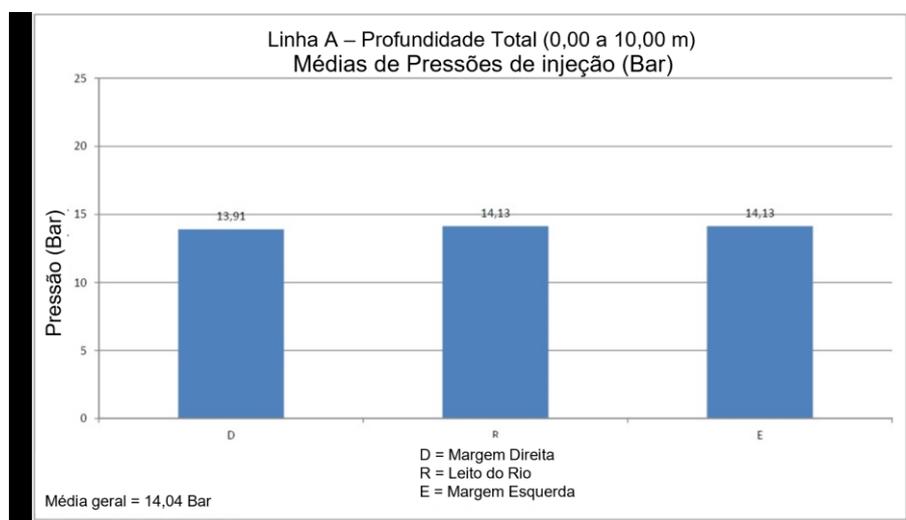
Na Figura 5.10 o gráfico de porcentagem apresenta os valores médios das absorções por metro das injeções e no Figura 5.11 as pressões médias atingidas.

Figura 5.10 Linha A – Absorções médias (l/m)



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.11 Linha A – Pressões médias atingidas (Bar)



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

As médias de absorção foram de 74 l/m na região do leito e margem direita, enquanto na margem esquerda a média foi de 100 l/m. A pressão média em todas as seções foi em torno de 14 Bar. Ao considerar a linha A, a absorção média geral foi de 86,97 l/m, e foram consumidos cerca de 210 mil litros de calda de cimento ao longo desse processo de injeção dentro de um comprimento total de 2.498,60 metros de perfuração realizados na linha de consolidação de montante.

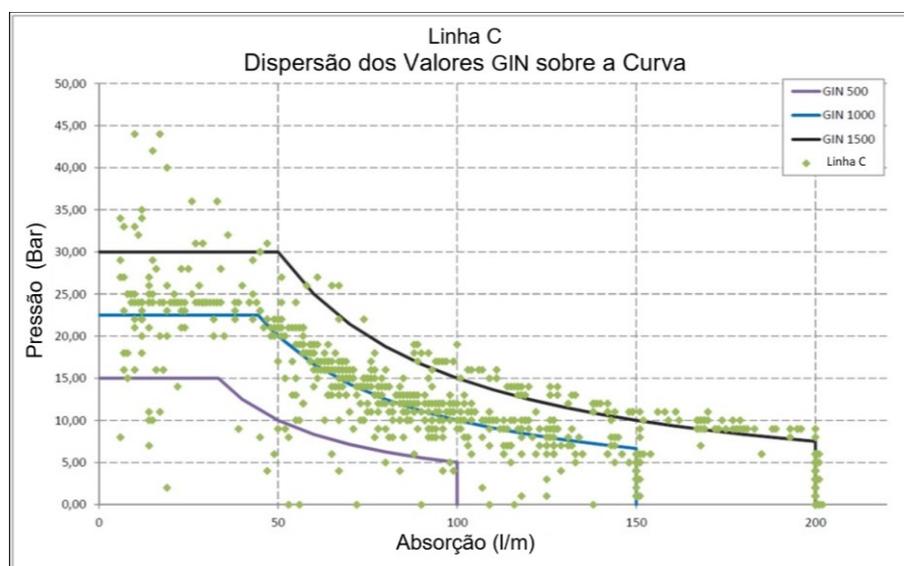
O maciço da ombreira esquerda apresentou absorções médias por metro cerca de 36,5% maiores do que no restante da linha de consolidação. Isso mostra que a região é mais permeável. Esse resultado indica que, para garantir uma consolidação adequada a ombreira esquerda necessitaria até a finalização da campanha de injeções reforços nas injeções realizadas.

### 5.2.2 Plinto – Linha C

As perfurações nessa linha, assim como na linha A, têm um comprimento total de 10,00 metros e são espaçadas a cada 2,00 metros. Nos primeiros dez metros de profundidade, essas injeções visam estabelecer um confinamento lateral e aumentar a consolidação entre as lajes de base e a rocha a jusante da cortina de impermeabilização.

As curvas GIN 500, 1000 e 1500 foram usadas como referência no processo de injeção da linha C. Os valores GIN se espalharam por essas curvas, mostrando os valores GIN da Figura 5.12.

Figura 5.12 Linha C – Dispersão dos valores GIN sobre a curva



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

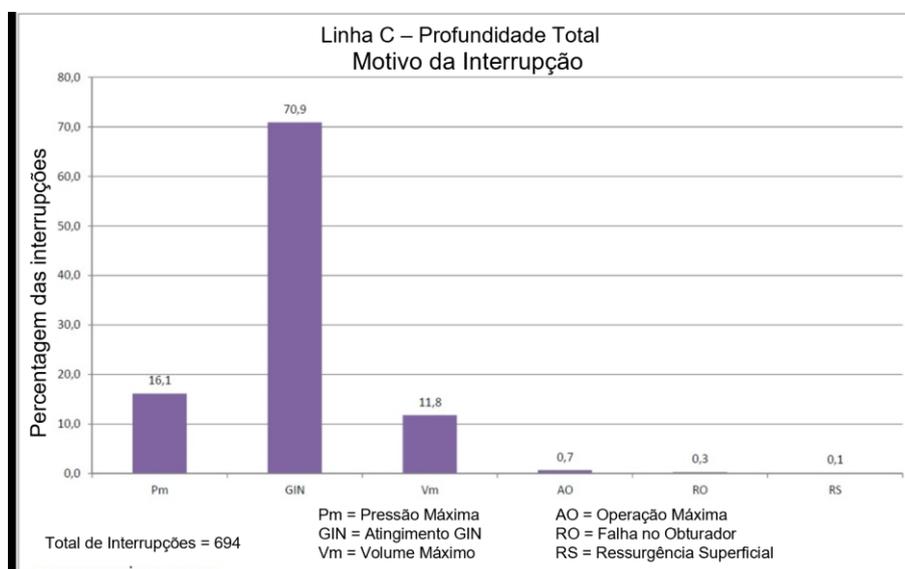
O gráfico aponta uma tendência de obstrução das manobras de injeção devido ao atingimento curva GIN ou à pressão máxima. Esta observação é validada pela Figura 5.13 que apresenta os critérios de paralisação para as manobras, representando cerca de 87% dos critérios de paralização com outros 12% sendo ocasionados por atingir o volume máximo de calda de cimento admitido.

Ao examinar a distribuição dos critérios de paralisação por ombreira ou leito ( Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.14), descobriu-se que o leito do rio registrou cerca de 19,8% mais paradas devido à pressão máxima. Devido ao cruzamento da curva GIN, a margem direita apresentou 78% das paralisações, enquanto a ombreira esquerda registrou 75% e 64%, respectivamente.

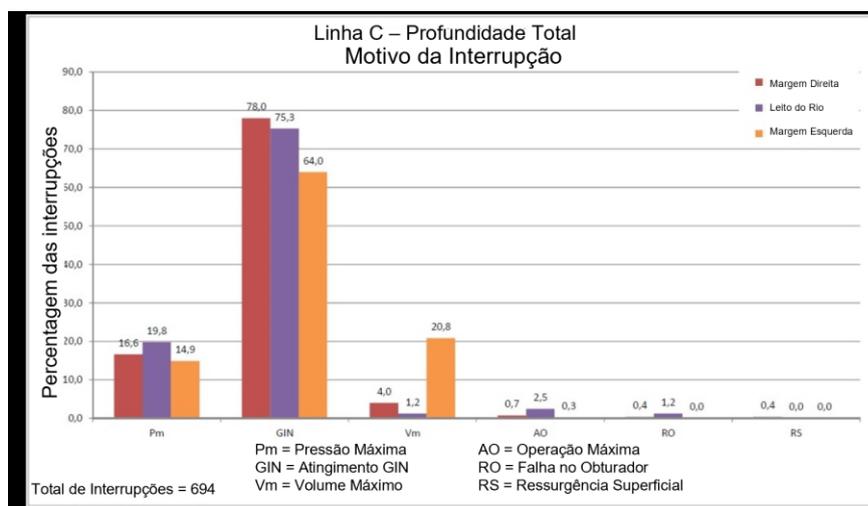
No caso das paralisações devido ao volume máximo de calda, elas ocorreram em 20,8% das injeções na ombreira esquerda, enquanto o leito e a ombreira direita tiveram 1,2% e 4%, respectivamente.

Figura 5.13 Linha C – Critérios de paralisação das injeções registrados



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

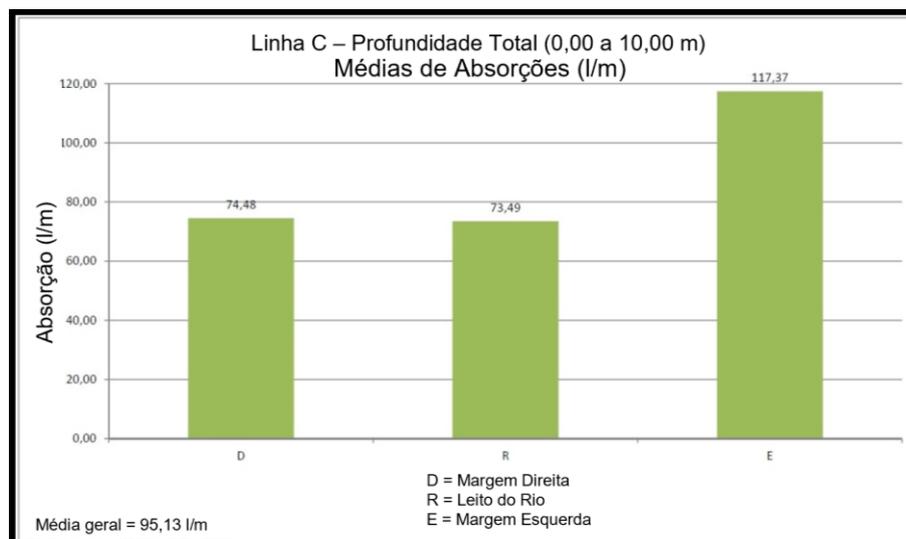
Figura 5.14 Linha C – Critérios de paralisação das injeções registrados segundo as margens e o leito do rio



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

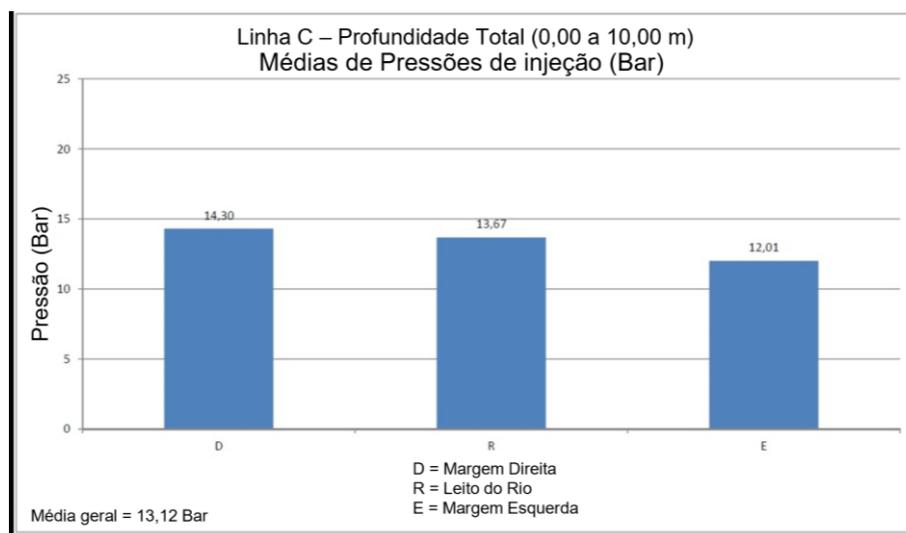
Na Figura 5.10 o gráfico de porcentagem apresenta os valores médios das absorções por metro das injeções e no Figura 5.11 as pressões médias atingidas.

Figura 5.15 Linha C – Absorções médias (l/m)



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.16 Linha C – Pressões médias atingidas (Bar)



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

As médias de absorção de calda foram de 73,49 l/m e 74,48 l/m nos trechos do leito e da ombreira direita, enquanto a ombreira esquerda apresentou uma média de absorção de 117,37 l/m. As pressões médias por segmento foram de 14,30 Bar para a ombreira direita, 13,67 Bar para o leito do rio e 12,01 Bar para a ombreira esquerda.

A absorção média geral na linha C foi de 95,13 l/m, e o consumo total de calda de cimento atingiu cerca de 230 mil litros nessas injeções. O comprimento total perfurado foi de 2.445,30 metros.

Assim como na análise da linha A, as absorções médias por metro na ombreira esquerda são aproximadamente 58% maiores do que nos trechos do leito e da ombreira direita, indicando uma maior permeabilidade nessa região.

### 5.2.3 Plinto – Linha B – Injeções de Impermeabilização

A linha B corresponde às injeções de impermeabilização que se encontram no centro da laje de plinto entre as linhas A e C. O comprimento das perfurações é variável, tendo em conta a carga hidráulica a que está sujeito a respetiva seção (Menor nas margens e maiores no fundo do vale).

O processo de injeção na linha B segue uma sequência de perfurações e injeções. Inicialmente, são realizadas as perfurações exploratórias da linha B, seguidas pela injeção de consolidação das linhas A e C. Após essa etapa, a

continuidade dos trabalhos é garantida pela execução das perfurações primárias, secundárias e terciárias, que são obrigatórias. Além disso, as perfurações complementares de ordem superior (quaternária, quinária etc.) são perfuradas e injetadas sempre que as absorções em uma determinada seção que recebe essas perfurações de ordem superior superarem 40 l/m.

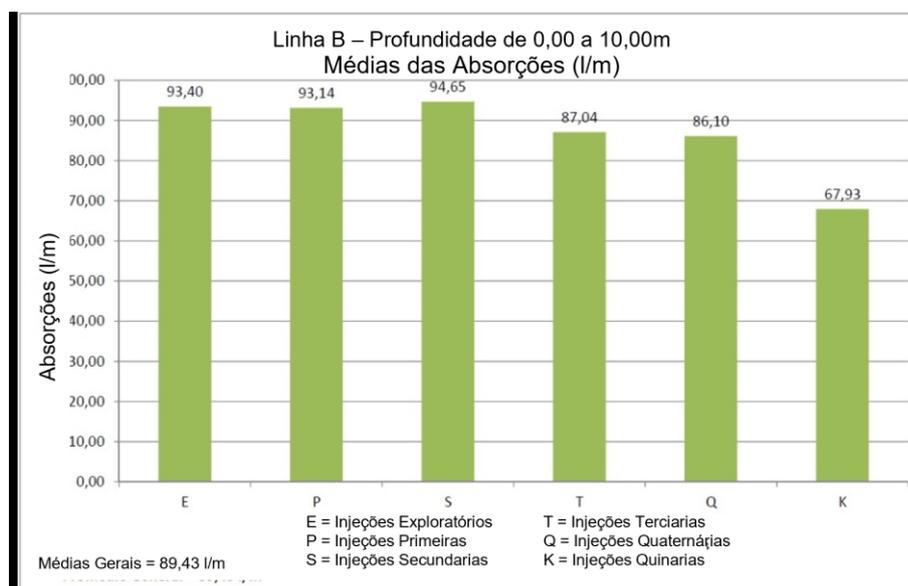
No tratamento de injeção de cimento na linha B, utiliza-se a curva de intensidade de injeção GIN 1500, com uma pressão máxima de 30 bar e um volume máximo de 200 l/m<sup>3</sup>.

Com o objetivo de realizar uma comparação com as injeções realizadas nas linhas A e C, será conduzida uma análise específica, isolando o primeiro trecho da linha B compreendido entre as profundidades de 0,00 m e 10,00 m. Essa análise separada permitirá uma avaliação mais precisa e detalhada do desempenho e comportamento do tratamento de injeção de cimento nesse trecho específico da linha B.

#### 5.2.3.1 Horizonte de tratamento de 0,00 m a 10,00 m.

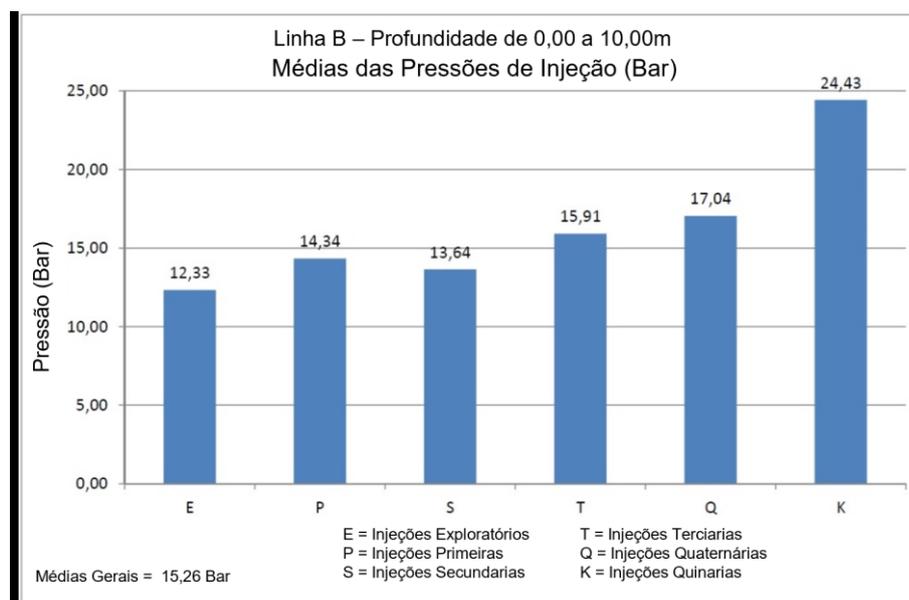
Na Figura 5.17 é possível ver o gráfico com os valores médios de absorção por metro de injeções e na Figura 5.18 são mostradas as pressões médias atingidas.

Figura 5.17 Linha B - Absorção média – Profundidade. 0,00 m á 10,00 m



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.18 Linha B - Pressão média das Injeções – Profundidade. 0,00 m á 10,00 m



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

As perfurações exploratórias, que foram as primeiras a serem injetadas, apresentaram uma absorção média de 93,40 l/m e uma pressão média de 12,33 Bar. Esses valores refletem a condição média inicial do maciço, uma vez que se trata das perfurações iniciais.

Ao analisar as perfurações primárias, realizadas após as linhas A e C, notou-se que a absorção média permaneceu em 93,14 l/m, enquanto a pressão média aumentou para 14,34 Bar, resultando um aumento de cerca de 16%.

Quanto às perfurações obrigatórias, tanto as secundárias quanto as terciárias, observou-se um aumento nas absorções médias, chegando a 94,65 l/m e 87,04 l/m, respectivamente. As pressões médias nessas perfurações foram de 13,64 Bar e 15,91 Bar.

Já as perfurações quaternárias, que são complementares, apresentaram uma absorção média de 86,10 l/m e uma pressão média de 17,04 Bar. Comparadas às perfurações exploratórias, houve uma diminuição média de consumo de argamassa próxima a 7,8% e um aumento de mais de 38% na pressão média.

No entanto, as perfurações quaternárias não atenderam aos critérios do projeto, onde as absorções devem ser inferiores a 40 l/m em todos os trechos injetados. Isso indica que as perfurações quinárias devem ser realizadas nas áreas onde as absorções são maiores que os limites estabelecidos (>40 l/m).

Uma absorção média de 67,93 l/m e uma pressão média de 24,43 bar foram encontradas durante perfurações quinarias no leito do rio. Houve uma diminuição média de cerca de 27,5% no consumo de calda em comparação com as perfurações exploratórias.

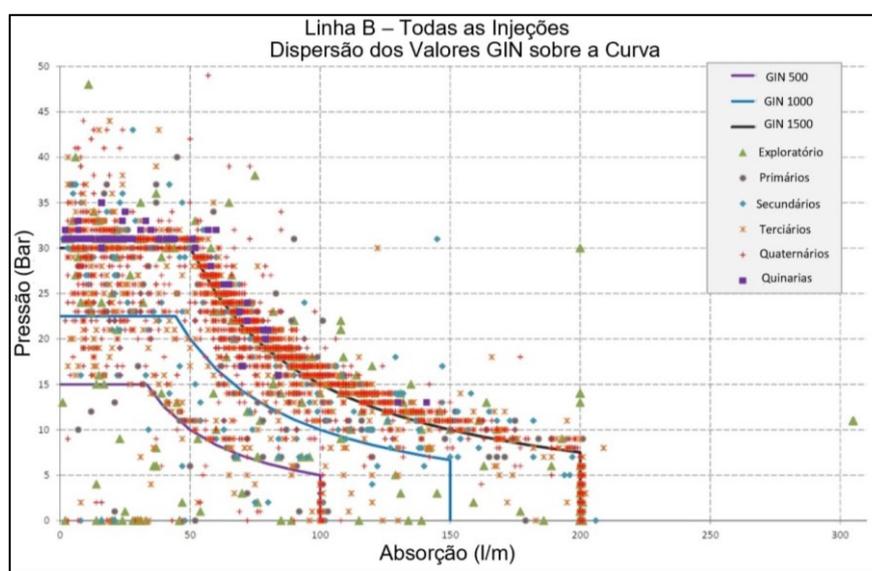
Estes furos apresentaram uma pressão quase 98% maior que os exploratórios. Isso mostra que nessa região a cortina de impermeabilização está se fechando.

Ao levar em consideração o volume total de calda injetada nessa etapa, foi encontrado um consumo de aproximadamente 440 mil litros, quase 50% maior do que a média dos volumes injetados nas linhas A e C.

### 5.2.3.2 Horizonte de tratamento de 0,00 m a 70,00 m. (total)

Após coletar todos os resultados obtidos na linha B e inserir os valores de GIN nas curvas GIN 1500, obtemos um gráfico semelhante ao ilustrado na Figura 5.19.

Figura 5.19 Linha B – Dispersão dos valores GIN de todas as ordens de injeção na curva GIN

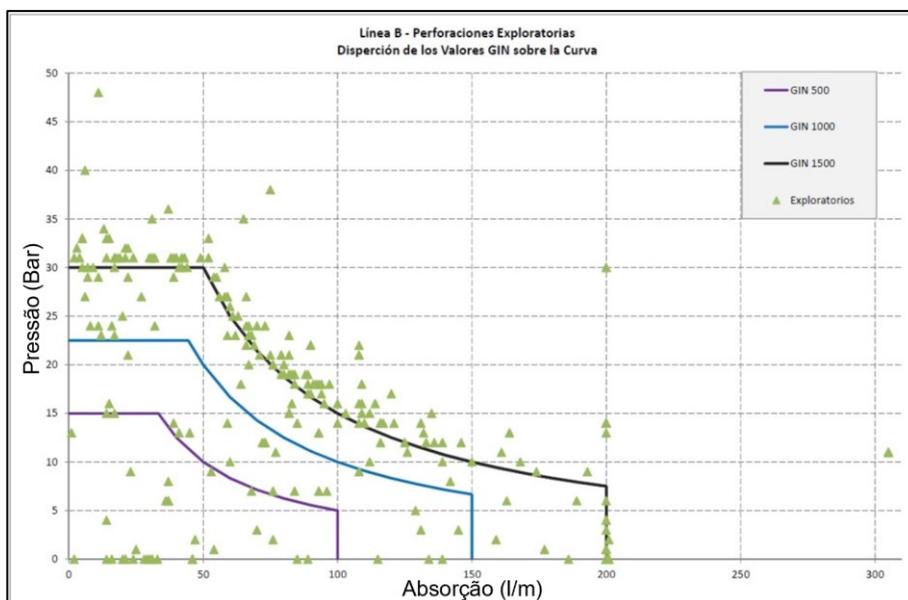


Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

No gráfico, dois elementos distintos podem ser observados: as manobras apresentam um comportamento de paralisação ao atingir a curva GIN e a pressão máxima estabelecidas; além disso, a dispersão dos valores GIN é significativamente maior em comparação com as demais linhas, ultrapassando ocasionalmente o GIN máximo estabelecido. Este é o resultado das últimas recomendações da consultoria externa, que sugerem que as injeções sejam mantidas por um período após atingir a pressão máxima ou atingir a curva GIN para consolidar a injeção em cada manobra.

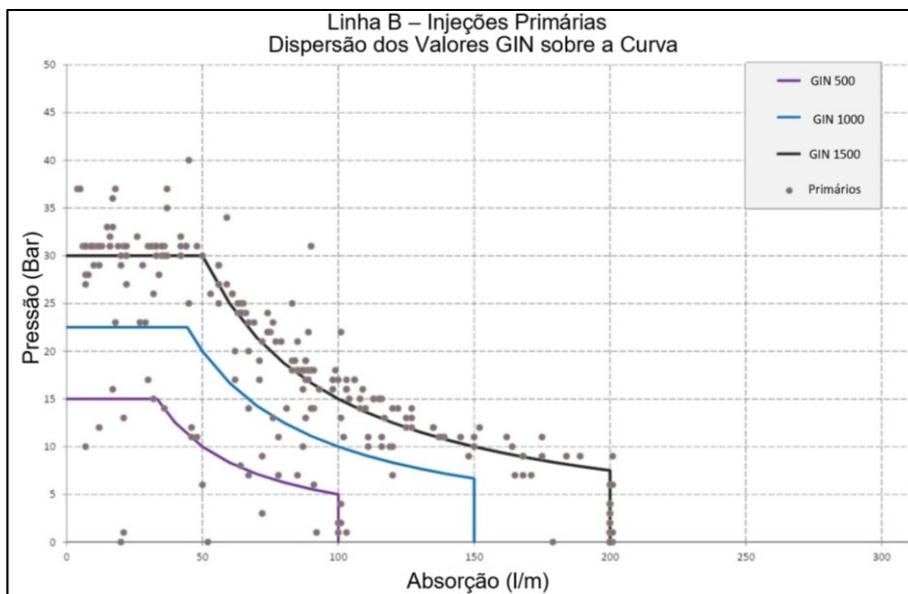
Em continuidade, a partir da Figura 5.20 até a Figura 5.26 são apresentadas a dispersão dos valores do GIN de acordo com sua ordem de furação.

Figura 5.20 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções exploratórias



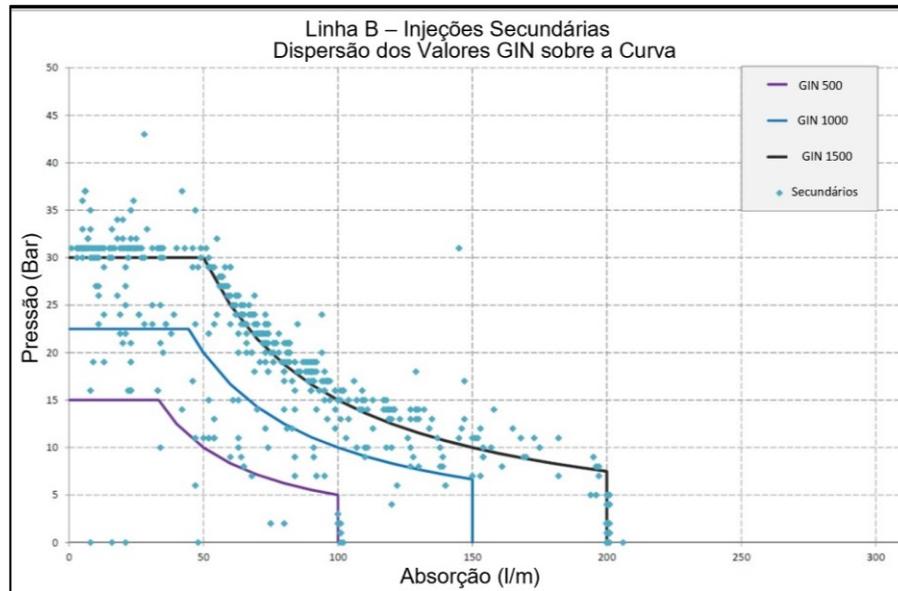
Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.21 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções primárias.



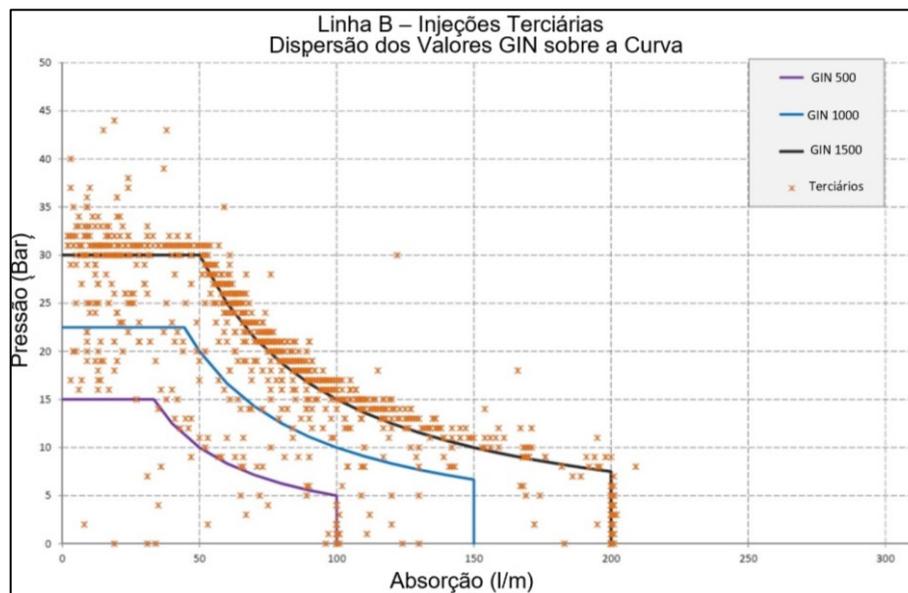
Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.22 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções secundárias.



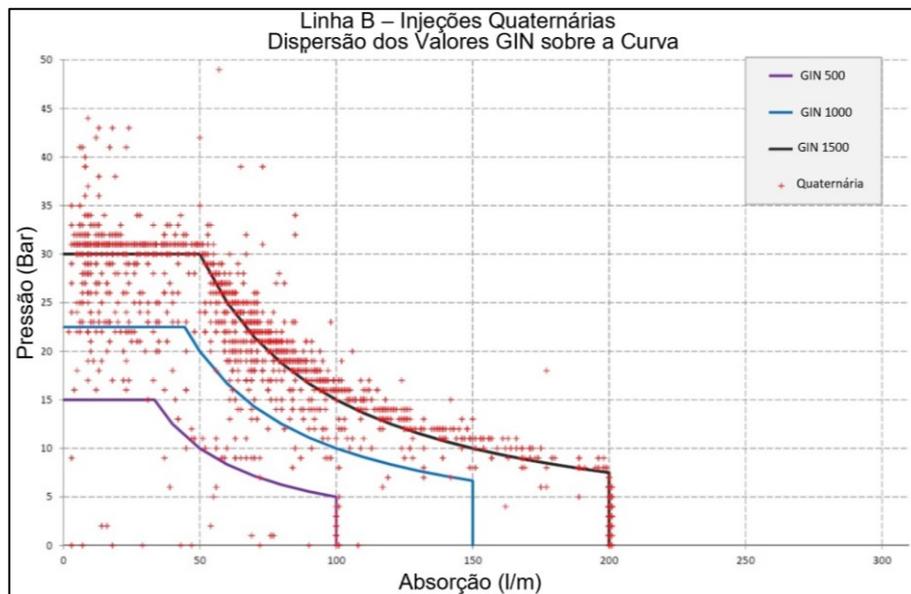
Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.23 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções terciárias.



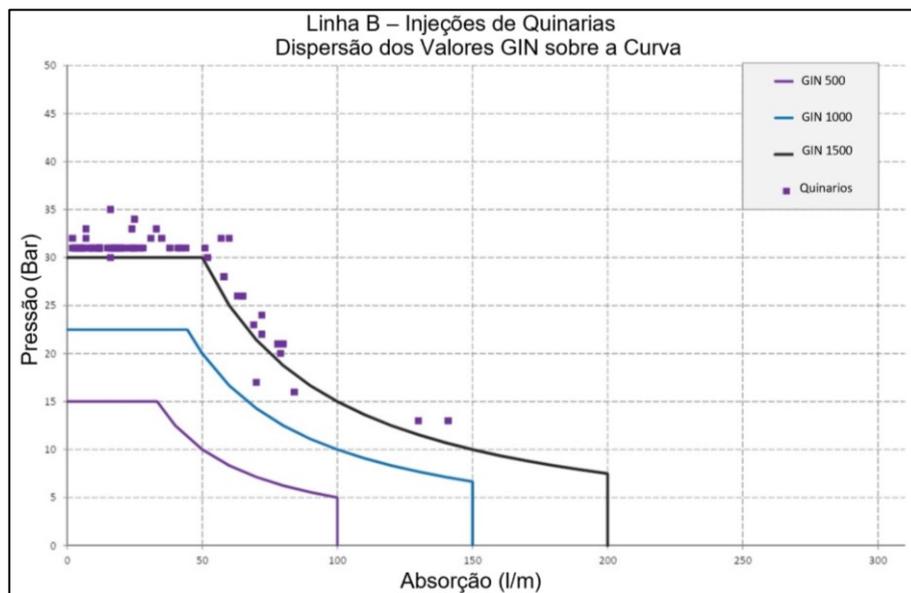
Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.24 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções quaternárias.



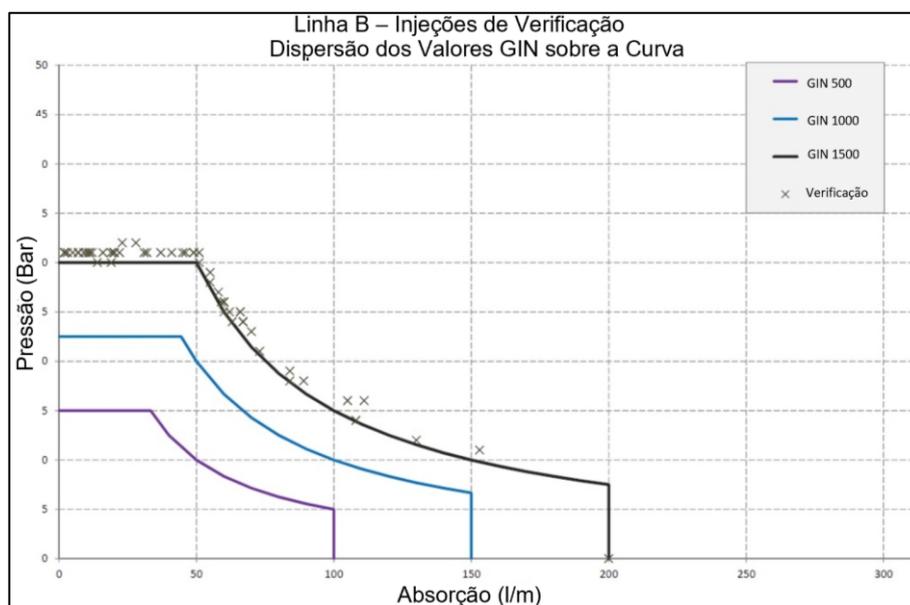
Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.25 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções quinárias.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

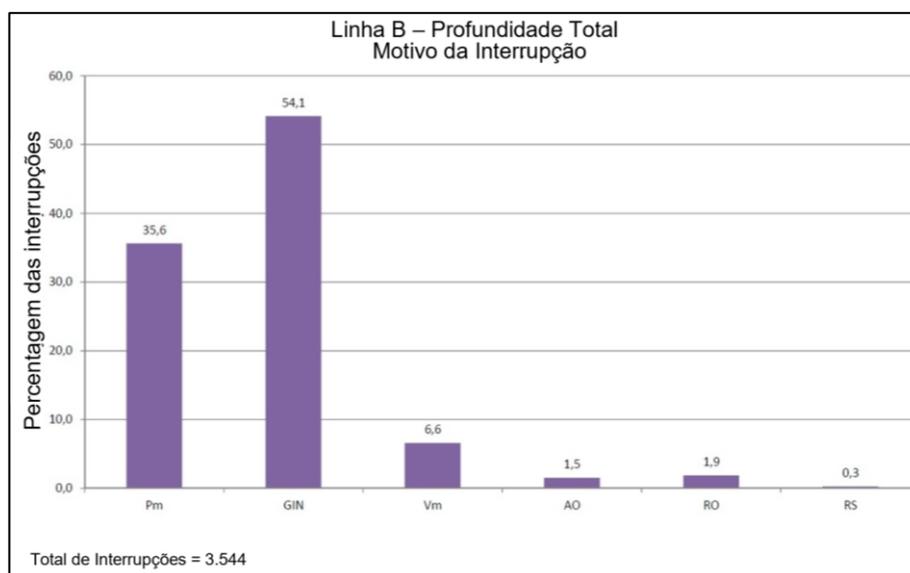
Figura 5.26 Linha B – Dispersão dos valores GIN das injeções de verificação.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

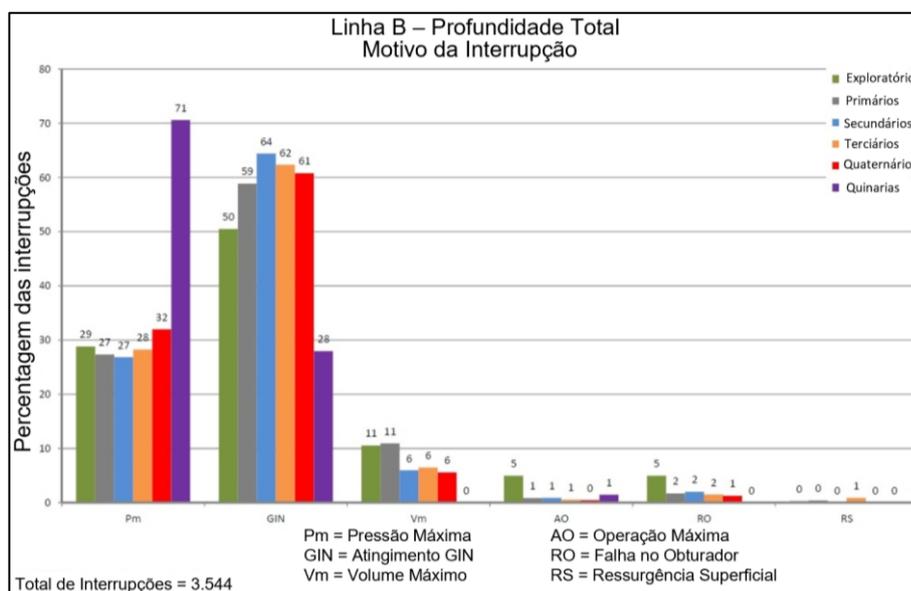
A Figura 5.27 mostra os motivos de interrupção de todos os furos realizados e a Figura 5.28 mostra mais detalhadamente os percentuais distribuídos segundo a ordem de injeção.

Figura 5.27 Linha B – Motivo que levaram a paralização de injeções.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.28 Linha B – Motivo que levaram a paralização de injeções segundo a ordem de injeção.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

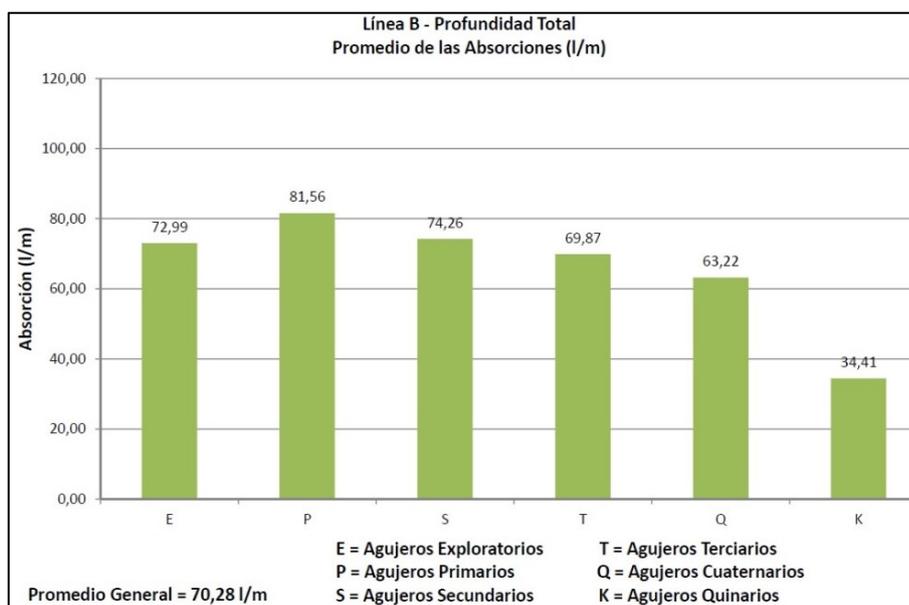
Das 3.544 paralizações, 54% ocorreram devido ao cruzamento da curva GIN, 36% em razão das injeções alcançarem a pressão máxima e 6,6% devido ao volume máximo de calda ser utilizado. Os 4,4% restantes são em razão da ressurgência superficial, falha no obturador e operação máxima.

Ao examinar o comportamento das perfurações de ordem quinária, notou-se que 71% das paradas foram devidas à pressão máxima, enquanto as perfurações de ordem anterior tiveram cerca de 29% dessas paralizações. As perfurações quinárias também tiveram 28% de paradas devido ao cruzamento da curva GIN, enquanto as de ordem anterior variaram de 50% nas exploratórias a 64% nas secundárias.

No que diz respeito às paralizações devido ao consumo de volume máximo, as perfurações exploratórias e primárias tiveram 11% dessas paradas, enquanto as perfurações até o Quaternário tiveram 6%. As perfurações quinárias não tiveram paradas por esse critério.

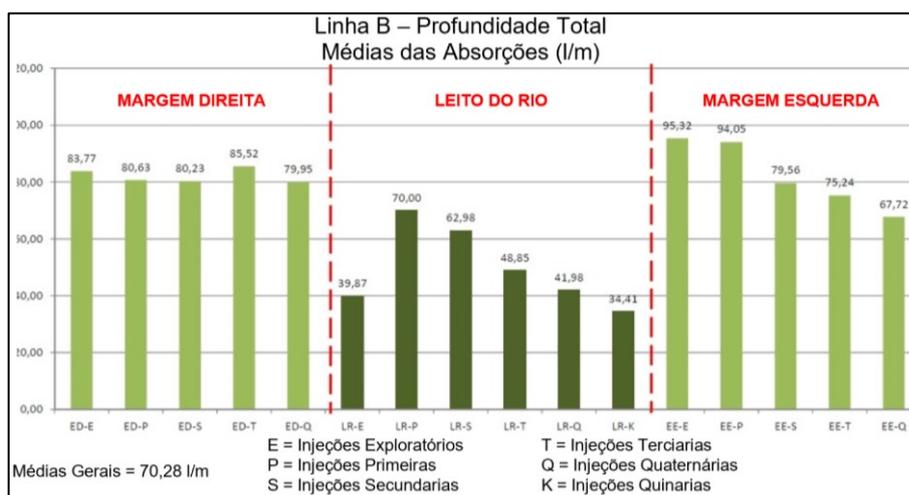
A Figura 5.29 mostra todos os resultados das absorções médias obtidos na linha B, e a Figura 5.30 mostra como as absorções médias se distribuem entre o leito do rio e as ombreiras.

Figura 5.29 Linha B – Absorções médias segundo a ordem de injeção.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.30 Linha B – Absorções médias de calda segundo a ordem de injeção nas ombreiras e leito do rio.



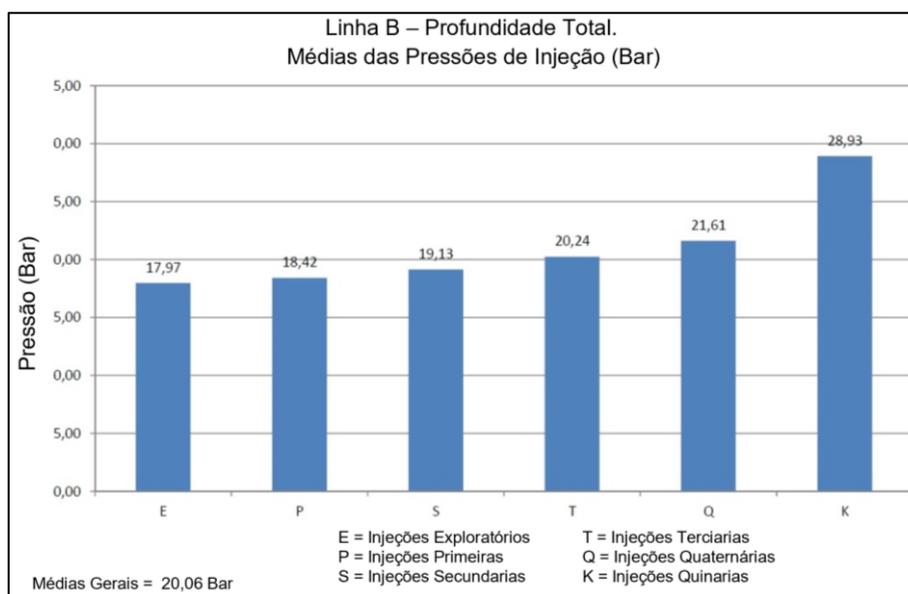
Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Na Figura 5.31 são apresentados todos os resultados das pressões médias obtidas na linha B e na

Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

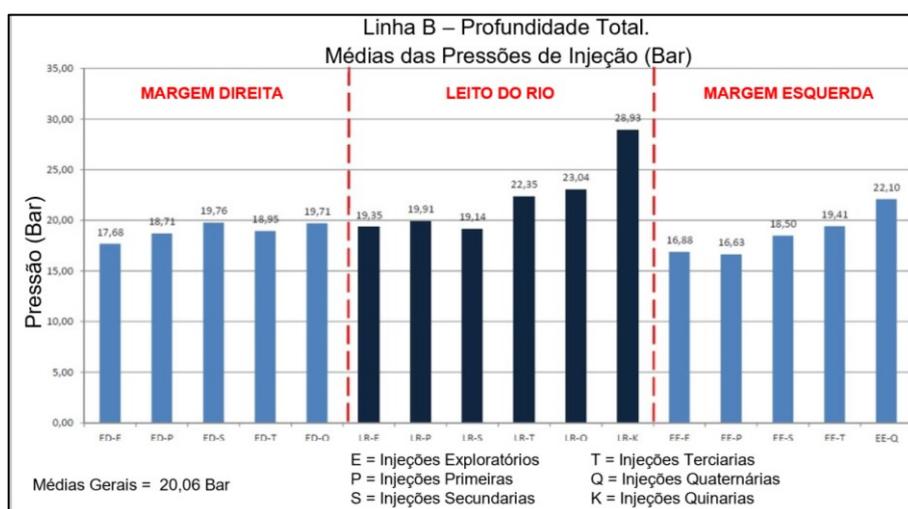
Figura 5.32 é apresentado um detalhe de como se distribuem as pressões médias entre as ombreiras e o leito do rio.

Figura 5.31 Linha B – Pressões médias segundo a ordem de injeção.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Figura 5.32 Linha B – Pressões médias segundo a ordem de injeção nas ombreiras e leito do rio.



Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Os valores médios de absorção da calda de cimento foram calculados em 70,28 l/m, com uma pressão média de 20,06 Bar. A análise desses valores indicou uma diminuição gradual das absorções à medida que se avança para perfurações de ordem superior, acompanhada de um aumento nas pressões de injeção.

Nas perfurações exploratórias, os valores médios de absorção foram de 72,99 l/m e a pressão média foi de 17,97 Bar, enquanto nas perfurações quinárias, os valores médios de absorção diminuíram para 34,41 l/m e a pressão média aumentou para 28,93 Bar.

Comparando as perfurações quinárias com as exploratórias, notou-se uma redução média de absorção de 53% e um aumento médio de pressão de 61%.

Ao analisar as absorções médias na ombreira direita, observou-se que o consumo até as perfurações quaternárias se manteve em torno de 80,00 l/m, enquanto a pressão aumentou de 17,68 Bar nas perfurações exploratórias para 19,71 Bar nas perfurações quaternárias.

No leito do rio, houve uma diminuição gradual das absorções e um aumento das pressões de injeção, indicando uma tendência de fechamento.

Analisando a ombreira esquerda, observou-se uma tendência de diminuição das absorções e um aumento de pouco mais de 25% na pressão, também sugerindo um fechamento gradual.

Os resultados obtidos indicam que as injeções estão obtendo sucesso, embora seja necessário realizar injeções em perfurações de ordem superior (quaternária, quinária etc.) para cumprir os critérios de absorção por trecho inferiores a 40 l/m, particularmente nas áreas onde esses limites foram ultrapassados.

O consumo total de calda de cimento injetado na linha B foi de 1.330.667 litros, e o comprimento total perfurado atingiu 16.203,60 metros. Esses resultados reforçam a eficácia do tratamento de injeção de cimento na linha B para a consolidação e impermeabilização adequadas da estrutura.

#### 5.2.4 Resumo Estatísticos das Injeções do Plinto

Os dados gerais de absorções e pressões nas médias do plinto estão resumidos na Tabela 5-1.

Tabela 5-1  
RESUMEN DE DOS VALORES PROMEDIOS DE ABSORCIONES Y PRESSIONES

<b>RESUMO ESTATÍSTICO</b>				
	<b>Linha A</b>	<b>Linha C</b>	<b>Linha B (Total)</b>	<b>Linha B (10 m)</b>
Absorção médias (l/m)	86,97	95,13	70,28	89,43
Pressão médias (Bar)	14,04	13,12	20,06	15,26
Absorção Total (l)	209.785,00	226.328,00	1.330.667,00	440.286,00
Total Injetado (l)	1.766.780,00			

Fonte: Adaptado de Engevix (2016).

Durante a análise do tratamento de injeção de cimento, foram observados os seguintes dados relevantes:

- O volume total de calda injetada alcançou a marca de 1.766.780 litros.
- Ao somar os volumes absolutos de calda injetada nas linhas A, C e B até uma profundidade de 10,00 m, constatou-se que totalizam 876.399 litros. Essa quantidade corresponde a aproximadamente 50% do volume total injetado, destacando a concentração significativa de injeções nos primeiros 10,00 m de profundidade.
- Os valores médios de pressão na linha B, no trecho de 0,00 a 10,00 m, apresentaram uma média de 15,26 Bar. Esse resultado representa um aumento de pressão média de aproximadamente 9% em relação às linhas A e C, que registram uma média de cerca de 14,04 Bar.
- Considerando a pressão média total das injeções na linha B, obteve-se um valor de 20,06 Bar, o que representa um aumento de aproximadamente 11,6% em relação às perfurações exploratórias, cuja pressão média foi de 17,97 Bar.

Esses dados demonstram a distribuição dos volumes injetados ao longo das diferentes linhas e a variação nas pressões médias, evidenciando a eficácia e os resultados do tratamento de injeção de cimento na cortina de consolidação e impermeabilização da estrutura.

### 5.3 INFLUÊNCIA GEOLÓGICA-GEOTÉCNICA

A análise comparativa dos resultados de injeção na linha B, revela a influência direta da litologia nos parâmetros do tratamento de impermeabilização. Ao examinar as estatísticas abordadas no capítulo anterior, como consumo de calda de cimento e as pressões alcançadas, torna-se evidente que as variações litológicas ao longo da profundidade desempenham um papel significativo no desempenho do processo de injeção.

Na fase inicial do trecho de tratamento (0,00 m a 10,00 m), as perfurações exploratórias, influenciadas pela condição de RQD observada em superfície (apêndice A e B) predominante nesse intervalo, apresentaram absorções médias altas seguindo uma forte similaridade com o RQD observado em superfície.

A comparação entre os setores litologicamente distintos, como o leito do rio, a ombreira direita e a ombreira esquerda, revelou variações notáveis nos resultados. No leito do rio, caracterizado por siltitos e arenitos azuis, observou-se uma diminuição gradual das absorções e um aumento nas pressões, sugerindo uma tendência de fechamento da cortina de impermeabilização nessa região.

Em contraste, as ombreiras direita e esquerda apresentaram respostas mais estáveis, mas com variações associadas às características litológicas específicas desses setores, como zonas de falhas e descontinuidades abertas. A ombreira esquerda, em geral, mostrou siltitos e arenitos azuis de qualidade superior em comparação com a ombreira direita com xistos, argilitos, siltitos, arenitos e uma quantidade notável de falhas e juntas abertas, influenciando diretamente nos resultados das injeções.

Ao analisar o trecho completo de tratamento (0,00 m a 70,00 m), as estatísticas indicam uma tendência geral de redução gradual das absorções e aumento nas pressões à medida que avançamos nas ordens das perfurações. Essa tendência é interpretada à luz das variações litológicas presentes no maciço rochoso, no qual predominância de consumo médios altos para xistos, argilitos e siltitos verdes e forte similaridade com o RQD destas regiões. No restante do trecho, os consumos reduzem com a profundidade, estando relacionados com a diminuição significativa da abertura de juntas em relação a profundidade.

Em resumo, a litologia emerge como um fator crítico na eficácia das injeções. As estatísticas revelam não apenas variações nos parâmetros de injeção, mas também destacam a importância de adaptar estratégias de injeção com base na compreensão detalhada das características litológicas do maciço. Essas conclusões têm implicações práticas significativas para otimizar futuras operações de injeção e garantir a eficácia contínua do tratamento de impermeabilização em diferentes setores da cortina.

#### 5.4 EFETIVIDADE DAS INJEÇÕES

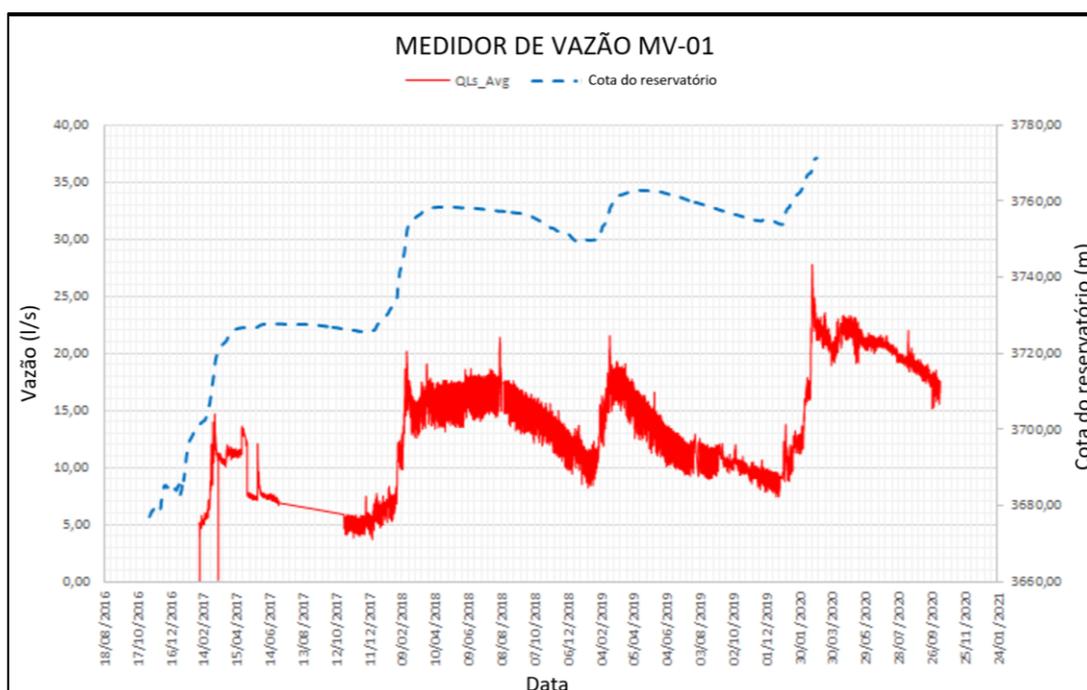
Após a execução de todas as campanhas de injeção previstas em projeto, das campanhas complementares necessárias e da execução de demais fases construtiva da barragem iniciou-se o lento processo de enchimento do reservatório. Onde o

volume máximo foi atingido em meados de 2021, quando a barragem verteu pela primeira vez.

O monitoramento das perdas d'água do reservatório de Misicuni ao longo do enchimento do reservatório deu-se pelo acompanhamento do medidor de vazão MV-01 posicionado a jusante do barramento.

Dentro dos dados disponíveis para esta dissertação está o gráfico de acompanhamento das vazões deste medidor, visto na Figura 5.33.

Figura 5.33 Medidor de Vazão MV-01 – Leituras disponíveis entre outubro de 2016 e janeiro de 2021



Fonte : Modificado de relatório interno de Engevix (2021)

O gráfico apresenta a distribuição das leituras de vazão de água em l/s comparadas com a cota de enchimento do reservatório, é possível observar que a cota do reservatório acompanha as estações de degelo na região da Bolívia e que apesar de momentâneos picos de vazão (28 l/s) provocados pelo enchimento repentino do reservatório o medidor possui uma tendência de estabilizar em cerca de 50% da vazão máximo registrada no ciclo de degelo.

Desta forma, o ponto de estabilização das vazões pela fundação registrada em outubro de 2020 foi de 17,54 l/s para uma área da face da barragem de 48.000 m<sup>2</sup>, o que representa uma vazão específica para uma barragem com as dimensões de Misicuni na ordem de 0,0096 m<sup>3</sup>/s/m.

A vazão do medidor de vazão por si só já representa um valor abaixo das disponíveis na bibliografia, ver Tabela 2.7, porém considerando que a fundação da barragem são rochas brandas e que a vazão específica obtida é extremamente baixa demonstra-se que o tratamento de fundação da barragem foi eficaz e efetividade em relação ao seu propósito.

## CONCLUSÕES

Os dados apresentados nestes relatórios são, em grande parte, os mesmos disponíveis nos informes técnicos do projeto e relatórios de supervisões disponíveis para o recorte temporal de 2015 a 2016, havendo ainda novos trabalhos de injeções executados após esse período até a finalizações dos trabalhos. Desta forma, este trabalho apresenta uma tendência de comportamento sobre os consumos registrados.

A consulta bibliográfica e as descrições sobre os tratamentos de injeções no *Projeto Múltipla de Misicuni* indicam que a concepção e o desenvolvimento dos trabalhos de injeção foram totalmente baseados na filosofia e nos procedimentos recomendados pelo Método GIN, desenvolvido por G. Lombardi e D. Deere.

Há registros de revisões de dados e aplicações práticas que levaram a mudanças na composição da mistura de calda de cimento, visando uma maior eficiência, bem como a adoção de GINs menos agressivos para regiões com rochas de menor resistência. Além disso, foram estabelecidos critérios adicionais para garantir a obstrução adequada dos furos de injeção

Os dados disponíveis nos permitem concluir que à medida que as ordens de injeção progredem, o consumo da calda de cimento diminui significativamente, desta forma demonstrando a boa eficiência das injeções executadas.

Outro ponto a se considerar é que na grande maioria das injeções realizadas os critérios de paralisação de injeção se concentraram em atingir a curva GIN ou alcançar a pressão máxima estipulada em projeto, aumentando suas percentagens à medida que a ordem de injeção progride.

Conforme foi apontado na seção correspondente deste relatório, o desenvolvimento dos trabalhos de tratamento geotécnico para mitigação da permeabilidade hidráulica da fundação da barragem, a partir do plinto, apresentou problemas e particularidades importantes que têm notório impacto nos resultados obtidos. Como na margem esquerda da barragem onde a condição geotécnica do material é menos competente e existem complicações na geologia estrutural do maciço.

No caso do objetivo do tratamento das injeções, entendido como o de reduzir a permeabilidade hidráulica no terreno para reduzir as vazões de água “perdidas” por

percolação na fundação da barragem foi alcançado de forma satisfatória, tendo em vista que as medições de vazão de jusante da barragem após o enchimento do reservatório apresentaram 17,54 l/s. Considerando que a seção da barragem possui 468,51 m a vazão específica apresentada após o enchimento do reservatório 0,0096 m<sup>3</sup>/s/m. É um valor expressivamente inferior ao de barragens similares na bibliografia se conclui que os tratamentos de injeção foram efetivos e eficazes no caso desta barragem.

O método GIN foi aplicado em alguns casos no Brasil. No entanto, fatores como a necessidade de uma estação de tratamento completa para operação, a mão de obra qualificada exigida para especificar e executar os tratamentos, bem como os custos financeiros consideráveis associados à injeção de calda de cimento monitorada, têm dificultado a expansão desse método no Brasil.

Essa situação pode ser contornada com financiamento público e privado no desenvolvimento de projetos pilotos para desenvolver equipamentos e capacitar a mão de obra para os trabalhos, barateando o método e liberando os projetistas para especificá-los para os seus projetos.

Contudo, os cenários não são animadores, pois poucos projetos com a capacidade de demandar o uso do método GIN estão sendo desenvolvidos no Brasil. Além disso, a mão de obra especializada que costumava realizar injeções de calda de cimento pelo método tradicional em grandes complexos hídricos no Brasil hoje está extremamente reduzida.

## REFERÊNCIAS

- ANA. (2017). **Resolução nº 236/2017**. Disponível em: Acesso em: 01/12/2022
- AMARO, A. C. P. **Interpretação De Ensaio Lugeon Para a Caracterização Hidráulica De Maciços Rochosos**. 162 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa-FCT/UNL, Caparica, 2015.
- AZEVEDO, A. A.; ALBUQUERQUE FILHO, J. L. **Águas subterrâneas**. Geologia de Engenharia. Sao Paulo–SP, Brazil: ABGE, p. 111-130, 1998.
- BARNES, H.A. **Thixotropy-a review**. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 70, n. 1, 1-33, 1997
- BREMEN, R. **The use of additives in cement grouts**. Hydropower and Dams. v. 4, n. 1, 71-76, 1997.
- CAMPOS JÚNIOR, H. S. **Procedimentos progressivos analíticos e numéricos para análise de barragens em arco**. xxii, 184 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade de Brasília – UNB, Brasília, 2011.
- CHAU, L. - **A Study on Concrete Faced Rockfill Dams. Bachelor thesis in civil engineering**, University of Southern Queensland, USA, 2014.
- COSTA, Walter Duarte. **Geologia de Barragens**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- CRUZ, Paulo Teixeira. **As 100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção e projeto**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996
- EMPRESA MISICUNI. **Descripción e Información del Proyecto Múltiple Misicuni**, Cochabamba, 2020. 27p. Consultado 26 de março de 2023 em: <https://www.misicuni.gob.bo/download/descripcion-e-informacion-del-proyecto-multiple-misicuni/>
- ENGEVIX. **Informe Técnico Sobre Los Resultados de Las Inyecciones**. Florianópolis, 2016. *no prelo*.

GAMA, P. S. S. **Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens**: Revisão crítica de metodologias. 200 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa- FCT/UNL, Lisboa, 2012.

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

LOMBARDI, G. **Grouting of rock masses**. New Orleans: Geotechnical Special Publication, 2003

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

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

LOMBARDI, G. **Grouting of rock with cement mixes**. In: ICOLD-SYMPOSIUM, Antalya, 1999

LOMBARDI, G. DEERE, D. s. Water Power and Dam Construction, jun. 1993.

LOPES, M. B. **Análise da eficiência do sistema de vedação da fundação em granito de uma barragem de concreto**. 162f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica de Barragens) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Ouro Preto, 2015.

LOPES, M. B. **Tratamento de fundação de barragens de concreto**. 1 ed. São Paulo: appris, 2020

LUGEON, M. (1933). **Barrage et géologie**. Paris: Dunod.

MASSAD, F. **Obras de Terra**: Curso Básico de Geotecnia. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 170p.

Multiurethanes. **Grouting Narrow Fissures** - Technical Information. 2010. Consultado a 27 de novembro de 2022 em: <https://multiurethanes.com/wp-content/uploads/2017/05/Multiurethanes-Technical-Information-Cement-Grouting-4.pdf>

MUNOZ VARGAS, Erik; ROJAS A., Juan Pablo; MURILLO C., René y PONCE B., Jaime. **PROYECTO MÚLTIPLE MISICUNI**. *JBC* [online]. 2010, vol.7, n.21, pp. 53-59. ISSN 2075-8936.

PEREIRA, R., BATISTA, A. L., NEVES, L. C. **Modelo probabilístico para a representação das subpressões nas fundações de barragens de betão**. 12p, Encontro Nacional Betão Estrutural 2016, Coimbra, 2016

SIACARA, Adrian Torrico; SALINAS, Mauricio; FUTAI, Marcos Massao. **FOUNDATION ON ROCK OF THE MISICUNI DAM FUNDAÇÃO ROCHOSA DA BARRAGEM DE MISICUNI**. Paper presented at the ISRM 2nd International Specialized Conference on Soft Rocks, Cartagena, Colombia, October 2016.

USBR, **Dams and Public Safety**, United States Department of the Interior Bureau of Reclamation, Denver, 1983.

TECNOSUELO BOLIVIA S.R.L; **Informe Técnico Sobre El Tratamiento de Inyecciones Método Gin En La PM Misicuni - Análisis Y Resultados Del Tratamiento De La Fundación**, Cochabamba, Bolivia 2016, *no prelo*.

TEIXEIRA, B. F. L. **Caracterização dos Reservatórios Turbidíticos da Porção Centro-Norte do Novo Campo de Jubarte**, Bacia de Campos, Baseada na Interpretação Integrada de Dados de Rocha, Perfis de Poço e Sísmica 2021. 122 f, Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica) - Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.

YANG, H., HAYNES, M., WINZENREAD, S., OKADA, K. **The History of Dams**. University of California, Davis 1999.

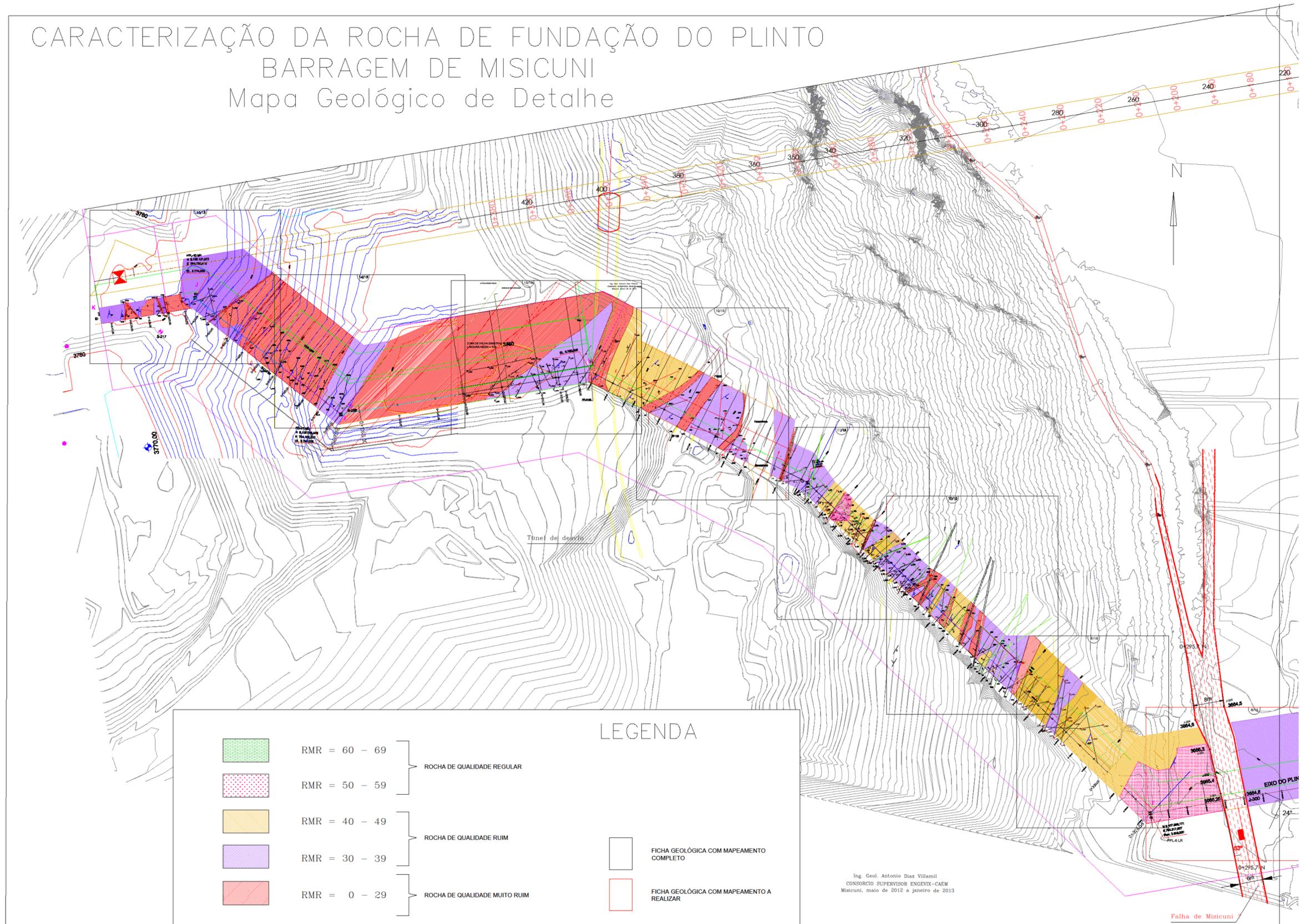
WEAVER, K.D.; BRUCE, D. A. **Dam Foundation Grouting**: revised and expanded Edition. Nova Iorque: American Society of Civil Engineers, 2007.

WOOTEN *et al.* **The Williamsburg Reservoir Dam Failure of 1874.**, San Diego ASDSO Annual Conference. Association of State Dam Safety Officials - Dam Safety, 2014.

ZHANG, L.. **Aspects of rock permeability.** Frontiers of Structural and Civil Engineering, Elsevier, Cambridge, 2017. T 7, 102- 116.

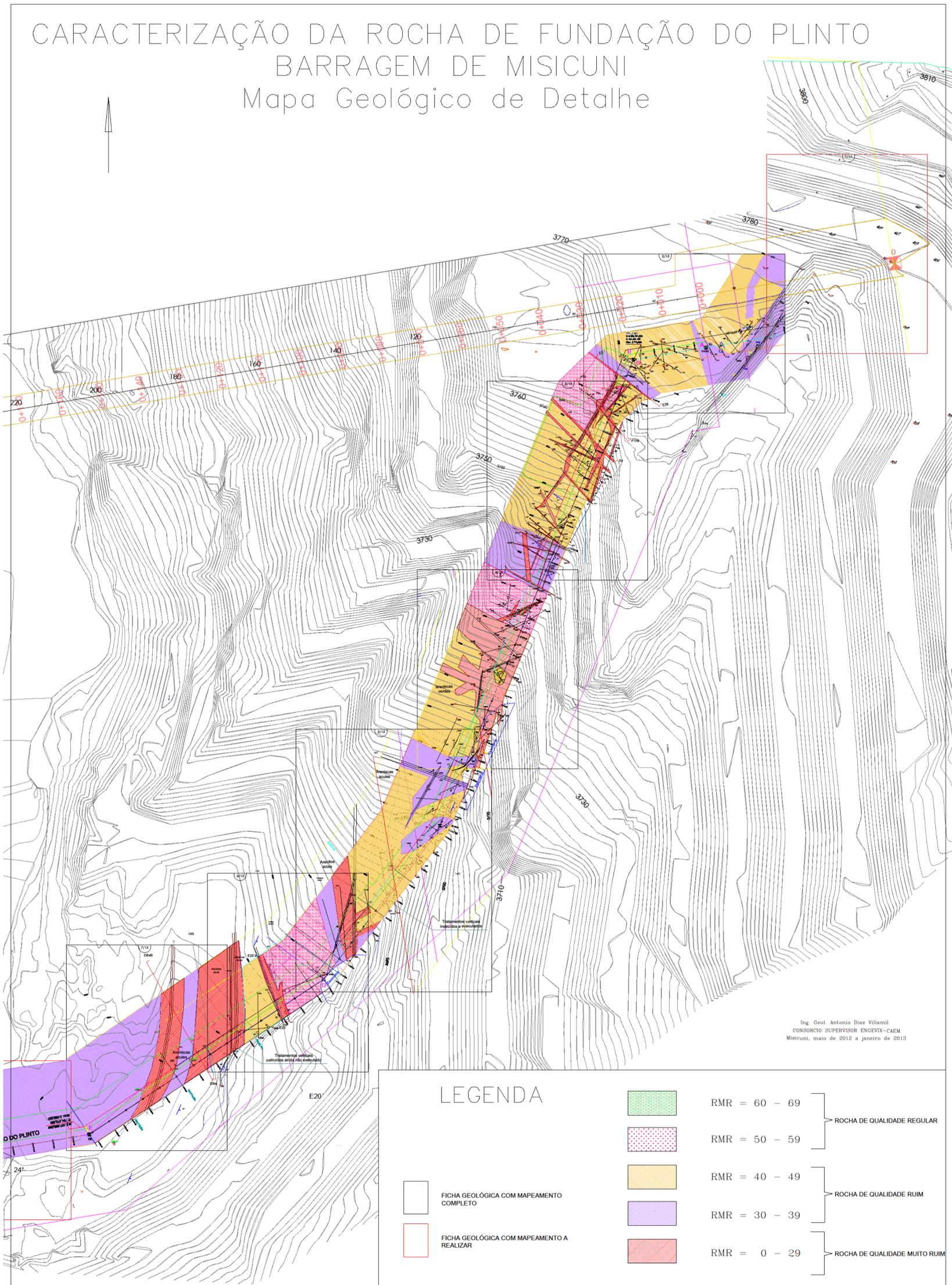
ANEXO A - Mapa Geológico/Geomecânico Margem Direita

CARACTERIZAÇÃO DA ROCHA DE FUNDAÇÃO DO PLINTO  
BARRAGEM DE MISICUNI  
Mapa Geológico de Detalhe



Fonte: adaptado de Consórcio Supervisor Engevix-Caem (2013).

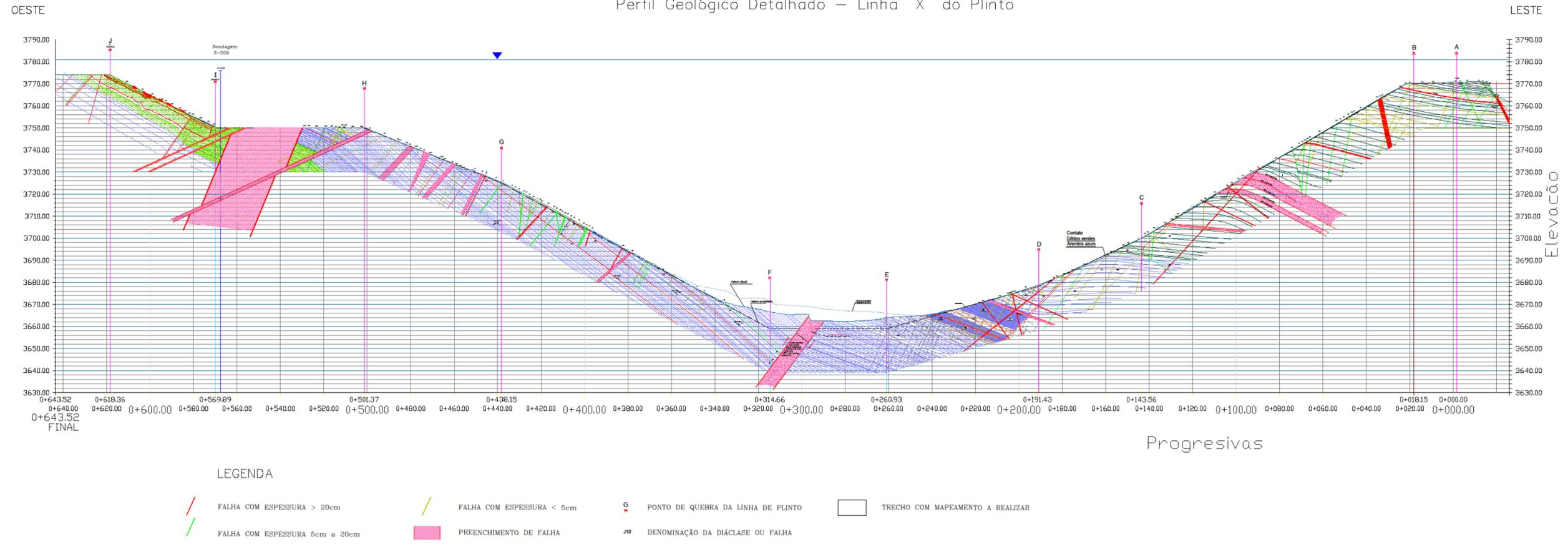
ANEXO B - Mapa Geológico/Geomecânico Margem Esquerda



Fonte adaptado de Consórcio Supervisor Engevix-Caem (2013).

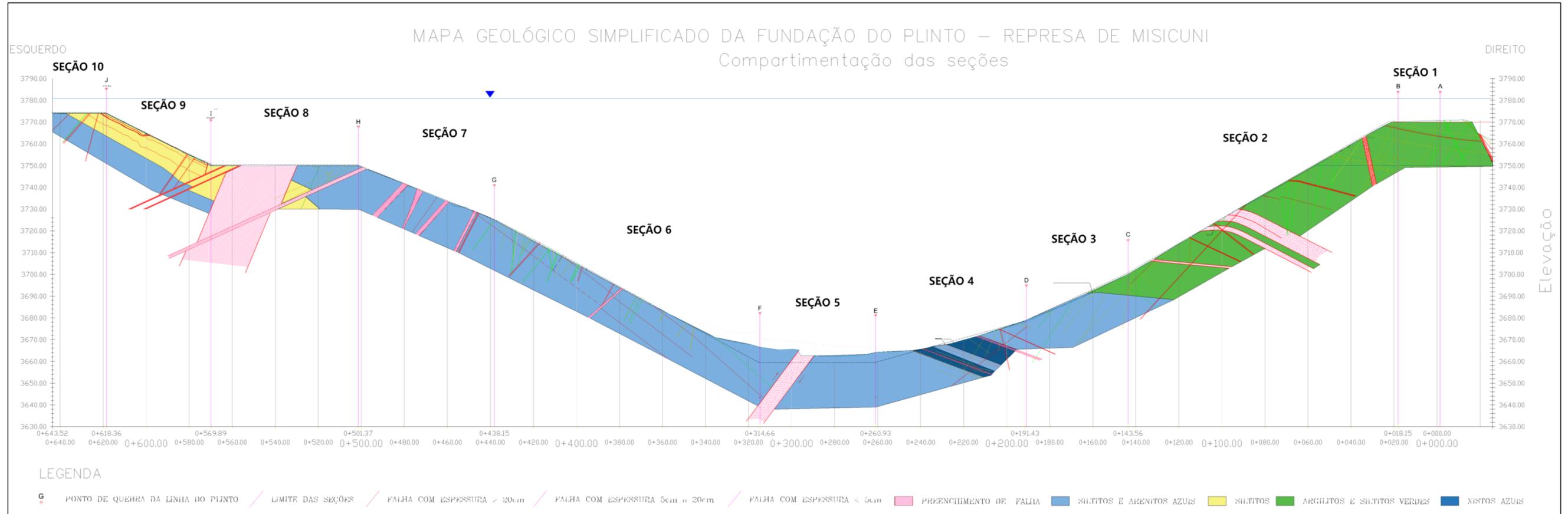
ANEXO D – Perfil Geológico/Geomecânico na seção do plinto

CARACTERIZAÇÃO DA ROCHA DE FUNDAÇÃO DO PLINTO – BARRAGEM DE MISICUNI  
 Perfil Geológico Detalhado – Linha "X" do Plinto



Fonte: adaptado de Consórcio Supervisor Engevix-Caem (2013).

ANEXO D – Perfil Geológico simplificado na seção do plinto



Fonte: adaptado de Consórcio Supervisor Engevix-Caem (2013).