

Henrique Ayuso de Almeida

Cortinas de Injeção para Tratamento de Fundação de Barragens

Campinas, SP

Julho de 2022

Henrique Ayuso de Almeida

Cortinas de Injeção para Tratamento de Fundação de Barragens

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de **bacharel em Geologia** ao Instituto de Geociências da Universidade Estadual de Campinas, sob orientação da Professora Dra. Ana Elisa Silva de Abreu.

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP

Instituto de Geociências – IG

Departamento de Geologia e Recursos Naturais

Orientador: Ana Elisa Silva de Abreu

Campinas, SP

Julho de 2022

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca do Instituto de Geociências
Marta dos Santos - CRB 8/5892

AL64c Almeida, Henrique Ayuso de, 1998-
Cortina de injeção para tratamento de fundação de barragens / Henrique Ayuso de Almeida. – Campinas, SP : [s.n.], 2022.

Orientador: Ana Elisa Silva de Abreu.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Mapeamento geológico. 2. Fundações (Engenharia). 3. Condutividade hidráulica. 4. Permeabilidade. 5. Águas subterrâneas. I. Abreu, Ana Elisa Silva de, 1973-. II. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Geociências. III. Título.

Informações adicionais, complementares

Título em outro idioma: Grout curtain for dam foundation treatment

Palavras-chave em inglês:

Geological mapping

Foundations (Engineering)

Hydraulic conductivity

Permeability

Groundwater

Titulação: Bacharel

Banca examinadora:

Ana Elisa Silva de Abreu [Orientador]

Jefferson de Lima Picanço

Ricardo Perobelli Borba

Data de entrega do trabalho definitivo: 13-07-2022

Agradecimentos

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso àqueles que estiveram ao meu lado em algum momento desses últimos anos.

À minha família, Wagner Almeida, Luci Ayuso, Felipe Almeida, Chicaco Okutani de Almeida, Lucas e Gustavo Okutani, Wanderley de Almeida, Álvaro Ayuso e Ted, obrigado por me aceitarem e me apoiarem em todos meus momentos de dificuldades.

À minha grande companheira Isabella Honda, que confia e acredita em mim como ninguém, sempre me apoiando, incentivando e estando ao meu lado.

Aos meus incríveis amigos Fernando Vieira, Heitor Kazuo, Renan Grimaldi, Lucas Marti, Artur Dani, Ernesto Etulain, Fabrício Almeida, Pedro Hokama, Leonardo Godoi, Davi Drezza, Brenno Santos, Ricardo Couto, Rodrigo Alonso, Eduardo Massari, Fabio Ricci, Caio Castriotto e tantos outros que compartilharam comigo todos os campos, entregas de relatórios, provas e histórias de vida... agradeço de coração todo o companheirismo e sentimento de estar em outra família.

Por fim, à minha orientadora Ana Elisa, que me orientou e me ajudou na realização deste trabalho, abrindo meus olhos para esta área que é a geologia de engenharia.

Obrigado.

Resumo

As cortinas de injeção são empreendimentos custosos, cuja função é a de diminuir o fluxo de água subterrâneo com sentido montante-jusante. Uma efetiva cortina de injeção diminui significativamente os efeitos de "piping" e de subpressão, através da redução da condutividade hidráulica do maciço. No presente Trabalho de Conclusão de Curso, foi realizada uma revisão bibliográfica acerca dos procedimentos associados à construção de uma cortina de injeção em fundação de barragens, com o objetivo de apresentar o procedimento e propostas de autores diferentes acerca dele. Uma cortina de injeção que cumpre seu propósito com relevante eficácia consiste de um levantamento de dados geológico-geotécnicos do maciço, realização de ensaios de perda d'água sob pressão, aplicação de pressões, tipos e volumes de calda adequadas ao maciço, disposição dos furos com organização planejada, sempre acompanhado por um controle de qualidade efetivo e sistemático. As propostas de métodos de execução de cortinas de injeção de Houlsby (1976, 1990), Lombardi e Deere (1993) e Wilson e Dreese (2003) variam quanto às pressões aplicadas, condutividades hidráulicas máximas aceitas, caldas utilizadas, mas concordam em organização dos furos, utilização dos ensaios de perda d'água e aspectos executivos. Assim, elas seguem a mesma linha de raciocínio: estabelecer um obstáculo ao fluxo d'água eficaz através da interpretação das características geológico-geotécnicas do maciço da fundação da barragem.

Palavras-chave: Mapeamento geológico; Fundações (Engenharia); Condutividade hidráulica; Permeabilidade; Águas subterrâneas.

Abstract

Grout curtains are expensive undertakings, which has the function of lowering the flow of underground water with upstream-downstream direction. An effective grout curtain substantially decreases the piping and uplift pressure effects through the reduction of the permeability (hydraulic conductivity) of the rock massif. In the present final paper, it will be presented a literature review about the proceedings associated with the construction of a grout curtain in concrete dam foundations, with the objective of presenting the procedure and the propositions of different authors about it. A grout curtain that fulfills its purpose with efficiency consists of the collection of geologic and geotechnic informations about the rock massif, the realization of water pressure testing, adequate pressure, types and volume of the cement grout, planned holes organization and always accompanied with systematic and effective quality control. The different propositions of execution of grout curtain made by Houlsby (1976, 1990), Lombardi e Deere (1993) and Wilson e Dreese (2003) vary when it comes to details, like the pressure applied, maximum permeabilities accepted, but agree about hole organization, utilization of water pressure testing and executive aspects. Therefore, they follow the same understanding of the procedure: to establish an effective grout curtain through the interpretation of the geologic-geotechnical particularities composing the dam foundation's massif.

Keywords: Geological mapping; Foundations (Engineering); Hydraulic conductivity; Permeability; Groundwater

Lista de ilustrações

Figura 1 – Variação da condutividade hidráulica de um maciço em relação à profundidade. (a) representa o grupo dos granitos, gnaisses e migmatitos, (b) representa os basaltos, (c) os arenitos e (d) representa os xistos e filitos. Fonte: Azevedo e Albuquerque (1998) <i>apud</i> Lopes (2020)	15
Figura 2 – Montagem dos equipamentos do ensaio de perda d'água sob pressão com obturador duplo. Fonte: ABGE (2021).	17
Figura 3 – Ensaio de perda d'água em andamento. É possível ver na foto a canalização (1), o "pulmão"(2) como estabilizador de pressão, o manômetro (3), hidrômetro (4), e tubulações de entrada e de retorno (5), utilizado para o controle da pressão. Fonte: acervo pessoal.	18
Figura 4 – Comportamentos frequentes de maciços em ensaios de perda d'água sob pressão, com ênfase em 3 tipos de comportamento: a não alteração, fechamento e abertura da descontinuidade (ABGE, 2021).	22
Figura 5 – Ilustração demonstrando a maior efetividade de furos inclinados em comparação com furos verticais para maciços com famílias de descontinuidades importantes. Fonte: Modificado de Gama (2012).	24
Figura 6 – Ilustração dos tipos de "bits"utilizados no método rotopercussivo. Fonte: Lopes (2020).	26
Figura 7 – Foto de uma perfuratriz executando um furo vertical para realização de uma cortina de injeção. Fonte: Acervo pessoal.	26
Figura 8 – Foto do resultado de um ensaio de sedimentação da calda de cimento. Fonte: Acervo pessoal.	27
Figura 9 – Exemplo de curva de injetabilidade, obtida pela relação de Fluidez × Estabilidade. Fonte: Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006) . .	28
Figura 10 – Gráfico ilustrando a variação dos diferentes métodos de adoção de pressão para cortinas de injeção. A linha (1) representa o sistema europeu, (2) representa o sistema americano. Fonte: Gama (2012). . . .	30
Figura 11 – Ilustração mostrando como os equipamentos são montados no processo de injeção de cimento nos furos da cortina de injeção. Fonte: Levis (2006), adaptado de Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006) . .	32
Figura 12 – Foto mostrando o misturador e o agitador de calda (1), junto com a bomba (2). Ao fundo, vê-se a mangueira se conectando às hastes, que descem ao furo vertical (3), onde está ocorrendo a injeção. Fonte: Acervo pessoal.	32

Figura 13 – Foto dos equipamentos de injeção perto do furo. À esquerda, vê-se a haste de metal (1) descendo o furo de injeção vertical, conectada por mangueiras ao manômetro (2), seguido pelo registro de retorno (para controle de pressão) e o registro da linha que envia calda ao furo (3). Depois dos registros, há um estabilizador de pressão (4). Nota-se o macaco hidráulico à direita (5) utilizado para aplicar pressão ao obturador, que isola o trecho injetado. Fonte: Acervo pessoal.	33
Figura 14 – Foto mostrando os equipamentos de injeção com obturador duplo composta pelos obturadores (1), a "flauta"(2), um tubo com furos por onde a calda sai e as hastes de injeção (3) que descem até o trecho injetado, levando a calda até o trecho pelo seu interior. Nota: os obturadores estão inflados, mostrando como que obstruem os furos empurrando a borracha contra a parede. Fonte: acervo pessoal.	34
Figura 15 – Método de separação da cortina em seções. Fonte: Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006).	35
Figura 16 – Método de injeção descendente. Fonte: Gama (2012).	37
Figura 17 – Método de injeção ascendente. Fonte: Gama (2012).	38
Figura 18 – Ilustração do espaçamento divisional na execução dos furos verticais. Na ilustração, P representa os furos primários, S os secundários e T, por fim, os terciários.. Fonte: Acervo pessoal.	39
Figura 19 – Exemplo do espaçamento divisional em conjunto com as áreas de influência de cada furo, representadas pelos círculos hachurados. Fonte: Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006).	40
Figura 20 – Ilustração de uma seção do corpo de uma barragem, com a instalação dos piezômetros à montante e à jusante da cortina de injeção. Fonte: Marsal e Resendiz (1975)	43
Figura 21 – Esquema para adoção de condutividades hidráulicas mínimas de caso a caso. $1 \text{ Lu} = 1,3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. Fonte: Gama (2012), adaptado de Houlsby (1976, 1990)	45
Figura 22 – Gráfico de pressão $\times$ Profundidade, relacionadas ao tipo de rocha. Fonte: Gama (2012), adaptado de Houlsby (1976, 1990)	46
Figura 23 – Esquema do processo executivo de injeção, considerando-se os valores de condutividades hidráulicas do maciço pré-injeção. Fonte: Gama (2012), adaptado de Houlsby (1976, 1990)	47
Figura 24 – Gráficos de pressão de injeção $\times$ volume de absorção de calda por metro. Em a) não é utilizada a curva GIN, em b) aplica-se a curva GIN, ilustrada pela curva BC no gráfico. Fonte: Modificado de Lombardi (2003, <i>apud</i> Gama, 2012). Extraído de Gama (2012)	48

Figura 25 – Gráfico com algumas curvas de GIN padrão. Fonte: Modificado de Lombardi (2003, <i>apud</i> Gama, 2012). Extraído de Gama (2012)	49
Figura 26 – Representação gráfica de curva GIN (a) e de penetrabilidade (b). Na ilustração, q é a vazão, p é a pressão, a curva 1 é a representação gráfica da pressão usada e a quantidade cumulativa de calda injetada, a curva 2 é a curva de penetrabilidade da calda e F é a intersecção da curva 1 com a curva GIN, indicando o ponto de paralisação de injeção com pressão e volume finais. Fonte: Modificado de Lombardi e Deere (1993) (<i>apud</i> Gama, 2012). Extraído de Gama (2012)	52
Figura 27 – Gráfico de exemplo de comportamento da calda ao longo de uma injeção, com a adoção de diferentes curvas GIN implícitas em a, b, c, d... Fonte: Lombardi e Deere (1993).	54

Lista de tabelas

Tabela 1	– Ensaaios para controle tecnológico de qualidade das caldas de cimento. Fonte: Adaptado de Gama (2012).	42
Tabela 2	– Regras para adoção do método GIN. Fonte: Modificado de Lombardi (2003, <i>apud</i> Gama, 2012). Extraído de Gama (2012)	51
Tabela 3	– Tabela de relação entre características do projeto atuante e valores alvo de condutividade hidráulica. Fonte: Modificado de Wilson e Dreese (2003).	57
Tabela 4	– Resultados de uma análise preliminar. Fonte: Modificado de Wilson e Dreese (2003)	58
Tabela 5	– Tabela resumo para efeito de comparação entre os métodos de Lombardi e Deere (1993) e Houlsby (1976, 1990).	60

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS DO TRABALHO	12
3	MÉTODOS	13
4	ESPECIFICAÇÕES DAS CORTINAS DE INJEÇÃO	14
4.1	Etapas pré-projeto	14
4.1.1	Caracterização geológico-geotécnica	14
4.1.2	Execução de ensaios de Perda d'Água	16
4.1.3	Ensaio Lugeon	23
4.2	Especificações de projeto	23
4.2.1	Organização dos furos para injeção	23
4.2.2	Profundidade e extensão da cortina	24
4.2.3	Técnicas de Perfuração	25
4.2.4	Injetabilidade e tipos de calda	27
4.2.5	Pressões de injeção	29
4.2.6	Definição do comprimento dos trechos de injeção	29
4.2.7	Crítérios para definição de paralisação da injeção	30
4.3	Execução da cortina de injeção	31
4.3.1	Equipamentos e circuito de injeção	31
4.3.2	Procedimento executivo	35
4.4	Controle de Qualidade	41
4.4.1	Qualidade do procedimento	41
4.4.2	Verificação de eficiência	41
5	PROPOSTAS DE MÉTODOS EXECUTIVOS	45
5.1	Proposta de Houlsby (1976, 1990)	45
5.2	Método GIN - Proposta de Lombardi e Deere (1993)	47
5.3	Método QEGC - Proposta de Wilson e Dreese (2003)	55
6	DISCUSSÃO	59
7	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64

1 Introdução

Ao se construir uma barragem, junto da seleção de um local adequado para a instalação de uma barragem, surge a preocupação de entender a susceptibilidade do maciço à ocorrência de "*piping*", palavra inglesa para "erosão interna". Este fenômeno consiste no fluxo de água no interior do maciço que sustenta a barragem, gerando erosões lentas que, com o passar do tempo, podem desestabilizar seu corpo (GAMA, 2012). Essa erosão pode se dar através dos poros da rocha, em caso de um embasamento sedimentar, ou pelas fraturas e zonas de falhas, caso o maciço tenha sido submetido a eventos tectônicos.

Outro problema que surge ao se tratar de obras hidráulicas desse porte é o de subpressão, classificado por Levis (2006) como "o esforço ascendente, exercido na base de obras hidráulicas, provocado pela água que percola através de seu maciço de fundação". Essa pressão oferece riscos estruturais, uma vez que atua aliviando o peso da estrutura e, portanto, a torna mais suscetível ao deslizamento.

Assim, segundo Levis (2006), é executada uma cortina de injeção, que consiste em uma ou mais linhas de furos preenchidos por injeção de calda, geralmente de cimento. Como resultado, obtêm-se um maciço menos permeável, alcançando valores médios de condutividade hidráulica de 10^{-4} cm/s.

Gama (2012) e Lopes (2020) indicam que obras em todo o mundo são adotadas cortinas de injeção em fundações de barragens, enquanto Levis (2006) aponta que as primeiras ocorrências desse tipo de tratamento se deram na França, em 1838. O conhecimento empírico desse tipo de tratamento foi crescendo pela Europa, até que, em 1935, fora elaborado o primeiro documento técnico sobre o assunto, nos Estados Unidos, para a Barragem de Estacada, no Oregon (LOPES, 2020).

Gama (2012) explica que este método de tratamento de fundações é utilizado, principalmente, em barragens com alturas de coluna d'água a partir de 15 metros. Consistem na injeção de material relativamente impermeável, sob pressão, em furos espalhados pelo maciço ao longo de uma (ou mais) linha(s) de injeção, com o intuito de preencher vazios, fraturas e descontinuidades, a fim de melhorar suas características hidráulicas e também mecânicas. Sendo assim, são associados diversos parâmetros técnicos para a aplicação de uma cortina de injeção, resultando em diferentes propostas por alguns autores da área de geologia de engenharia, como os métodos de Houlsby (1976, 1990), Lombardi e Deere (1993) e Wilson e Dreesse (2003), abordados neste trabalho. Espera-se, assim, que o maciço tratado com cortina de injeção apresente menor condutividade hidráulica e deformabilidade, além de uma maior resistência.

2 Objetivos do Trabalho

Tendo-se em vista que não existem normas técnicas brasileiras acerca deste assunto, e que os projetos do país vêm sendo elaborados com embasamento empírico (LOPES, 2020), este Trabalho de Conclusão de Curso tem por objetivo especificar todos os passos desse procedimento, apresentando, também os métodos de execução propostos mais recentemente.

Além disso, serão discutidos procedimentos associados aos de cortina de injeção, como ensaios de perda d'água, e todos seus processos e parâmetros adotados nos tratamentos de fundação de barragens no Brasil.

3 Métodos

Este trabalho possui um propósito descritivo, com a finalidade de apresentar os principais temas associados à construção de uma cortina de injeção para tratamento de maciços rochosos em fundação de barragens.

Com esse fim, foi realizada uma pesquisa bibliográfica acerca desse tipo de tratamento, apresentando de maneira qualitativa tanto um aspecto geral das injeções, introduzindo os parâmetros utilizados, como exemplos de métodos propostos por diferentes autores acerca da aplicação desses parâmetros.

Ressalta-se, também, a importância das dissertações de mestrado de Levis (2006) da Escola de Engenharia de São Carlos, da dissertação de mestrado de Gama (2012) da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa e do Livro "Tratamento de Fundação Para Barragens de Concreto", de Lopes (2020). Seus trabalhos contribuíram muito para este texto, introduzindo diversos modos de abordar o assunto e fontes de pesquisa para alcançar maior nível de detalhe.

Neste ramo das ciências da terra, a utilização de normas e guias técnicos se faz imprescindível. Portanto, destaca-se o livro "Investigações Geológico-Geotécnicas - Guia de Boas Práticas"(ABGE, 2021), utilizado para a obtenção de dados acerca dos ensaios de perda d'água.

4 Especificações das Cortinas de Injeção

O processo da criação de uma cortina de injeção deve ser bem organizado, planejado e utilizar de regras (ou especificações) que sejam seguidas ao longo de sua totalidade. Sendo assim, a cortina de injeção apresenta fases pré-projeto, durante a injeção, e pós-injeção, cada uma contando com prioridades diferentes a serem seguidas.

4.1 Etapas pré-projeto

4.1.1 Caracterização geológico-geotécnica

De acordo com Eletrobrás (2003), um dos primeiros passos a serem seguidos para o início do tratamento de fundações de barragens é a elaboração da modelagem geológico-geotécnica. Essa modelagem consiste no mapeamento geológico da fundação da barragem, descrevendo tanto sua composição litológica principal, quanto suas características geotécnicas, envolvendo grau de fraturamento, número de famílias e suas atitudes no maciço, preenchimento, espaçamento e outras características das diáclases.

Lopes (2020) aponta que faz parte da etapa de modelagem geológico-geotécnica a execução de sondagens mistas e rotativas com intuito exploratório ou até de métodos geofísicos, a partir dos quais seja possível entender a composição do maciço que servirá de fundação à barragem.

Para demonstrar a importância de se conhecer as características geológicas do maciço, a autora apresenta o gráfico da figura 1, que demonstra o comportamento da condutividade hidráulica ao se aprofundar em maciços compostos por diferentes grupos de rochas. Para os granitos, gnaisses e migmatitos, segundo Lopes (2020), o confinamento resultante da pressão associada ao peso da rocha afeta diretamente a condutividade hidráulica. Já para as rochas basálticas e arenitos, observa-se que a condutividade hidráulica é muito variável em relação à profundidade. Isso se deve ao fato de que, em basaltos, ocorrem juntas de alívio e texturas vesiculares, facilitando a percolação de água pelo maciço, ao ponto que em arenitos, além de juntas, a própria matriz da rocha é muito mais porosa que quando comparado com rochas ígneas, resultando em valores de condutividade hidráulica ainda maiores, como vistos na figura 1. Por fim, em rochas de baixo grau de metamorfismo, apesar de sua natureza fornecer altos valores de condutividade hidráulica, o confinamento exerce grande influência, diminuindo-a ao aumentar a profundidade.

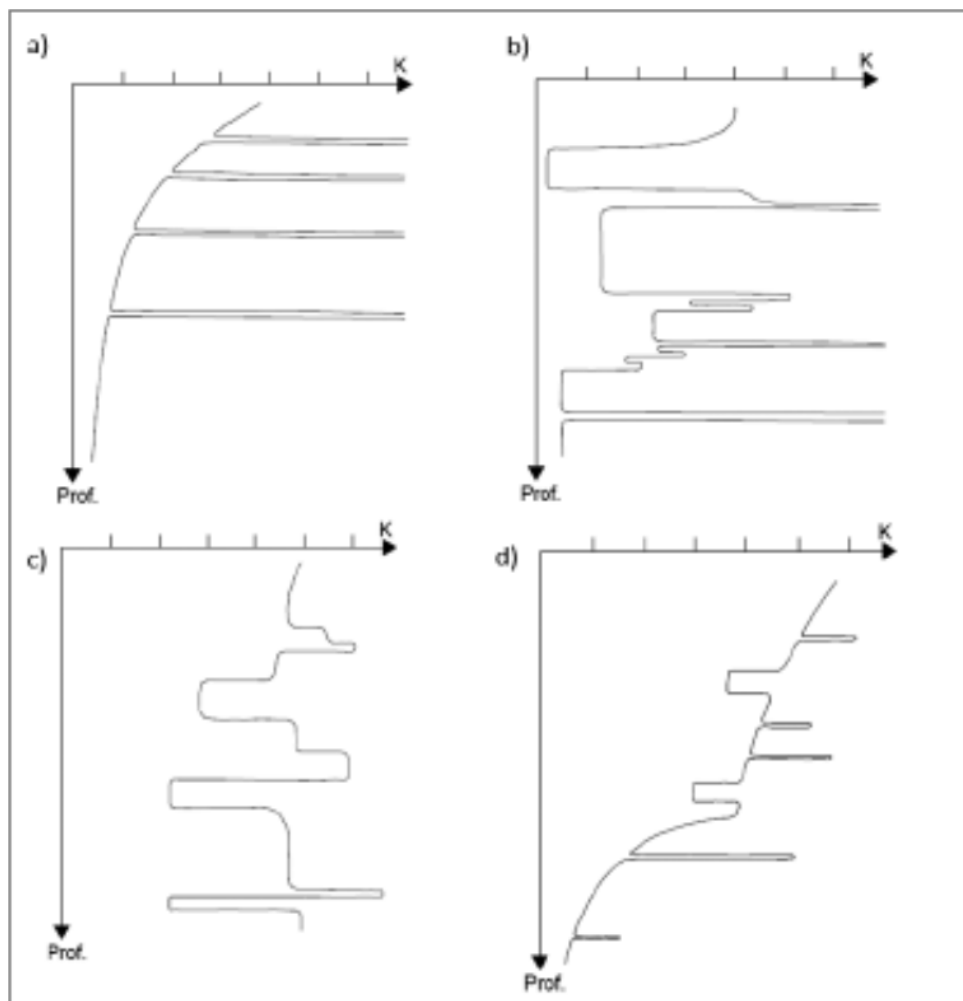


Figura 1 – Variação da condutividade hidráulica de um maciço em relação à profundidade. (a) representa o grupo dos granitos, gnaisses e migmatitos, (b) representa os basaltos, (c) os arenitos e (d) representa os xistos e filitos. Fonte: Azevedo e Albuquerque (1998) *apud* Lopes (2020)

O conhecimento da orientação das principais famílias de fraturas do embasamento é de extrema importância para a realização de um projeto de cortina de injeção, já que esta informação é necessária para a definição das inclinações dos furos de injeção (GAMA, 2012).

Ainda, Eletrobrás (2003) indica que faz parte da modelagem geológico-geotécnica a concepção do modelo hidrogeológico (ou hidrogeotécnico), que envolve a determinação da condutividade hidráulica do maciço, já que a cortina de injeção depende da percolação de fluidos nas discontinuidades. Esse valor de condutividade hidráulica é obtido a partir de ensaios de perda d'água, feitos a partir dos furos de sondagem (GAMA, 2012).

4.1.2 Execução de ensaios de Perda d'Água

O ensaio de Perda d'Água consiste no bombeamento de água ao longo de um determinado trecho de um furo de sondagem, isolado por obturadores simples ou duplos, por um determinado período de tempo e com pressão controlada (GAMA, 2012). O método tem como finalidade a obtenção do valor de condutividade hidráulica, dada em cm/s .

Oliveira (1983) aponta que, para a obtenção de resultados representativos da condutividade de maciço rochoso, os trechos a serem ensaiados devem apresentar 3 metros de comprimento quando o maciço for medianamente a muito fraturado, e de 5 metros quando ele for pouco fraturado.

A Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE) emitiu um boletim em 1975, no qual são indicados outros parâmetros a serem adotados para o ensaio. Em 2020 foi realizada uma revisão do procedimento, publicado no Guia de Boas Práticas para Investigações Geológico-Geotécnicas de 2021, o qual é utilizado neste trabalho como base para o procedimento.

Segundo o boletim (ABGE, 2021), devem ser estabelecidos 5 estágios de pressão, de 10 minutos cada: o primeiro sob pressão mínima, o segundo sob pressão mediana, o terceiro sob pressão máxima, seguido por um estágio de pressão mediana novamente e, por último, um novo estágio de pressão mínima. Durante cada estágio, o fluxo d'água deve permanecer constante. A absorção d'água correspondente a cada estágio de pressão é anotada como vazão (l/min).

A pressão máxima é calculada multiplicando-se a profundidade do obturador por $0,25 \text{ kgf/cm}^2$. As pressões médias são obtidas dividindo-se a pressão máxima por 2, e a para a pressão mínima adota-se o valor de $0,1 \text{ kgf/cm}^2$.

O boletim da ABGE ainda aponta que um ensaio de perda d'água deve apresentar os equipamentos e materiais adequados, apresentados na lista a seguir:

- Bomba: deve apresentar capacidade de vazão de 60 l/min a uma pressão de 10 kgf/cm^2 , a qual deve ser averiguada a cada furo ou a cada 10 ensaios trechos ensaiados;
- Canalização, luvas, cotovelos, etc.: devem estar em bom estado de conservação, sem obstruções de ferrugem que encurtem a canalização;
- Registros, válvulas: ao mesmo tempo que devem permitir um controle efetivo das vazões especificadas para o ensaio, devem apresentar bom estado de conservação;
- Estabilizador de pressão: tem a função de impedir oscilações maiores que 10% na leitura da pressão através de um manômetro;

- Hidrômetro: Deve possuir sensibilidade mínima de uma vazão de 3 l/min e seu desvio deve ser sempre menor que 10%. Deve ocorrer a calibração a cada 10 trechos ensaiados;
- Manômetros: Devem apresentar escalas de leitura adequadas para as pressões adotadas no trecho a ser ensaiado. É recomendado que o maior valor do manômetro não supere duas vezes a maior pressão a ser lida. Deve ser calibrado a cada 10 trechos ensaiados e seu desvio também deve ser menor que 10%;
- Piezômetro (opcional): Tubo de plástico utilizado para se obter maior precisão na medida de pressões baixas ($<0.5 \text{ kgf/cm}^2$)
- Obturador: É recomendado o obturador de borracha, que se expande por mecanismos mecânicos, hidráulicos ou pneumáticos, isolando o trecho a ser ensaiado o resto do furo. Em alguns casos, utiliza-se o obturador duplo, obturando-se acima e abaixo do trecho ensaiado. É recomendado o uso de obturadores com 1 metro de comprimento para evitar curtos-circuitos entre o trecho ensaiado e o restante do furo.

A figura 2 mostra um esquema dos equipamentos para ensaio de perda d'água montados.

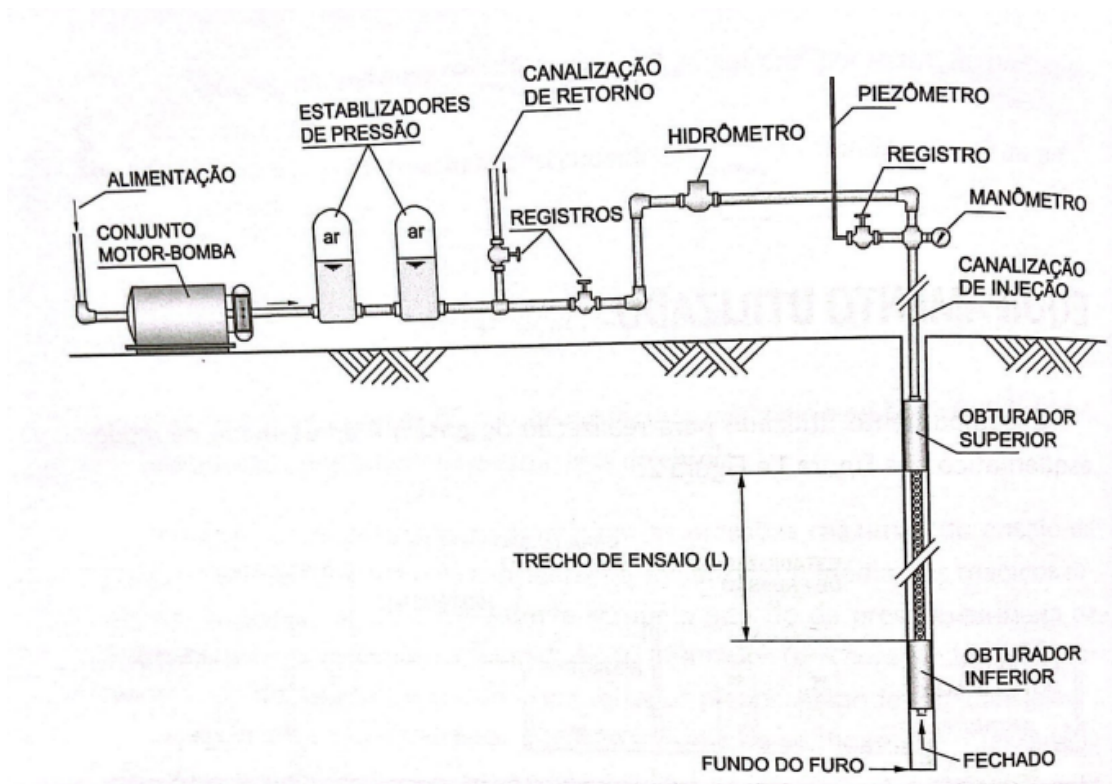


Figura 2 – Montagem dos equipamentos do ensaio de perda d'água sob pressão com obturador duplo. Fonte: ABGE (2021).

A figura 3 ilustra como é feito o ensaio de perda d'água na prática. É importante notar que as medidas de consumo d'água devem ser feitas a cada minuto, como se pode ver na foto.

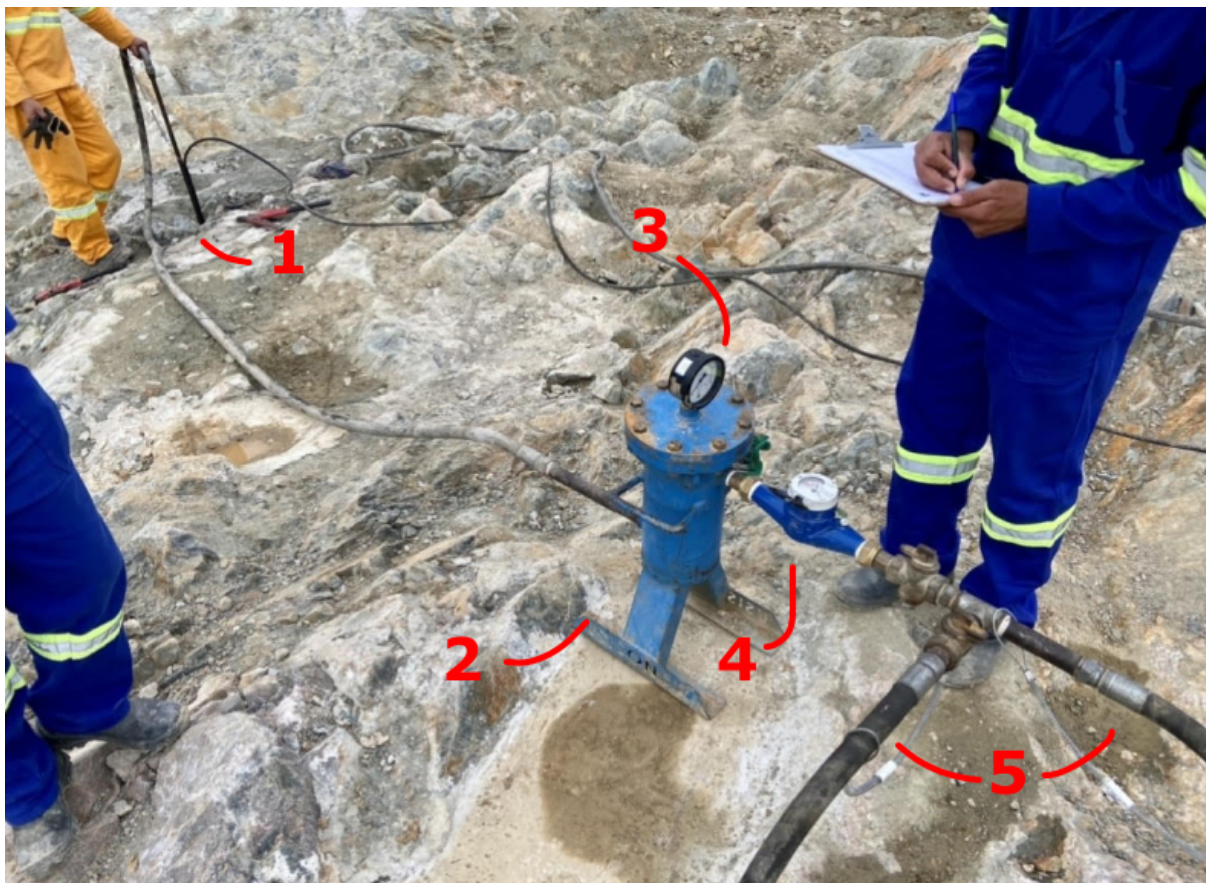


Figura 3 – Ensaio de perda d'água em andamento. É possível ver na foto a canalização (1), o "pulmão" (2) como estabilizador de pressão, o manômetro (3), hidrômetro (4), e tubulações de entrada e de retorno (5), utilizado para o controle da pressão. Fonte: acervo pessoal.

O próximo passo, de acordo com o boletim da ABGE, é de calcular a perda de carga na canalização, que pode tanto ser obtido através de ensaios em campo antes do ensaio de perda d'água em si (fornecendo valores mais próximos aos valores reais de perda de carga), como através da fórmula:

$$J = 20,21 \times 10^6 \times Q^{1,88} \times d^{-4,88}$$

onde J é a perda de carga (m/m), Q é a vazão, dada em litros por minuto (l/min) e d é o diâmetro interno da tubulação, em metros. Este valor de perda de carga na canalização é utilizado, portanto, no cálculo de carga efetiva.

Em seguida, deve-se estabelecer a carga efetiva (C_e) de acordo com a fórmula

$$C_e = \left(\frac{H}{10}\right) + pm - pc(kg/cm^2)$$

Onde H é a carga da coluna d'água em metros; pm é a carga da pressão manométrica do topo do furo em kg/cm^2 e pc é a perda de carga na canalização em kg/cm^2 . Em casos de uso de obturador duplo, deve-se, ainda, subtrair pl , que representa a perda de carga localizada na canalização do obturador duplo. É indicado, também, que deve-se calcular a coluna d'água comparando o nível d'água (NA) medido antes do início do ensaio, com o nível do trecho ensaiado, através das equações

$$H = h + P_{ob} + \frac{L}{2}$$

se o trecho estiver acima do NA;

$$H = h + N$$

se o trecho estiver abaixo do NA, e

$$H = -N + h$$

se o trecho apresentar artesianismo, onde h representa a altura do manômetro (m), P_{ob} representa a profundidade do obturador (m), L representa o comprimento do trecho ensaiado (m) e N representa a profundidade do NA (m).

Em seguida, deve-se calcular a perda d'água específica (PE), através do cálculo da vazão específica QE seguindo a equação:

$$QE = \frac{Q}{L} (l/min/m)$$

Assim, obtêm-se a perda d'água específica da seguinte maneira:

$$PE = \frac{QE}{C_e} [(l/min/m)/(kg/cm^2)] = 1Hv$$

De acordo com Costa (2012), a unidade de Perda d'água específica também recebe o nome de *Hvorslev* (Hv):

$$1Hv = 1(l/min/m)/(kg/cm^2) = 1(l/min.m/atm)$$

Subsequentemente, junto do valor da perda d'água específica, utiliza-se de um fator de conversão de $1,66 \times 10^{-4}$ para a determinação do coeficiente de permeabilidade através da equação:

$$k = \frac{Q}{2\pi \times HL} \times \ln \frac{0,66 \times L}{r}$$

onde r diz respeito ao raio do furo em metros. Adotando-se Cf (coeficiente de forma) como

$$Cf = \ln \frac{0,66 \times L}{r}$$

devemos ajustar a fórmula de perda d'água específica em l/min/m/kg/cm² para uma condutividade hidráulica K em cm/s da seguinte forma:

$$K = PE \times \frac{1,66}{2\pi} \times 10^{-4} \times Cf$$

. Adotando-se:

$$F = \frac{1,66}{2\pi} \times 10^{-4} \times Cf$$

, teremos:

$$K = PE \times F(cm/s)$$

Levis (2006) indica que essas equações valem apenas quando trata-se de fluxos laminares. Cruz *et al.* (1983, apud Lopes 2020) apontam que um fluxo laminar ocorre quando as vazões não ultrapassam 20 litros por minuto, enquanto que fluxos que apresentam consumos entre 20 e 60 litros por minuto são classificados como de transição. Já os fluxos turbulentos ocorrem no caso de valores maiores que 80 litros por minuto. Sendo assim, no caso de um fluxo turbulento, Levis (2006) aponta a necessidade da adoção de um coeficiente de condutividade hidráulica turbulento k' , através do valor de perda d'água turbulenta (PE'). Assim, utilizam-se das equações:

$$PE' = 2,4 \times 10^{-5} \times e\sqrt{e} \times Nf$$

$$k' = 4\sqrt{g \times e}$$

onde e representa a abertura da fratura, Nf é o número de fraturas por centímetro no trecho ensaiado e g é a aceleração da gravidade.

Já o Boletim de Ensaio de Perda d'Água Sob Pressão da ABGE (2021) destaca que, em caso de fluxos turbulentos, para o cálculo de condutividade hidráulica, deve-se utilizar os dados do primeiro estágio de pressão.

Por fim, finalizado o ensaio, os resultados devem passar por análises de como o trecho ensaiado se comportou sob as diferentes pressões. São confeccionados gráficos relacionando a carga efetiva com a vazão específica, ambos resultados obtidos na etapa anterior. No boletim da ABGE, são apontados 5 comportamentos possíveis de ser observados pelos gráficos: (i) o fluxo laminar, cujas linhas dos gráficos apresentam uma relação linear entre as variáveis, indicando uma independência entre a pressão aplicada e condutividade hidráulica do maciço; (ii) o fluxo turbulento, quando a relação entre as variáveis do gráfico não é linear, observando-se uma condutividade hidráulica menor à medida que se aumenta a pressão efetiva; (iii) deformação, que ocorre quando a pressão aplicada no maciço o deforma, causando uma abertura temporária nas fraturas, sendo observado quando o estágio de pressão crescente apresenta uma condutividade hidráulica menor que o estágio de pressão

decrecente; (iv) remoção de preenchimento ou deformação permanente, observado quando a vazão específica aumenta apenas com a introdução da água, independentemente do estágio de pressão, o que indica a remoção de algum preenchimento de fraturas, ou até o fraturamento hidráulico; (v) preenchimento das descontinuidades, observado com uma contínua diminuição das vazões específicas ao longo do ensaio, independente do estágio de pressão, podendo ser explicado por três fenômenos, preenchimento por água de descontinuidades isoladas, expansão de argilominerais das descontinuidades e, por fim, carreamento de finos para as descontinuidades, obstruindo a passagem de água.

A figura 4 mostra diferentes casos de comportamentos de maciços quando submetidos ao ensaio de perda d'água, ilustrados através do gráfico de vazão específica por pressão efetiva. As setas dos gráficos mostram os estágios de pressão, que começam em 1 (pressão mínima), em seguida 2 (pressão intermediária), depois 3 (pressão máxima), então 4 (pressão intermediária novamente) e, por fim, 5 (pressão mínima). Interpretando esse gráfico, é possível perceber se o maciço está sofrendo um fraturamento hidráulico ou uma deformação (como em D3 na figura 4), ou apenas tendo suas descontinuidades preenchidas, sem alteração mecânica do maciço (como em L2 na figura 4).

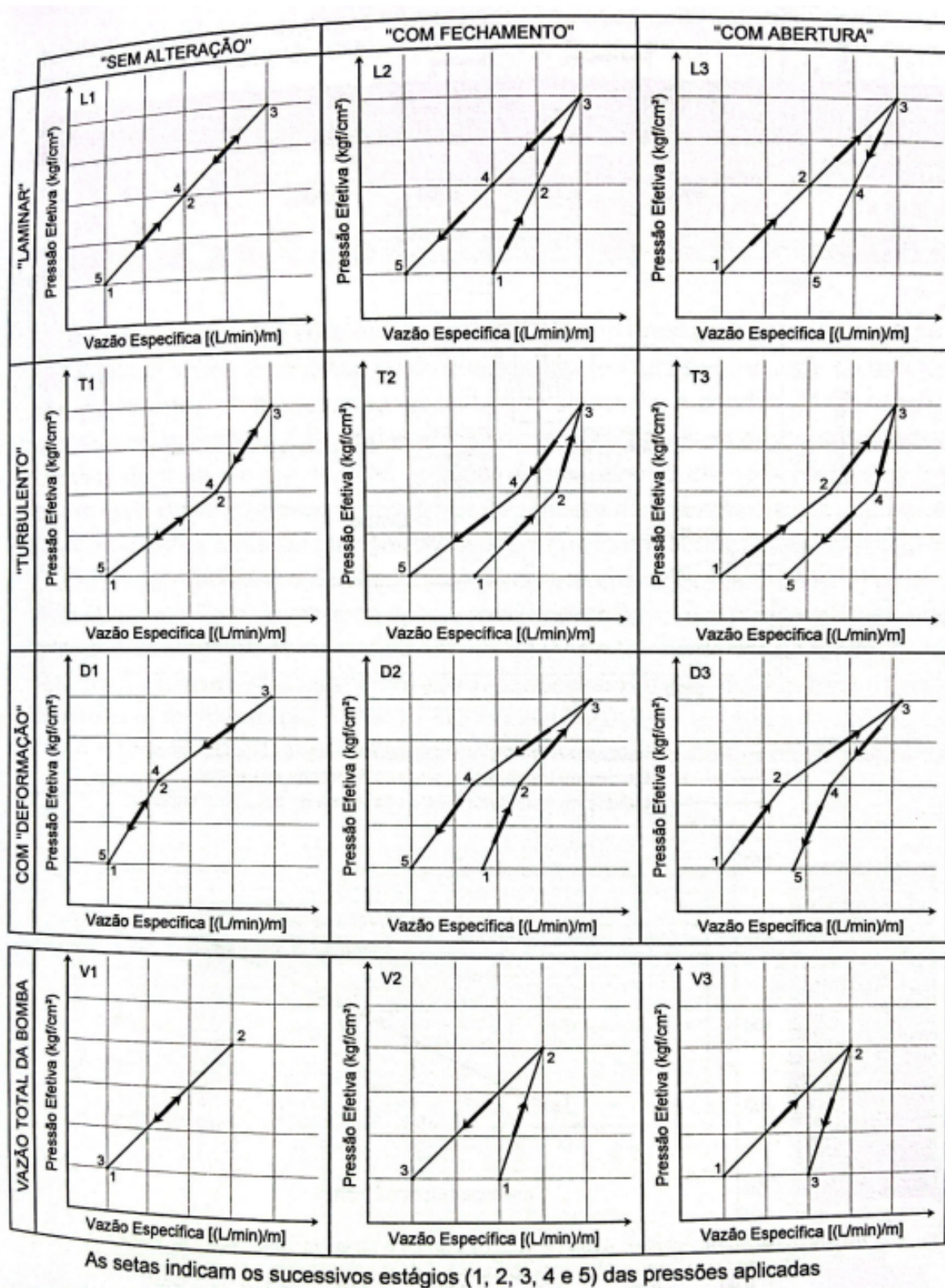


Figura 4 – Comportamentos frequentes de maciços em ensaios de perda d'água sob pressão, com ênfase em 3 tipos de comportamento: a não alteração, fechamento e abertura da descontinuidade (ABGE, 2021).

De acordo com Lopes (2020), os ensaios de perda d'água sob pressão são realizados em furos exploratórios, que fazem parte da investigação geológico-geotécnica, e são localizados onde, posteriormente, se construirá a cortina de injeção. Assim, é ressaltada a importância da realização desses ensaios na etapa de pré-projeto, que classificam o comportamento do maciço sob influência de fluidos sob pressão, sua condutividade hidráulica e, além disso, servem como termo de comparação para a verificação da eficácia da cortina, explicada posteriormente neste trabalho.

4.1.3 Ensaios Lugeon

De acordo com Levis (2006), o ensaio de Lugeon foi um dos primeiros e mais satisfatórios ensaios desenvolvidos com o intuito de se determinar a condutividade hidráulica de um maciço. Desenvolvido em 1933, por Maurice Lugeon, o ensaio consiste na injeção de água sob a pressão de 1 MPa, ou 10 kgf/cm², em todos os trecho de um furo de sondagem, independente da profundidade, utilizando-se, também, de obturadores, junto da medição de vazão em função do tempo. A unidade Lugeon (Lu) é igual à vazão de 1 litro por minuto por metro, sendo que o ensaio é realizado aplicando-se a pressão de 10 kgf/cm² por 10 minutos. Em termos de Perda d'Água Específica, utilizada no ensaio apresentado anteriormente, $1Lu = 1,0l/m.min.10atm$. Já em termos de condutividade hidráulica, Fell *et al.* (2005 *apud* GAMA, 2012) dizem que $1Lu = 1,3 \times 10^{-5} cm/s$ em maciços homogêneos e isotrópicos.

O ensaio de Lugeon foi modificado ao longo do tempo, e Levis (2006) indica que essas modificações, no Brasil, originaram o Ensaio de Perda d'Água conhecido hoje.

4.2 Especificações de projeto

4.2.1 Organização dos furos para injeção

Levis (2006) aponta que as cortinas de injeção, a fim de criar uma zona menos permeável, são estreitas, subverticais ou pouco inclinadas à montante, e atuam como a continuação das estruturas de impermeabilização do próprio corpo da barragem. São constituídas por até três linhas principais de injeção, com uma central, mais profunda, e as outras duas distribuídas nas laterais da central, uma à montante e outra à jusante, podendo variar de acordo com o projeto da cortina.

Assim, a autora explica que o espaçamento entre os furos da cortina de injeção giram em torno de 3 a 6 metros, com o mais comum sendo de 3 metros de distância. Já Gama (2012) explica que essa distância pode chegar a até 12 metros. Os espaçamentos entre os furos são adotados a fim de obter-se áreas injetadas que se sobrepõem, para que não sobrem caminhos por onde a água possa percolar.

Em relação à inclinação dos furos, emprega-se a importância do mapeamento geológico-geotécnico da fase preliminar. Normalmente, adota-se uma direção perpendicular à inclinação média da superfície do terreno, porém, quando existem importantes famílias de fraturas ocorrentes no embasamento, deve-se adotar inclinações aos furos de modo que eles intersectem essas famílias de modo efetivo (GAMA, 2012). O autor ainda aponta que se, por exemplo, as descontinuidades apresentarem a mesma inclinação dos furos da cortina, a probabilidade de um furo intersectá-la é muito baixa. Weaver e Bruce (2007) apontam que os furos devem formar inclinações de no mínimo 30° a partir das principais famílias de fraturas do maciço que compõe o embasamento, a fim de evitar esse problema.

A figura 5 ilustra um maciço fraturado horizontal e verticalmente, mostrando que uma cortina adotando inclinação dos furos perpendicular ao terreno não seria efetiva para tratar completamente o maciço, interceptando apenas as famílias sub-horizontais da ilustração.

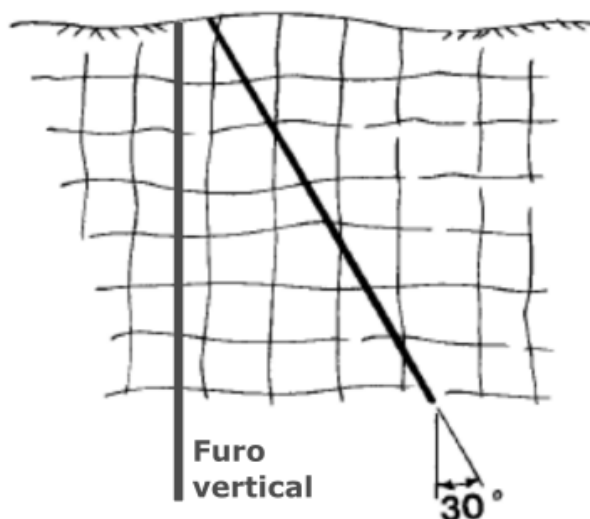


Figura 5 – Ilustração demonstrando a maior efetividade de furos inclinados em comparação com furos verticais para maciços com famílias de descontinuidades importantes. Fonte: Modificado de Gama (2012).

4.2.2 Profundidade e extensão da cortina

As cortinas de injeção apresentam uma profundidade média geral para os furos de injeção. De acordo com Levis (2006), no Brasil, as profundidades dos furos costumam não ultrapassar metade da altura do corpo da barragem, alcançando, assim, uma média de 30 metros de profundidade.

Ewert (2003), por sua vez, aponta que as cortinas de injeção giram em torno de uma vez a altura da barragem, e Gama (2012) completa que podem alcançar 1,5 vezes esse valor, seguindo-se as especificações americanas. Gama (2012) ainda explicita que as

grandes profundidades são adotadas para que o caminho pelo qual a água deve percorrer seja maior, distribuindo-se em uma região maior a pressão associada ao fluxo.

Ewert (2003), ainda ressalta que a determinação da profundidade da cortina não é um problema geométrico (proporcional à altura da barragem), mas sim um problema geológico. Ela deve aumentar ou diminuir de acordo com o comportamento (condutividade hidráulica, por exemplo) do maciço, mesmo que isso resulte em uma cortina assimétrica.

Quanto à extensão da cortina de injeção, deve-se garantir que a água não percole em volta das ombreiras da barragem. Assim, Ewert (2003) aponta que a cortina deve se estender até o ponto onde o nível d'água do reservatório encontre o nível d'água freático natural. Para alcançar isso, podem ser aplicados furos inclinados em leque nos taludes das ombreiras das barragens, que partem de pontos próximos mas apresentam inclinações crescentes de furo para furo.

4.2.3 Técnicas de Perfuração

Gama (2012) aponta que são empregados dois tipos de perfuração para a realização de furos para injeção: rotação e rotopercussão. O método rotativo utiliza-se de rotações maiores que 600 rotações por minuto (rpm), sem grandes pressões aplicadas pela ferramenta de corte, podendo-se retirar amostras do maciço, o que aumenta a duração do procedimento, ainda mais em furos profundos. É utilizado em furos com diâmetros de até 75 mm e de 50 a 150 metros de profundidade. Já o método rotopercussivo utiliza tanto da rotação quanto da percussão do "bit" (nome associado ao martelo utilizado neste método de perfuração). É um método destrutivo, sendo impossível retirar amostras do maciço, porém mais rápido e, consequentemente, mais barato que o rotativo (KUTZNER, 1996). As rotações atingem velocidades de 10 a 60 rpm, e os diâmetros dos furos são sempre maiores que 90 mm. O autor ainda explica que perfurações rotopercussivas atingem avanços de até 20 m/h, enquanto que o método rotativo, em rochas pouco duras, tem um avanço de, no máximo, 10 m/h.

As características geológicas e geotécnicas do maciço controlam fortemente esta etapa do procedimento. Segundo Lopes (2020), são utilizados 2 tipos de "bits" no modo rotopercussivo, ilustrados na figura 6. O "bits" convencional de botão (figura 6a)) desgasta o maciço apenas com os botões em sua ponta, enquanto que o "bits "Retrac"(figura 6b)) utiliza de lâminas em sua lateral para a uniformização do furo na retirada das hastes, além dos botões presentes no primeiro.

A figura 7 mostra uma perfuratriz rotopercussiva em funcionamento, executando um furo para futura injeção em uma fundação de barragem. A perfuratriz funciona através de um compressor, que fornece ar comprimido através da mangueira vista na foto. O furo em questão é vertical, mas furos inclinados são realizados inclinando-se a torre da

perfuratriz e medindo-se a inclinação com um nível-bolha.

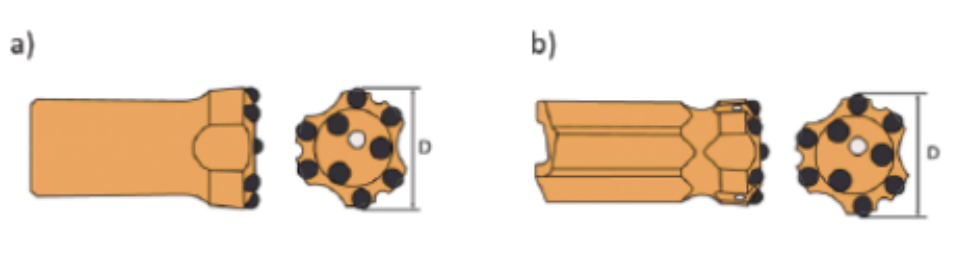


Figura 6 – Ilustração dos tipos de "bits" utilizados no método rotopercussivo. Fonte: Lopes (2020).



Figura 7 – Foto de uma perfuratriz executando um furo vertical para realização de uma cortina de injeção. Fonte: Acervo pessoal.

4.2.4 Injetabilidade e tipos de calda

De acordo com Papadakis (1959, *apud* Levis (2006)), o conceito de injetabilidade é definido como "a capacidade da calda penetrar no meio a ser injetado". Segundo Levis (2006), determinado tipo de trabalho/procedimento a ser realizado traz consigo um limite mínimo de injetabilidade, e a calda, após injetada com este alto grau de injetabilidade, deve apresentar resistência mecânica adequada para aquele tipo de trabalho. Na realização de cortinas de injeção, a resistência mecânica pode ser sacrificada para que, em troca, seja alcançada uma maior impermeabilidade (HSU et al., 1970).

Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006) apresenta que o conceito de injetabilidade é adquirido a partir da relação entre fluidez e estabilidade, em forma de uma curva. Os parâmetros são relacionados pela velocidade de escoamento da calda, obtida pela velocidade com a qual a calda passa por um funil padrão (fluidez), e pelo fator de sedimentação, obtido pelo repouso da calda e relação da coluna d'água que se forma na superfície, em porcentagem (estabilidade).

A figura 8 mostra uma foto de uma proveta utilizada para a obtenção do fator de sedimentação. A foto foi tirada após uma hora da deposição da calda no recipiente, e o fator de sedimentação é obtido dividindo a altura da coluna de água pela altura da coluna no início do ensaio, em porcentagem, conforme também explicado na figura 9.



Figura 8 – Foto do resultado de um ensaio de sedimentação da calda de cimento. Fonte: Acervo pessoal.

A figura 9 mostra uma curva de injetabilidade, obtida pela relação fluidez $\times$ estabilidade. Observa-se que onde se tem relações de água/cimento (A/C) altos, ou seja, mais água que cimento, a fluidez é bastante alta, mas a sedimentação acaba por ser alta também, o que prejudica a qualidade da calda.

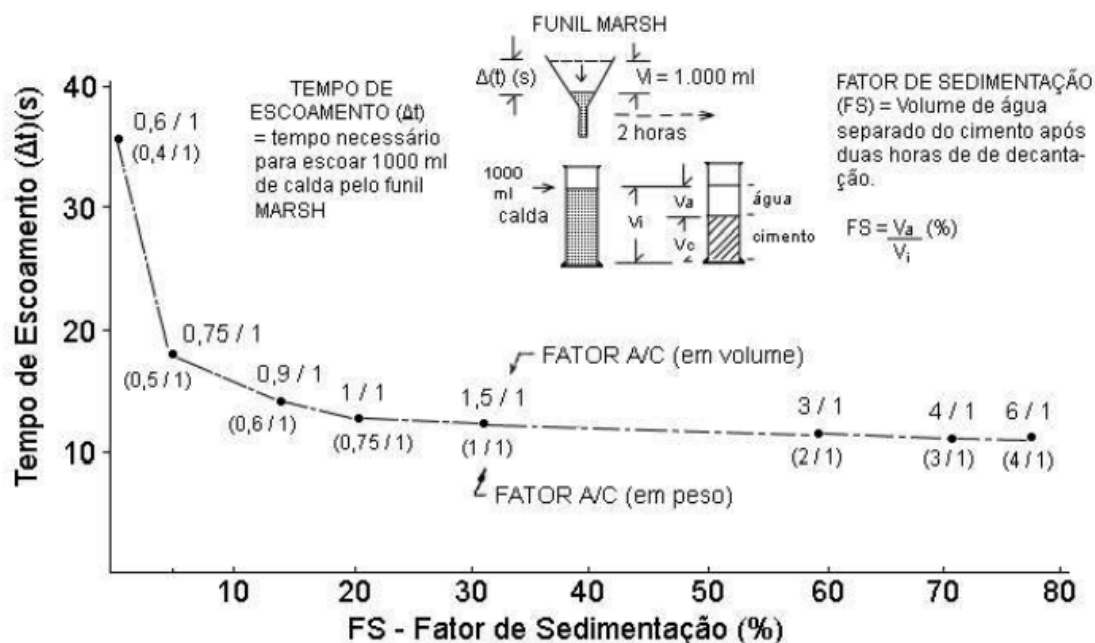


Figura 9 – Exemplo de curva de injetabilidade, obtida pela relação de Fluidez $\times$ Estabilidade. Fonte: Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006)

Em sua tese de mestrado, Brandão (2014) aponta que as caldas que predominam na realização de cortinas de injeção em fundações de barragem são as caldas feitas a partir do cimento Portland. O autor defende que, diferente de fluidos como a água, que atuam sob as leis de fluidos Newtonianos, as caldas de cimento atuam sob as leis de fluidos Binghamianos. Para fluidos Newtonianos, os fluxos dependem apenas da viscosidade dinâmica, sem resistência interna, enquanto que, para os fluidos Binghamianos, sendo eles corpos mais densos, possuem uma viscosidade dinâmico-plástica, e são regidos pela coesão e tixotropia (diminuição de viscosidade sob agitação).

Brandão (2014) aponta que as caldas para injeção são compostas principalmente por água e cimento em uma relação pré-estabelecida, mas que alguns aditivos podem ser inseridos para se obter um comportamento desejado, que facilite a execução da injeção. Dentre eles, estão: superplastificantes, utilizados para diminuição da viscosidade, aumentando-se a penetração da calda sem aumentar a pressão de injeção; bentonita, que estabiliza a mistura; e materiais finos que além de estabilizar, podem fornecer maior durabilidade do cimento após a cura.

4.2.5 Pressões de injeção

Levis (2006) levanta algumas questões importantes a serem consideradas ao se determinar as pressões no procedimento de injeção: uma maior pressão de injeção pode fornecer maiores volumes de calda injetada, o que consequentemente aumenta os preços do procedimento, além de trazer consigo a possibilidade de fraturamento hidráulico, resultando na perda de coesão da rocha.

Levando isso em consideração, Infanti Jr. e Nitta (1978) apontam que a pressão deve ser uma função das características do maciço, a fim de fornecer boa percolação da calda sem prejudicar o meio rochoso. Devem, portanto, ser levadas em consideração características como profundidade do trecho injetado, estrutura da rocha, atitude das fraturas e a sobrecarga devida à estrutura.

Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006) aponta dois sistemas de determinação de pressão de injeção mais utilizados: (i) o *sistema americano*, no qual adota-se pressões baixas, que geralmente giram em torno de $0,25 \text{ kgf/cm}^2$ por metro de profundidade ou até uma função da densidade do maciço multiplicada pela profundidade; (ii) e o *sistema europeu*, sob o qual são adotadas pressões relativamente altas, chegando a 1 kgf/cm^2 por metro de profundidade. Vale ressaltar que 1 kgf/cm^2 equivale a uma pressão de, aproximadamente, 0,981 bar.

Gama (2012), em sua dissertação, explica que o método europeu tem sido eficiente em maciços rochosos com resistência razoável, porém, quando se tratando de maciços pouco resistentes, a adoção de pressões altas é prejudicial, piorando suas características ao invés de tratá-lo. Por sua vez, continua o autor, a adoção do método americano pode não ser o suficiente para alguns maciços, ao passo que, em outros casos pode até fornecer pressões excessivas. Assim, é ressaltado, ainda, que as pressões a serem adotadas devem ser resultados dos estudos feitos para a obra em questão, com todas as características do maciço, citadas acima, já conhecidas.

A figura 10 ilustra como os diferentes sistemas de adoção de pressão diferem. Nota-se que, como são funções da profundidade, quanto mais profundo, maior a diferença entre eles, com o sistema europeu adotando pressões relativamente bastante altas em profundidade.

4.2.6 Definição do comprimento dos trechos de injeção

O trecho de injeção é uma seção do furo individual da cortina, separando-o em segmentos, por exemplo, de 2 ou 3 metros, que serão injetados um a um, até a finalização do furo. Segundo Gama (2012), a definição de um comprimento ideal do trecho de injeção é crucial para se obter um tratamento eficaz do maciço. Aponta, também, que um trecho mais curto (menor que 3 metros) representa um tratamento de maior qualidade, enquanto

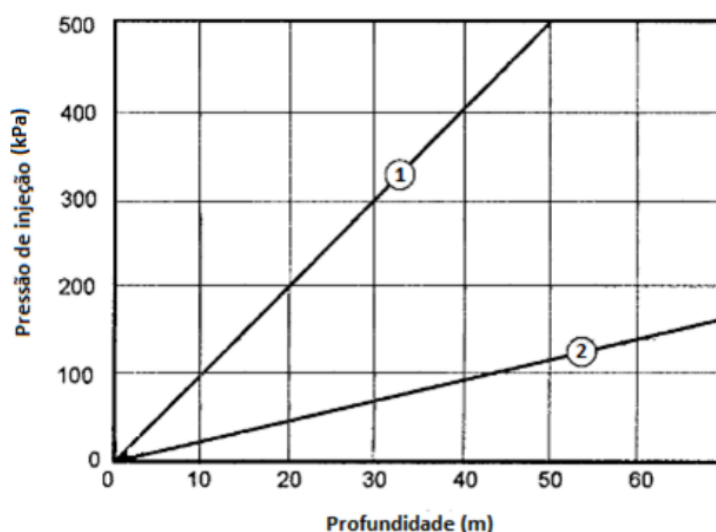


Figura 10 – Gráfico ilustrando a variação dos diferentes métodos de adoção de pressão para cortinas de injeção. A linha (1) representa o sistema europeu, (2) representa o sistema americano. Fonte: Gama (2012).

que um trecho longo (maior que 5 metros) é mais econômico.

Warner (2004) defende a ideia de que o trecho de injeção deve apresentar comprimento de 1,5 a 3 metros de comprimento quando perto da superfície e, de acordo com o aumento de sua profundidade, pode-se aumentar esse comprimento para 3 a 6 metros. Comprimentos menores podem ser adotados se o maciço apresentar uma condutividade hidráulica muito alta, como ocorre em áreas diaclasadas, por exemplo.

4.2.7 Critérios para definição de paralisação da injeção

A paralisação da injeção de calda de cimento em um trecho de um furo da cortina depende do conceito de "nega" que, de acordo com Gama (2012), é alcançado quando a vazão de calda de cimento atinge valores suficientemente baixos. Não se atingiu um consenso acerca desses valores, que dependem de avaliações baseadas na experiência de execução do perito em tratamento de fundação por injeção de calda (BRANDÃO, 2014). Warner (2004) indica que a "nega" de calda é alcançada quando não há um consumo de calda maior que 28 litros por um período de 5 a 15 minutos. Além disso, é apontado que indica-se a continuidade da injeção de calda sob pressão por alguns minutos após o alcance da "nega". Houlsby (1990), afirma a necessidade de se manter o sistema pressurizado por 15 minutos após atingir a "nega", isso porque a calda começa a enrijecer no local onde se encontra sob pressão, garantindo a extensão da injeção, prevenindo o arrastamento pela água ao ser aliviada.

Para se saber que não será mais necessário injeções no local, Gama (2012) aponta que é adotado um critério de condutividade hidráulica: requer que mais ensaios de perda

d'água sejam feitos para se verificar que a condutividade hidráulica do maciço diminuiu, podendo chegar, normalmente, a valores tão baixos de condutividade hidráulica quanto 1×10^{-5} cm/s.

Uma alternativa para determinar a paralisação das injeções, de acordo com Gama (2012), é a adoção de volumes de calda absorvido. Estabelece-se um volume máximo de calda que o maciço deve absorver, baseado nas características de rocha encontradas nos mapeamentos e sondagens.

Outra maneira de se verificar a necessidade de mais furos de injeção, de acordo com Brandão (2014), é a avaliação geológica da região onde já foram feitos os furos, realizando-se, uma avaliação espacial a partir das sondagens, ensaios de perda d'água sob pressão, perfil geológico, os próprios consumos de cimento dos furos já realizados e outros.

4.3 Execução da cortina de injeção

4.3.1 Equipamentos e circuito de injeção

De acordo com Levis (2006), os equipamentos utilizados para injeção consistem em:

- Misturadores: são grandes recipientes onde ocorre a preparação da calda (adição de água e aditivos ao cimento). Apresentam lâminas de alta rotação para melhor mistura.
- Agitadores: também são grandes recipientes onde a calda, após batida, permanece, sendo agitada por lâminas para manter a mistura homogênea.
- Bombas: realizam a injeção da calda sob pressão, devendo ser capazes de injetar grandes vazões de calda a altas pressões (até 20 kgf/cm²).
- Itens complementares: composto pelas mangueiras, engates rápidos, registros para controle de pressão, manômetros para verificação da pressão, hastes rígidas que descem até o furo, junto com o obturador para isolamento do trecho.

A figura 11 é uma ilustração de Levis (2006) que indica como o circuito de injeção é montado, com a distribuição dos equipamentos acima listados. Já a figura 14 é uma foto da operação ocorrendo em obra, com foco no misturador e agitador de calda, enquanto que a figura 13 é uma foto com foco nos equipamentos que ficam perto do furo de injeção. Por fim, a figura ?? dá ênfase ao obturador, responsável por isolar o trecho injetado do restante do furo.

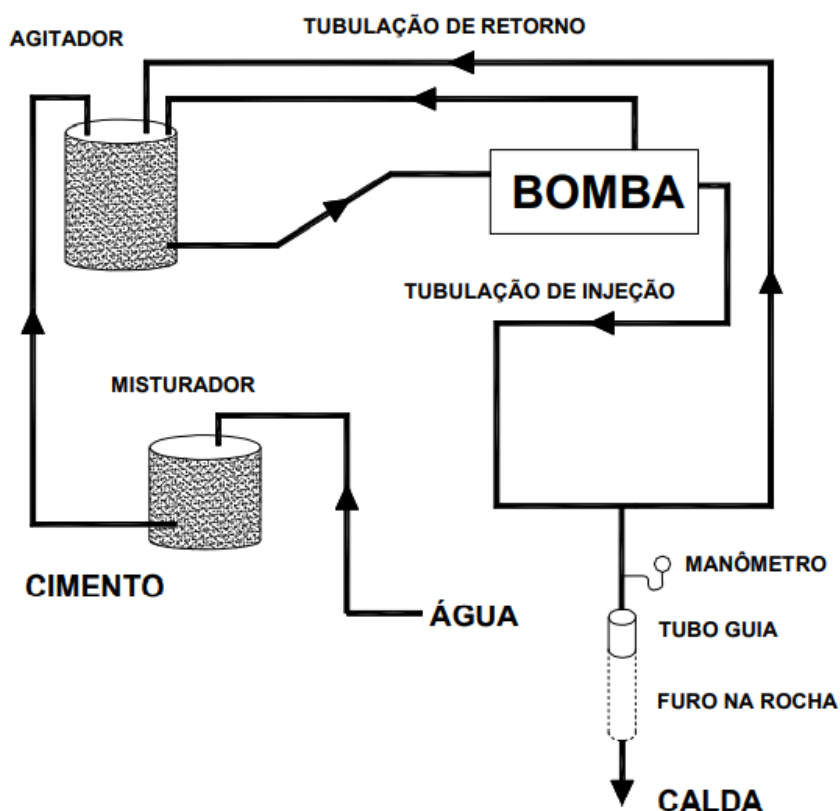


Figura 11 – Ilustração mostrando como os equipamentos são montados no processo de injeção de cimento nos furos da cortina de injeção. Fonte: Levis (2006), adaptado de Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006)



Figura 12 – Foto mostrando o misturador e o agitador de calda (1), junto com a bomba (2). Ao fundo, vê-se a mangueira se conectando às hastes, que descem ao furo vertical (3), onde está ocorrendo a injeção. Fonte: Acervo pessoal.

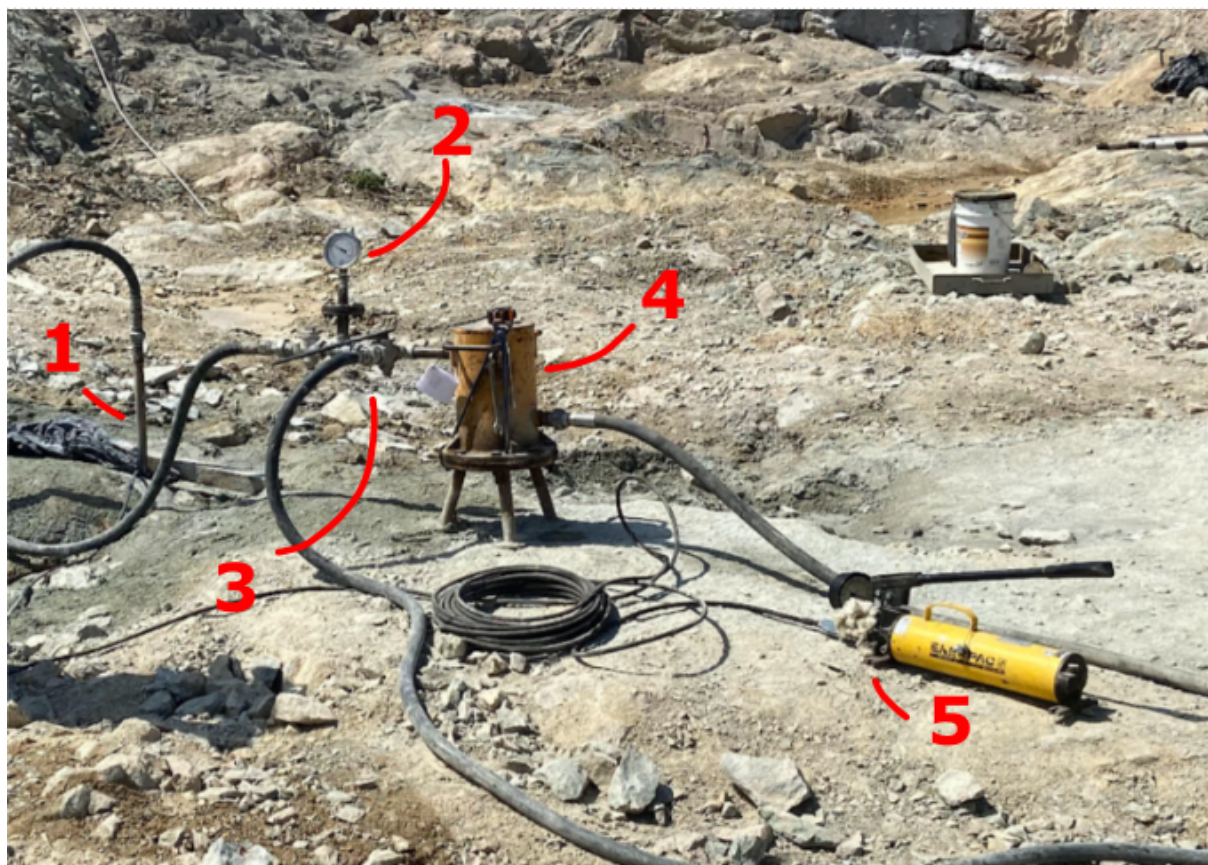


Figura 13 – Foto dos equipamentos de injeção perto do furo. À esquerda, vê-se a haste de metal (1) descendo o furo de injeção vertical, conectada por mangueiras ao manômetro (2), seguido pelo registro de retorno (para controle de pressão) e o registro da linha que envia calda ao furo (3). Depois dos registros, há um estabilizador de pressão (4). Nota-se o macaco hidráulico à direita (5) utilizado para aplicar pressão ao obturador, que isola o trecho injetado. Fonte: Acervo pessoal.



Figura 14 – Foto mostrando os equipamentos de injeção com obturador duplo composta pelos obturadores (1), a "flauta"(2), um tubo com furos por onde a calda sai e as hastes de injeção (3) que descem até o trecho injetado, levando a calda até o trecho pelo seu interior. Nota: os obturadores estão inflados, mostrando como que obstruem os furos empurrando a borracha contra a parede. Fonte: acervo pessoal.

4.3.2 Procedimento executivo

Durante a execução das injeções da cortina, alguns passos são seguidos para garantir maior qualidade e efetividade da cortina. Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006) aponta que o comprimento da cortina de injeção deve ser dividida em seções que, dentro das quais, não se deve realizar simultaneamente trabalhos de injeção, perfuração e/ou ensaios de perda d'água sob pressão. A figura 15 mostra como o autor sugere o seccionamento, com um perfil paralelo ao eixo da barragem, separando as seções na direção do eixo, e também realizando a separação das profundidades dos furos em zonas, que podem indicar zonas com pressões iguais de injeção, por exemplo, dependendo do parâmetro de pressão a ser adotado.

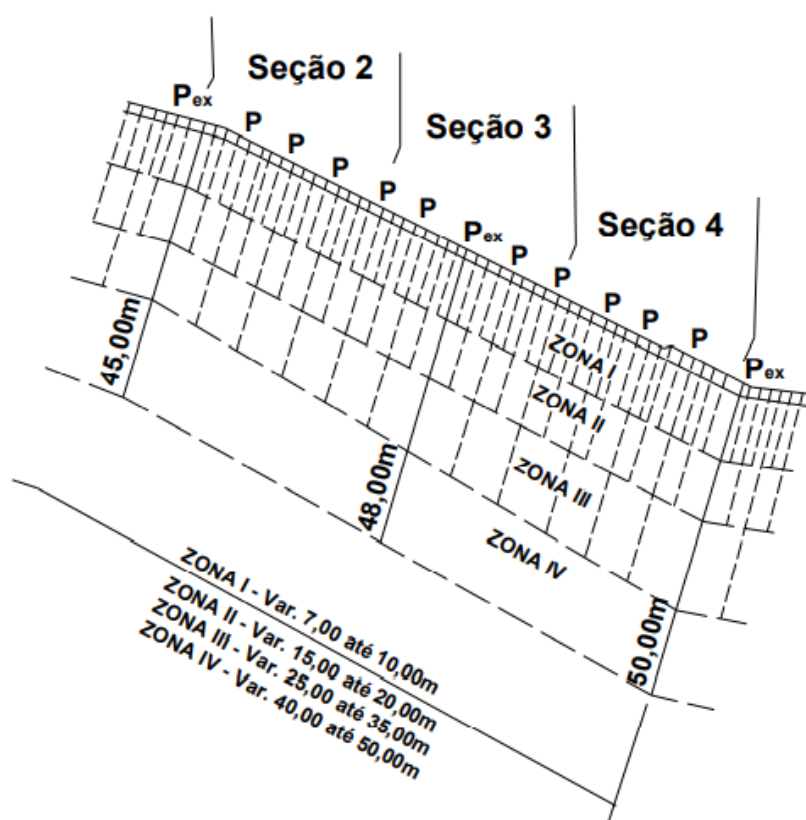


Figura 15 – Método de separação da cortina em seções. Fonte: Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006).

Levis (2006) mostra que, durante a perfuração e injeção do furo da cortina, 2 principais métodos são adotados:

- Método ascendente: consiste na perfuração do furo até sua cota de base em um só avanço. Em seguida, as injeções avançam da base do furo em direção à superfície, seguindo os trechos com seu comprimento já definido (exemplo: de 3 em 3 metros, da base ao topo).

- Método Descendente: Consiste em um método mais lento, que realiza a injeção assim que a perfuratriz realiza um avanço no comprimento do trecho. De acordo com Gama (2012), quando a perfuração avança o suficiente para a injeção de um trecho, ela é paralisada, inicia-se a injeção, e a perfuração volta apenas quando a calda é solidificada.

Gama (2012) indica, também, que o método descendente é mais trabalhoso, porém, fornece os melhores resultados de impermeabilização. Além disso, permite pressões mais elevadas em profundidade, uma vez que os trechos superiores já estão injetados, impedindo a fuga da calda nesta direção. O autor apresenta uma ilustração do método descendente, mostrada na figura 16, que explica o método. Vale notar que há um intervalo mínimo de 24 horas após a injeção do trecho adjacente, já que deve-se dar tempo para a calda injetada solidificar.

Já na figura 17, o autor ilustra o método ascendente de injeção. Vale notar que, pelo fato de o furo ser aberto todo em apenas um avanço, há maior probabilidade de ocorrer colapsos das paredes dentro do furo, além de apresentar maior dificuldade de descer obturadores em maciços de pior qualidade.

Para respeitar o seccionamento apresentado por Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006), Levis (2006) mostra que é adotado o espaçamento divisional (*split spacing*) na execução de furos, mostrado no esquema da figura 18. Este sistema consiste na divisão da cortina de injeção em três classes de furos: os furos primários, secundários e terciários (se necessários). Os furos primários são mais espaçados, com cerca de 6 a 12 m de distância um do outro, cujas áreas de influência sofrem pouca ou nenhuma sobreposição. Já os secundários, estão situados na meia distância entre os furos primários, enquanto que os terciários ficam na meia distância dos furos secundários. Desta forma, a perfuração e injeção dos furos seguem a ordem: furos primários, depois secundários e os terciários por último.

Levis (2006), ainda, aponta que realizando-se a injeção desta maneira os furos de uma fase subsequente acabam por avaliar a eficiência das injeções de furos da fase anterior. Depois, mostra uma figura (Figura 19) retirada de Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006), indicando como que o espaçamento entre furos deve ser escolhido de maneira cuidadosa para ser otimizado, baseando-se na área de influência de uma injeção, ou seja, baseando-se no "cilindro" que representa até onde a calda alcança, preenchendo os vazios do maciço.

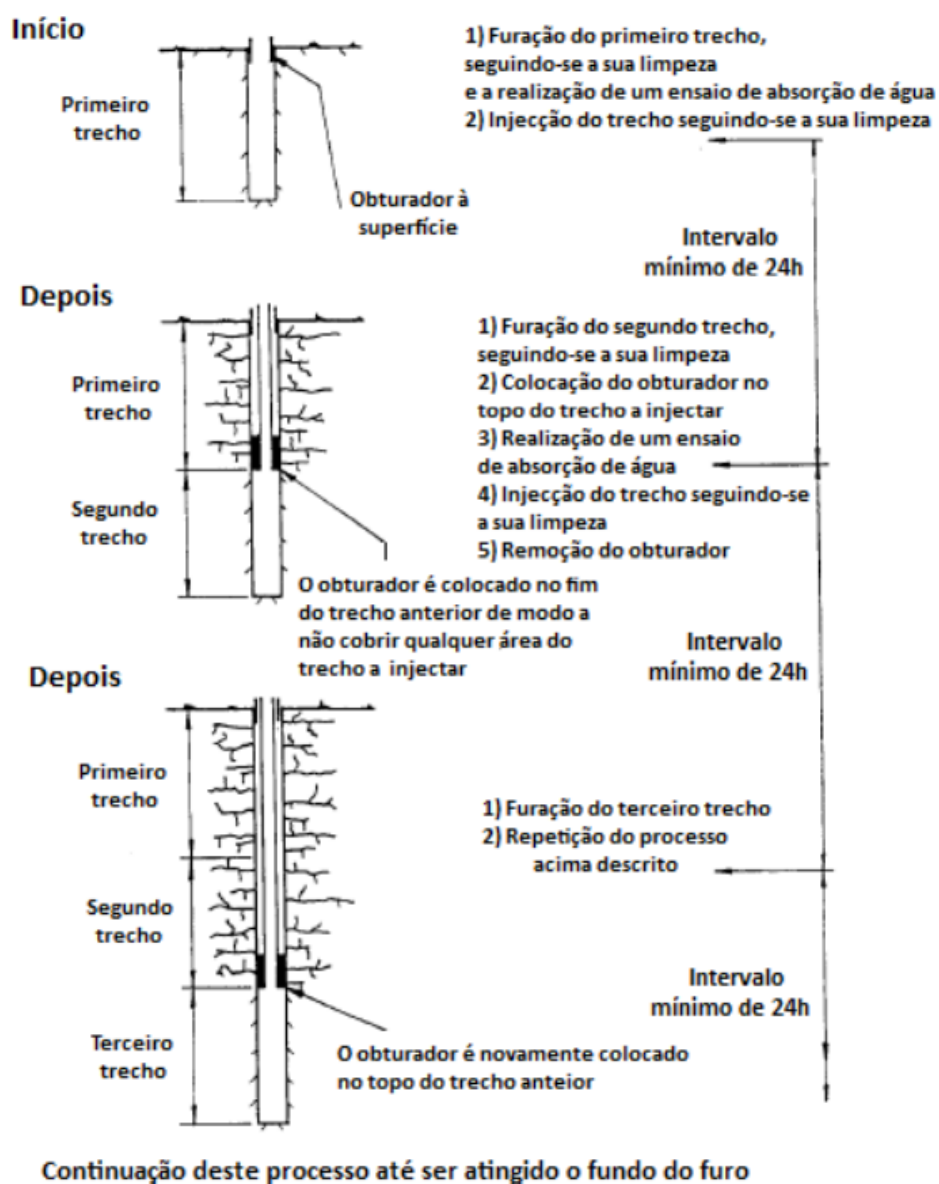


Figura 16 – Método de injeção descendente. Fonte: Gama (2012).

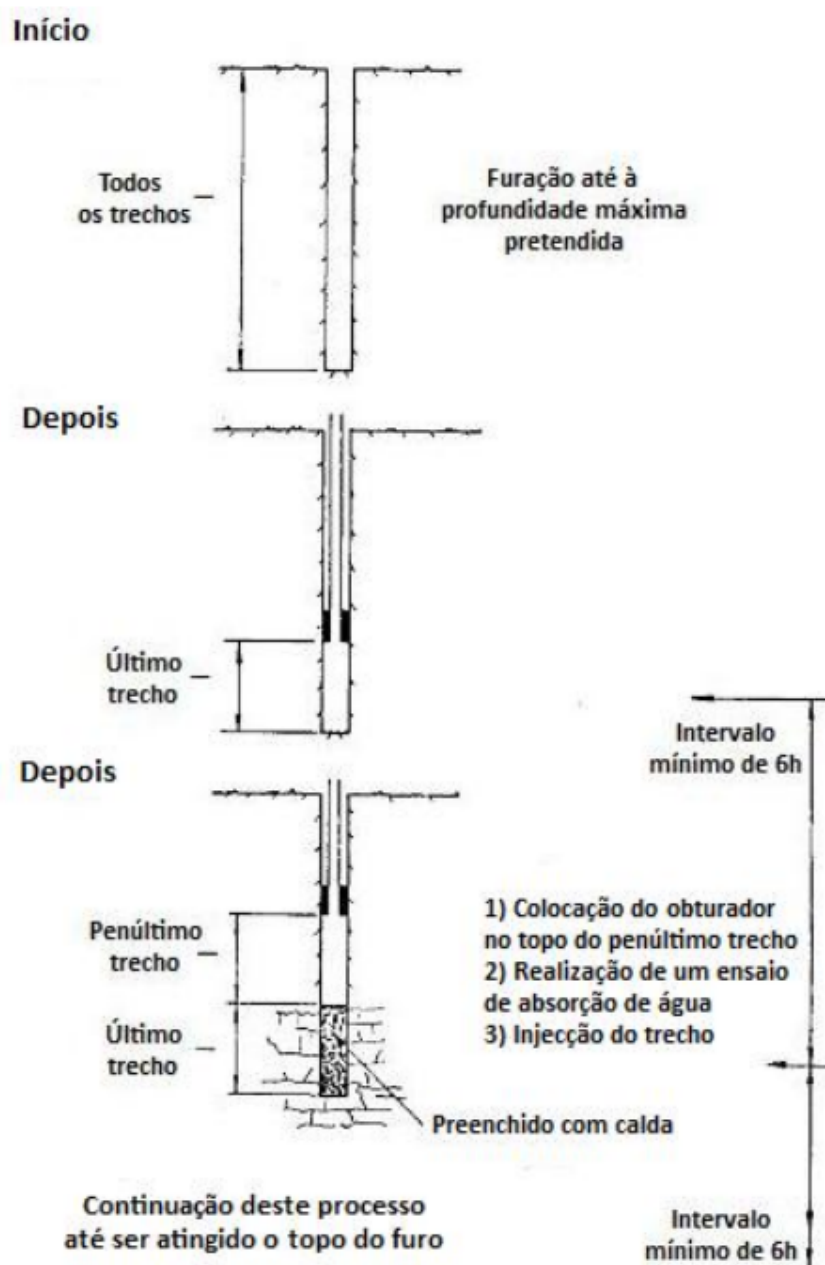


Figura 17 – Método de injeção ascendente. Fonte: Gama (2012).

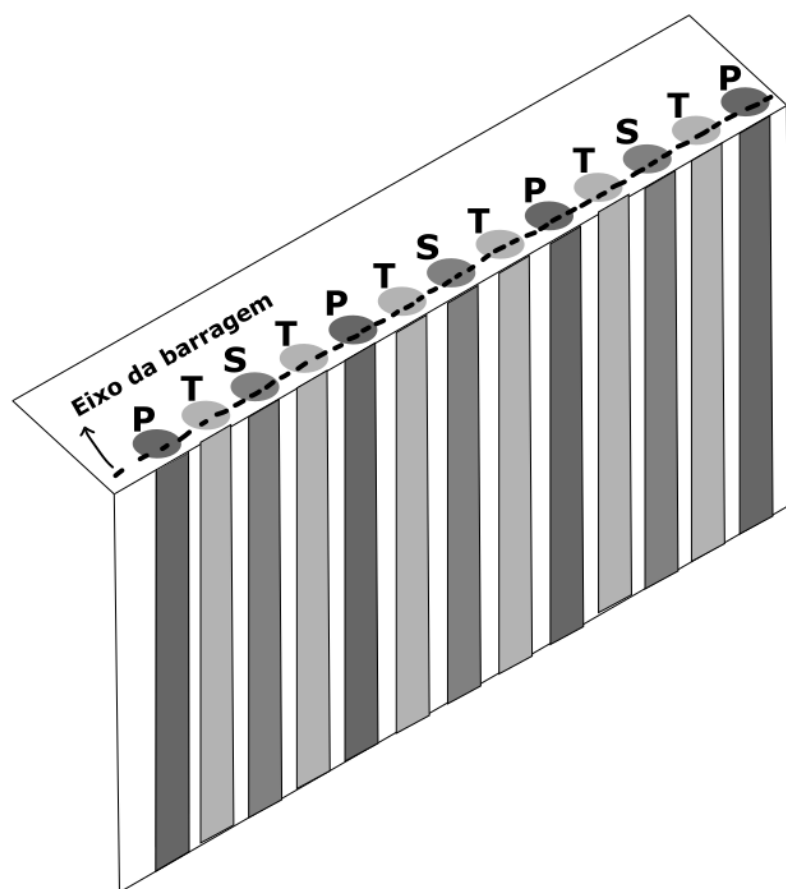


Figura 18 – Ilustração do espaçamento divisional na execução dos furos verticais. Na ilustração, P representa os furos primários, S os secundários e T, por fim, os terciários.. Fonte: Acervo pessoal.

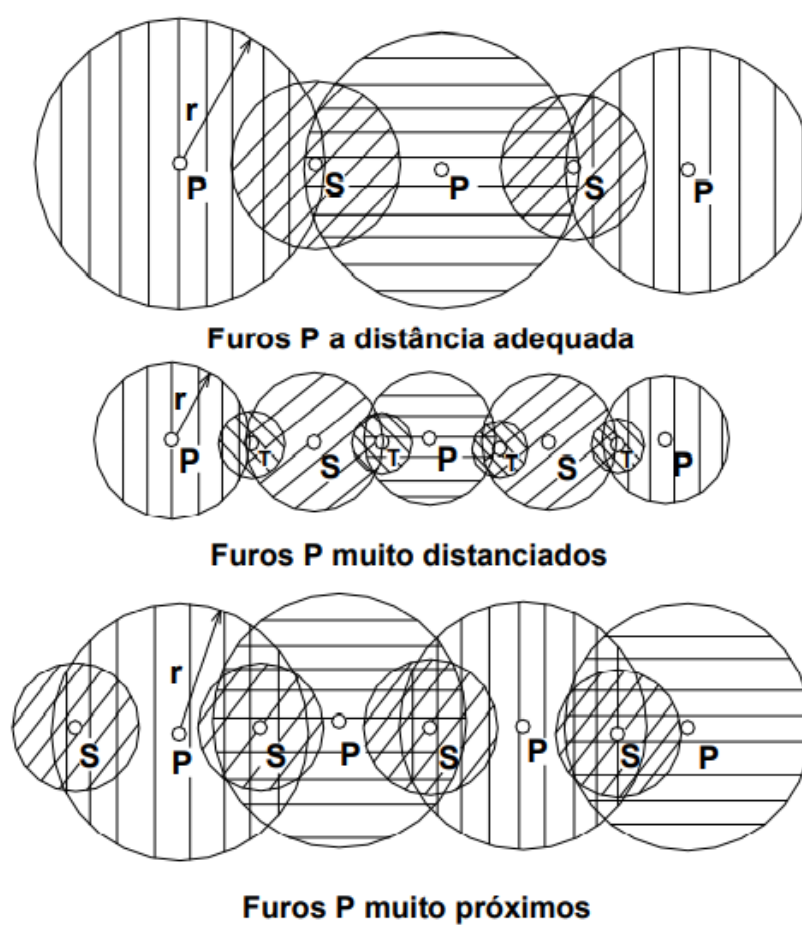


Figura 19 – Exemplo do espaçamento divisional em conjunto com as áreas de influência de cada furo, representadas pelos círculos hachurados. Fonte: Marques Filho (1986, retirado de LEVIS, 2006).

4.4 Controle de Qualidade

Gama (2012), em sua tese, explica que a garantia de uma cortina de injeção bem executada, atendendo aos parâmetros de projeto, necessita de monitoramento sistemático, pré, durante e após a injeção, conforme apresentado também por Silva Gomes (2002)

4.4.1 Qualidade do procedimento

Antes da injeção, Silva Gomes (2002) aponta a necessidade de um controle tecnológico da calda a ser injetada. A seção 4.2.4 - *Injetabilidade e tipos de calda* já abordou, em partes, esse assunto, ilustrado nas figuras 8 e 9. Gama (2012) adaptou uma tabela para explicar os métodos de controle de qualidade pré-injeção mais utilizados (Tabela 1)

Já durante a injeção, Gama (2012) indica a necessidade da observação e monitoramento do consumo de calda. Existem equipamentos manuais como manômetros e caudalímetros, entre outros, e até equipamentos automatizados para esse monitoramento. Porém, o consumo de calda não é o único parâmetro a se observar durante a injeção. Deve-se observar a superfície em busca de algum levantamento causado pelas altas pressões, podendo-se fazer uso de estações totais, ou outras técnicas, como apontado pelo autor.

4.4.2 Verificação de eficiência

Segundo Levis (2006), é muito difícil calcular com exatidão a eficiência de uma cortina de injeção. A autora considera que uma diminuição da condutividade hidráulica em um fator de 10 vezes pode ser um indicador de boa eficácia da cortina, enquanto que Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006) diz que a verificação da eficiência se dá à medida que é observada uma diminuição da absorção de cimento, até se alcançar os parâmetros de "nega"especificados no projeto. Apesar disso, a eficiência de uma cortina jamais será de 100% (GUIDICINI; ANDRADE, 1983).

Outro método bastante utilizado para verificar a eficiência de uma cortina de injeção consiste na análise dos resultados dos ensaios de perda d'água sob pressão, realizados antes e após a injeção (AZEVEDO, 1993). Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006) sugere uma análise estatística dos ensaios, observando-se o comportamento das condutividade hidráulica antes e depois do tratamento. O autor aponta a adoção de condutividades hidráulicas de $0,5 \times 10^{-5}$ cm/s, até 10^{-4} cm/s como representantes de um tratamento eficaz e, à medida que a profundidade do furo aumenta, o critério de condutividade hidráulica é relaxado, podendo alcançar $1,5 \times 10^{-4}$ cm/s.

Marques Filho (1986, *apud* LEVIS, 2006), ainda, indica que, para a verificação da cortina de injeção, a ação mais adequada seria esperar o enchimento do reservatório, pois a partir desse momento a cortina estaria realizando sua função, atuando contra as pressões

Tabela 1 – Ensaaios para controle tecnológico de qualidade das caldas de cimento. Fonte: Adaptado de Gama (2012).

Equipamentos	Parâmetro avaliado	Descrição sucinta
Cone de Marsh	Viscosidade Aparente	O ensaio é realizado enchendo o cone de Marsh normalizado SIMR até ao topo e medindo o tempo que 1 l de calda demora a fluir pelo funil.
Penetrômetro ou molinete	Coesão e tempo de pega	Quer o penetrômetro, quer os molinetes de laboratório são usados para medir o tempo necessário para a calda atingir o início da pega (coesão de 100 Pa) e pega (coesão de 1000 Pa).
Pressofiltro	Coefficiente de pressofiltração	O ensaio é realizado vertendo 400 ml de calda no equipamento de ensaio, sendo a calda pressurizada de seguida até 0,7 MPa. O ensaio continua até toda a água ser removida da amostra. A fórmula utilizada para calcular este parâmetro encontra-se descrita na secção 2.3.3.4.
Proveta de 250 ml, graduada	Decantação	A capacidade de decantação da calda pode ser medida de acordo com o método ASTM C940 com uma proveta de 250 ml, graduada, ao fim de 2h.
Balança baróide	Peso volumétrico	O peso volumétrico de uma calda pode ser estimado com uma balança baróide, que consiste numa balança calibrada especificamente para o efeito.
Agulha de Vicat	Tempo de pega inicial e final	O tempo de presa inicial e final da calda pode ser determinado com a agulha de Vicat. Este dispositivo é colocado à superfície da amostra de calda e largada. O tempo de presa inicial é obtido quando a agulha penetra 25 mm, sendo que o tempo de presa final é obtido quando a agulha não penetra a amostra.

atreladas às colunas d'água com dezenas de metros.

Já Marsal e Resendiz (1975) apontam uma forma de calcular a eficácia da cortina a partir de dados piezométricos. É necessária a instalação de piezômetros à montante e à jusante da cortina, e o cálculo segue a equação:

$$Ec = \frac{\Delta H}{H_m}$$

onde Ec se refere à eficácia da cortina, ΔH à diferença de alturas piezométricas de montante e jusante e, por fim, H_m é a altura piezométrica à montante. A figura 20 é uma ilustração do posicionamento desses piezômetros.

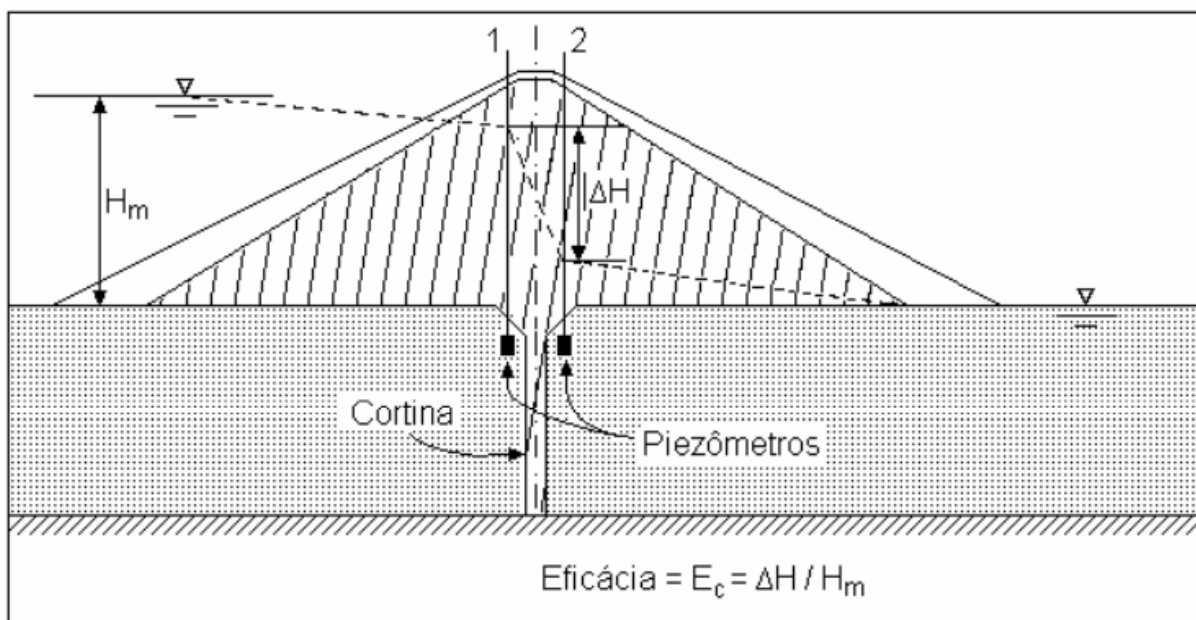


Figura 20 – Ilustração de uma seção do corpo de uma barragem, com a instalação dos piezômetros à montante e à jusante da cortina de injeção. Fonte: Marsal e Resendiz (1975)

Vale citar que, de acordo com Silveira (2006) piezômetros são equipamentos instalados em furos de sondagem para se calcular a subpressão, a pressão de água associada a determinada profundidade da fundação (do inglês, *uplift pressure*, é um efeito da pressão d'água nos poros do maciço, que tendem a aliviar as tensões efetivas do peso da barragem, gerando instabilidade). A tubulação é vedada em todo seu comprimento e porosa apenas na ponta (bulbo), local por onde a água percola e preenche o furo. Assim, a pressão é obtida, medindo-se a altura da coluna d'água acima do bulbo. Um piezômetro, portanto, serve como um medidor de nível d'água, mas recebe contribuição de água apenas da seção mais profunda do furo, e a coluna d'água dentro dele irá fornecer a pressão d'água naquela determinada profundidade.

Marsal e Resendiz (1975) também apontam outro método de se calcular a eficácia da cortina de injeção: uma relação das condutividades hidráulicas e vazões de infiltração antes e após o tratamento do maciço, indicado pela equação:

$$Ec = \frac{Qi - Qf}{Qi}$$

onde Qi representa a vazão de infiltração antes do tratamento e Qf é a vazão de infiltração após o processo de injeção da cortina.

Por fim, de acordo com Gama (2012), os dados do controle de qualidade da obra, obtidos durante o processo executivo da cortina, fornecem informações que permitem a adaptações feitas pela Projetista da obra, adequando as condições executivas de acordo com os resultados obtidos, visando um tratamento do maciço mais efetivo.

5 Propostas de métodos executivos

No capítulo anterior, foram descritos os métodos associados a cada processo de planejamento e executivo de uma cortina de injeção. Alguns autores propuseram conjuntos de critérios para a realização desses serviços de injeção, como determinadas pressões de injeção, tipos de caldas e outros (GAMA, 2012). Desta forma, serão apresentados neste capítulo algumas dessas propostas, mostrando os parâmetros que variam de um autor a outro.

5.1 Proposta de Houlby (1976, 1990)

Para Houlby (1976, 1990), o primeiro passo é o de avaliar a necessidade do tratamento por cortina de injeção de acordo com a obra em questão, e os valores máximos de condutividade hidráulica permitidos para esta situação. O esquema da figura 21 funciona como um guia para estabelecer as condutividades hidráulicas máximas permitidas de acordo com cada caso. Sempre que uma parte do maciço da fundação apresentar condutividades hidráulicas maiores que as estabelecidas por esse guia, será necessário o tratamento.

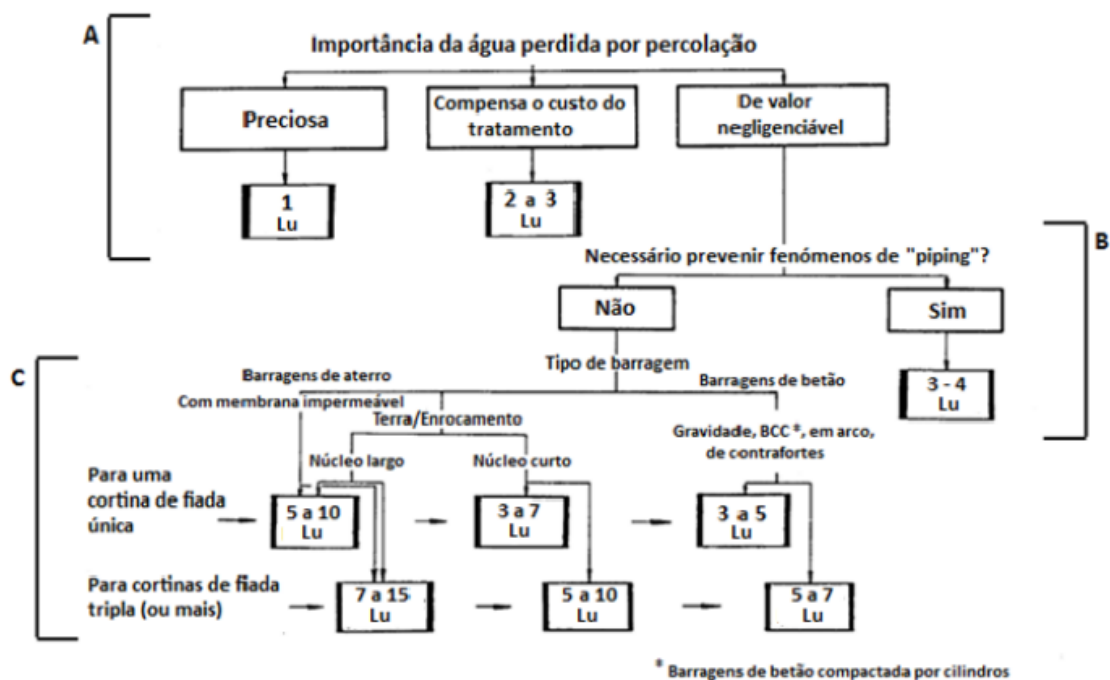


Figura 21 – Esquema para adoção de condutividades hidráulicas mínimas de caso a caso. 1 Lu = $1,3 \times 10^{-5}$ cm/s. Fonte: Gama (2012), adaptado de Houlby (1976, 1990)

Concluindo-se que se faz necessária a execução de uma cortina de injeção, o autor defende a utilização da maior pressão que o maciço suporte, sem que ocorra o fraturamento hidráulico. Na figura 22, são relacionadas as pressões necessárias, a profundidade do trecho injetado, e a qualidade do maciço rochoso. É indicada uma pressão máxima de 100 kPa para as rochas médias a fracas.

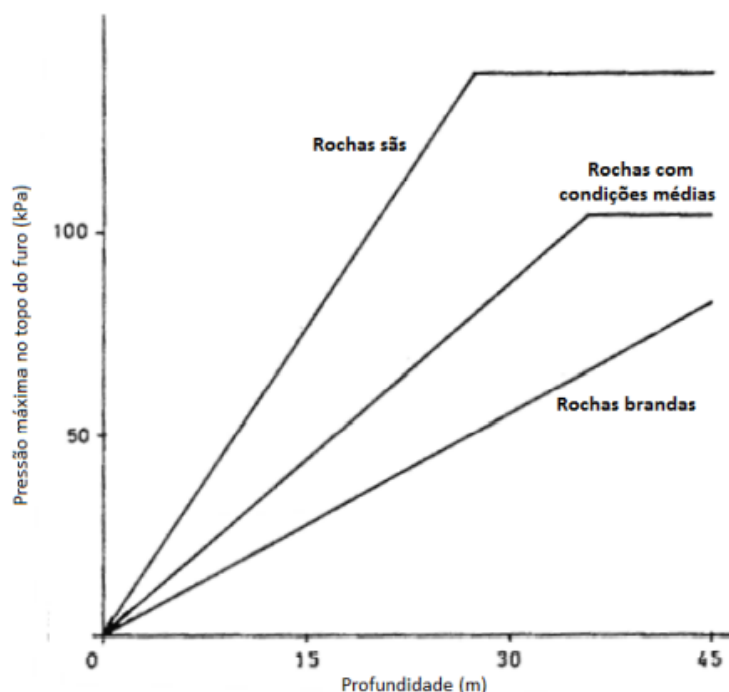


Figura 22 – Gráfico de pressão × Profundidade, relacionadas ao tipo de rocha. Fonte: Gama (2012), adaptado de Houlsby (1976, 1990)

Em relação ao processo executivo deste método, Houlsby (1976, 1990) aponta uma sequência de caldas com traços (relação Água:Cimento ou A/C, em massa) diferentes, começando por uma calda mais fluida, passando para uma calda bastante espessa:

$$5:1 \longrightarrow 4:1 \longrightarrow 3:1 \longrightarrow 2:1 \longrightarrow 1:1 \longrightarrow 0,8:1 \longrightarrow 0,6:1 \longrightarrow 0,5:1$$

Segundo o autor, não são necessários outros traços além desses e, no caso da necessidade de utilizar um traço menos espesso, deve-se seguir a ordem estabelecida acima (se for necessário espessar o traço 4:1 para 2:1, deve-se necessariamente realizar a injeção com o traço 3:1 antes).

A execução da injeção também leva em conta os valores de condutividade hidráulica do maciço, obtidos pelos ensaios de perda d'água sob pressão, para estabelecer o traço inicial da calda de cimento conforme mostrado na figura 23. Esta etapa é muito importante, uma vez que a utilização de caldas muito espessas no início pode obstruir as discontinuidades, e a adoção de caldas finas demais pode resultar em um tratamento de baixa eficiência. Sendo assim, com os parâmetros acima consolidados, a injeção da calda de cimento deve ocorrer com cada traço (do inicial ao 0,5:1) até que ocorra a "nega".

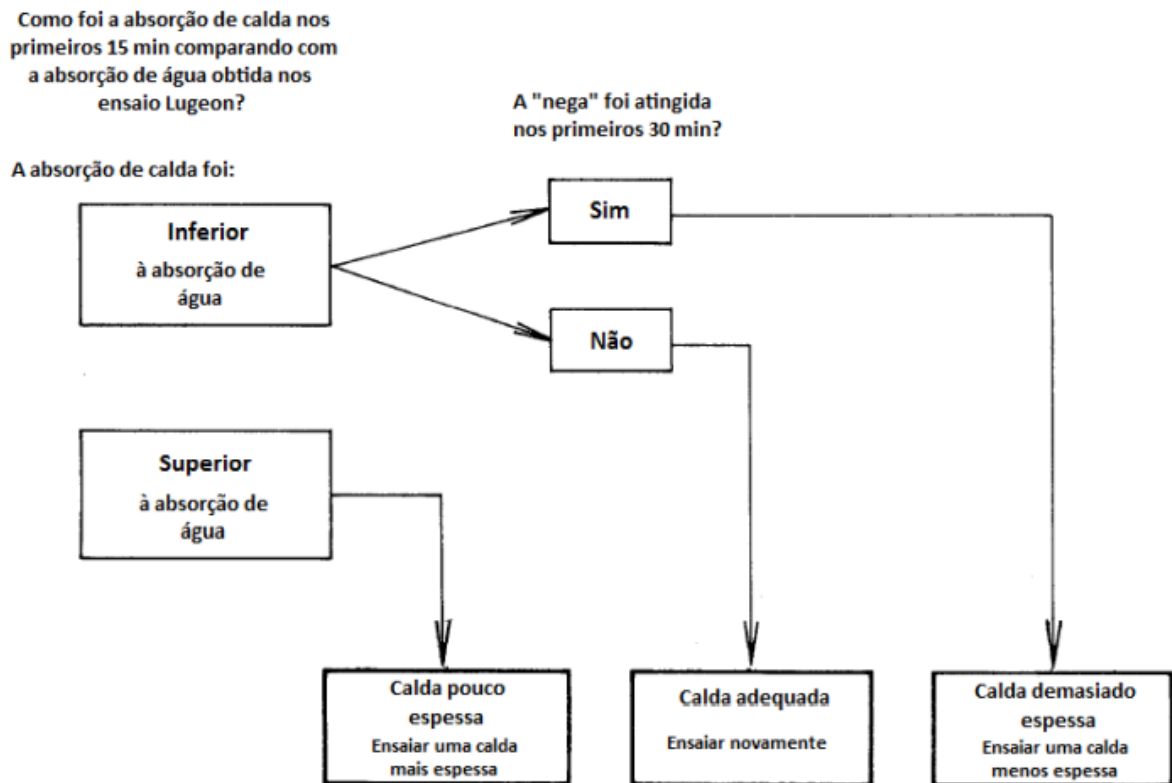


Figura 23 – Esquema do processo executivo de injeção, considerando-se os valores de condutividades hidráulicas do maciço pré-injeção. Fonte: Gama (2012), adaptado de Houlsby (1976, 1990)

5.2 Método GIN - Proposta de Lombardi e Deere (1993)

Este método foi desenvolvido por Lombardi e Deere (1993) a fim de se sistematizar a execução das cortinas de injeção, obtendo-se o melhor resultado possível sem fraturar o maciço, pelo menor custo, e da maneira mais simples possível.

Sendo assim, os autores desenvolveram o Grout Intensity Number (GIN), um valor de intensidade de injeção definido como “o produto da pressão final de injeção e da absorção de calda por metro de furo ao final do processo de injeção de um só estágio” (LOMBARDI, 1996). Portanto, o valor de GIN é associado ao momento em que a velocidade de circulação da calda é 0, e seu cálculo é representado nas fórmulas:

$$p = \frac{R \cdot c}{e}$$

$$V = R^2 \times e$$

e, por fim,

$$GIN(kPa \times l/m) = p \times V = R^3 \times c$$

onde p representa a pressão final dos estágios de injeção, V representa a absorção final de calda por metro, p é a pressão, R é a distância alcançada pela calda, c é a coesão da mistura e e é a abertura da junta. Desta forma, a variável abertura da junta não entra no cálculo de GIN, que é a variável mais difícil de se determinar.

A figura 24 mostra como a curva GIN previne o faturamento hidráulico: em uma injeção que não utiliza o método GIN (figura 24 a)), alcançam-se valores de pressão $\times$ volume de absorção que oferecem riscos de fraturamento e levantamento hidráulicos; enquanto que quando se usa uma curva GIN (figura 24 b)) a zona que oferece esses riscos, representada pela área hachurada do gráfico, não é atingida, diminuindo significativamente as chances de danos estruturais ao maciço.

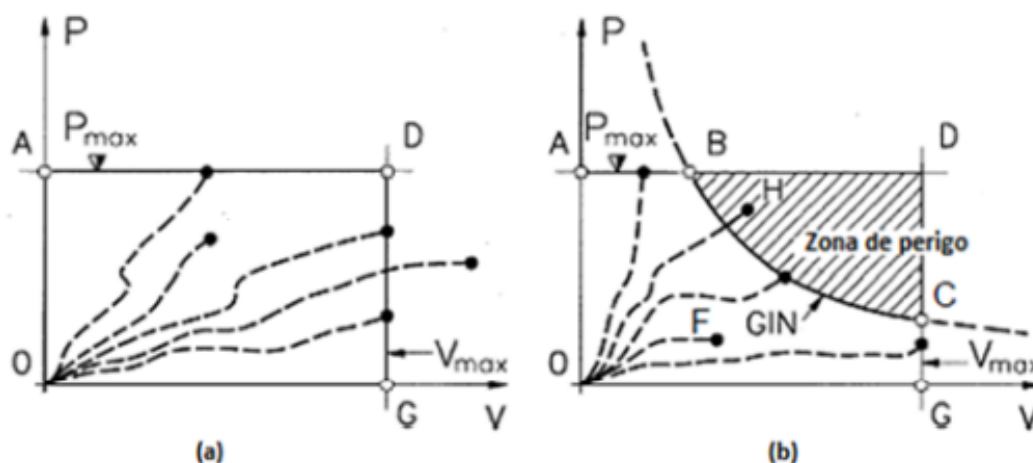


Figura 24 – Gráficos de pressão de injeção $\times$ volume de absorção de calda por metro. Em a) não é utilizada a curva GIN, em b) aplica-se a curva GIN, ilustrada pela curva BC no gráfico. Fonte: Modificado de Lombardi (2003, *apud* Gama, 2012). Extraído de Gama (2012)

Sendo assim, para se adotar um valor GIN, deve-se estabelecer pressões máximas, volumes máximos de absorção, bem como o A/C da calda de cimento a ser utilizada. Gama (2012) afirma que, como esse valor precisa de informações detalhadas sobre o maciço como abertura e espaçamento das fraturas; deformabilidade e condutividade hidráulica do maciço; entre outros, se faz muito difícil adotar um valor GIN antes do início do processo de injeção. Sendo assim, Lombardi (1996) definiu dois principais métodos de definição de um valor GIN:

1. Método Experimental: para esta definição de valor GIN, são necessários ensaios de injetabilidade nas zonas homogêneas do maciço de fundação. Mede-se, assim, a penetrabilidade da calda em função de diferentes valores de GIN. Assim que é definida uma penetrabilidade de teste (Rt), aplica-se as equações:

$$K = Rt \times \sqrt[3]{\frac{ct}{GINt}}$$

$$GIN = \frac{c \times R^3}{K^3} = \frac{c \times R^3}{ct \times (Rt)^3} \times GINt$$

onde o sufixo t representa valores teste e K representa um fator de injetabilidade, o qual considera todas as qualidades do maciço citadas acima.

2. Método Observacional: nesse caso, são usados dados empíricos baseados em experiências anteriores e dados bibliográficos para se adotar um valor de GIN inicial. Ao decorrer do processo, algumas alterações e adequações podem ser realizadas no valor de GIN.

A figura 25 apresenta um gráfico com várias curvas de GIN padrão, construídas a partir de dados empíricos obtidos em várias obras pelo autor. Essas curvas são as utilizadas no Método Observacional, podendo sofrer alguns ajustes ao longo do processo executivo.

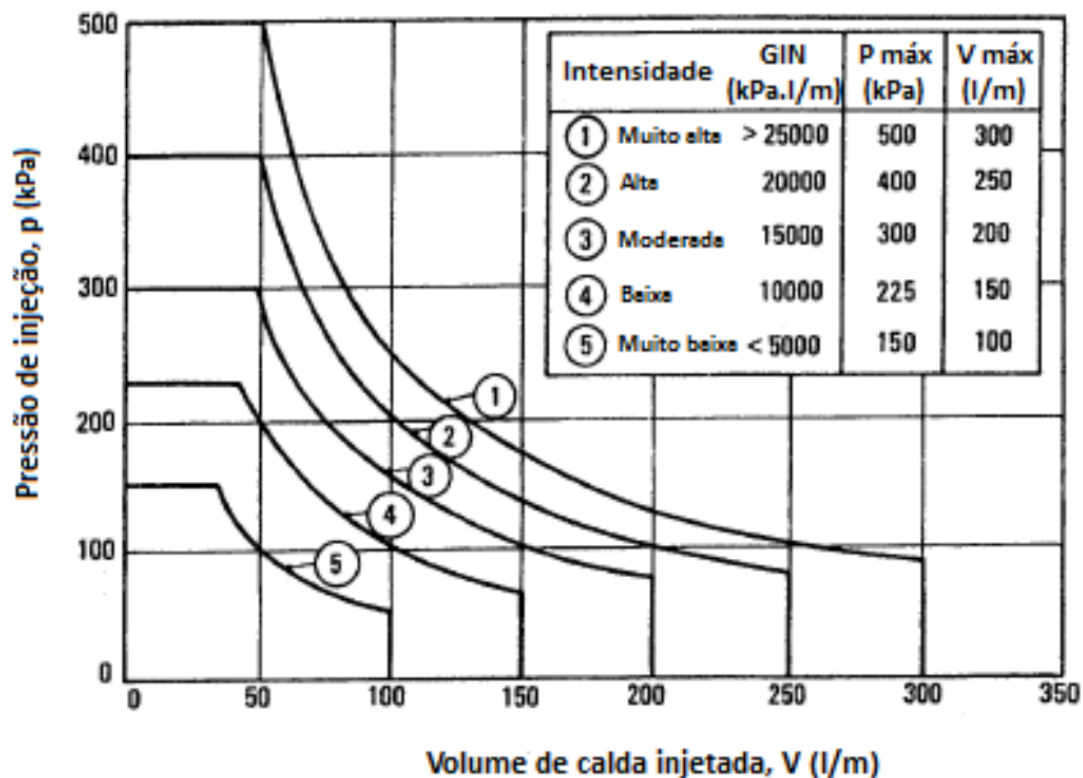


Figura 25 – Gráfico com algumas curvas de GIN padrão. Fonte: Modificado de Lombardi (2003, *apud* Gama, 2012). Extraído de Gama (2012)

Também faz parte do método GIN a adoção de um volume máximo de absorção, baseado nas condições do maciço e os valores alvo de impermeabilização dele. Porém,

este valor não deve ser imposto como critério de paralisação para o processo de injeção. Lombardi e Deere (1993) indicam que este volume máximo deve ser o gatilho para uma tomada de decisão dentre elas: simples continuação da injeção; interrupção definitiva do procedimento; pausa temporária na injeção para retomada posterior; abandono do furo e abertura de outro nas proximidades; adição de componentes repelentes de água (adjuvantes, normalmente) à calda de cimento; ou outras medidas.

Em relação às pressões, por razões práticas, Lombardi (1996) explicita que também devem ser adotados limites de pressões independentes do valor GIN, também baseados no objetivo do projeto, bem como as qualidades do maciço. Sendo assim, geralmente são adotadas pressões máximas que giram em torno de duas a três vezes o valor da pressão de água que será encontrada futuramente àquela profundidade. Em adição a isso, é recomendado a utilização do "*split spacing*" e, à medida que são realizados os furos de linhas mais avançadas (terciária, por exemplo), as pressões devem ser aumentadas, uma vez que se espera o preenchimento das fraturas mais importantes pelos furos primários e secundários, que as fissuras a serem tratadas sejam mais fechadas e que o maciço em si se encontre sob maior tensão (LOMBARDI; DEERE, 1993).

O traço da calda de cimento a ser adotado deve ser estável, e sua adoção deve ser o produto de ensaios laboratoriais, girando em torno de 0,7:1 até 1:1 (LOMBARDI; DEERE, 1993). Alguns aditivos são permitidos, como superplastificantes para aumentar a penetrabilidade da calda através da redução da coesão e viscosidade, e agentes que reduzam a perda de água da mistura. Durante todo o procedimento de injeção da cortina, será utilizado apenas uma calda, produto dos ensaios laboratoriais.

Com o passar dos anos de aplicações do método, Lombardi (2003, *apud* Gama (2012)) apontou algumas regras/características associadas ao seu processo executivo, listadas na tabela 2.

Gama (2012) indica que durante a injeção, realiza-se o acompanhamento em tempo real de vários parâmetros, o que possibilita a relação deles em formas de gráficos, como por exemplo: pressão por tempo, vazão por tempo, absorção por tempo, pressão por absorção e penetrabilidade por absorção. Essas relações tornam possível a avaliação da ocorrência de fenômenos como o fraturamento hidráulico, permitindo que sejam tomadas ações para remediá-las.

A figura 26 é uma representação gráfica de uma injeção utilizada como exemplo por Lombardi e Deere (1993). Em 26 a), têm-se P_{max} e V_{max} , os valores máximos de pressão e volume, respectivamente, adotados para esse exemplo; a curva GIN adotada; P_f e V_f , pressão e volume finais para o trecho injetado, e a curva 1, a representação gráfica dos valores de pressão e volume cumulativo do processo de injeção. Já em 26 b), está representada a curva de penetrabilidade em relação ao volume injetado. Observa-se que, naturalmente, essa razão deve decrescer à medida que um maior volume de calda é injetado.

Tabela 2 – Regras para adoção do método GIN. Fonte: Modificado de Lombardi (2003, *apud* Gama, 2012). Extraído de Gama (2012)

1	Definição exata da quantidade de trabalhos a realizar.
2	Dimensiona, mas não especifica o projeto de tratamento.
3	Definição da melhor calda possível para o projeto, do ponto de vista técnico, bem como do económico, através da execução de ensaios de laboratório.
4	Utilização de uma calda única, a melhor possível, para todos os trechos de injeção, de modo a garantir a qualidade dos resultados, bem como a simplificação do processo de injeção, diminuindo também a quantidade de calda desperdiçada.
5	Definição dos parâmetros da curva GIN: $p_{m\acute{a}x}$, $V_{m\acute{a}x}$ e $GIN = p.V$, tendo sempre em consideração todas as características geológicas e geotécnicas da rocha, bem como a quantidade de trabalhos a realizar e a economia associada do projeto.
6	Confirmação dos parâmetros utilizados através da execução de ensaios de campo e verificação da eficácia das injeções através da execução de ensaios de injectabilidade adicionais.
7	Não realizar ensaios de absorção de água, pois estes são inúteis e perigosos.
8	Utilização do método split spacing para a execução da cortina de impermeabilização.
9	Aumentar o comprimento dos trechos de injeção em profundidade para acelerar o processo de injeção e adicionalmente obter alguma economia de calda.
10	Em maciços muito permeáveis injetar água acima do nível freático para o saturar, um pouco antes da execução das injeções, de modo a evitar a perda de água da calda para o maciço e criar obstruções nas fraturas.
11	A determinação da necessidade de execução de um furo adicional, bem como a sua profundidade é baseada na quantidade de calda injetada em furos adjacentes.
12	Execução dos procedimentos de injeção controlados por computador são um pré requisito para a obtenção de um tratamento eficaz.

Em relação aos ensaios de perda d'água sob pressão, Lombardi (2003, *apud* Gama (2012)) nega a eficiência da correlação desses ensaios com o comportamento da calda de injeção, impossibilitando a escolha de uma calda a partir dessas informações. Isso porque a água se comporta como um fluido newtoniano, enquanto que a calda é composta por partículas em suspensão, atuando como um fluido binghamiano, conforme tratado na seção 4.2.4 - *Injetabilidade e tipos de calda*. Desta forma, o autor explicita que, no máximo, pode-se realizar correlações aproximadas com a diminuição de condutividade hidráulica antes e após o tratamento, mas são inúteis para a determinação da injetabilidade do maciço e da capacidade de absorção de calda, além de serem nocivos pela possibilidade de reabertura de descontinuidades já tratadas anteriormente (LOMBARDI, 1996).

Para ilustrar como o processo de injeção evolui ao se adotar o método GIN, Lombardi e Deere (1993) apresentaram um exemplo, presente na figura 27. Nota-se, assim, que as curvas 1, 2, 3 e 4 representam um possível processo de injeção, com o acompanhamento de volume e pressão em tempo real descrevendo esses determinados caminhos pelo gráfico. Tomando-se como exemplo a curva 1, o ponto *a* indica a intersecção desta curva com uma curva GIN de baixa intensidade: neste caso, a injeção cessaria com um volume de 150 litros por metro e uma pressão de, aproximadamente, 3 bar. Adotando-se uma curva GIN com intensidade um pouco maior, a injeção paralisaria no ponto *b*, com um volume de 200 litros por metro, e uma pressão ainda de 3 bar. Já adotando-se uma curva GIN com intensidade muito alta, a injeção pararia no ponto *d*, com um volume de aproximadamente 280 litros por metro e uma pressão final de aproximadamente 9 bar. As curvas 1, 2, 3 e 4 descrevem padrões esperados para fissuras abertas, com abertura média, fechadas e extremamente fechadas, respectivamente, e a seção da curva x-y se refere a um fraturamento hidráulico que ocorreu durante a injeção.

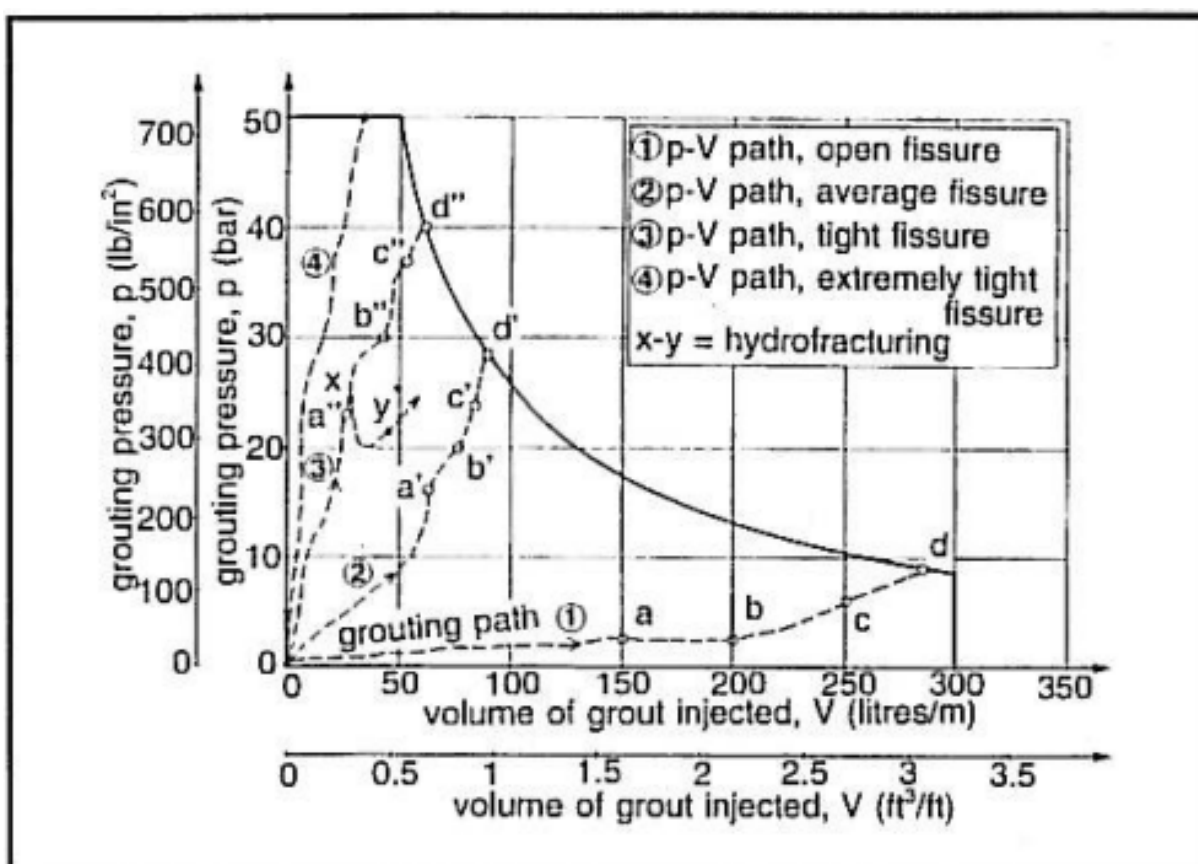


Figura 27 – Gráfico de exemplo de comportamento da calda ao longo de uma injeção, com a adoção de diferentes curvas GIN implícitas em a, b, c, d... Fonte: Lombardi e Deere (1993).

5.3 Método QEGC - Proposta de Wilson e Dreese (2003)

Os autores Wilson e Dreese (2003) indicam que, até 1980, as cortinas de injeção construídas não eram efetivas tecnicamente, tampouco economicamente, uma vez que usavam como base conhecimentos empíricos, levando em consideração pouco, ou quase nada, dos conhecimentos geológicos associados ao maciço onde atuaram.

Sendo assim, os autores desenvolveram o método QEGC, que significa *Quantitatively Engineering Grout Curtain*, e consiste na definição dos seguintes parâmetros: caracterização do local; requerimentos de performance do projeto, parâmetros da cortina de injeção e, por fim, métodos analíticos.

Como passo inicial, deve-se caracterizar o maciço, realizando-se o mapeamento geológico, responsável pela descrição das unidades geológicas, descrição geotécnica das principais famílias de fraturas, grau de alteração da rocha; realização de sondagens de qualidade e, por fim, estudos de ensaios de perda d'água sob pressão, que forneçam dados sobre a condutividade hidráulica e o comportamento das fraturas sob injeção de fluidos sob pressão (acerca de ocorrência de fraturamento hidráulico) (WILSON; DREESE, 2003).

Os produtos desta primeira etapa estão listados abaixo (WILSON; DREESE, 2003):

1. Definição da profundidade máxima da cortina;
2. Definição do topo provável da elevação da cortina, que leva em conta a profundidade afetada por intemperismo, materiais de preenchimento de descontinuidades e condutividade hidráulica;
3. Determinação da orientação dos furos de injeção mais vantajosa;
4. Identificação de zonas críticas;
5. Definição de condutividade hidráulica para o design do modelo
6. Estabelecimento de um limite prévio de pressão de injeção.

Em seguida, os autores levantam que, na etapa de estabelecimento de requerimentos de performance do projeto, é de suma importância a definição de parâmetros de infiltração residual, os caminhos de infiltração e a distribuição de pressões associada a esses fluxos. Para o estabelecimento desses parâmetros, devem ser contabilizados os fatores de segurança da barragem; os impactos e valores associados ao controle dessa pressão; os valores associados ao volume de água perdida nesses fluxos e, por fim, a aceitação política/pública desse volume de infiltração.

De acordo com Wilson e Dreese (*op cit.*), os volumes de infiltração a serem adotados giram em torno de $7,6 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ até $7,6 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$. Assim, inicia-se o projeto da cortina, levando-se em conta diferentes alternativas que obedeçam os valores preestabelecidos.

Avançando-se no modelo, a definição dos parâmetros da cortina de injeção se dão de acordo com a tabela 3, apontando as características de projeto, e as condutividades hidráulicas alvos associadas a uma linha única e uma linha tripla de injeção.

Assim, os autores (*op cit.*) afirmam que os pontos abordados pela tabela 3 são fatores aparentemente de pequena importância, mas ao se somar os efeitos negativos de vários fatores defeituosos, obtêm-se uma diminuição na eficácia da cortina muito considerável.

Como último parâmetro de projeto a ser definido, os autores indicam que a espessura da cortina deve girar em torno de 1,5 m para cortinas simples e de 4,5 m para cortinas triplas, com um espaçamento de 1,5 m de uma linha para outra.

Por fim, Wilson e Dreese (2003) apontam os métodos analíticos utilizados. O projeto utiliza de uma modelagem baseada no fluxo em maciços porosos. Desta forma, a correlação com maciços fraturados é possível, mas ocorre uma maior correlação quando as fraturas são mais frequentes e homogêneas.

Além disso, ainda na etapa de utilização de métodos analíticos, Wilson e Dreese (2003) apontam a necessidade de uma análise preliminar, baseada na infiltração máxima que se busca atingir, para verificar a necessidade e planejar o custo da instalação de uma cortina de injeção. A tabela 4 é um exemplo de uma análise preliminar e, a partir dela, decide-se a profundidade adotada baseada no tempo que o procedimento demorará, o seu custo, e o valor de infiltração total residual máxima.

Os autores, assim, concluem que, definidos os parâmetros após a análise preliminar, devem-se considerar otimizações e parâmetros de qualidade para obter-se um produto eficaz. Apontam, por fim, que uma cortina que seja uma ordem de magnitude menos permeável que o maciço pode fornecer uma eficiência de até 50%, enquanto que quando a cortina possui condutividade hidráulica 2 ordens de magnitude menor, a eficiência pode se aproximar de 99%.

Tabela 3 – Tabela de relação entre características do projeto atuante e valores alvo de condutividade hidráulica. Fonte: Modificado de Wilson e Dreese (2003).

	Características de Projeto	Cortina de linha simples	Cortina de linha tripla
Level 1	Baixos valores de contratação; contratados inexperientes; sem especificação de projeto dirigida pela engenharia; pagamento feito por volume/massa de sólidos injetados; traços de calda finos (menores que 3:1); ensaios de perda d'água limitados; espaçamento de furos em torno de 3 m; pressões conservadoras; monitoramentos feito com manômetros e <i>dipstick</i> ; furos não injetados até "nega" absoluta; fiscalização inexperiente e pouco numerosa; nenhum entendimento ou análise de resultados	Não recomendado - Resultados imprevisíveis	1×10^{-5} m/s
Level 2	Baixos valores de contratação; contratados experientes; alguma influência da engenharia na especificação do processo; pagamento feito por volume/massa de sólidos injetados; Caldas <i>Tipo I ou Tipo II</i> com traços mais espessos que 3:1; ensaios de perda d'água limitados; espaçamento de furos em torno de 1,5 m; pressões conservadoras; monitoramentos feito com manômetros e <i>dipstick</i> ; injeção feita até "nega" absoluta e mantimento de pressão após "nega" por um tempo; fiscalização com experiência limitada e número de fiscais adequado para acompanhamento integral; entendimento e análise de resultados limitada.	1×10^{-5} m/s	1×10^{-6} m/s
Level 3	Necessidade de uma equipe contratada comprometida, especializada e com equipamentos especializados; pagamento feito por tempo de injeção; traços da calda equilibrados e estáveis; programa de ensaios de perda d'água extenso; programa dirigido pela engenharia; espaçamento máximo de furos de 1,5 m; utilização da máxima pressão que o corpo geológico suporta; monitoramento realizado através de transdutores de pressão, fluxômetros magnéticos e acompanhamento dos dados em tempo real; injeção até "nega" absoluta; fiscalização experiente e número de fiscais adequado para acompanhamento integral; bom entendimento e boa análise de resultados.	1×10^{-6} m/s	4×10^{-7} m/s
Level 4	Necessidade de uma equipe contratada comprometida, especializada e com equipamentos especializados; pagamento feito por tempo de injeção; traços da calda equilibrados, estáveis e utilização de caldas especiais; programa de ensaios de perda d'água extenso; programa dirigido pela engenharia; espaçamento máximo de furos de 1,5 m e baseado em análises finais; utilização da máxima pressão que o corpo geológico suporta; monitoramento realizado através de transdutores de pressão, fluxômetros magnéticos e sistemas analíticos atuando em tempo real junto com a obtenção dos dados; injeção até "nega" absoluta; fiscalização muito experiente e número de fiscais adequado para acompanhamento integral; avançado entendimento e análise de resultados.	4×10^{-7} m/s	1×10^{-8} m/s

Tabela 4 – Resultados de uma análise preliminar. Fonte: Modificado de Wilson e Dreese (2003)

Profundidade da Cortina (m)	Infiltração Máxima (m^3/s)	Custo da Cortina (dólares)	Duração da Construção da Cortina (Meses)
0	0.107	0	0
6	0.039	600,000	2
24	0.006	2,400,000	8
36	0.005	3,600,000	12

6 Discussão

No último capítulo foram apresentadas diferentes propostas para o procedimento de execução da cortina de injeção. Analisando-se criticamente cada proposta, é possível observar alguns parâmetros que mais variam: a pressão de injeção, como no caso do método GIN de Lombardi e Deere (1993) e o critério de adoção de condutividade hidráulica mínima, como observado comparando-se o método de Houlsby (1976, 1990) com o de Wilson e Dreese (2003). Apesar de o método mais discutido na bibliografia ser o GIN (LEVIS, 2006), (GAMA, 2012), (BRANDÃO, 2014), todas as propostas apresentadas já foram aplicadas, e possuem validade.

A fim de apresentar os métodos de maneira resumida, foi elaborada a tabela 5, comparando a maneira como os autores introduzem diferentes parâmetros em suas propostas.

À medida que os métodos de Lombardi e Deere (1993) e de Houlsby (1976, 1990) são mais diretos, e apresentam formas de obter os parâmetros de forma quantitativa, Wilson e Dreese (2003) explicitam alguns parâmetros, como por exemplo a pressão, de forma mais qualitativa, usando os termos "pressões conservadoras" e "máxima", sem estabelecer números. Por este motivo, o método não está inserido na tabela 5, apesar de indicar que as investigações geológicas também são fundamentais, recomendar o uso de ensaios de perda d'água e adotar a organização dos furos em linhas simples ou triplas espaçadas 1,5 metros.

Tabela 5 – Tabela resumo para efeito de comparação entre os métodos de Lombardi e Deere (1993) e Houlsby (1976, 1990).

Parâmetros	Houlsby	GIN
Investigações geológicas-geotécnicas	Fundamental	Fundamental
Ensaio de perda d'água	Antes e após injeção	Antes e após a injeção, não utilizar durante por ser nocivo ao maciço e não fornecer informações relevantes
Organização dos furos	Linhas de injeção únicas ou triplas, dependendo da condutividade hidráulica alvo	<i>Split Spacing</i>
Profundidade da cortina	Não especificado	Não especificado
Injetabilidade e tipo de calda	Sequência de traços a ser seguida - traço inicial baseado nos ensaios de perda d'água	Definição de apenas uma calda para todo o procedimento, por meio de experimentos laboratoriais
Pressões de injeção	Pressões máximas para rochas fracas de 100 kPa	No máximo, de 2 a 3 vezes o valor de pressão de água na profundidade do trecho
Comprimento do trecho	Não especificado	Deve aumentar junto com a profundidade do trecho
Paralisação de injeção	Injeção por 15 minutos após o alcance da "nega"	Depende do valor de GIN adotado
Verificação de eficiência	Ensaio de perda d'água	Ensaio de perda d'água

Desta forma, fica claro a importância das investigações geológico-geotécnicas, sendo fundamentais para os três métodos. Além disso, verifica-se no método GIN uma importante diferença quanto à adoção dos ensaios de perda d'água: em seus artigos, Lombardi e Deere (1993) apontam esses ensaios como altamente nocivos ao maciço, e Gama (2012) até indica a não utilização desses métodos no geral quando adotado do GIN, porém, em artigos posteriores Lombardi (1996) apontou que eles podem ser utilizados antes e depois da realização da cortina, mas nunca durante o processo executivo.

Em relação à organização dos furos, não se observa grandes variações, uma vez que o método *Split spacing* pode ser adotado junto com as linhas simples e triplas de injeção. Já para a adoção de caldas, há uma divergência importante entre os métodos de Houlsby (1976, 1990) e de Lombardi e Deere (1993): o primeiro adota uma variação de caldas para o mesmo furo, começando com uma calda fina (A/C mais alto) e variando para uma calda mais espessa, enquanto que o método de GIN defende a utilização de apenas uma calda. Por sua vez, as pressões apresentadas pelo método GIN, apesar de apontarem valores quantitativos, variam bastante de acordo com o local onde a cortina será aplicada, por depender da pressão de água local. Para os comprimentos dos trechos de injeção, o método GIN define o aumento do comprimento à medida que se aumenta a profundidade onde eles se encontram. Ao se tratar da paralisação de injeção, ao ponto que Houlsby (1976, 1990) indica a continuação de injeção por um período após o alcance de "nega", Lombardi e Deere (1993) definem pressões e volumes de injeção previamente e, uma vez que o gráfico de injeção, fornecido pelo acompanhamento em tempo real, alcança esses parâmetros (volume máximo, pressão máxima ou a curva GIN adotada), a injeção deve cessar. Para a verificação de eficiência, utiliza-se de ensaios de perda d'água para a comparação da condutividade hidráulica do maciço antes e depois da construção da cortina.

Os parâmetros "Profundidade da cortina" e "Comprimento do trecho" do método de Houlsby (1976, 1990) não são especificados, pois não variam em relação às especificações já apresentadas no capítulo 4, apontando cortinas com profundidades de 1 a 1,5 vezes a altura da barragem (GAMA, 2012), e trechos de 1,5 a 3, até 6 metros de comprimento (WARNER, 2004). A explicação dessa diferença se dá pelo fato de que os parâmetros de projeto, utilizados diretamente na injeção, são produtos de extensas pesquisas, derivadas de uma descrição detalhada do maciço, utilizando classificações geológicas e geotécnicas, além de ferramentas exploratórias como os ensaios de perda d'água sob pressão. Assim, limitar esses parâmetros quantitativamente se faz torna um trabalho complexo e sistemático.

O mundo das injeções é bastante abrangente, englobando não somente as caldas de cimento, mas também diferentes polímeros, que não foram abordados neste trabalho. Com isso, observa-se a complexidade atrelada à construção de uma cortina de injeção, bem como todas as variáveis inseridas ao se considerar as caldas de cimento para injeção,

bem ilustradas por Wilson e Dreese (2003), ao apresentar a tabela 3 associando os custos e o tempo de construção de uma obra desse tipo.

7 Conclusão

Uma cortina de injeção de cimento consiste na execução sistemática de furos, seguindo uma (ou mais) linha(s) de injeção localizada próxima ao eixo de uma barragem, em um maciço cujas características geológicas e geotécnicas são conhecidas e estudadas. Desta forma, sua função é a de diminuir a condutividade hidráulica do maciço em questão, diminuindo, por consequência, a velocidade e o volume de água que percola por baixo do corpo da barragem, diminuindo a subpressão e os riscos de *pipíng*.

Para a execução de uma cortina eficiente, os seguintes parâmetros devem ser definidos: condutividade hidráulica alvo e atual do maciço, organização, profundidade e extensão dos furos, técnicas de perfuração, injetabilidade e tipo da calda de cimento, pressões de injeção, comprimento dos trechos de injeção e critérios de paralisação de injeção. Eles devem sempre seguir um controle de qualidade, e sua definição é feita baseada nas características que o maciço apresentou na fase de mapeamento.

Afim de padronizar este procedimento, alguns autores desenvolveram regras, especificações ou métodos a serem seguidos com o intuito de obter uma cortina eficiente. Esses padrões elaboram um conjunto de parâmetros, como pressões e volumes de calda injetada máximos por trecho, tipos de caldas de cimento, técnicas de verificação de eficiência, métodos de acompanhamento sistemático e outros. Mesmo assim, o fator que não varia de uma proposta para a outra é a importância do mapeamento geológico-geotécnico para a definição dos parâmetros de injeção.

Por fim, deve-se ressaltar a relevância da etapa de pré-projeto, que levanta o grau de importância da água do reservatório para definir quão impermeável pode ser o maciço; que mapeia as principais estruturas e descontinuidades e que define previamente a condutividade hidráulica do maciço, auxiliando na definição de condutividade hidráulica alvo. Enquanto isso, apesar de necessitar de acompanhamento sistemático e de rigoroso controle de qualidade, os parâmetros executivos podem sofrer alterações de um projeto a outro, baseados na experiência do acompanhamento técnico e no comportamento do maciço sob tratamento.

Referências

- ABGE. *Investigações Geológico-Geotécnicas - Guia de Boas Práticas*. 1. ed. [S.l.]: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2021. 305–357 p. Citado 6 vezes nas páginas 6, 13, 16, 17, 20 e 22.
- AZEVEDO, A. *Análise do Fluxo de das Injeções nas Fundações da Barragem de Taquaruçu, Rio Paranapanema, São Paulo*. 206 p. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Carlos, São Carlos, 1993. Citado na página 41.
- BRANDÃO, A. C. M. *Tratamento de Fundações da Barragem do Escalão Principal do Baixo Sabor*. Dissertação (Mestrado) — Universidade do Porto, Portugal, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 28, 30, 31 e 59.
- COSTA, W. D. *Geologia de Barragens*. 2. ed. [S.l.]: Oficina de Textos, 2012. 352 p. Citado na página 19.
- ELETROBRÁS. *Critérios de projeto civil de usinas hidrelétricas*. 1. ed. [S.l.]: Comitê Brasileiro de Barragens, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- EWERT, F. K. *Discussion of Rock Type Related Criteria for Curtain Grouting. Proceedings of the Third International Conference on Grouting and Ground Improvement*. [S.l.]: ASCE, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.
- GAMA, P. S. S. *Injeção de caldas de cimento em fundações rochosas de barragens: Revisão crítica de metodologias*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2012. Citado 31 vezes nas páginas 6, 7, 8, 9, 11, 13, 15, 16, 23, 24, 25, 29, 30, 31, 36, 37, 38, 41, 42, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 59 e 61.
- GUIDICINI, G.; ANDRADE, R. M. de. Considerações sobre o tratamento das fundações de estruturas hidráulicas em basaltos. *Simpósio sobre a geotecnia da bacia do alto Paraná*, v. 1, p. 319–350, 1983. Citado na página 41.
- HOULSBY, A. C. Routine interpretation of the lugeon water-test. *Quarterly Journal Of Engineering Geology*, v. 9, p. 303–313, 1976. Citado 12 vezes nas páginas 4, 5, 7, 9, 10, 11, 45, 46, 47, 59, 60 e 61.
- HOULSBY, A. C. *Construction and Design of Cement Grouting*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 1990. 468 p. Citado 13 vezes nas páginas 4, 5, 7, 9, 10, 11, 30, 45, 46, 47, 59, 60 e 61.
- HSU, S. J. C.; RE, G.; ONO, S. Alguns aspectos sobre o tratamento de fundações de barragens em obras hidrelétricas. *Semana Paulista de Geologia Aplicada*, v. 2, p. 449–469, 1970. Citado na página 27.
- INFANTI JR., N.; NITTA, T. Considerações para reavaliação dos critérios de injeção de cimento. *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia*, v. 1, p. 35–43, 1978. Citado na página 29.
- KUTZNER, C. *Grouting of Rock and Soil*. [S.l.]: A. A. Balkema, 1996. 271 p. Citado na página 25.

- LEVIS, S. D. *Verificação da eficácia dos sistemas de vedação e drenagem em fundações de barragens de concreto*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Carlos, Brasil, 2006. Citado 17 vezes nas páginas 6, 7, 11, 13, 20, 23, 24, 27, 28, 29, 31, 32, 35, 36, 40, 41 e 59.
- LOMBARDI, G. Selecting the grouting intensity. *International Water Power Dam Construction*, v. 3, p. 62–66, 1996. Citado 5 vezes nas páginas 47, 48, 50, 53 e 61.
- LOMBARDI, G.; DEERE, D. U. Grouting design and control using the gin principle. *International Water Power Dam Construction*, p. 15–22, 1993. Citado 14 vezes nas páginas 4, 5, 8, 9, 10, 11, 47, 50, 52, 53, 54, 59, 60 e 61.
- LOPES, M. B. *Tratamento de Fundação para Barragens de Concreto*. 1. ed. [S.l.]: Appis Ltda, 2020. Citado 9 vezes nas páginas 6, 11, 12, 13, 14, 15, 23, 25 e 26.
- MARSAL, R. J.; RESENDIZ, D. *Presas de tierra y enrocamiento*. [S.l.]: Limusa, 1975. 546 p. Citado 3 vezes nas páginas 7, 43 e 44.
- OLIVEIRA, R. Estudo geotécnico de maciços rochosos de fundação de barragens. contribuição da geologia de engenharia. Lisboa, 1983. Citado na página 16.
- SILVA GOMES, A. Sistemas de observação em obras geotécnicas. planejamento, instalação e observação. *Proceedings do 8º Congresso Nacional de Geotecnia*, p. 2541–2562, 2002. Citado na página 41.
- SILVEIRA, J. F. A. *Instrumentação e segurança de barragens de terra e enrocamento*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2006. 379 p. Citado na página 43.
- WARNER, J. *Practical Handbook of Grouting: Soil, Rock and Structures*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley Sons, 2004. 632 p. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 61.
- WEAVER, K. D.; BRUCE, D. A. *Dam Foundation Grouting, Revised and Expanded Edition*. [S.l.]: ASCE Press, 2007. 504 p. Citado na página 24.
- WILSON, D. B.; DREESE, T. L. Quantitatively engineered grout curtains. *American Society of Civil Engineers Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*, p. 881–892, 2003. Citado 11 vezes nas páginas 4, 5, 9, 10, 11, 55, 56, 57, 58, 59 e 62.