Apêndice A
Histórico da Construção

Dezembro de 2019

A versão oficial deste Apêndice é a versão em língua inglesa. Em caso de qualquer contradição ou divergência de interpretação entre a versão traduzida e a versão em língua inglesa deste Apêndice, prevalecerá a versão em língua inglesa.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO 1

2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO 1
   2.1 Localização 1
   2.2 Visão Geral da Instalação 2

3. CENÁRIO 5
   3.1 Geologia 5
      3.1.1 Geologia Regional 5
      3.1.2 Geologia Local 5
   3.2 Hidrogeologia 6
   3.3 Hidrologia 6

4. VISÃO GERAL DA BARRAGEM I 6
   4.1 Descrição da Barragem 6
   4.2 Recursos de Gerenciamento Hídrico da Barragem 10

5. CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM I 11
   5.1 Condições Preexistentes 11
   5.2 Primeiro Alteamento: Barragem Inicial, 1976 14
      5.2.1 Investigações Geotécnicas 14
      5.2.2 Abordagem do Projeto 14
      5.2.3 Complicações e Desvios 18
   5.3 Segundo Alteamento: Projeto Inicial, 1982 a 1983 18
      5.3.1 Investigação Geotécnica 19
      5.3.2 Abordagem do Projeto 22
      5.3.3 Complicações e Desvios 25
   5.4 Segundo Alteamento: Projeto Revisado, 1984 a 1990 26
      5.4.1 Investigação Geotécnica 27
      5.4.2 Abordagem do Projeto 28
      5.4.3 Complicações e Desvios 31
   5.5 Terceiro Alteamento: 1991 a 1993 33
      5.5.1 Investigações Geotécnicas 33
      5.5.2 Abordagem do Projeto 34
      5.5.3 Instrumentação 39
   5.6 Quarto Alteamento: 1995 41
      5.6.1 Investigações Geotécnicas 41
      5.6.2 Abordagem do Projeto 41
      5.6.3 Instrumentação 46

5.6.4 Complicações e Desvios 46
5.7 Quinto Alteamento: 1998....47
5.7.1 Investigações Geotécnicas 47
5.7.2 Abordagem do Projeto 48
5.7.3 Instrumentação....53
5.7.4 Complicações e Desvios 54
5.8 Sexto Alteamento: 2000....54
5.8.1 Investigações Geotécnicas 55
5.8.2 Abordagem do Projeto 55
5.8.3 Instrumentação....60
5.8.4 Complicações e Desvios 60
5.9 Sétimo Alteamento: 2003 60
5.9.1 Investigações Geotécnicas 61
5.9.2 Abordagem do Projeto 61
5.9.3 Instrumentação....65
5.9.4 Complicações e Desvios 65
5.10 Oitavo Alteamento: 2004....66
5.10.1 Investigações Geotécnicas 66
5.10.2 Abordagem do Projeto 67
5.10.3 Instrumentação....68
5.10.4 Complicações e Desvios 68
5.11 Nono e Décimo Alteamentos: 2008 e 2013 68
5.11.1 Investigações Geotécnicas 69
5.11.2 Abordagem do Projeto 70
5.11.3 Instrumentação....74
5.11.4 Complicações e Desvios 75

6. EVENTOS PÓS-CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM I....78
6.1 Introdução 78
6.2 Sistema de Gerenciamento de Águas Superficiais....78
6.2.1 Gerenciamento de Águas Superficiais no Reservatório....79
6.2.2 Gerenciamento das Águas Superficiais na Face Jusante da Barragem I 80
6.3 Drenos Horizontais Profundos....81
6.3.1 Instalação do DHP 15 84
6.4 Percolação....86
6.5 Programa de Perfuração em Progresso no Momento do Rompimento da Barragem....87

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Planta de localização da Mina Córrego do Feijão 2
Figura 2: Mina Córrego do Feijão 4
Figura 3: Seção transversal da Barragem I mostrando alteamentos e etapas da construção 8
Figura 4: Vista aérea da Barragem I 8
Figura 5: Topografia na área da Barragem I antes da construção 12
Figura 6: Condições do local antes da construção da Barragem I 13
Figura 7: Seção transversal do projeto conceitual da Barragem I 15
Figura 8: Seção transversal do Segundo Alteamento (Projeto Inicial) 20
Figura 9a: Curva granulométrica de finos de minério 21
Figura 9b: Curvas de granulométricas de rejeitos 22
Figura 10: Detalhes da drenagem interna do Segundo Alteamento (Estágio 2) 24
Figura 11: Exploração do local do Segundo Alteamento (Projeto Revisado) 27
Figura 12: Estágios do Segundo Alteamento revisados conforme projetados 29
Figura 13: Estágios do Segundo Alteamento conforme construídos 32
Figura 14: Investigação geotécnica do Terceiro Alteamento 34
Figura 15: Seção transversal do projeto do Terceiro Alteamento 35
Figura 16: Camada drenante do projeto do Terceiro Alteamento 36
Figura 17: Plano de instrumentação do Terceiro Alteamento 40
Figura 18: Seção transversal da berma do Quarto Alteamento 42
Figura 19: Detalhe do borda do tapete drenante do Quarto Alteamento 43
Figura 20: Seção transversal da estação 0,00 – 10+10,00 48
Figura 21: Seção transversal da estação 10+10,00 – 29,00 50
Figura 22: Detalhe típico do despejo de Drenagem 51
Figura 23: Seção transversal do Sexto Alteamento 56
Figura 24: Detalhe da drenagem interna e gestão de águas superficiais 58
Figura 25: Seção transversal típica do Sétimo Alteamento 61
Figura 26: Características de drenagem do Sétimo Alteamento 64

Figura 27: Nono e Décimo Alteamentos conforme projetados 71
Figura 28: Plano de instalação do indicador do nível d'água e piezômetro no Nono e Décimo Alteamentos 75
Figura 29: Nono e Décimo Alteamentos "as built" 76
Figura 30: Carga de projeto do Nono e Décimo Alteamentos 77
Figura 31: Sistema de Desaguamento do Reservatório Após a Cessação da Disposição de Rejeitos 80
Figura 32: Localizações dos DHPs 83
Figura 33: Local da percolação observada perto do DHP 15 85
Figura 34: Imagem de 18 de janeiro de 2019, filmagem com drone 86
Figura 35: Furos de sondagem na Barragem I entre outubro de 2018 e a ruptura 90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Detalhes da construção da Barragem I 9
Tabela 2: Parâmetros de materiais da barragem inicial 17
Tabela 3: Resultados de ensaios de laboratório em amostras de rejeitos (Segundo Alteamento, projeto inicial) 19
Tabela 4: Resultados de ensaios de laboratório em amostras de rejeitos (Segundo Alteamento, projeto revisado) 28
Tabela 5: Resultados de análises de estabilidade do projeto do Terceiro Alteamento 38
Tabela 6: Resumo da análise de estabilidade do projeto do Quarto Alteamento 45
Tabela 7: Parâmetros de materiais do Quinto Alteamento 49
Tabela 8: Parâmetros de materiais do Sexto Alteamento 57
Tabela 9: Parâmetros de materiais do Sétimo Alteamento 63
Tabela 10: Furos de sondagem executados ou iniciados na Barragem I até a data da ruptura 89

1. INTRODUÇÃO

Este Apêndice apresenta o histórico de construção da Barragem I da Mina do Córrego do Feijão ("Barragem I") da Vale S.A. ("Vale") e de algumas estruturas relevantes perto da Barragem I. O Apêndice descreve a barragem e a área ao redor, bem como aspectos relacionados ao projeto e à construção da barragem e suas estruturas auxiliares. Este Apêndice também apresenta um resumo de relevantes procedimentos operacionais que foram usados para gerenciar os rejeitos e os principais eventos que podem colaborar para o entendimento sobre a estrutura e as características da barragem.

Os dados e descrições estabelecidos neste Apêndice foram desenvolvidos com base em documentos e registros obtidos da Vale e/ou de terceiros. Em alguns casos, algumas informações não estavam disponíveis, o que se entende ser devido a diversos fatores, incluindo os mais de 40 anos de história da Barragem I, a aquisição da barragem pela Vale de um proprietário anterior, Ferteco Mineração S.A. ("Ferteco"), em 2001, e a perda, durante o rompimento, de determinados registros impressos armazenados em um escritório próximo à Barragem I. Entretanto, as informações disponíveis são suficientes para proporcionar uma descrição dos principais aspectos relacionados ao projeto e à construção da Barragem I.

2. DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO

2.1 Localização

A Barragem I faz parte da mina Córrego do Feijão no complexo de Paraopeba, situado em Brumadinho, Minas Gerais, Brasil. A localização é apresentada na Figura 1.

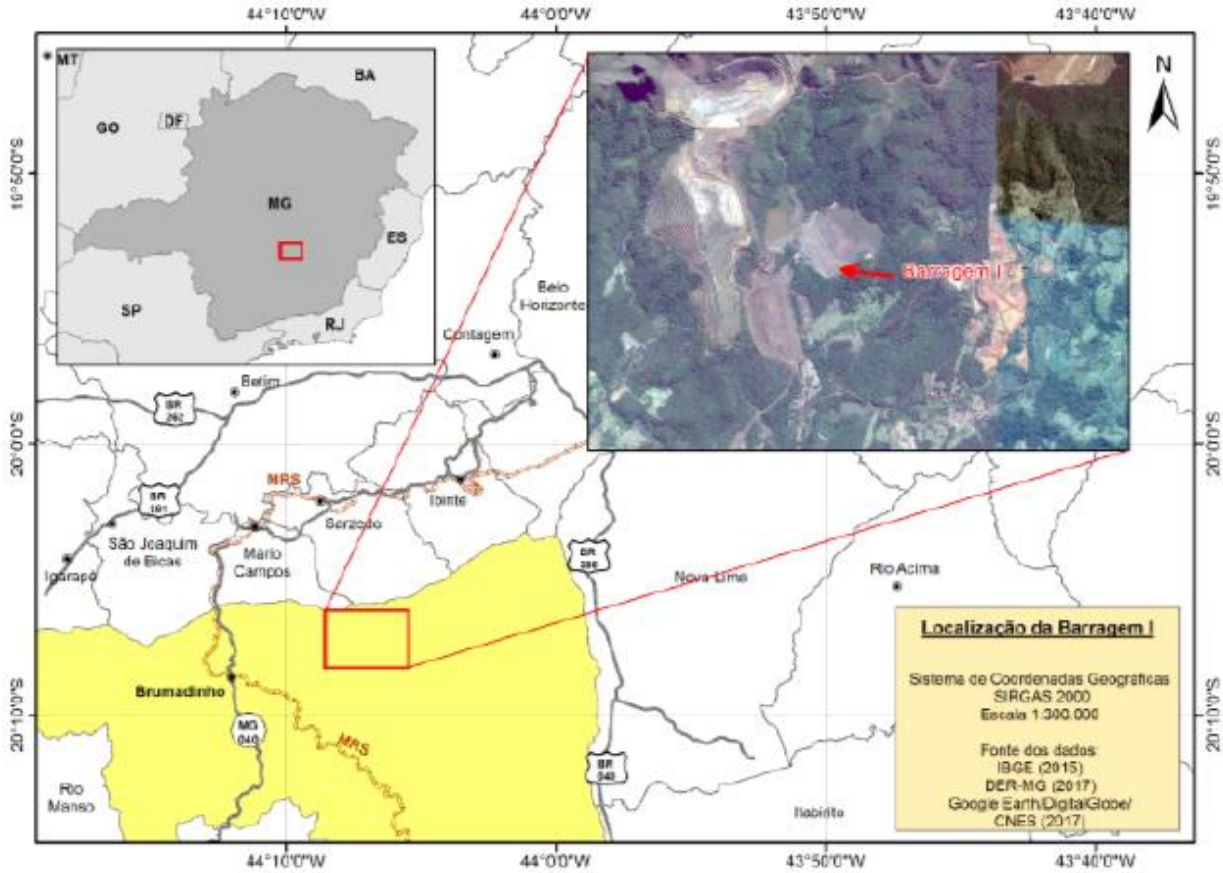


Figura 1: Planta de localização da Mina Córrego do Feijão[1]

2.2 Visão Geral da Instalação

A Mina Córrego do Feijão, incluindo a Barragem I, era de propriedade e foi desenvolvida pela Ferteco até 27 de abril de 2001, quando a Vale adquiriu a Ferteco. A Figura 2 apresenta uma vista aérea da instalação da Mina Córrego do Feijão. As barragens I e VI estão identificadas na Figura 2. Na época em que a Vale comprou a Ferteco, em abril de 2001, a barragem havia sido elevada até uma cota de (El.) 916,5 metros acima do nível médio do mar (m nmm), com uma altura máxima de 60,5 m, conforme configuração discutida na Seção 5.8 deste Apêndice (ou seja, o Sexto Alteamento).

Os subprodutos da mineração incluíam resíduos de rocha e rejeitos, produzidos durante a trituração do minério não processado e o processo subsequente de concentração de minério. Para

[1] Revisão Periódica de Segurança de Barragem Mina Córrego Feijão – Barragem I Relatório Técnico, TÜV SÜD (TÜV SÜD 2018) ("Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018").

o processo de concentração de minério, foi utilizada água para auxiliar na separação por gravidade das partículas de minério das frações estéreis (ou seja, rejeitos). Essa água também foi usada para transportar os rejeitos através de um sistema de tubulação para a Barragem I. Embora o minério não processado tenha sido submetido ao processo de concentração, quantidades variáveis de minério ainda permaneceram presentes nos rejeitos. A barragem de rejeitos propriamente dita foi desenvolvida para a secagem e disposição dos rejeitos.[2] O reservatório da Barragem I também serviu para reduzir a turbidez e melhorar a qualidade da água vertida da barragem.[3]

Em julho de 2016, foi iniciado um método de processamento a seco de minério na central de tratamento da Mina Córrego do Feijão, eliminando a necessidade de processar minério utilizando água. Naquela época, a Barragem I deixou de receber rejeitos.

[2] Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.

[3] Relatório Técnico Comum / Geral Baragem B1 Avaliação Técnica Complementar – Análise de Estabilidade Sob Carregamento Náo Drenado (Geoconsultoria) ("Revisão técnica suplementar - Análise de estabilidade em condições de carga não drenada").

Figura 2: Mina Córrego do Feijão[4]

[4] Google Earth. (n.d.). Vista aérea da Mina Córrego do Feijão. Em julho de 2018. Texto e gráficos adicionados pelos autores.

3. CENÁRIO

Abaixo, apresentamos um resumo das condições geológicas regionais e locais, com base nas informações fornecidas nos documentos do projeto inicial do Primeiro Alteamento da barragem[5] e relatórios de geologia regional da área[6].

3.1 Geologia

3.1.1 Geologia Regional

A mina Córrego do Feijão está localizada ao longo do alinhamento da Serra do Curral, que delimita a seção norte do Quadrilátero Ferrífero, uma região rica em minério de ferro. Exceto por uma pequena movimentação rúptil no período geológico do Cretáceo, apenas intemperismo e erosão foram registrados nesta região. O segmento sudoeste da Serra do Curral é composto por uma espessa sequência litológica do Supergrupo Minas, composta por quartzitos e filitos do Grupo Caraça, uma formação ferrosa do Grupo Itabira e metapelitos do Grupo Piracicaba. A mina Córrego do Feijão, onde está localizada a Barragem I, está situada em uma área dominada por solos residuais de gnaisse e solos coluviais lateríticos.

3.1.2 Geologia Local

A Barragem I foi construída em uma área sobre um maciço rochoso composto por gnaisses bandados, sobrepostos por solos saprolíticos, residuais e coluviais. Esses solos exibiam boa capacidade de suporte e baixa permeabilidade.[7] As informações históricas sobre os parâmetros geotécnicos dos solos de fundação são limitadas. Em geral, os solos de fundação são compostos por argila siltosa sobreposta por solos saprolíticos.[8] A Barragem I foi construída no vale do Córrego do Feijão. O vale lateral (Córrego da Pedra Grande) se estreita no local da barragem, devido a uma crista constituída de rocha dura que se projetana base do vale, denominada "Kanga Ridge". Areia fina e siltosa presente na base do vale e solos lateríticos presentes ao longo das encostas do vale se juntam diretamente na crista rochosa, que é ligeiramente fragmentada e permite percolação.

---

5 Documentos do projeto, Primeiro Alteamento (Christoph Erb 1976) ("Documentos de projeto, Erb").

6 Alkmim, F.F., & Marshak, S. (1998). Transamazonian orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: Evidence for paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, *90*(1-2), 29-58; Doerr, J.V. (1969). Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilatero Ferrifero Minas Gerais, Brazil (U.S. Geologic Survey Paper 641-A). Washington, DC: U.S. Government Printing Office.

7 Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.

8 Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018; Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão).

3.2 Hidrogeologia

Na região, as águas subterrâneas permeiam as rochas, estruturas rochosas erodidas e solos residuais. As águas subterrâneas nas áreas com a geologia descrita na Seção 3.1 normalmente são recarregadas pela precipitação e drenam para os recursos de drenagem superficial (por exemplo, riachos) a partir de rochas e solos subjacentes. Na área da Barragem I, as águas subterrâneas provavelmente fluíram para o Córrego do Feijão desde rochas e solos subjacentes. A construção da Barragem I e os rejeitos represados provavelmente eliminaram o riacho como ponto de descarga das águas subterrâneas, resultando em um aumento nas cotas das águas subterrâneas nas proximidades da barragem e rejeitos ao longo do desenvolvimento do projeto. Além disso, a água nos rejeitos está provavelmente conectada hidraulicamente às águas subterrâneas na área, limitando o potencial de desaguamento dos rejeitos mediante drenagem para os solos naturais. A drenagem dos rejeitos provavelmente ocorreria apenas através da drenagem lateral através da barragem, e não verticalmente para as rochas e solos subjacentes, bem como por evaporação a partir da superfície.

3.3 Hidrologia

A Barragem I está localizada em uma bacia de drenagem de 84.4 hectares (ha) do Córrego do Feijão.[9] O represamento atrás da barragem cobre uma área de aproximadamente 25 ha, ou aproximadamente 30% de toda a área da área de captação que contribuem para a barragem. A topografia desta área montanhosa se inclina acentuadamente em direção à área represada da barragem. Cerca de dois terços da bacia está coberta por vegetação densa e o restante está coberto por rejeitos represados e vegetação rasteira. Os dados de precipitação local estão descritos no Apêndice C.

4. VISÃO GERAL DA BARRAGEM I

4.1 Descrição da Barragem

A Barragem I foi construída em 15 estágios (10 alteamentos, com os primeiros alteamentos construídos em estágios) entre 1976 e 2013. A barragem foi construída principalmente usando o método de construção para montante, no qual a barragem é erguida em estágios através da construção de bermas em cima de rejeitos previamente depositados e esgotados. Este método resulta na mudança da crista à montante da barragem ao longo do tempo, conforme ilustrado na Figura 3, o que aumenta a capacidade de retenção de rejeitos da barragem. Usando esse método, a barragem foi construída até uma altura máxima de 86 m, com uma cota final da crista de 942 m

[9] Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.

nmm e um comprimento de crista de 720 m.[10] Os 15 estágios e 10 alteamentos da barragem estão identificados na Tabela 1. O termo "alteamento" foi usado pela Vale e pelos engenheiros listados na Tabela 1 para denotar certas etapas de construção da barragem, algumas das quais envolveram um ou mais estágios de construção de bermas. A correlação entre alteamentos e estágio(s) está identificada na Tabela 1, e os alteamentos e estágios da Barragem I estão ilustrados na vista em perfil transversal na Figura 3.

Os materiais utilizados para construir os estágios da barragem foram geralmente obtidos a partir dos rejeitos retidos pela própria barragem. Conforme discutido na Seção 5, os materiais de construção foram projetados para serem obtidos a partir da fração mais grossa dos rejeitos que haviam sido depositados anteriormente. De acordo com os documentos disponíveis, discutidos abaixo, os estágios construídos da barragem eram compostos por materiais com permeabilidade de 10^{-8} a 10^{-7} m/s, com algumas tão baixas quanto 10^{-9} m/s.

A operação de disposição de rejeitos foi projetada para resultar na segregação da fração grossa, por sedimentação hidráulica, da fração fina para separar os rejeitos grossos para uso em futuras construções das bermas de alteamento.[11] Essa construção era para ser realizada lançando os rejeitos do topo da crista da barragem para o lado a montante da berma, com a intenção de depositar a fração de rejeitos grossos próxima à berma e a fração fina fluir para uma cota mais baixa, mais distante da berma (ver a localização do lago de decantação na Figura 4). A área de deposição de material grosso próxima da barragem que devia resultar desse processo é chamada de "praia". As propriedades da praia são altamente dependentes da manutenção de uma altura suficiente da barragem (ou seja, uma altura muito baixa resultaria em água represada e deposição de material fino próximo à barragem, em vez da formação de uma praia com material grosso) e operação do processo de disposição (por exemplo, velocidade de descarga, altura do lançamento do rejeito da tubulação para a praia, etc.).

[10] Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.

[11] Especificações da construção, Segundo Alteamento (Tecnosan 1981) ("Especificações da construção do Segundo Alteamento, Tecnosan").

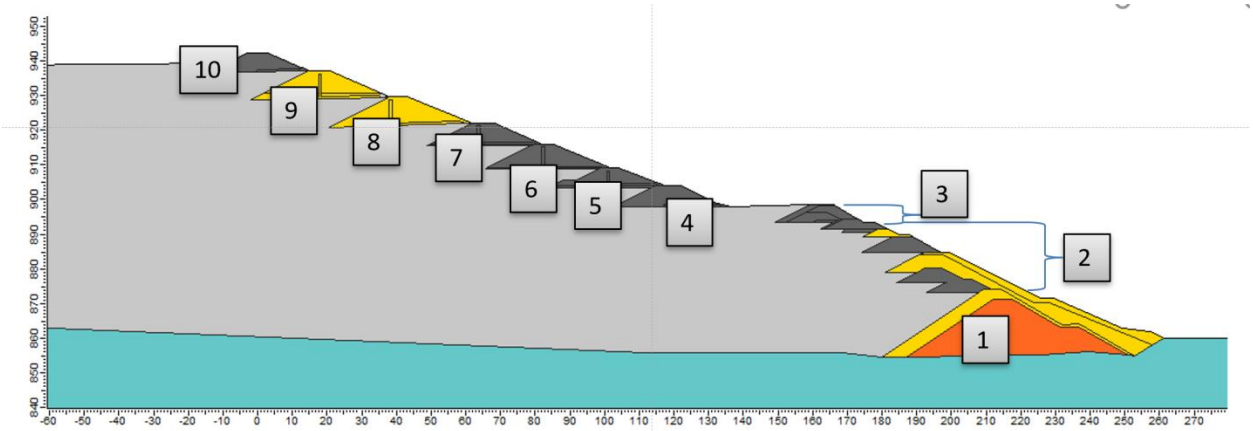


Figura 3: Seção transversal da Barragem I mostrando alteamentos e etapas da construção[12]

Figura 4: Vista aérea da Barragem I[13]

[12] Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018. Numeração adicionada pelos autores.

Tabela 1: Detalhes da construção da Barragem I[14]

Estágio	Ano	ID do Alteamento	Cota da crista (m nmm)	Altura máxima (m)	Empresa do projeto	Empresa de construção
1	1976	Barragem Inicial (Primeiro)	874	18	Christoph Erb	Emtel
2	1982	Segundo	877	21	Tecnosan	Tercam
3	1983		879	23		Desconhecido
4	1984		884	28		Construtora Sul Minas
5	1986		889	33		Desconhecido
6	1990		891,5	35,5		Unienge Com. e Constr. Ltda.
7	1991	Terceiro	895	39.	Chammas Engenharia	Construtora Sul Minas
8	1993		899	43		Desconhecido
9	1995	Quarto	905	49	Tecnosolo	CMS Constr. SA
10	1998	Quinto	910	54		U & M
11	2000	Sexto	916,5	60,5		Constr. Dragagem Paraopeba
12	2003	Sétimo	922,5	66,5		Construtora Impar Ltda.
13	2004	Oitavo	929,5	73,5		Integral
14	2008	Nono	937	81	Geoconsultoria	Integral
15	2013	Décimo	942	86	Geoconsultoria	Salum Enga

[13] Google Maps. (n.d.). Vista aérea da Barragem I. Em junho de 2017. Texto e gráficos adicionados pelos autores.
[14] A tabela foi modificada da Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.

4.2 Recursos de Gerenciamento Hídrico da Barragem

Conforme observado na Seção 2.2, a função da Barragem I era armazenar os rejeitos com a intenção de que a barragem e os rejeitos drenados fossem um local de descarte permanente e estável para os rejeitos. Isso dependia do gerenciamento da água utilizada na disposição dos rejeitos e água advindas de outras fontes (ou seja, escoamento superficial, precipitação e águas subterrâneas) para que a água não desestabilizasse a estrutura da barragem. Conforme descrito em termos gerais na Seção 2.3 e em mais detalhes na Seção 5, foram especificados materiais e práticas operacionais ao longo do histórico da exploração da barragem para drenar a água dos rejeitos depositados perto da barragem, sem desestabilizá-la. As práticas especificadas de gerenciamento de água durante o projeto e a construção envolveram gerenciamento de *águas superficiais* e de *águas nos rejeitos*.

- Os recursos de gerenciamento de *águas superficiais* da Barragem I geralmente consistiam em uma série de canais de superfície laterais e verticais que foram projetados para direcionar a água de escoamento superficial, precipitação, e a água nos rejeitos para o Córrego do Feijão, para além do pé da barragem. Os objetivos do sistema de gerenciamento de águas superficiais incluíam a prevenção de galgamento da barragem e um desenvolvimento adequado da praia de rejeitos (conforme discutido na Seção 4.1).

- Os recursos de gerenciamento de *água de rejeitos* da Barragem I foram projetados para que a água nos rejeitos fossem para o lago de decantação para criar condições favoráveis para a drenagem da água, vertical e lateralmente, a partir dos rejeitos e, assim, promover a formação adequada da praia contra a barragem (conforme discutido na Seção 4.1). A formação de uma praia resultaria em uma camada grossa de material de permeabilidade relativamente alta diretamente atrás da face a montante da barragem, promovendo adensamento e dessecação para servir de suporte ao próximo alteamento e também fornecer uma fonte de material grosso para a construção do próximo estágio da berma. Devido ao fato de se formar como uma declividade (idealmente, de diversos por cento), a praia também promoveria o fluxo da água nos rejeitos ou de chuva lateralmente em direção ao lago de decantação. O gerenciamento da água dos rejeitos também incluiu a construção de drenos laterais e de subsuperfície nos alteamentos, normalmente como tapetes drenantes de material de maior permeabilidade na base dos alteamentos, para direcionar a água dos rejeitos retidos para a superfície da barragem, para evitar o acúmulo de pressão hidráulica. Os fluxos desses recursos de drenagem foram coletados em tubos e canais de drenagem de superfície e monitorados por meio de medidores de vazão. As medições obtidas com medidores de vazão são discutidas na Seção 7 do Apêndice C, e os drenos subterrâneos na estrutura da barragem são discutidos na Seção 5 de cada estágio da construção da barragem.

À medida que a barragem era alteada, havia a necessidade de direcionar a água represada para o córrego no pé da barragem. Para facilitar essa passagem da água, um canal foi construído ao redor da ombreira direita da barragem. Antes da construção do Nono Alteamento, uma galeria foi construída em solos naturais adjacentes à berma do Oitavo Alteamento para transmitir essa água e as bermas do Nono e Décimo Alteamentos foram construídas sobre essa galeria. Além disso, naquela época, três torres de tomada d´água foram construídas na ombreira direita da barragem para controlar e direcionar os fluxos para o canal e, eventualmente, para o reservatório atrás da Barragem VI.

5. CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM I

5.1 Condições Preexistentes

Conforme discutido na Seção 4.1, a construção da Barragem I começou em 1976. Naquela época, o local não era explorado e apresentava topografia montanhosa com características tropicais.[15] A topografia do local antes do início da construção é apresentada na Figura 5.

[15] Os aspectos do local antes da construção estão descritos nos Documentos do Projeto da Erb e nos relatórios de inspeção para preparação do local para a construção inicial preparada pela Engosolo. Relatórios de inspeção do local (Engesolo 1976).

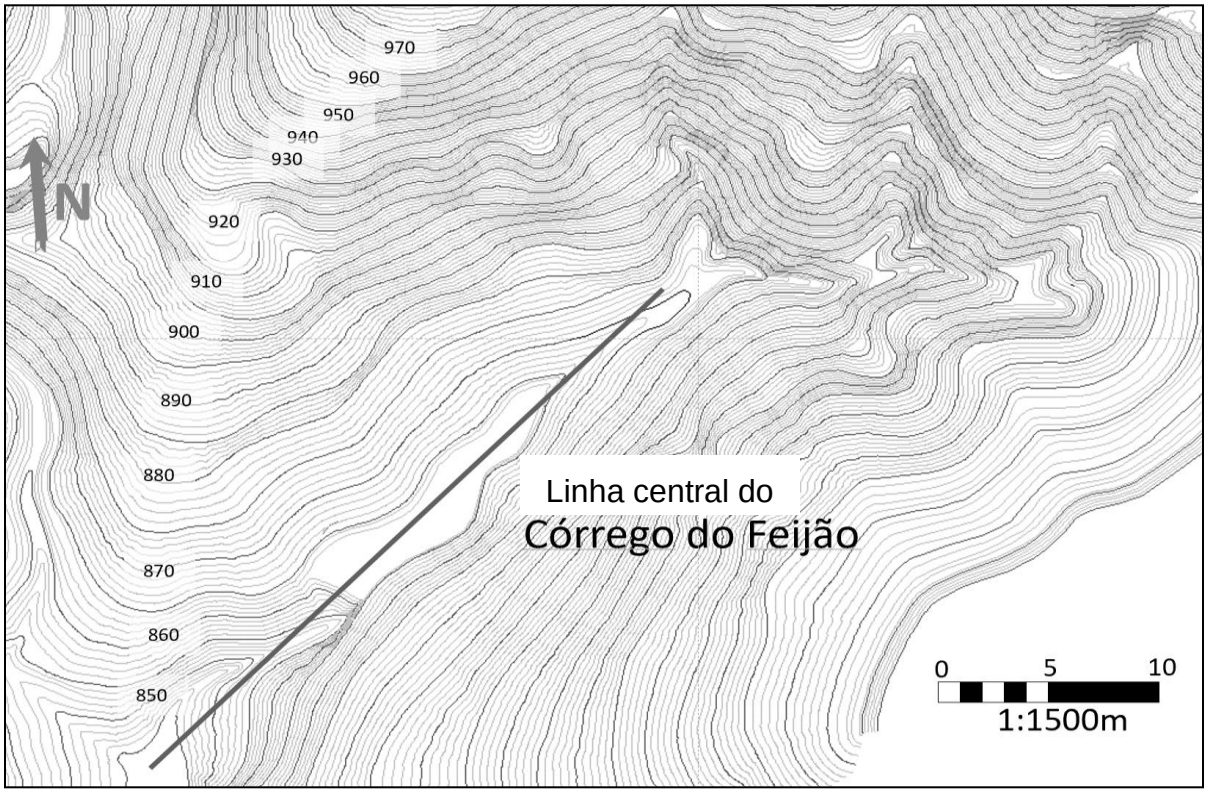


Figura 5: Topografia na área da Barragem I antes da construção[16]

Os documentos descrevem que no local, antes da exploração mineral, havia um riacho no fundo de um vale. O vale é descrito como tendo cerca de 30 m de largura e áreas pantanosas resultantes da inclinação relativamente plana do riacho; esta área é mostrada na Figura 6 ao longo do alinhamento do riacho. As encostas do vale são caracterizadas como cobertas, "sem exceção", por solos densos de "terra vermelha" de laterita com presença elevada de silte. A descrição também sugere que os solos de laterita foram cobertos com uma camada de quartzo intemperisado e minério com espessura inferior a 0,3 m. O local foi caracterizado como adequado para a construção de um represamento porque a superfície estava coberta com solos coesivos de baixa permeabilidade com uma espessura de pelo menos 0,5 m.[17]

Um aspecto importante do local antes do início da exploração foi a presença de um afloramento de rochas duras, conhecido como "Kanga Ridge" e mostrado logo ao sul do "Eixo da barragem" na Figura 6. A formação foi descrita como moderada a pouco fragmentada e permeável.[18] O

[16] Mapa da topografia do arquivo de projeto da Barragem I. Texto e gráficos adicionados pelos autores.
[17] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão).
[18] Documentos de projeto (Tradução em inglês do original em alemão), Erb.

riacho Córrego do Feijão cortou o "Kanga Ridge", de tal forma que o "Kanga Ridge" serviu naturalmente como uma “estrutura de apoio” ao longo da qual a Barragem I seria construída.

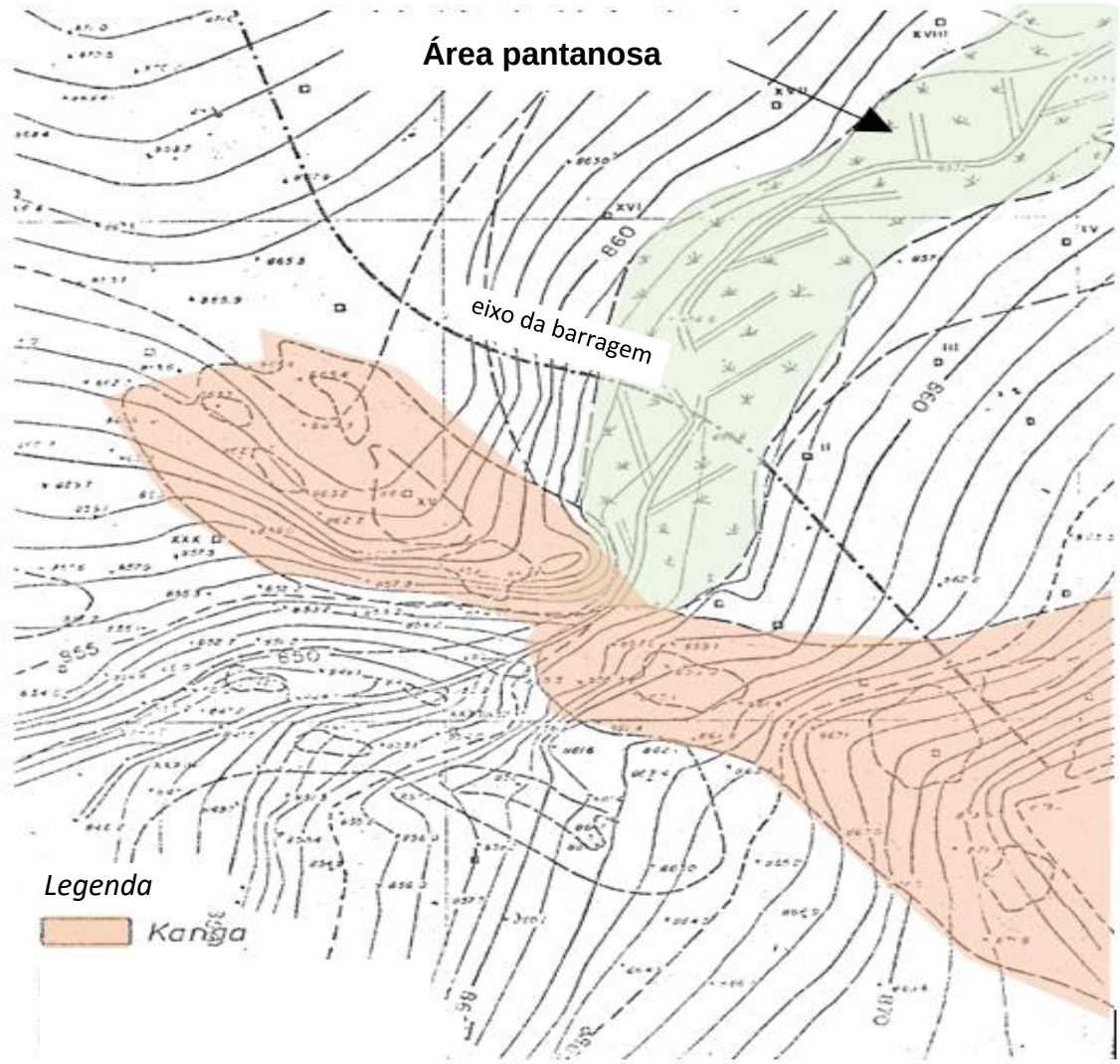
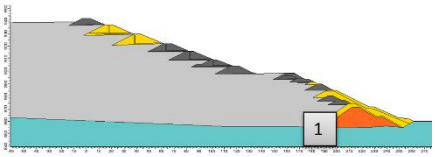


Figura 6: Condições do local antes da construção da Barragem I[19]

[19] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão). As áreas coloridas identificadas na Figura 6 como “Kanga” e “Área pantanosa” foram adicionadas com base nas descrições dos Documentos do projeto da Erb; a figura em si não estava disponível em uma resolução que permitisse correlação entre a legenda e o conteúdo da figura.

5.2 Primeiro Alteamento: Barragem Inicial, 1976



O Primeiro Alteamento (localização mostrada na figura à direita), também conhecido como "Barragem Inicial", foi construído em 1976. A Barragem Inicial foi projetada por Christoph Erb em 1975 para criar uma estrutura com uma altura máxima de 18 m com uma cota de crista de 874 m nmm. Os documentos disponíveis sobre o Primeiro Alteamento não incluem um projeto formal. Entretanto, diversos documentos estão disponíveis que descrevem o projeto e a construção dessa barragem.[20] Em geral, esses documentos incluem descrições das condições do local antes do início da construção (Seção 5.1), o processo de seleção do local e do desenvolvimento do projeto da Barragem Inicial, o *design* da estrutura propriamente dita, e observações feitas durante a sua construção.

5.2.1 Investigações Geotécnicas

Antes da construção da Barragem Inicial, foi realizada uma investigação geotécnica composta por furos de sondagem e ensaios de laboratório de possíveis materiais para a construção da barragem. Os resultados dos ensaios de laboratório disponíveis desses materiais de construção da barragem consistiram em ensaios de granulometria em cinco amostras de "grãos de minério de tamanho de areia" obtidos da operação de processamento da mina de Feijão. Durante a construção, foram perfurados vários furos de sondagem a percussão e escavadas covas rasas na área da Barragem I.[21] Essas investigações geralmente confirmam a caracterização das condições do local antes da construção da Barragem I, conforme descrito na Seção 5.1.

5.2.2 Abordagem do Projeto

O projeto envolveu a construção de uma barragem no leito do riacho Córrego do Feijão e a nordeste do "Kanga Ridge", conforme ilustrado na Figura 6. O projeto incluiu avaliações do sistema de gerenciamento de águas superficiais da barragem, estabilidade, drenagem interna e especificações de construção, conforme descrito abaixo.

---

[20] Documentos do projeto, Erb, Relatórios de inspeção do local (Engesolo 1976).
[21] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão).

5.2.2.1 Geometria

A Barragem Inicial foi projetada para ter uma altura máxima de 18 m e uma crista de 5 m de largura na cota de 874 m nmm. Os taludes a montante foram projetados para ter uma inclinação de 1,5 horizontal para 1 vertical (1,5H: 1V), e os taludes a jusante foram projetados para ter uma inclinação de 1,75H: 1V. Uma camada de aproximadamente 4 m de espessura de solo laterítico foi projetada para o talude a montante da barragem (Figura 7), a qual deveria ser inserida aproximadamente 1,2 m nos solos coesivos naturais localizados no pé da Barragem Inicial para formar uma barreira contra percolação.

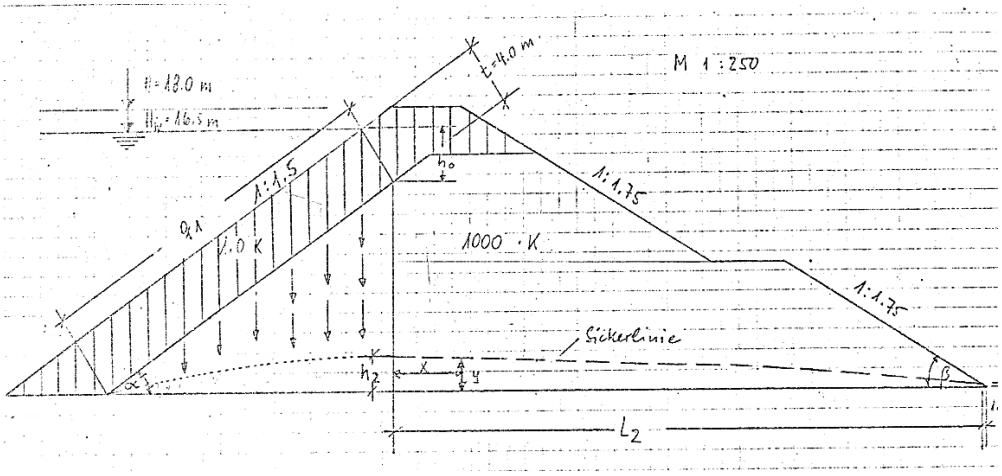


Figura 7: Seção transversal do projeto conceitual da Barragem I[22]

5.2.2.2 Drenagem Interna

O projeto da Barragem Inicial não incluiu nenhum recurso de sistema de drenagem interna. Com relação à capacidade da Barragem Inicial de transmitir percolação, o projetista observou que o baixo coeficiente de permeabilidade de laterita em comparação com a permeabilidade dos rejeitos devia limitar a percolação que poderia ser esperada no corpo da barragem,[23] sugerindo que qualquer percolação que fluísse através da camada de solo de laterita de 4 m de espessura no talude a montante da barragem fluiria através dos rejeitos do corpo da barragem sem acúmulo de água neste. Isso é ilustrado na Figura 7, que mostra a linha freática numa elevação muito baixa da Barragem Inicial. Aparentemente, nenhuma estrutura foi incluída no projeto do pé à jusante da barragem para facilitar a drenagem da percolação a partir do corpo de modo a prevenir problemas de erosão ou *piping*.

---

[22] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão).
[23] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão).

O projeto da barragem também exigiu a construção de uma camada de solo laterítico no talude a jusante. Este recurso foi considerado necessário para reter o assoreamento de rejeitos, para proporcionar uma camada adequada para o crescimento da vegetação e impedir a erosão da face a jusante da berma. Não há registro do projeto ou construção de sistemas de drenagem para conduzir água do corpo da Barragem Inicial através da camada de laterita localizada na face à jusante da barragem.

5.2.2.3 Gerenciamento de Águas Superficiais

O projeto previa a descarga das águas superficiais que adentrassem a área de represamento- tanto pela área de captação quanto pelas tubulações de descarga de rejeito, para o riacho Córrego do Feijão, através de um canal construído no talude noroeste do vale, na ombreira direita da barragem.[24] O canal foi projetado para transportar toda a água que deveria fluir para o represamento. A área de drenagem da área de captação foi estimada em 1.050 km^2, o que teria uma boa correlação com a área estimada em estudos posteriores. O sistema de drenagem superficial consistia em uma berma que foi construída no talude a jusante da barragem a uma cota aproximada de 864 m nmm (10 m abaixo da crista da Barragem Inicial). Além disso, um vertedouro que consistia em um canal trapezoidal de 150 m de comprimento e 3 m de largura e uma inclinação aproximada de 0,2% foi construído na Barragem Inicial, através do qual a água superficial era descarregada do represamento para o leito original do riacho Córrego do Feijão, no pé da barragem.

5.2.2.4 Parâmetros dos Materiais Selecionados

Os parâmetros do rejeito e laterita foram previstos no projeto inicial e estão apresentados na Tabela 2. A Barragem Inicial foi projetada para ser construída com minério "ultrafino" de drenagem livre (ou seja, rejeitos) da mina de Feijão. Os parâmetros previstos para os rejeitos foram baseados em ensaios realizados em amostras da cava de Fábrica, e os parâmetros de laterita foram baseados em amostras coletadas no lago de decantação Forquilha, da cava de Fábrica.

[24] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão).

Tabela 2: Parâmetros de materiais da barragem inicial[25]

Material	Peso específico (kN/m^3)	Ângulo de atrito (°, phi)	Coesão (kPa)	Permeabilidade (m/s)
Minério ultrafino	25	35	0	$1{,}2\times10^{-6}$
Laterita	20	29	30	$1{,}2\times10^{-9}$

5.2.2.5 Estabilidade Geotécnica

A estabilidade geotécnica dos taludes a montante e a jusante da Barragem Inicial foi avaliada. A configuração do projeto foi relatada como estável em condições estáticas com fatores de segurança (FS) de 1,53 ou superior, que foi considerado pelo projetista como em conformidade com a prática referencial de engenharia na época. A importância da compactação de rejeitos e laterita foi discutida nos documentos do projeto e descrita como um requisito para alcançar o nível de estabilidade necessário.

5.2.2.6 Especificações da Construção

As especificações da construção foram fornecidas no texto do relatório do projeto.[26] O relatório especificou requisitos de adensamento para os rejeitos e laterita. O grau de compactação foi especificado em 100% da densidade seca máxima do Proctor normal ("standard Proctor"), exceto no lado a jusante da Barragem Inicial, onde foi considerada aceitável a compactação de 95% do Proctor normal para laterita.

Os documentos do projeto especificaram o seguinte em relação à preparação do local:

- toda a vegetação da Barragem I e áreas adjacentes deve ser removida, incluindo a camada superficial do solo e qualquer material orgânico;
- solos superficiais fracos precisam ser secos e drenados (com valas) antes da limpeza;
- a rocha ao longo do "Kanga Ridge" deve ser limpa e as fraturas na face da rocha devem ser preenchidas com areia para evitar erosão interna; e
- a Barragem Inicial deve ser selada na face a montante com solo de laterita, que é introduzido nos solos dos arredores.

[25] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão); Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.
[26] Documentos de projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão).

Não houve menção a qualquer preparação ou melhoria da base da área de represamento para obter uma permeabilidade específica.

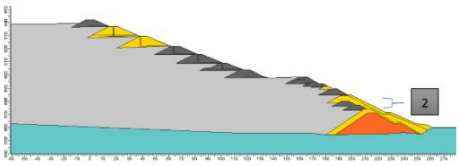
5.2.3 Complicações e Desvios

As informações "As-Built" não estão disponíveis para a Barragem Inicial. Entretanto, os documentos do projeto do Segundo Alteamento, que fornecem um resumo da Barragem Inicial, não identificam desvios do projeto.[27]

Ensaios e inspeções foram realizados durante a construção, que em geral mostram que os resultados dos ensaios relatados atendem aos requisitos das especificações de construção.[28] Nenhuma informação foi fornecida sobre as fontes dos materiais de construção, seus parâmetros, nem se cumpriram ou não os requisitos ou as hipóteses considerados no projeto. Os relatórios de ensaios incluem registros de perfurações a percussão de teste e respectivos ensaios geotécnicos de laboratório. Entre outras coisas, esses relatórios observam:

- a presença de superfície úmida no vale (20 de janeiro de 1976); e
- a performance da compactação do solo ao longo da rocha ("Kanga Ridge") utilizando equipamento mecânico (6 de fevereiro de 1976).

5.3 <u>Segundo Alteamento: Projeto Inicial, 1982 a 1983</u>



O Segundo Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foi construído entre 1982 e 1990. O projeto inicial do Segundo Alteamento previa o aumento da Barragem I em 15 m, da cota 874 m nmm para uma cota de crista de 889 m nmm. Entretanto, depois que a barragem foi elevada para a cota de 892 m nmm, o projeto foi alterado, conforme discutido na Seção 5.4. Nesta seção, apenas o projeto inicial do Segundo Alteamento é discutido. Diversos documentos descrevem o projeto e a construção do projeto inicial do Segundo Alteamento,[29] incluindo (i) os projetos iniciais e revisados, as análises de estabilidade dos taludes e as especificações técnicas da construção;[30] (ii) relatórios da inspeção da construção;[31] e (iii) relatórios de perfuração e ensaios de laboratório

[27] Documentos do projeto, Segundo Alteamento (Tecnosan) ("Documentos do projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan").
[28] Relatórios de inspeção do local (Engesolo 1976).
[29] Documentos do projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
[30] Especificações da construção do Segundo Alteamento, Tecnosan.
[31] Documentos de Inspeção da Construção do Segundo Alteamento.

realizados durante o Segundo Alteamento.[32] O projeto inicial do Segundo Alteamento foi produzido em 1980 pela Tecnosan (discutido nesta Seção 5.3), e um projeto revisado foi produzido em 1983, também pela Tecnosan (discutido na Seção 5.4).

5.3.1 Investigação Geotécnica

Não existe relato de realização de investigações geotécnicas antes do desenvolvimento do projeto inicial do Segundo Alteamento. Entretanto, em 1980, foram realizados ensaios de laboratório em rejeitos para estimar os seguintes parâmetros geotécnicos: peso específico, distribuição granulométrica, parâmetros de adensamento, ângulo de atrito e permeabilidade.[33] Os resultados dos ensaios relatados sobre os rejeitos estão descritos na Tabela 3. Os locais onde essas amostras foram obtidas não foram relatados e, portanto, não se sabe se esses materiais foram planejados para uso como material de construção da barragem. A Tecnosan também menciona os resultados dos ensaios de cisalhamento direto realizados em duas amostras de rejeitos, que relataram ângulos de atrito estimados de 29,5 ° e 31,5 °, mas para os quais nenhum relatório de ensaios de laboratório é fornecido. Mencionam que ensaios de adensamento em laboratório também foram realizados nas amostras de rejeitos, mas os valores dos ensaios não parecem ter sido incluídos nos documentos disponíveis.

Tabela 3: Resultados de ensaios de laboratório em amostras de rejeitos (Segundo Alteamento, projeto inicial)[34]

Amostra	Densidade Real dos Grãos (g/cm^3)	Granulométrica %					Coeficiente de permeabilidade (m/s)
		Argila	Silte	Areia Fina	Areia Média	Areia Grossa	
A	4,90	-	7	90	3	-	$3,43 \times 10^{-6}$
B	5	-	7	85	8	-	$9,47 \times 10^{-6}$

Ensaios de laboratório também foram realizados no material da camada drenante chamado "sinterfeed".[35] O "sinterfeed" foi usado para a construção dos tapetes drenantes subjacentes a muitos dos alteamentos. De acordo com o projeto inicial, os dois estágios que usariam filtros de "sinterfeed" eram o segundo e o quarto estágio do Segundo Alteamento (Figura 8). A Tecnosan forneceu uma curva granulométrica do "sinterfeed" (Figura 9a) e rejeitos (Figura 9b), indicando

[32] Relatórios de Investigação Geotécnica 1 e 2, Pavisolos & Sondag.
[33] A tabela foi modificada dos documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
[34] Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
[35] Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.

que o "sinterfeed" tem uma graduação de areia fina a silte grosso. Entretanto, nenhuma outra descrição do "sinterfeed", nem a localização ou natureza da fonte do "sinterfeed", foram encontradas nos documentos iniciais do projeto do Segundo Alteamento.

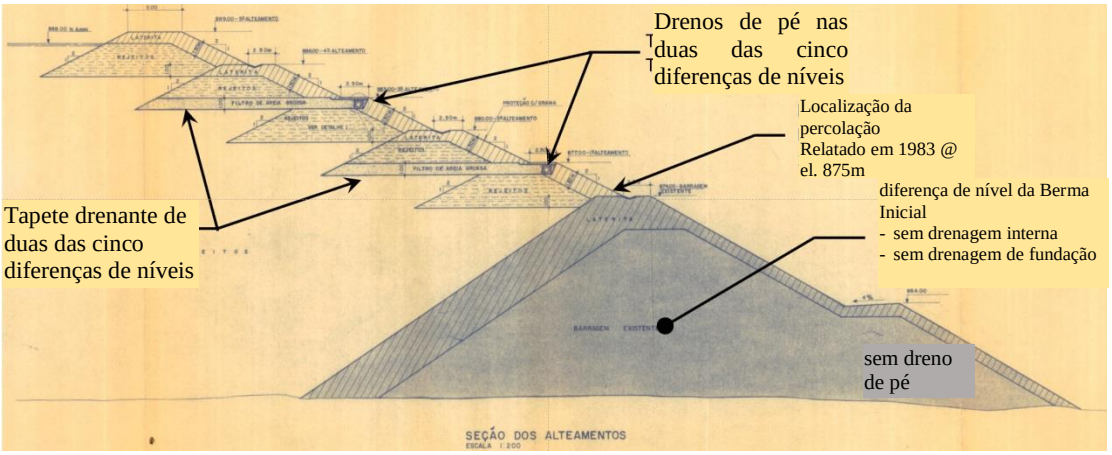


Figura 8: Seção transversal do Segundo Alteamento (Projeto Inicial)[36]

[36] Planta do Segundo Alteamento, Tecnosan. Texto e gráficos adicionados pelos autores.

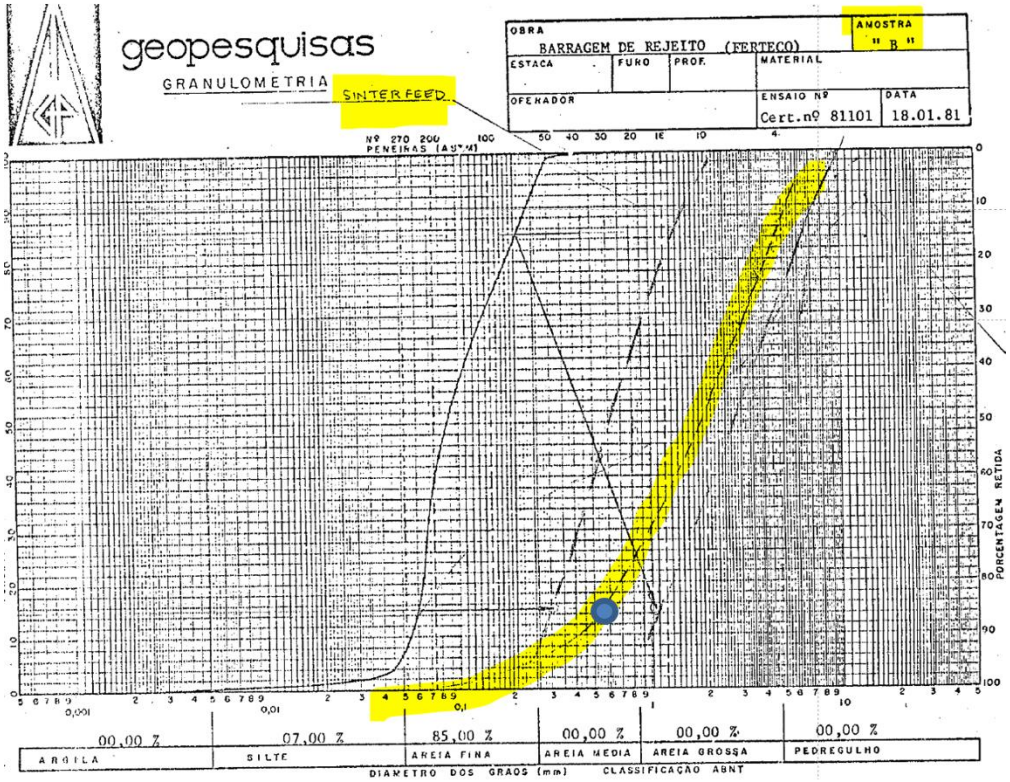


Figura 9: (a) Curva granulométrica de finos de minério[37]

[37] Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan (grifo adicionado).

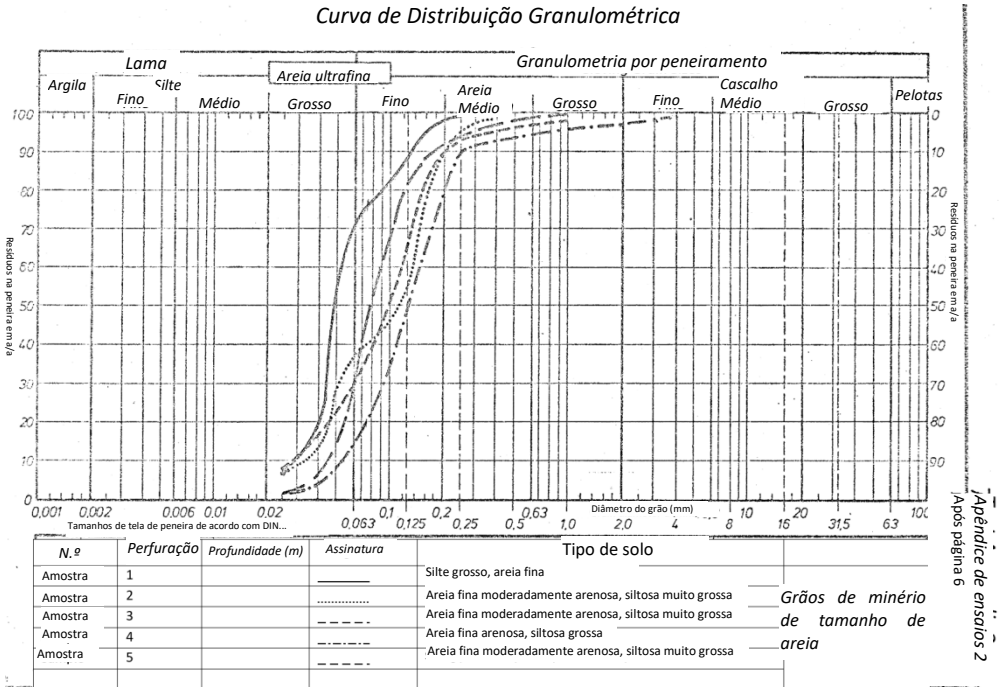


Figura 9b: Curvas de granulométricas de rejeitos[38]

5.3.2 Abordagem do Projeto

O projeto inicial do Segundo Alteamento descreveu uma série de cinco estágios, cada um com altura de 3 m, para altear a barragem a uma cota de crista de 889 m nmm usando o método de construção a montante.[39] A seção transversal do projeto está ilustrada na Figura 8. O projeto inclui estágios construídos com rejeitos grossos compactados, cobertura do talude a jusante com uma camada de laterita compactada de 1,5 m de espessura e inclusão de tapetes drenantes horizontais em dois estágios (ver a discussão sobre drenagem interna na Seção 5.3.2.2). O projeto incluiu o sistema de drenagem de águas superficiais e os vertedouros, a própria barragem e o uso de rejeitos para construção do alteamento. O projeto discute a importância da formação da praia para a estabilidade da barragem e a função da praia na formação de materiais adequados para uso em estágios futuros da construção da barragem.[40]

---

38 Documentos de Projeto, Erb (Tradução em inglês do original em alemão). Observe que a identificação "Areia ultrafina" deriva do documento original e não é um termo usado no sistema de classificação de dimensão dos grãos mencionado na figura subjacente.

39 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.

40 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.

5.3.2.1 Geometria

O projeto inicial do Segundo Alteamento está ilustrado acima na Figura 8. O projeto previa taludes a montante e a jusante da barragem de 2H:1V. Os taludes a jusante foram projetados com um revestimento de laterita adensada de 1,5 m de espessura. Os taludes externos desses estágios deveriam ser compactados sobre o talude da Barragem Inicial, com canais na base de cada estágio. A base dos estágios da berma deveria ser construída diretamente sobre a praia, formada por rejeitos depositados atrás do estágio anterior. O relatório do projeto indica que a praia foi projetada para formar a fundação do estágio sobrejacente.[41]

5.3.2.2 Drenagem Interna

A drenagem interna do projeto inicial do Segundo Alteamento consistiria em filtros horizontais em pedra britada ou "sinterfeed" ("tapetes drenantes") na base do segundo e quarto dos cinco estágios planejados do Segundo Alteamento.[42] Um perfil transversal do Segundo Alteamento, segundo estágio (também indicado na Tabela 1 como o "dique do estágio 3") e o tapete drenante estão ilustrados na Figura 10. O filtro foi projetado para reduzir a pressão hidrostática atrás da Barragem I. Conforme ilustrado na Figura 10, na camada de "sinterfeed" de 50 cm de espessura (isto é, cerca de 18 polegadas), foi especificado um tubo longitudinal que se inclina em direção às ombreiras. Esse tubo parece descarregar em intervalos para os canais de superfície da barragem, mas isso não está claro nos documentos de projeto disponíveis. Esses tubos de descarga parecem se correlacionar com os dispositivos de medidores de vazão, que foram usados para medir as vazões dos drenos (consulte a Seção 7 do Apêndice C para ver a discussão sobre os instrumentos e medições de fluxo de drenos), embora os documentos disponíveis não forneçam uma correlação clara entre esses tubos e a localização de qualquer dispositivo de medição de fluxo de drenagem específico.

---

[41] Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
[42] Especificações da Construção do Segundo Alteamento, Tecnosan.

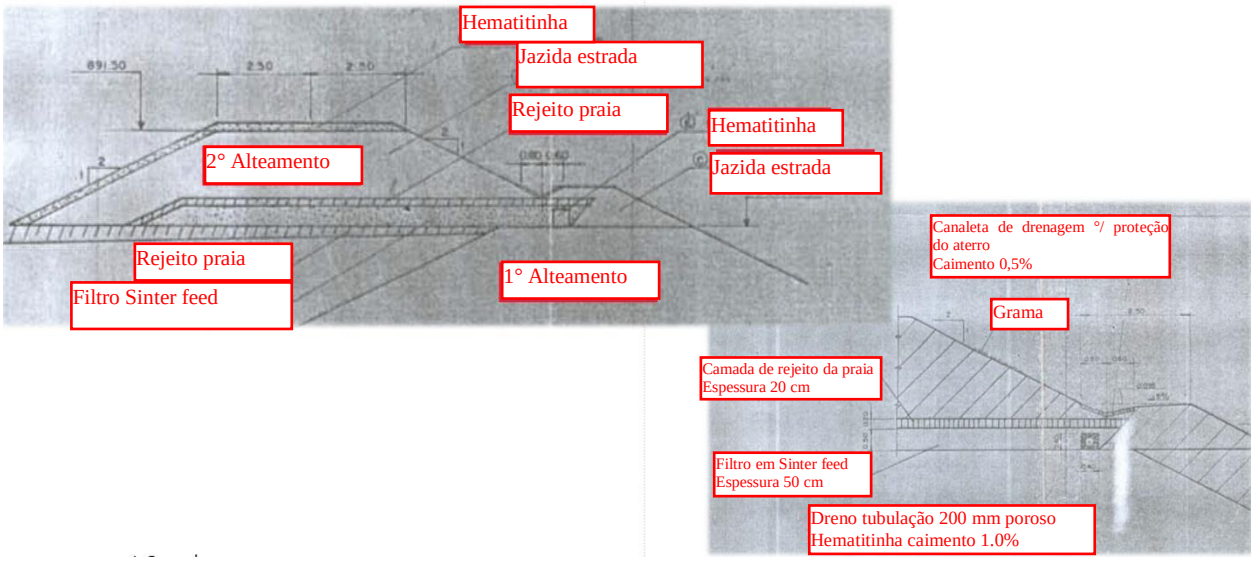


Figura 10: Detalhes da drenagem interna do Segundo Alteamento (Estágio 2)[43]

O projeto incluiu uma avaliação da capacidade do dreno de "sinterfeed" para filtrar o material de rejeitos que seria colocado sobre ele, e cálculos para determinar se o tubo de drenagem filtraria o material agregado (ou seja, hematita) ao redor do tubo. O projeto incluiu cálculos para determinar se o "sinterfeed" atende aos critérios de filtro ($D_{15,"Sinterfeed"} < 5D_{85,Rejeitos}$) da amostra de rejeitos "B". Os resultados dos cálculos mostraram que a amostra atendeu aos critérios do filtro. Entretanto, o cálculo do filtro não foi realizado para a amostra de rejeitos "A", que parece não atender aos critérios de filtro. Outros critérios de filtro (por exemplo, uniformidade, permeabilidade, segregação, correção para a parte mais grossa da peneira #4) não parecem ter sido verificados. A gradação do "sinterfeed" na Figura 9a mostra uma faixa de granulometria de "sinterfeed" aceitáveis, mas nenhum resultado de ensaio de conformidade com essa faixa granulométrica de filtragem foi encontrado nos documentos fornecidos e nenhum estudo representativo da granulometria de rejeitos foi encontrado nesse período. Para o cálculo do filtro de tubo (ou seja, $D_{Furodotubo} < 2D_{85,Itabirito}$), é evidente que o resultado foi uma recomendação de que o agregado deveria ter um diâmetro de 4,8 mm a 12,5 mm, mas a intenção desta recomendação não é clara.[44]

5.3.2.3 Gerenciamento de Águas Superficiais

A construção de um canal para direcionar a água do vertedouro para fora da área de represamento foi discutida nos documentos do projeto inicial do Segundo Alteamento, mas

[43] Imagem do Plano do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan. Texto adicionado pelos autores.
[44] Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.

nenhum projeto formal foi fornecido. Juntamente com a laterita mencionada anteriormente, projetada para proteger o talude a jusante e a crista da barragem, uma camada de grama foi especificada para o talude a jusante, para evitar erosão.[45]

5.3.2.4 Estabilidade Geotécnica

A estabilidade geotécnica do Segundo Alteamento foi avaliada pelo método Bishop.[46] Apenas as condições drenadas foram avaliadas e apenas uma seção transversal típica foi analisada. Os parâmetros de materiais usados no projeto estão descritos na Seção 5.3.1. Uma rede de fluxo foi construída para estimar o nível da superfície freática atrás dos estágios, pressupondo que os rejeitos estavam saturados, exceto onde foram drenados pelos tapetes drenantes discutidos na Seção 5.3.2.2. Parece que a análise pressupôs que não havia superfície freática ou pressão hidrostática na Barragem Inicial. Um FS de 1,7 foi calculado para as análises apresentadas.[47]

5.3.2.5 Especificações da Construção

As especificações da construção do Segundo Alteamento previam uma densidade relativa mínima de 60% para a areia e um grau de compactação mínimo de 97% para a laterita compactada com um teor de umidade de -2/+1% da umidade ótima.[48] Não foram encontradas especificações para os materiais de "sinterfeed", hematita ou itabirito. As especificações formais para os rejeitos da praia não foram fornecidas no projeto, embora a praia tenha sido descrita como um meio para criar uma fração grossa dos rejeitos mais perto da barragem e a praia fosse uma vantagem da construção.[49]

5.3.3 Complicações e Desvios

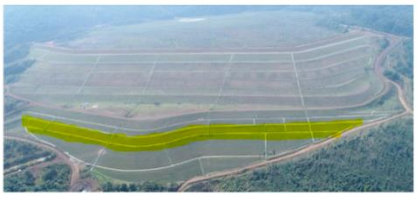
A efetiva construção do Segundo Alteamento diferiu consideravelmente do projeto original. Os dois primeiros estágios do Segundo Alteamento, estágios 2 e 3, foram construídos conforme o planejado, usando o método de construção por montante, conforme especificado no projeto.[50] O estágio 2 elevou a crista da Barragem I da cota 874 m nmm para 877 m nmm e o estágio 3 elevou a crista para a cota 879 m nmm. Foram preparados diversos relatórios de inspeção da construção que documentam certos aspectos de construção das bermas de estágio 2 e 3 (principalmente os ensaios de densidade de campo realizados).[51] Não foi encontrada qualquer

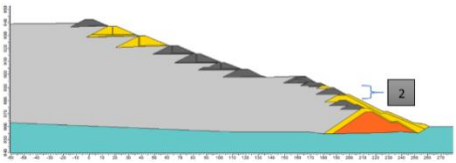
---

45 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
46 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
47 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
48 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
49 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
50 Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.
51 Documentos de Inspeção da Construção do Segundo Alteamento.

informação sobre o controle de qualidade do material (isto é, granulometria dos materiais de origem); especificamente, nenhum ensaio de fase de construção foi fornecido para os materiais de "sinterfeed", hematita ou itabirito usados durante a construção para verificar se atendiam às granulometrias adotadas nos cálculos do projeto. Além disso, não foi encontrada verificação de que o tapete drenante especificado para o estágio 3 foi construído conforme especificado.

5.4 Segundo Alteamento: Projeto Revisado, 1984 a 1990





O projeto do Segundo Alteamento foi revisado após a construção do estágio 3. Os estágios do projeto revisado do Segundo Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foram construídos entre 1984 e 1990. O objetivo do projeto revisado do Segundo Alteamento era elevar a Barragem I em 29 m da cota 880 m nmm a uma cota de crista de 909 m nmm. Na realidade, a barragem foi elevada apenas para a cota 891,5 m nmm como resultado deste projeto. Diversos documentos descrevem o projeto e a construção do Segundo Alteamento revisado, incluindo (i) o projeto revisado, as análises de estabilidade dos taludes e as especificações técnicas da construção;[52] e (ii) relatórios de perfuração e ensaios de laboratório realizados durante os estágios do Segundo Alteamento.[53]

Os documentos revisados não contêm uma discussão específica dos motivos da alteração do projeto. Entretanto, os documentos indicam alguns fatores que poderiam ter sido a base para o projeto revisado:

- Foi detectada percolação na base do estágio 2 após a construção do estágio 3, que foi relatado como concluído em 1983.[54]
- A estabilidade da barragem aparentemente foi considerada uma preocupação antes da construção do estágio 4, pois foi encontrado um documento intitulado "Verificação de Estabilidade".[55]
- Nenhum outro relatório mencionou percolação ou problemas de percolação na Berma de Partida ou nos estágios do Segundo Alteamento durante o período de 1980 a 1983.

---

52 Relatório do Projeto Revisado, Segundo Alteamento (Tecnosan 1983) ("Projeto Revisado do Segundo Alteamento, Tecnosan"); Especificações da Construção do Segundo Alteamento, Tecnosan.

53 Relatórios de Investigação Geotécnica 1 e 2, Pavisolos & Sondag.

54 Relatório Técnico comum / Geral Barragem B1 Avaliação Técnica Complementar – Análise de Estabilidade Sob Carregamento Não Drenado (Geoconsultoria) (Revisão técnica suplementar - Análise de estabilidade em condições de carga não drenada).

55 Verificação da Estabilidade, Segundo Alteamento (Tecnosan 1983) ("Verificação da Estabilidade, Tecnosan").

Relatórios posteriores sugerem "relatos de percolação" na base da Barragem Inicial, mas não contêm detalhes sobre a data de realização desses relatos.[56]

5.4.1 Investigação Geotécnica

Em 1983, foi realizada uma investigação geotécnica composta por 13 perfurações a percussão, numeradas F-1 a F-11, incluindo F-8a e F-9a, com ensaios de penetração padrão ("SPTs") e ensaios de laboratório em amostras coletadas das perfurações.[57] As localizações das investigações de campo estão descritas na Figura 11. A Figura 11 não indica claramente onde ocorreram as perfurações e o texto do relatório geotécnico não esclarece isso. Entretanto, os registros de sondagem sugerem que as perfurações F-1 a F-7 foram realizadas no reservatório de rejeitos e a F-11 parece ter sido realizada na barragem.[58] As localizações das outras perfurações a percussão não são claras.

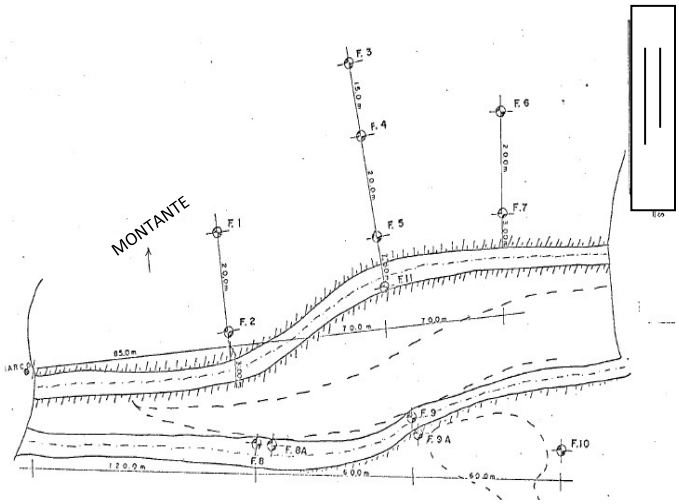


Figura 11: Exploração do local do Segundo Alteamento (Projeto Revisado)[59]

Amostras deformadas de rejeitos foram testadas em laboratório para identificar pesos específicos, teor de umidade, distribuição granulométrica e densidade relativa. Os resultados estão descritos na Tabela 4 abaixo.

---

56 Documentos do Projeto, Quarto Alteamento (Tecnosolo) ("Relatório do Projeto do Quarto Alteamento").
57 Relatórios de Investigação Geotécnica 1 e 2, Pavisolos & Sondag.
58 Registros de Sondagem para Investigação Geotécnica, Pavisolos & Sondag, Relatório 173/83 (Pavisolos & Sondag 1983).
59 Relatório de Investigação Geotécnica 1, Pavisolos & Sondag.

Tabela 4: Resultados de ensaios de laboratório em amostras de rejeitos (Segundo Alteamento, projeto revisado)[60]

Furo de Sonda	Peso Específico Seco no Campo (g/m³)	Relações de Vazios Mínimas	Índice de Vazios no Campo	Umidade Natural (%)	Densidade dos Grãos (g/m³)	Peso Específico Seco Mínimo (g/m³)	Peso Específico Seco Máximo (g/m³)
1	2,361	0,79	1,025	16,1	4,780	2,15	2,675
2	2,329	-	1,020	14,7	4,704	-	-
3	2,481	0,77	0,844	14,4	4,574	2,15	2,579
4	2,388	-	1,096	15,5	4,006	-	-
5	2,359	-	0,901	10,9	4,484	-	-
6	2,402	0,77	0,932	16,6	4,640	2,15	2,614
7	2,380	-	1,011	7,5	4,786	-	-

5.4.2 Abordagem do Projeto

O projeto revisado do Segundo Alteamento previa a construção de um estágio para uma cota superior de 884 m/s por linha de centro, seguido de cinco estágios subsequentes, cada um com 5 m de altura, o que elevaria a crista da barragem para a cota de 909 m nmm usando o método de construção a montante.[61] A abordagem está ilustrada na Figura 12. O projeto previa um tapete drenante na base de cada um dos cinco estágios acima do estágio alteado por linha de centro (ou seja, acima do estágio 4). Embora o conceito e a importância da praia tenham sido discutidos no projeto inicial do Segundo Alteamento,[62] não foram discutidos em nenhum dos documentos do projeto revisado do Segundo Alteamento.

[60] A tabela foi modificada do Projeto Revisado do Segundo Alteamento, Tecnosan.
[61] Projeto Revisado do Segundo Alteamento, Tecnosan.
[62] Documentos do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.

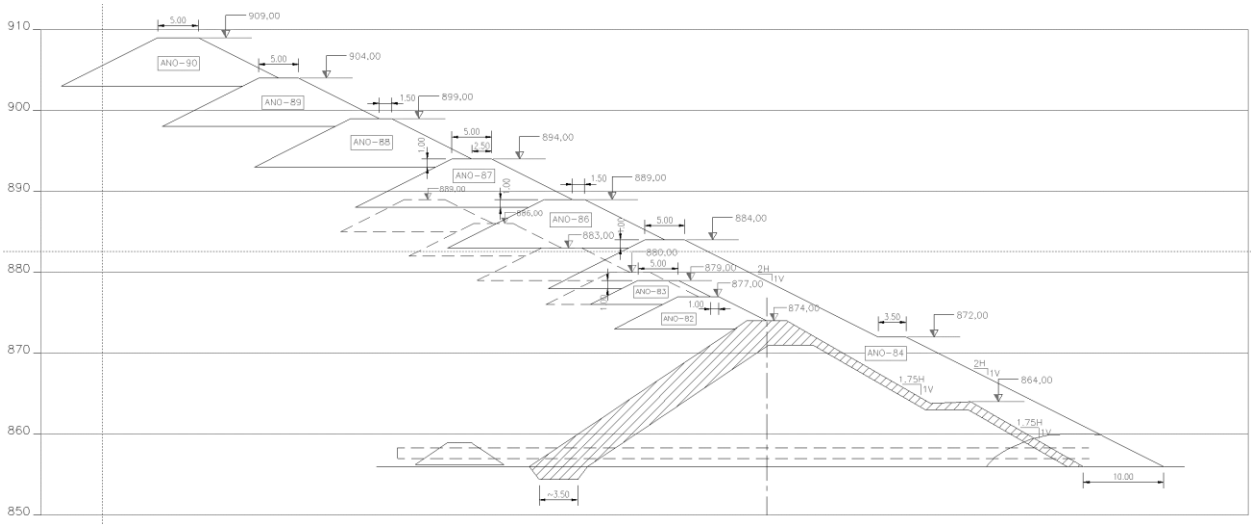


Figura 12: Estágios do Segundo Alteamento revisados conforme projetados[63]

5.4.2.1 Geometria

O layout do Segundo Alteamento revisado conforme projetado está ilustrado na Figura 12 acima. A geometria dos estágios exigia um talude de solo compactado com um talude de 2H:1V no lado a jusante e, aparentemente, um talude semelhante no lado a montante. Aparentemente, um canal foi planejado entre as bermas para gerenciamento das águas superficiais. A geometria do estágio alteado por linha de centro é mostrada como se estendendo ao lado a jusante de todos os estágios inferiores e tendo uma cota de crista de 884 m nmm. As cinco etapas subsequentes foram planejadas com aproximadamente 5 m de altura para elevar a barragem para a cota de 909 m nmm usando rejeitos da praia. Uma face de laterita adensada de 1,5 m de espessura foi planejada nos taludes a jusante das bermas do Segundo Alteamento do projeto revisado com taludes 2H:1V para proteger a barragem contra erosão.

5.4.2.2 Drenagem Interna

O projeto original do Segundo Alteamento especificou um tapete drenante no segundo estágio, mas não há nenhuma evidencia que o tapete drenante foi instalado. O relatório do projeto revisado do Segundo Alteamento, que foi preparado depois da construção do segundo estágio do Segundo Alteamento, indica que cada estágio restante do alteamento deveria ser construído com um tapete drenante na base do estágio, incluindo um tubo longitudinal para conduzir a percolação para as ombreiras. O relatório observa que o objetivo do sistema de drenagem era

63 Arquivo do Projeto do Segundo Alteamento, Tecnosolo.

"...reduzir as pressões atuantes nos diques, elevando assim o fator de segurança contra a ruptura do mesmo...".[64] Não há outra discussão sobre drenagem interna e não encontramos nenhuma ilustração do filtro de drenagem ou dos tubos longitudinais dessas bermas.[65]

5.4.2.3 Gerenciamento de Águas Superficiais

O projeto revisado do Segundo Alteamento incluiu um vertedouro ("extravasor") para drenar a água da superfície dos rejeitos para um canal fora da área de represamento.[66] O extravasor foi especificado para ser feito de concreto, que encaminhava a água para duas galerias de concreto que, presumivelmente, seriam construídas com uma "coffer dam" (não a própria barragem) entre o represamento e o canal que leva ao riacho original a jusante do pé da barragem. Não foi encontrado nenhum plano da localização da coffer dam e da torre de decantação.

5.4.2.4 Estabilidade Geotécnica

A estabilidade geotécnica do projeto revisado do Segundo Alteamento foi avaliada pela Tecnosan no relatório "Verificação de Estabilidade".[67] O relatório forneceu parâmetros de resistência ao cisalhamento dos rejeitos de 0 kg por centímetro quadrado (kg/cm^2) e um ângulo de atrito interno de 30°, mas não fornece citação ou resultado de ensaio para esses valores. Assume-se que laterita e minério fino possuam os mesmos parâmetros aos utilizados para o projeto da Barragem Inicial e não foram reavaliados. As análises foram realizadas manualmente, usando o método Bishop para superfícies de ruptura circular e um simples equilíbrio de forças para as superfícies do bloco, aparentemente assumindo que não haveria nenhuma pressão de água dos poros na barragem ou nos rejeitos.[68] O FS mínimo relatado foi de 1,44, que foi considerado adequado pelo projetista, tendo em vista o período de construção previsto de 1,5 a 2 anos.

5.4.2.5 Especificações da Construção

As especificações para a construção dos estágios do projeto revisado do Segundo Alteamento estão incluídas em um parágrafo do relatório do projeto.[69] A especificação previa uma

---

64 Projeto Revisado do Segundo Alteamento, Tecnosan.

65 Os resultados da modelagem de percolação do Painel sugerem fortemente que a drenagem interna foi de fato instalada dentro do Segundo Alteamento. Veja Apêndice G.

66 Projeto Revisado do Segundo Alteamento, Tecnosan; Imagem do plano do projeto do Segundo Alteamento, Tecnosan.

67 Verificação da Estabilidade, Tecnosan.

68 Ambos os cálculos mostram um local para poro-pressão a ser considerada no cálculo e em ambos os locais os valores estão em branco. Verificação da estabilidade, Tecnosan.

69 Projeto Revisado do Segundo Alteamento, Tecnosan.

compacidade relativa mínima de 60% para a areia e um grau de compactação mínimo de 97% do Proctor para a laterita compactada, com um teor de umidade de -2/+1% do ótimo. Nenhuma discussão ou especificação adicional foi encontrada para os materiais de "sinterfeed", hematita ou itabirito nos documentos do projeto revisado do Segundo Alteamento.

5.4.3 Complicações e Desvios

A efetiva construção do projeto revisado do Segundo Alteamento foi, tal como ocorreu com o projeto inicial, consideravelmente diferente daquela prevista em projeto. A configuração como construída do Segundo Alteamento revisado está ilustrada na Figura 13; o alteamento por linha de centro (estágio 4) foi construído em 1984, em geral como planejado no projeto. O próximo estágio, o estágio 5, foi construído em 1986, com uma altura planejada de 5 m, mas incluía aparentemente uma berma de compensação em toda a face a jusante da barragem; esse recurso não é discutido em nenhum dos documentos disponíveis e, portanto, sua finalidade, detalhes da construção e considerações de drenagem (se houver) não são conhecidas. O terceiro e último estágio do projeto revisado do Segundo Alteamento (estágio 6) foi construído em 1990 e tinha apenas 2,5 m de altura em vez de 5 m de altura.[70]

Não foram encontrados relatórios de inspeção da construção que documentem a construção do estágio 4 e, portanto, não é possível confirmar se os materiais utilizados atendem às especificações exigidas ou se as camadas drenantes foram construídas conforme planejado no projeto. Diversos documentos fornecem informações de inspeção da construção nos estágios 5 e 6. Os três estágios restantes não foram construídos conforme indicado nos planos. Em vez disso, os três estágios subsequentes foram incluídos no projeto planejado para o Terceiro Alteamento, conforme discutido na Seção 5.5.[71]

---

[70] Plano de Engenharia, Terceiro Alteamento (Chammas Engenharia 1991) ("Plano de Engenharia do Terceiro Alteamento da Barragem").

[71] 1986 Ferteco Scans (Exacta 1986) ("1986 Ferteco Scans 1-5").

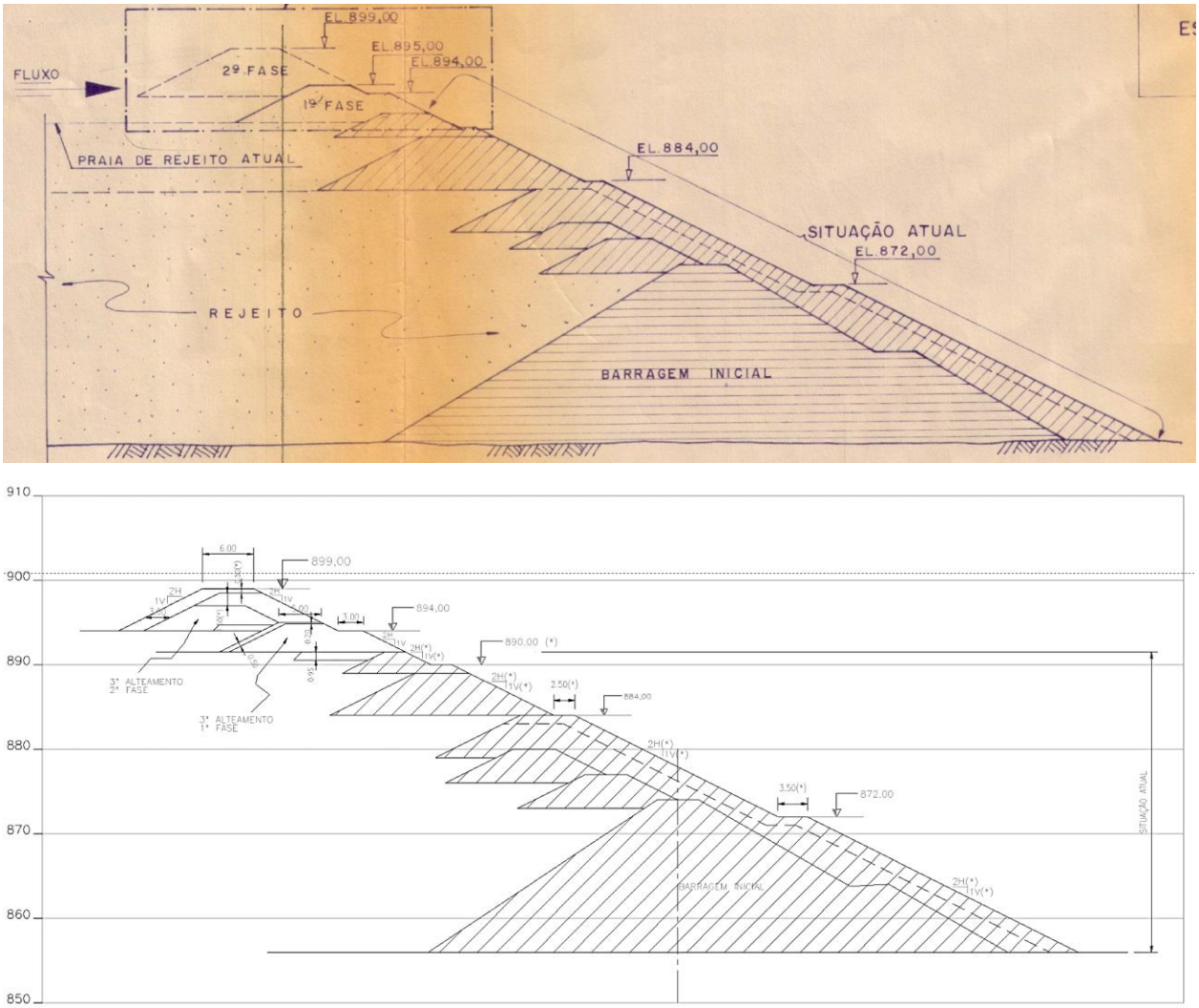
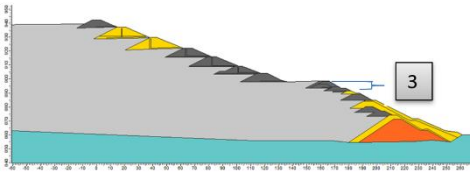


Figura 13: Estágios do Segundo Alteamento conforme construídos[72]

[72] Plano de Engenharia do Terceiro Alteamento da Barragem; Desenhos do Segundo Alteamento, Tecnosolo.

5.5 Terceiro Alteamento: 1991 a 1993



O Terceiro Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foi construído entre 1991 e 1993. O objetivo do projeto do Terceiro Alteamento era elevar a Barragem I em 7,5 m da cota 891,5 m nmm a uma cota de crista de 899 m nmm. As informações disponíveis sobre o Terceiro Alteamento incluem um relatório do projeto e desenhos do projeto da Chammas Engenharia para o estágio 8 do projeto[73]; não há documentos do projeto disponíveis para o estágio 7, nem relatórios de exploração do local ou de inspeção da fase de construção.

5.5.1 Investigações Geotécnicas

O relatório do projeto inclui os resultados das perfurações que foram realizadas para o Terceiro Alteamento. A Figura 14 mostra que as perfurações foram realizadas antes do primeiro estágio do Terceiro Alteamento (estágio 7). Os valores de SPT indicam resistência à penetração variável com profundidade, o que pode indicar tipos de materiais diferentes ou níveis diferentes de compactação do material. Nas ombreiras esquerda e direita (por exemplo, perfurações SP-05 e SP-03), apenas rejeitos foram encontrados acima da profundidade do solo pré-construção. A perfuração a percussão SP-04, que avançou pela crista da berma do sexto estágio (ou seja, a quinta berma do Segundo Alteamento) perto do centro da barragem, supostamente encontrou camadas de rejeitos e material de "aterro" utilizado para construir os estágios da berma subjacente. O relatório também indica que a perfuração encontrou camadas de material de tapete drenante (isto é, "filtro de areia" e "filtro de minério fino") e que a perda de água ocorreu na profundidade do tapete drenante durante a perfuração, sugerindo que os tapetes drenantes mostrados nos desenhos do projeto do Segundo Alteamento foram instalados. Nenhuma informação adicional está disponível sobre o material encontrado nas perfurações.

[73] Documentos Do Projeto, Fase 2 do Terceiro Alteamento (Chammas Engenharia 1993) ("Relatório do Projeto da Fase 2 do Terceiro Alteamento").

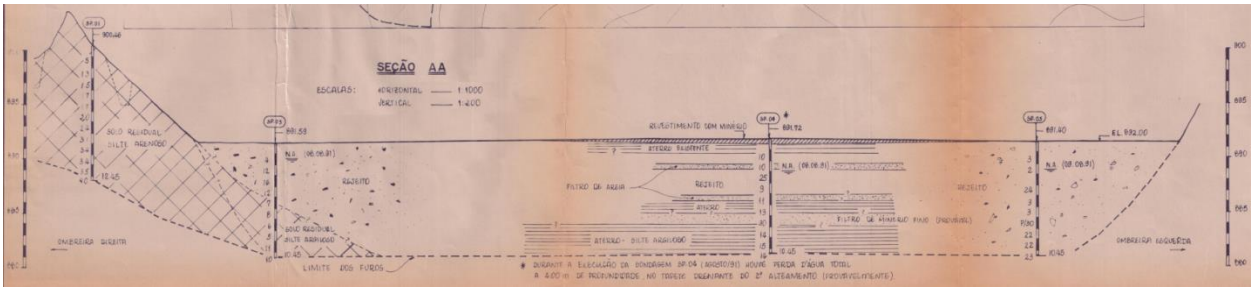


Figura 14: Investigação geotécnica do Terceiro Alteamento[74]

5.5.2 Abordagem do Projeto

O conceito do projeto do Terceiro Alteamento está ilustrado na Figura 15. O Terceiro Alteamento foi desenvolvido em duas fases. A Fase 1 envolveu a construção do estágio 7 e a Fase 2 envolveu a construção do estágio 8. Para a Fase 1, não existe nenhum documento do projeto disponível. Para a Fase 2, foi encontrado um documento do projeto detalhado e desenhos de construção. O documento do projeto observa que o projeto da Fase 2 foi baseado em um projeto da Fase 1 realizado em agosto de 1991 e as informações de construção coletadas durante a construção da Fase 1 de setembro a dezembro de 1991.[75] Os objetivos do projeto da Fase 2 foram relatados como sendo:

- melhorar o projeto e desempenho do extravasor existente, incluindo levantamento topográfico;
- melhorar o acesso à crista da barragem;
- utilizar solos locais para empréstimo;
- substituição dos materiais da camada drenante de cascalho por areia triturada; e
- identificar a instalação de instrumentação para monitorar o desempenho da barragem.[76]

Os desenhos mostram que a Fase 1 consistiu em elevar a crista da barragem da cota 891,5 m nmm para 895 m nmm, e a Fase 2 consistiu em elevar a crista da barragem mais 4 m, para a cota 899 m nmm. Ambas as fases foram projetadas usando a técnica por montante. Os taludes a montante e a jusante foram projetados com taludes 2H:1V com toda (Fase 1) ou parte (Fase 2) da porção externa construída com argila laterita. Rejeitos de granulometria argilosa provenientes do represamento perto da ombreira direita foram especificados para uso onde era previsto rejeitos, e os solos provenientes de uma jazida escavada como parte da Fase 1 foram especificados para

[74] Plano de Engenharia do Terceiro Alteamento da Barragem.
[75] Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.
[76] Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.

serem usados em outros locais. Especificou-se grama para proteger os taludes a jusante contra erosão.[77]

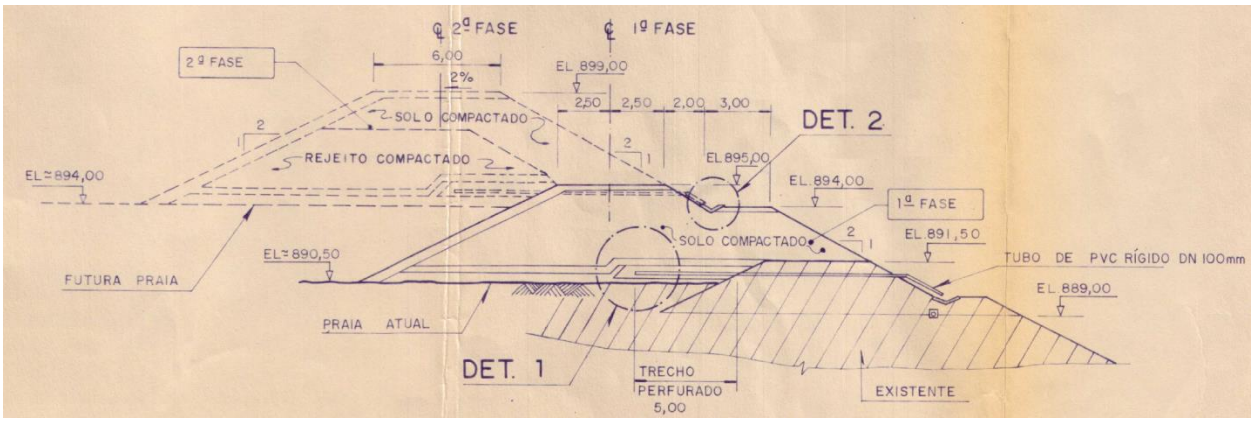


Figura 15: Seção transversal do projeto do Terceiro Alteamento[78]

5.5.2.1 Geometria

Na Figura 15, as Fases 1 e 2 foram projetadas com taludes a montante e a jusante com taludes de 2H:1V, com toda (Fase 1) ou parte (Fase 2) da porção a montante construída com argila. Uma berma de 3 m foi planejada na parte inferior do talude a jusante, onde um canal de drenagem foi construído durante a Fase 1. A crista da Fase 2 da construção foi projetada com um talude a montante de 2% para direcionar a precipitação para o lago de decantação.[79]

5.5.2.2 Drenagem Interna

Os estágios do Terceiro Alteamento foram projetados com recursos de drenagem interna para controlar a percolação. O detalhe do projeto está descrito na Figura 16 e inclui uma camada drenante de 1,5 m de espessura na base dos estágios construídos usando uma camada de transição de "pellet feed" com base formada por um dreno de pé contínuo de cascalho de “sinterfeed” envolto em um geotêxtil (“Bidim OP-20”) que descarregava a água diretamente no canal de drenagem no talude a jusante da barragem. A drenagem da camada drenante deveria ser direcionada do dreno de pé para o canal de descarga usando tubos rígidos de policloreto de polivinila (“PVC”) de 100 mm de diâmetro, instalados a cada 50 m ao longo da praia. Esses

[77] Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.
[78] Plano de Engenharia do Terceiro Alteamento Da Barragem.
[79] Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.

tubos de PVC foram planejados para serem perfurados ao longo da seção embutida na camada drenante.[80]

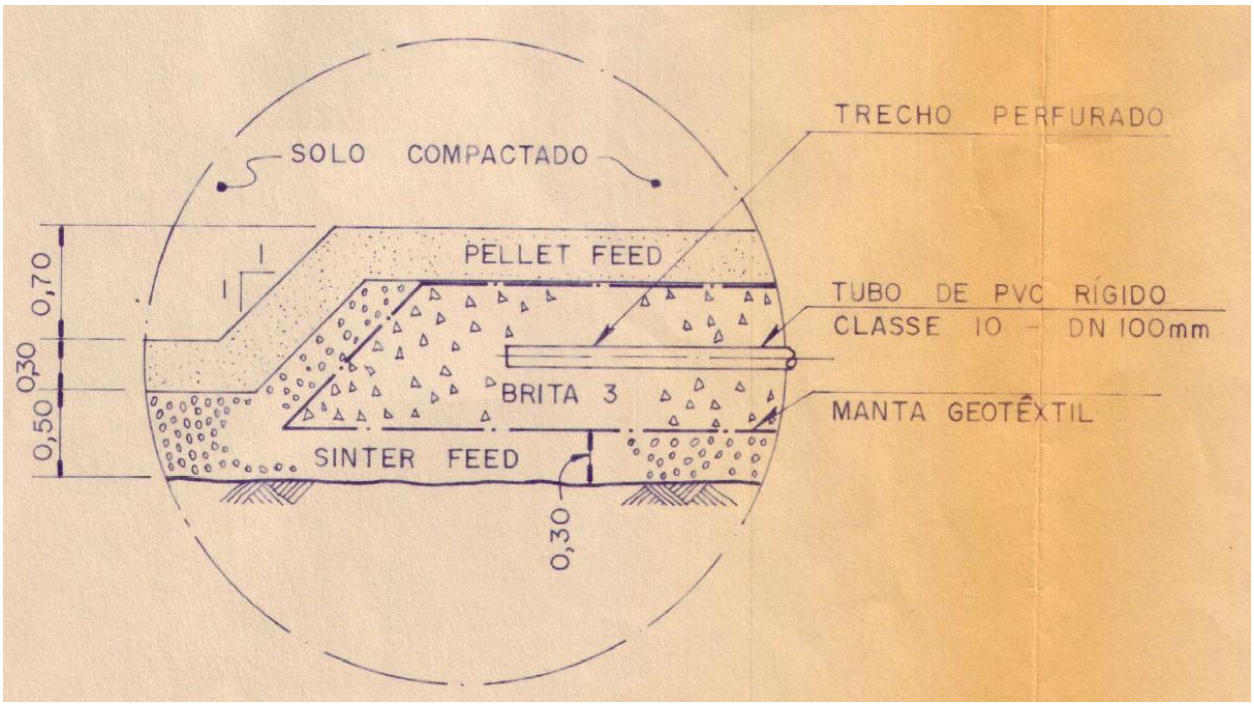


Figura 16: Camada drenante do projeto do Terceiro Alteamento[81]

5.5.2.3 Gerenciamento de Águas Superficiais

O Terceiro Alteamento foi projetado para gerenciamento das águas superficiais, direcionando as águas acumuladas acima dos rejeitos para o riacho Feijão ao redor da ombreira direita da barragem. Não há detalhes disponíveis para o projeto de águas superficiais da Fase 1, mas o projeto da Fase 2 incluiu detalhes significativos sobre a estrutura de controle de drenagem nos rejeitos e o canal de descarga ao redor da ombreira direita. O projeto previa um extravasor retangular em concreto armado de 35 m de comprimento na cota de 897,5 m nmm para direcionar o fluxo para o canal do extravasor da Fase 1 previamente construído. Um canal também foi projetado para proteger os taludes do extravasor da Fase 2 e para evitar a erosão da ombreira direita.[82]

---

80 Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.
81 Plano de Engenharia do Terceiro Alteamento da Barragem.
82 Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.

5.5.2.4 Estabilidade Geotécnica

Não há análises geotécnicas de estabilidade para as bermas do Terceiro Alteamento. A estabilidade dos estágios do Terceiro Alteamento é mencionada, entretanto, no projeto do Quarto Alteamento.[83] As análises de estabilidade descritas nas tabelas do relatório mostram os resultados das análises realizadas para as fases 1 e 2 do Terceiro Alteamento. As análises foram realizadas e resultaram em um FS mínimo de 1,33 para a Fase 1 e um FS mínimo de 1,23 para a Fase 2 (Tabela 5).

[83] Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

Tabela 5: Resultados de análises de estabilidade do projeto do Terceiro Alteamento[84]

Cota Crista da Barragem (m)	Cota de Rejeito (m) NR	Cota Nível D'água No Reservatório (m) NA	FS - Bishop Modificado	FS - Fellenius	Condição	Observações	Data dos Estudos
909	(ND)	(ND)	1,44	(ND)	(1)	(2)	Agosto/1983
891,5	891	891	1,521	1,353	Antes do Terceiro Alteamento	2	ND
895	891	894	1,509	1,344	Após a Construção da Primeira Fase do Terceiro Alteamento, Antes do Lance de Rejeitos		
895	894	894	1,487	1,330	Após a Construção da Primeira Fase do Terceiro Alteamento e Lance de Rejeitos		
899	898	894	1,429	1,235	Após a Construção da Segunda Fase do Terceiro Alteamento, antes do Lance de Rejeitos		
899	898	898	1,408	1,225	Após a Construção da Segunda Fase do Terceiro Alteamento e Lance de Rejeitos		

Observações:
ND Não disponível.
1 Cota máxima da barragem considerada em 1983 (cota 909 m).
2 Pesquisa realizada com superfícies de ruptura tangentes à linha da fundação.

[84] A tabela foi modificada do relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

5.5.2.5 Especificações da Construção

O Relatório do Projeto da Fase 2 do Terceiro Alteamento fornece especificações detalhadas de construção. A Fase 2 foi especificada para ser construída com argila siltosa compactada, advinda da área de empréstimo próxima à barragem, bem como rejeitos localizados na área da ombreira direita do represamento (ou seja, rejeitos finos). A especificação de construção indicava a necessidade de um laboratório de campo que supervisionasse a compactação, bem como levantamento e controle de declividade e supervisão de qualidade da construção. A especificação também indicou a necessidade de verificar se os materiais de drenagem foram construídos com as características especificadas.[85]

As camadas compactadas foram especificadas com uma espessura máxima de 25 cm por camada para áreas a serem compactadas usando equipamento pesado e 15 cm por camada para áreas onde a compactação manual era necessária. Os requisitos de compactação especificavam o teor de umidade em 2% do teor ótimo de umidade (ou seja, +/-2%) e um mínimo de 98% da densidade padrão de Proctor. Uma camada de transição de "pellet feed" foi especificada para ser compactada com um mínimo de 65% da densidade relativa de compactação e deveria atender aos seguintes requisitos de granulometria de filtro:

- $D_{15,\text{transição}} > 5D_{15,\text{material de base}}$
- $D_{15,\text{transição}} < 5D_{85,\text{material de base}}$
- $D_{5,\text{filtro}} > 0{,}74$ mm (ou seja, peneira 200)[86]

Agregados limpos, e sem contaminação, disponíveis de um fornecedor regional foram especificados para as camadas de drenagem. Como alternativa, minério triturado obtido *in loco* poderia ser usado, com a aprovação do engenheiro.

5.5.3 Instrumentação

Como parte da Fase 2, a instrumentação foi instalada para monitorar a Barragem I. O relatório do projeto da terceira fase do alteamento identifica[87] os seguintes instrumentos a serem instalados durante o desenvolvimento da fase 2 do Terceiro Alteamento, ilustrado na Figura 17:

- Piezômetros [88] nos solos de fundação e na barragem;

---

85 Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.
86 Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.
87 Relatório do Projeto de Fase 2 do Terceiro Alteamento.
88 Plano de Instrumentação, Terceiro Alteamento (Chammas Engenharia 1993) ("Plano de Instrumentação do Terceiro Alteamento"). O Plano de instrumentação do Terceiro Alteamento indica que 18 piezômetros seriam instalados, e não 21, conforme descrito no texto do relatório do projeto ou 22, conforme implicado pela numeração dos piezômetros.

- drenos sub-horizontais na camada drenante da Fase 2; e
- marcos topográficos (MS-1 a MS-22)[89] nas bermas localizadas nas cotas 872 m nmm, 884 m nmm, 890 m nmm, 894 m nmm e 899 m nmm.

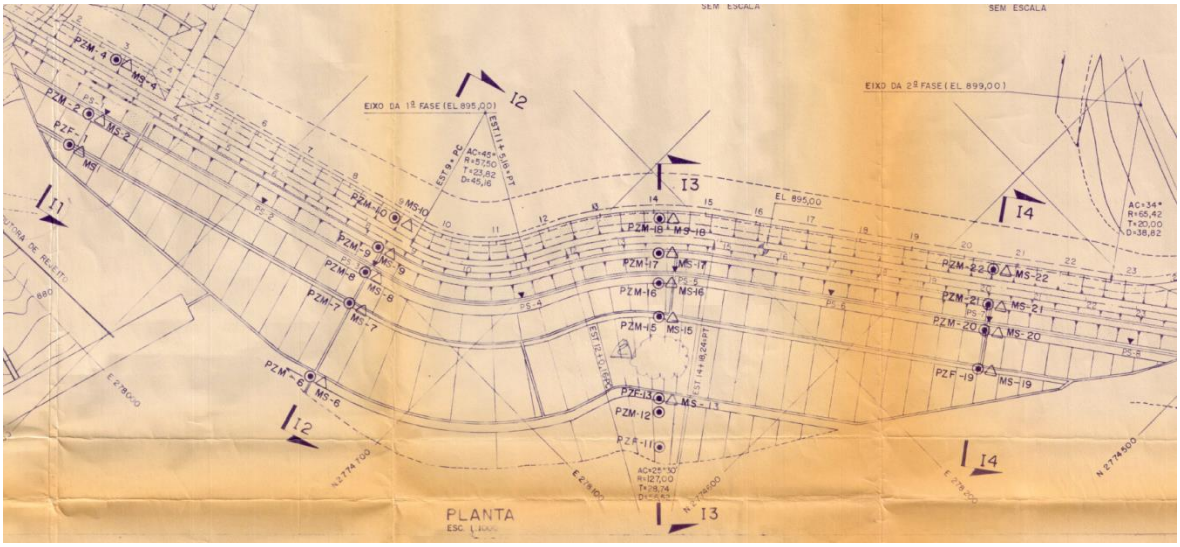


Figura 17: Plano de instrumentação do Terceiro Alteamento[90]

O sistema de instrumentação foi projetado para monitorar as poropressões excessivas, o movimento da barragem e a eficiência da drenagem interna. Documentação do projeto menciona, em particular, que o objetivo dos piezômetros é "...acompanhar o desenvolvimento das pressões intersticiais e definir a superfície freática atual e sua evolução em função dos alteamentos futuros…" e que as drenagens sub-horizontais, "...em associação com os dados dos piezômetros adjacentes [possibilitará] avaliar-se efetivamente o comportamento e desempenho do sistema de drenagem interna da barragem."[91] Um relatório de estabilidade e hidrologia do Quinto Alteamento faz referência a essa instalação.[92]

---

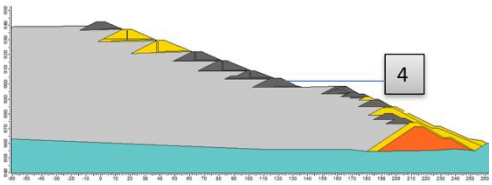
89 Há uma discrepância entre a referência a 18 pontos de observação de superfície no texto do relatório e os 22 mostrados no Plano de instrumentação do Terceiro Alteamento. Ver o Plano de instrumentação do Terceiro Alteamento.

90 Plano de Instrumentação do Terceiro Alteamento.

91 Relatório do Projeto De Fase 2 do Terceiro Alteamento.

92 Relatório de Projeto, Volume 2, Quinto Alteamento (Tecnosolo, 1998) ("Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo").

5.6 Quarto Alteamento: 1995



O Quarto Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foi construído em um único estágio (como os outros seis alteamentos subsequentes). Esse alteamento foi construído depois da construção do Terceiro Alteamento conforme o seu plano original. Entretanto, o Quarto Alteamento representou um desvio do projeto inicial original[93] ao incorporar um recuo na face da barragem, conforme descrito na Seção 5.6.2.1. Há disponível uma quantidade significativa de informações quanto ao Quarto Alteamento, incluindo informações de levantamento, relatórios de projeto, desenhos de construção e especificações técnicas.[94] Os anexos a esses relatórios, incluindo cálculos detalhados, não estão disponíveis. Porém, os resultados das análises do projeto estão disponíveis e resumidos abaixo. Não há documentos da fase de construção disponíveis que descrevam como o Quarto Alteamento foi construído.

5.6.1 Investigações Geotécnicas

O relatório do projeto[95] menciona que foi realizada uma investigação geotécnica para o Quarto Alteamento, mas o apêndice que contém o relatório geotécnico não está disponível. O relatório do projeto também indica que as leituras piezométricas do nível d'água foram coletadas dos piezômetros entre as datas de 20 de junho de 1994 e 6 de junho de 1995,[96] mas não há dados disponíveis sobre a instalação ou leituras desses piezômetros durante esse período.[97]

5.6.2 Abordagem do Projeto

5.6.2.1 Geometria

A geometria da barragem foi alterada significativamente durante o Quarto Alteamento. Como discutido na Seção 5.2.2.5, o alinhamento da barragem foi compensado aproximadamente 4 m a montante do Terceiro Alteamento devido a preocupações de estabilidade. A figura 18 exibe uma seção transversal típica que mostra que os taludes deveriam ter inclinação de 2H:1V[98] a montante

---

93 Projeto Revisado do Segundo Alteamento, Tecnosan.
94 Arquivos do Projeto do Quarto Alteamento, Tecnosolo.
95 Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.
96 Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.
97 No Apêndice C, as datas de dados de piezômetro disponíveis começam em abril de 1996.
98 Arquivos do Projeto do Quarto Alteamento, Tecnosolo.

e a jusante, e deveria ser construído um tapete drenante (denominado "tapete filtrante de sinterfeed" na figura) sob a face jusante da linha de centro da barragem.

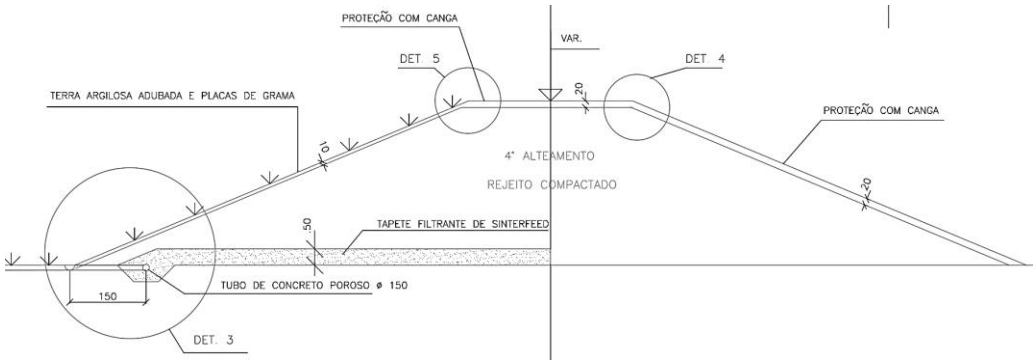


Figura 18: Seção transversal da berma do Quarto Alteamento[99]

As especificações técnicas mencionam que essa camada de filtro deve ser construída usando os rejeitos da praia formada pelo Terceiro Alteamento.[100]

5.6.2.2 Parâmetros dos Materiais Selecionados

Os materiais para construção são descritos no relatório de engenharia e nas especificações técnicas[101] assim como nos desenhos (conforme ilustrado acima, na Figura 18).

5.6.2.3 Drenagem Interna

O sistema de drenagem interna do Quarto Alteamento consistia em uma camada de filtro de "sinterfeed" horizontal na metade a jusante da base da berma. A camada de material filtrante foi alimentada por um tubo de PVC de 150 mm de diámetro, envolto em hematita, no pé a jusante do alteamento. O tubo desviava a água para um canal perimétrico, conforme ilustrado na Figura 19.[102] Não foi fornecido nenhum cálculo de análise de filtração desses materiais nos relatórios disponíveis para revisão, e os locais dos tubos de saída não estão especificados.

---

99 Arquivos do Projeto do Quarto Alteamento, Tecnosolo.
100 Especificações Técnicas, Quarto Alteamento ("Especificações Técnicas do Quarto Alteamento").
101 Relatório do Projeto do Quarto Alteamento; Especificações Técnicas do Quarto Alteamento.
102 Arquivos do Projeto do Quarto Alteamento, Tecnosolo.

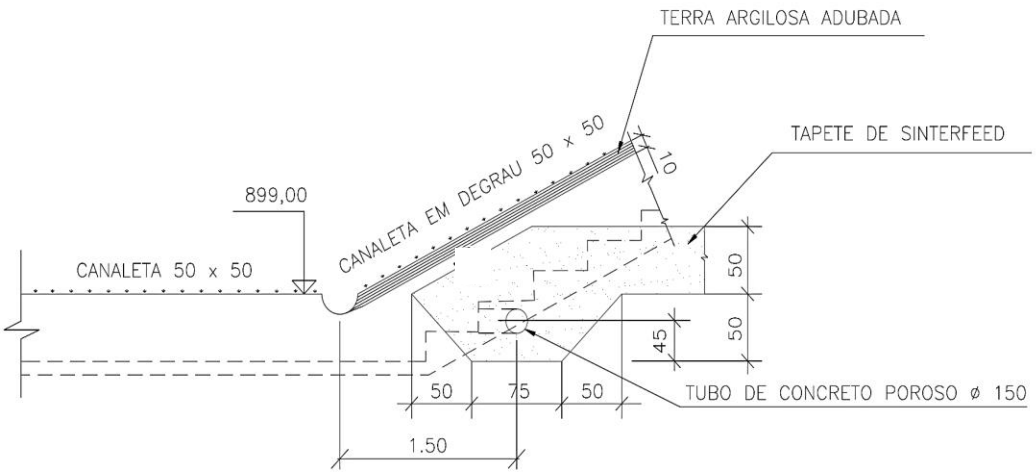


Figura 19: Detalhe do borda do tapete drenante do Quarto Alteamento[103]

5.6.2.4 Gerenciamento de Águas Superficiais

O projeto do Quarto Alteamento incluía uma análise dos fluxos de água que precisariam ser transportados pelo canal usando o método de hidrografia do U.S. Soil Conservation Service (Serviço de Conservação do Solo dos EUA) e um evento de precipitação presumido. Isso foi usado como informação no projeto hidráulico do canal de concreto e dos canais de saída que transportavam água para o riacho a jusante da barragem. Foi construído um canal periférico de concreto como parte do Quarto Alteamento. A água coletada no canal periférico foi transportada ao longo da ombreira direita, para a Barragem VI.[104] Assim como no Terceiro Alteamento, o projeto especificava que o talude a montante do Quarto Alteamento deveria ser protegido por uma camada de laterita compactada e que todos os taludes construídos acima do nível d'água deviam ser protegidos por grama.[105]

5.6.2.5 Estabilidade Geotécnica

Conforme discutido na Seção 5.5.2.1, o relatório do projeto incluiu uma discussão sobre estabilidade geotécnica, mas o relatório detalhado da análise de estabilidade que foi incluído como Anexo 6.2 não está disponível para revisão. O relatório do projeto observa que os

[103] Arquivos do Projeto do Quarto Alteamento, Tecnosolo.
[104] Arquivos do Projeto do Quarto Alteamento, Tecnosolo.
[105] Arquivos do Projeto do Quarto Alteamento, Tecnosolo.

resultados das leituras do piezômetro feitas antes da elaboração do relatório[106] indicaram que eram visíveis percolações na face da barragem:[107]

> "As leituras de nível d'água nos piezômetros, em cotas muito elevadas, mostram condições bastante desfavoráveis, que consideramos como não recomendáveis para a segurança da barragem.
>
> "Durante visita ao local, foi possível observar a ocorrência de percolação (surgência) d'água em alguns pontos do maciço da barragem, em níveis inferiores à cota 875 m (região correspondente à Barragem Inicial)."[108]

O relatório sugeriu que o projeto fosse revisado para solucionar essas questões e que se continuasse o monitoramento piezométrico para avaliar as condições da água na barragem:

> "Os fatores apontados [de segurança] e os reduzidos fatores determinados [de segurança], recomendam sejam tomadas providências urgentes objetivando identificar as causas e melhor definir adequadas soluções para saneamento dos problemas."
>
> "Independentemente das providências acima, recomenda-se continuar o monitoramento do caminho preferencial (percolação) da água através do maciço da barragem, com auxílio dos piezômetros existentes e dos programados para serem instalados (ver esquema no anexo 6.6)."[109]

Foram usados tanto os métodos Fellenius como o Bishop-modificado para avaliar a estabilidade do Quarto Alteamento. O projetista calculou o FS de aproximadamente 1,1 para condições na época do Terceiro Alteamento. O relatório do projeto do Quarto Alteamento afirma que a "análise dos resultados obtidos, nos leva a concluir que os fatores de segurança estão abaixo dos valores que poderiam ser considerados como ideais"[110] (Tabela 6).

---

[106] Os desenhos e especificações do Quarto Alteamento não estão datados. Portanto, a data da preparação não está clara. Há anotação de que os estudos das análises de estabilidade foram realizados em junho de 1995. Logo, pressupõe-se que os relatórios, desenhos e especificações tenham sido emitidos nesse período.

[107] Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

[108] Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

[109] Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

[110] Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

Tabela 6: Resumo da análise de estabilidade do projeto do Quarto Alteamento[111]

Cota Crista da Barragem (m)	Cota de Rejeito (m) NR	Nível d'Água no Reservatório (m) NA	FS - Bishop Modificado	FS - Fellenius	Condição	Observações	Data dos Estudos
899	898	898	1.13	1.07	Após a Construção da Segunda Fase – Terceiro Alteamento e Lance de Rejeitos	1	Junho 1995
905 cota média (eixo deslocado)	903	903	1.13	1.10	Após a Construção do Quarto Alteamento e Lance de rejeitos		
905 cota média (eixo deslocado)	903	903	1.33	1.23	Após a Construção do Quarto Alteamento e Lance de Rejeitos	1	
945 cota média (eixo deslocado)	943	943	1.33	1.22	Barragem Concluída	2	
945 cota média (eixo deslocado)	943	943	1.93	1.87	Barragem Concluída	3	

Observações:

1 Pesquisa realizada considerando as leituras do nível d'água nos piezômetros fornecidas pela Ferteco e também considerando a ruptura na fundação.

2 Supondo que os problemas de instabilidade observados no maciço atual foram resolvidos.

3 Superfície da ruptura que passa pela linha de base criada pelo deslocamento do eixo do Quarto Alteamento (cota de 898 m).

Também foram analisados futuros alteamentos para a cota de 945 m nmm. Como mostra a Tabela 6, essas análises estimaram FS mais elevados entre 1,22 e 1,93.[112] Não há qualquer informação disponível sobre a geometria assumida, sobre as resistências do material ou as condições piezométricas em relação aos casos analisados.

[111] A tabela foi modificada do relatório do Projeto do Quarto Alteamento.
[112] Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

5.6.2.6 Especificações da Construção

Especificações da construção do Quarto Alteamento estão disponíveis.[113] As especificações são de natureza descritiva e apenas são quantitativas em alguns casos específicos. Os materiais de construção deveriam ser obtidos dos rejeitos da Barragem I e da Barragem VI.[114] As camadas para compactação foram especificadas como tendo uma espessura máxima de 20 cm e uma densidade mínima de 100% do Proctor normal e teor de umidade a 2% da umidade ótima,[115] exceto em camadas diretamente acima do filtro planejado, com as seguintes densidades mínimas especificadas (sugerindo entendimento e atenção à importância deste material para o desempenho da barragem):

- primeira camada acima da camada drenante: 90% do Proctor normal;
- segunda camada acima da camada drenante: 93% do Proctor normal; e
- terceira camada acima da camada drenante: 96% do Proctor normal.[116]

O material de sinterfeed exigido para o sistema de drenagem interno foi especificado[117] para ter uma granulometria semelhante à curva de distribuição granulométrica descrita no Anexo 6.1 (que não está disponível para revisão). O relatório não exige especificamente testes de controle de qualidade para distribuição granulométrica ou quantifica o que seria uma gradação "semelhante".

5.6.3 Instrumentação

O documento do projeto indica que, como parte do Quarto Alteamento, seria instalada instrumentação para monitorar a Barragem I.[118] Entretanto, os instrumentos não são identificados no relatório de engenharia, nem nos desenhos ou nas especificações técnicas.

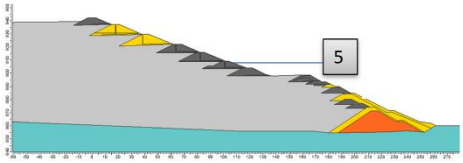
5.6.4 Complicações e Desvios

Os relatórios disponíveis não oferecem qualquer informação sobre a fase de construção da berma do Quarto Alteamento. Entretanto, os documentos do projeto dos alteamentos subsequentes não descrevem nenhum desvio do projeto ou das especificações durante a implementação do Quinto Alteamento. As informações "as built" não estavam disponíveis.

---

113 Especificações Técnicas do Quarto Alteamento.
114 Especificações Técnicas do Quarto Alteamento.
115 Especificações Técnicas do Quarto Alteamento.
116 Especificações Técnicas do Quarto Alteamento.
117 Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.
118 Relatório do Projeto do Quarto Alteamento.

5.7 Quinto Alteamento: 1998



O Quinto Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foi projetado pela Tecnosolo usando o método a montante para elevar a crista da Barragem I em 5 m, para a cota 910 m nmm em um único estágio. Há disponível uma boa quantidade de informações quanto ao Quinto Alteamento, incluindo um relatório do projeto, desenhos de construção, resultados das análises de estabilidade de taludes e hidráulicas, especificações técnicas e um plano de instalação de piezômetros. Os documentos do projeto datam de fevereiro e março de 1998[119] e o alteamento foi construído em 1998. Não há quaisquer anexos disponíveis em relação a qualquer um desses relatórios e, portanto, não há cálculos detalhados disponíveis para revisão, mas os resultados das análises do projeto estão resumidos abaixo. Não há documentos disponíveis da fase de construção que descrevam como o Quinto Alteamento foi construído.

5.7.1 Investigações Geotécnicas

O relatório das análises de estabilidade e hidrologia indica que o projeto foi desenvolvido após revisão das investigações geotécnicas realizadas em 1995 e 1997 pela Tecnosolo,[120] mas esses relatórios não estão disponíveis. O relatório também discute as condições do lençol freático consideradas no projeto.[121] O relatório do projeto descreve as condições da fundação como variáveis na área em que a berma do Quinto Alteamento deveria ser construída, com condições de fundação de baixa resistência perto da ombreira direita e condições de fundação mais firmes perto da ombreira esquerda.

> "No trecho entre a ombreira direita e a estaca 10 + 10m aproximadamente, o assentamento se dará sobre resíduo fofo, saturado ou com elevado grau de saturação. Neste trecho está prevista a implantação de aterro inicial atingindo 2,0 m de altura executado de forma lenta e cuidadosa, com a utilização de equipamentos leves de transporte e espalhamento, sem vibração excessiva […]."[122]

---

[119] Relatório do projeto, Volume 1, Quinto Alteamento (Tecnosolo, 1998) ("Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo"); Relatório de projeto, Volume 2, Quinto Alteamento (Tecnosolo, 1998) ("Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo").

[120] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.

[121] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.

[122] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.

O relatório também indica que no restante da fundação do Quinto Alteamento (ou seja, da estaca 10 + 10 m até a estaca 29 + 10 m) "…a praia [de rejeitos] existente apresenta-se em condições mais favoráveis, podendo o aterro compactado ser implantado a partir da camada de regularização,"[123] sugerindo que a superfície dos rejeitos perto da ombreira direita não apresentava uma praia adequadamente formada.

5.7.2 Abordagem do Projeto

5.7.2.1 Geometria

O projeto do Quinto Alteamento consistia em um estágio que deveria ser construído diretamente adjacente ao Quarto Alteamento e paralelo ao seu alinhamento. Foi projetada uma berma inicial de 4 m de largura por 2 m de altura (Figura 20) em uma seção de 210 m começando na ombreira direita do Quarto Alteamento para mitigar as condições de saturação e baixa compactação descritas na Seção 5.6.1. Esta berma elevava a seção direita do Quinto Alteamento 2 m acima da esquerda.[124]

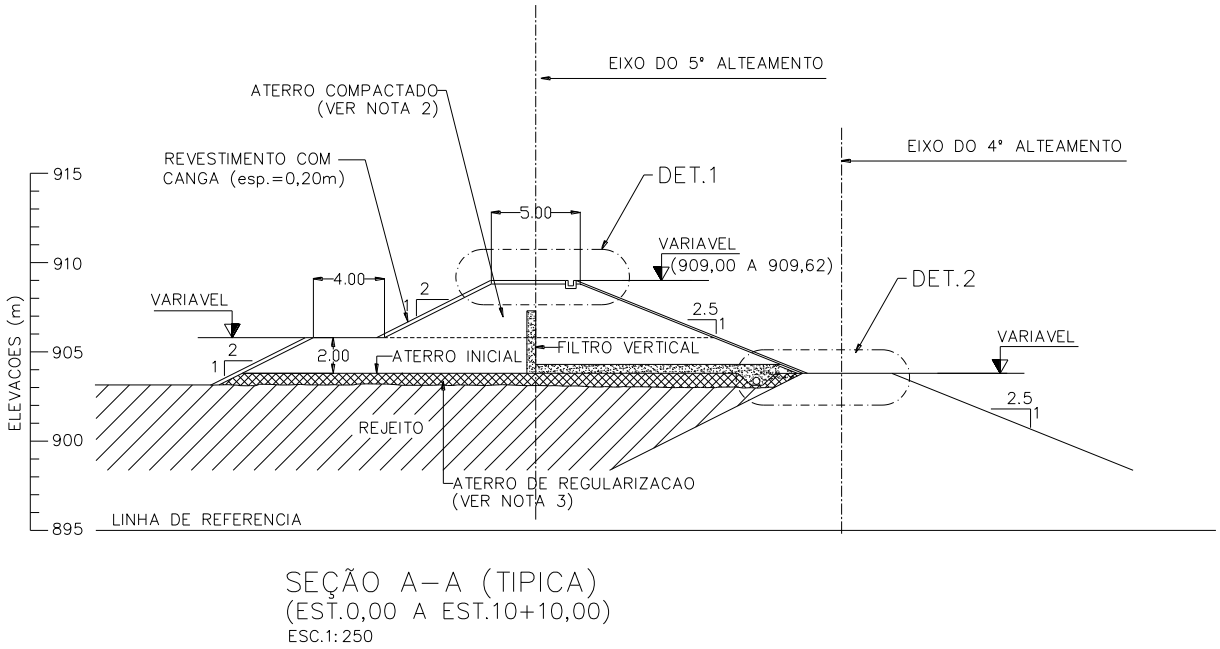


Figura 20: Seção transversal da estação 0,00 – 10+10,00[125]

---

[123] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo
[124] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[125] Arquivos do Projeto do Quinto Alteamento, Tecnosolo.

O Quinto Alteamento foi planejado para ter 5 m de altura com uma crista de 5 m de largura. Foi especificada uma elevação da crista de 911 m nmm perto da ombreira esquerda e de 909 m nmm perto da ombreira direita. A crista foi projetada com um declive de 1% para desviar o escoamento para a bacia de decantação. Os taludes a jusante e a montante deveriam ser construídos a 2H:1V e 2,5H:1V, respectivamente.[126]

5.7.2.2 Parâmetros dos materiais selecionados

As propriedades e parâmetros geotécnicos selecionados para o Quinto Alteamento foram fornecidos no relatório do projeto e são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7: Parâmetros de materiais do Quinto Alteamento[127]

Material	Peso Específico Total (kN/m^3)	Ângulo de Atrito (phi)	Coesão (kPa)	Resistência ao Cisalhamento não drenado (kPa)
Rejeitos lançados/fofos	25	33º	0	20 a 40
Rejeitos compactados	27.5	40º	0	-
Solos argilosos	19	30º	8.5	-
Fundação – Solos residuais	19	30º	8.5	-
Fundação – Solos coluviais	17	25º	15	-

A faixa de resistência ao cisalhamento para rejeitos saturados em condição não drenada foi determinada pelos projetistas através de cálculos retrospectivos, usando a hipótese de que o Quarto Alteamento era estável a um FS assumido. Usando essa abordagem, a resistência ao cisalhamento não drenado foi calculada em 20 kPa para FS assumidos de 1,10 e 25 kPa para FS assumidos de 1,30. Portanto, foi selecionada uma razão de resistência em condição não drenada

[126] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[127] A tabela foi modificada do relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.

(s_u/σ'_v) de 0,22, mas a base para essa escolha é desconhecida.[128] Não foi indicada nenhuma base para a escolha da razão de resistência em condição não drenada; entretanto, foi usada uma resistência ao cisalhamento de 40 kPa para condições de longo prazo nas análises.[129]

5.7.2.3 Drenagem Interna

Os desenhos do projeto indicam um sistema de drenagem interno que consiste em um filtro vertical e um filtro horizontal construídos em L e tubos de PVC. O filtro vertical (0,8 m de espessura) foi planejado dentro do núcleo, começando 1 m abaixo da crista do Quinto Alteamento até os rejeitos, onde seria conectado a um tapete drenante de 0,5 m de espessura (Figura 21). O filtro vertical e o tapete drenante foram projetados para serem construídos usando material sinterfeed. Ao contrário dos documentos anteriores do projeto, o relatório não apresenta qualquer discussão sobre graduação ou filtragem dos diferentes materiais da camada drenante.

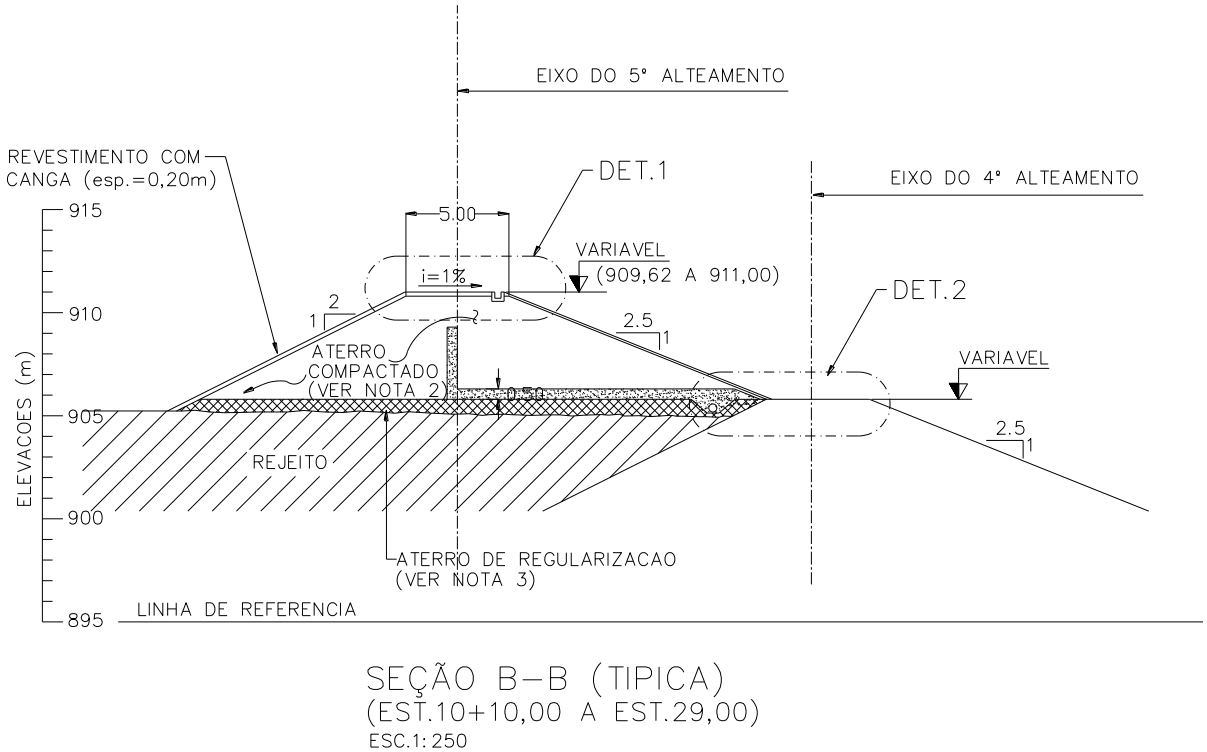


Figura 21: Seção transversal da estação 10+10,00 – 29,00[130]

---

128 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.
129 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.
130 Arquivos do Projeto do Quinto Alteamento, Tecnosolo.

Foi planejada a colocação de tubos de PVC horizontais porosos com diâmetro de 150 mm a cada 50 m ao longo do alinhamento do Quinto Alteamento, posicionados perpendicularmente ao alinhamento. O sistema de drenagem foi projetado para escoar para um canal de concreto armado no pé do alteamento (Figura 22).

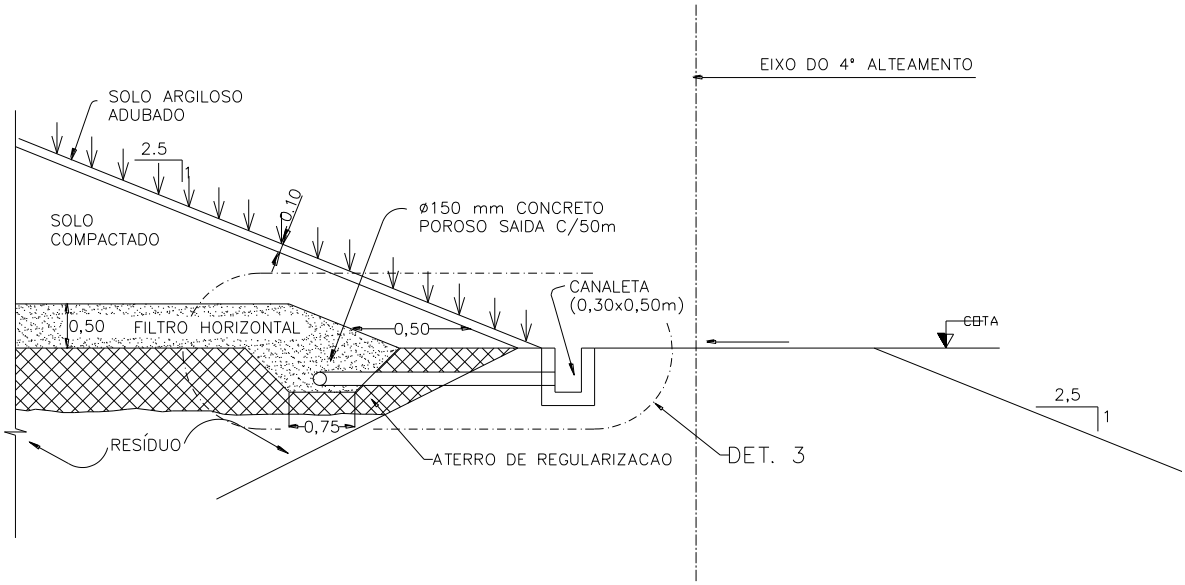


Figura 22: Detalhe típico do despejo de Drenagem[131]

5.7.2.4 Gerenciamento das Águas Superficiais

O sistema de drenagem de superfície foi planejado para ser composto por canais abertos de concreto no pé do Quinto Alteamento, a jusante. Os canais foram projetados para despejar na infraestrutura de drenagem existente do Quarto Alteamento através de um sistema de calhas transversais. Conforme descrito anteriormente para o Quarto Alteamento, o sistema de drenagem foi direcionado para um extravasor descarregando na Barragem VI.[132]

Foi especificada uma camada de 0,2 m de espessura de material compactado (por exemplo, laterita ou hematita) para uso na construção do talude e da crista a montante, para atuar como uma camada de proteção.[133] Foi especificado o uso de grama no talude a jusante, semelhante aos

[131] Arquivos do Projeto do Quinto Alteamento, Tecnosolo.
[132] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[133] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.

alteamentos anteriores, para evitar erosão. Foi planejado um sistema de extravasão na ombreira direita a partir da elevação de 909 m nmm e composto pelo seguinte:

- um canal de perfil trapezoidal com o fundo na cota 907,75 m nmm, largura de 1,5 m e talude de 1H:1V, incluindo uma estrutura de vertedouro de concreto a aproximadamente 200 m do alinhamento do Quinto Alteamento;
- um extravasor de perfil retangular de concreto armado passando sobre a crista da barragem; e
- o canal do Quarto Alteamento existente.[134]

5.7.2.5 Estabilidade Geotécnica

A estabilidade geotécnica foi avaliada usando dados piezométricos para estimar os níveis d'água na barragem e condições piezométricas elevadas, assumindo que a superfície da água atingisse as camadas drenantes internas de cada alteamento.[135] O relatório descreve uma "linha piezométrica desfavorável" usada na análise de longo prazo como a resultante de um reservatório cheio a montante fluindo através dos filtros verticais e tapetes drenantes horizontais;[136] entretanto, os apêndices que aparentemente fornecem as elevações e os dados dessa condição não estão disponíveis. Foram feitas análises da tensão efetiva e total pelo método Bishop, usando o software UTEXAS-3 para estimar o FS. O relatório indica que havia uma possibilidade de liquefação que poderia resultar em uma condição de resistência ao cisalhamento não drenado e[137], portanto, foram consideradas nas análises as condições não drenada e drenada. Foi calculado um FS mínimo de 1,32 para as condições de pré-construção (ou seja, Quarto Alteamento). O FS mínimo do Quinto Alteamento, calculado sob a condição piezométrica "mais desfavorável", foi de 1,22, considerado válido para a região mais saturada perto da área da ombreira direita.[138] Finalmente, foi avaliada a estabilidade da barragem totalmente construída para a elevação de 945 m nmm em operação normal, assumindo condições piezométricas "bastante desfavorável" e com FS mínimo de 1,40.[139]

5.7.2.6 Preparação do Local

Os documentos do projeto do Quinto Alteamento indicam que os seguintes itens deveriam ser inspecionados durante a preparação do local:

---

134 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
135 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.
136 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.
137 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.
138 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.
139 Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 2, Tecnosolo.

- vegetação e material orgânico removidos;
- as áreas das bordas da barragem com taludes maiores que 1H:1V devem ser corrigidas para um talude máximo de 1H:1V;
- a superfície final do depósito de rejeitos deve estar nivelada com a crista do Quarto Alteamento; e
- o material de baixa compactação, fofo, perto da ombreira direita deve ser removido.[140]

5.7.2.7 Especificações da Construção

As especificações da construção do Quinto Alteamento exigem que o alteamento seja construído com solos argilo-siltosos livre de materiais orgânicos e com detritos resultantes de escavações feitas durante a construção do canal de drenagem e das estradas de acesso.[141] Planejou-se complementar o material escavado com rejeitos da praia da ombreira esquerda, se necessário. Os documentos do projeto previam que solos argilo-siltosos fossem usados para as camadas iniciais ao longo de toda a extensão da barragem, com rejeitos para as camadas colocadas posteriormente.[142]

As camadas de compactação foram especificadas para uma espessura máxima de 20 cm, uma densidade mínima de 95% do Proctor normal e uma densidade média de 98% do Proctor normal e teor de umidade a +/-2% do teor ótimo.[143]

Na seção de baixa compactação saturada entre a ombreira direita e a Estação 10+10,00, o projeto inicial da plataforma do solo previa a compactação de camadas horizontais com no máximo 50 cm de espessura por meio de equipamento de espalhamento até alcançar uma altura de 2 m, observando o seguinte: "Neste trecho, a construção da plataforma inicial deverá ser efetuada de forma lenta e cuidadosa, com a utilização de equipamentos leves de transporte e espalhamento, sem vibração excessiva."[144]

5.7.3 Instrumentação

O projeto previa a instalação de marcos superficiais de levantamento e piezômetros[145] para monitorar a fundação e os alteamentos da Barragem I. Os desenhos do projeto mostram que 10

---

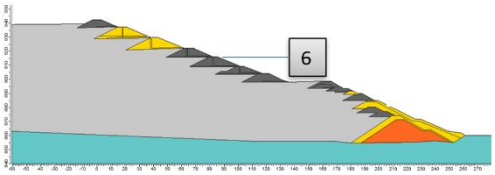
[140] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[141] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[142] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[143] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[144] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.
[145] Relatório do Projeto do Quinto Alteamento, Vol. 1, Tecnosolo.

piezômetros teriam profundidade entre 8 m e 20 m, cinco localizados no topo da barragem e cinco no pé a jusante do Quinto Alteamento.[146] Além disso, foi emitido um plano de monitoramento piezométrico com o projeto do Quinto Alteamento que identificou níveis piezométricos específicos que correspondiam a um FS calculado contra uma ruptura de talude de 1,30 (denominados como níveis de "atenção") e também níveis piezométricos mais altos que correspondiam a um FS de 1,15 calculado contra ruptura do talude (denominados como níveis de "alerta"). O plano também menciona os novos piezômetros a serem adicionados e descreve a importância de manter e monitorar os piezômetros para verificar a estabilidade da barragem e compreender o movimento da água em toda a barragem.[147]

5.7.4 Complicações e Desvios

Como descrito anteriormente, a área a aproximadamente 210 m da ombreira direita foi construída mais lentamente devido à presença de rejeitos de baixa compactação fofos e saturados. Isso exigiu depósito de 2 m de espessura para colmatar os solos de baixa compactação, bem como uma crista mais larga em aproximadamente 4 m, o que resultou na elevação variável da crista do Quinto Alteamento. As informações "as built" para o Quinto Alteamento não estão disponíveis. Portanto, não há informações disponíveis sobre se o subleito foi preparado ou se o lançamento do material de enchimento foi monitorado com qualquer ênfase específica no potencial de instabilidade do subleito. Além disso, não há registros disponíveis que documentem os materiais usados para construir a camada do leito drenante e sua rota de despejo.

5.8 <u>Sexto Alteamento: 2000</u>



O Sexto Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foi projetado pela Tecnosolo e consistia em um estágio para elevar a crista da Barragem I em 6,5 m para a cota 916,5 m nmm ao longo do alinhamento do Quinto Alteamento. Os documentos do projeto disponíveis indicam uma abordagem que se assemelha bastante ao do Quinto Alteamento. As informações disponíveis incluem desenhos do projeto, relatórios de análise de estabilidade e hidrologia, números de análise de estabilidade e um relatório de laboratório dos resultados dos testes de rejeitos da praia. Foram fornecidos e estão resumidos abaixo o

[146] Arquivos do Projeto do Quinto Alteamento, Tecnosolo.
[147] Plano de Monitoramento Piezométrico, Quinto Alteamento (Tecnosolo, 1998) ("Plano de Monitoramento de Piezômetro do Quinto Alteamento, Tecnosolo").

texto do relatório de cálculo de estabilidade[148] e seus resultados.

5.8.1 Investigações Geotécnicas

Foram realizadas quatro sondagens (SP-01, SP-02, SP-03 e SP-04) e foram coletadas amostras para testes de laboratório.[149] As amostras foram caracterizadas e foram realizados os seguintes testes: compactação, cisalhamento direto, permeabilidade, compressão triaxial não consolidada não drenada (UU). Foram usadas as medições do nível d'água do Quinto Alteamento e das SP-01, SP-02, SP-03 e SP-04 para estimar os níveis d'água aplicados durante as avaliações de estabilidade de taludes.[150]

5.8.2 Abordagem do Projeto

5.8.2.1 Geometria

O Sexto Alteamento foi planejado para ter 6,5 m de altura com uma crista de 5 m de largura. Foi especificada uma elevação de crista de 916,5 m nmm. Os taludes a montante e a jusante foram construídos em 2H:1V e 2,5H:1V, respectivamente, conforme mostrado na Figura 23.

[148] Relatório do Projeto, Sexto Alteamento (Tecnosolo, 2000) ("Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo").
[149] Quadro de Resultados de Ensaios, Sexto Alteamento.
[150] Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.

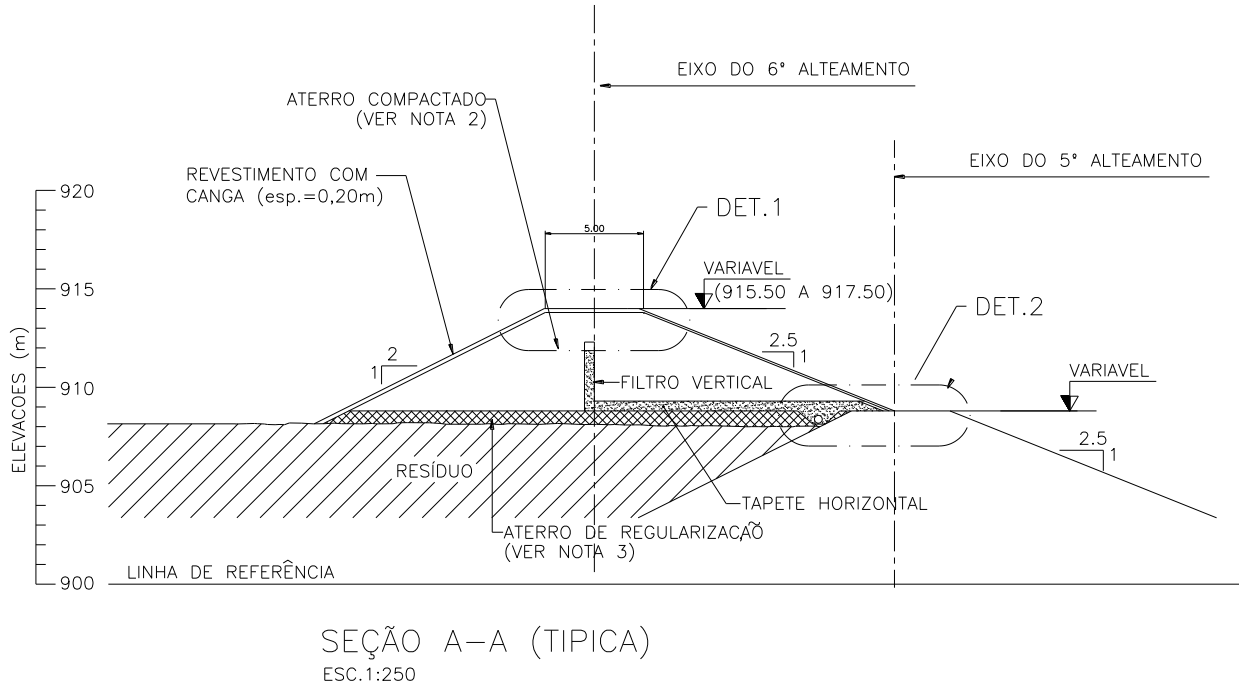


Figura 23: Seção transversal do Sexto Alteamento[151]

5.8.2.2 Parâmetros dos Materiais Selecionados

Os testes de laboratório realizados para o Sexto Alteamento ofereceram resultados de peso específico e coesão que foram considerados diferentes se comparados aos resultados de alteamentos anteriores e testes realizados anteriormente e não confiáveis; portanto, estes não foram utilizados nas análises do Sexto Alteamento.[152] Ao invés, a Tecnosolo optou por usar parâmetros selecionados anteriormente, resumidos na Tabela 8.

A resistência ao cisalhamento não drenado para rejeitos saturados foi calculada em 25 kPa e 30 kPa, respectivamente, por cálculo retroativo, assumindo um FS do Quinto Alteamento entre 1,10 e 1,30. Para análises de longo prazo, foi assumida uma razão de resistência não drenada (s_u/σ'_v) de 0,22. Foi usada uma resistência ao cisalhamento de 50 kPa para análises de longo prazo descritas como resistência da camada média. Não foi fornecida nenhuma outra base de cálculo para a escolha dos parâmetros de resistência não drenada.[153]

---

151 Arquivos do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
152 Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
153 Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.

Tabela 8: Parâmetros de materiais do Sexto Alteamento[154]

Material	Peso Específico Total (kN/m^3)	Ângulo de Atrito (phi)	Coesão (kPa)	Resistência ao Cisalhamento não Drenado (kPa)
Enchimento com solo argiloso	19	30º	8,5	-
Rejeitos – compactado	27,5	40º	0	-
Rejeitos – compacto médio	27	39º	0	-
Rejeitos –fofo a pouco compactado	26	37º	0	50
Rejeitos (resíduo) – pouco compactado	26	38º	0	70
Rejeitos – fofo	25	36º	0	30
Solos residuais	19	30º	8,5	-
Solos coluviais	17	25º	15	-

5.8.2.3 Drenagem Interna

Os desenhos do projeto indicam o uso de um sistema de drenagem interno semelhante ao sistema do Quinto Alteamento, composto por um filtro vertical, manta drenante e tubos de PVC. O filtro vertical (0,8 m de espessura) foi planejado dentro do núcleo, começando 1 m abaixo da crista do Quinto Alteamento até os rejeitos, onde seria conectado a uma manta drenante de 0,5 m de espessura, criando um filtro de drenagem interno em forma de L. O filtro vertical e a manta drenante foram projetados para serem construídos usando sinterfeed.

Foi planejada a colocação de tubos de PVC horizontais perfurados com um diâmetro de 150 mm a cada 50 m, que seriam colocados perpendiculares ao Quinto Alteamento e direcionariam a água para uma calha de concreto armado no pé do alteamento (Figura 24).[155]

[154] A tabela foi modificada do relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
[155] Arquivos do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.

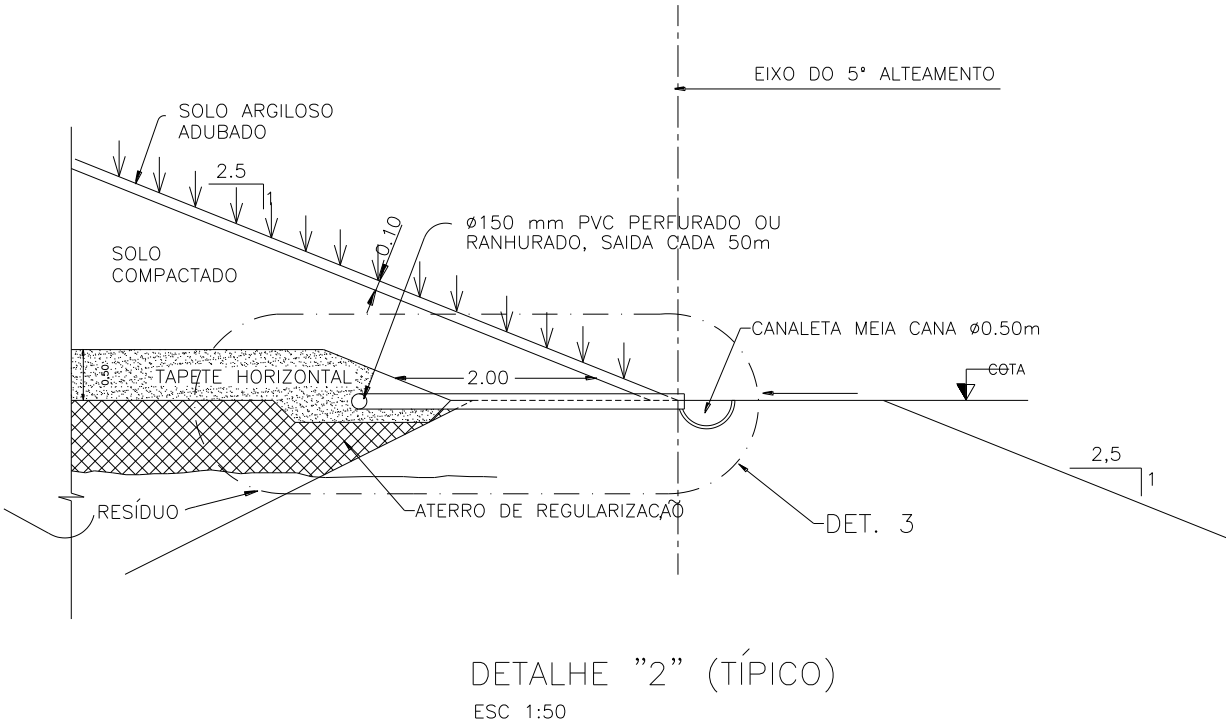


Figura 24: Detalhe da drenagem interna e gestão de águas superficiais[156]

5.8.2.4 Gerenciamento de Águas Superficiais

O sistema de drenagem de águas superficiais do perímetro foi projetado para direcionar a extravasão para a Barragem VI, tal como no quarto e Quinto Alteamentos (Figura 24). O relatório do projeto descreve em detalhes os estudos de hidrologia realizados para avaliar as condições que o sistema de águas superficiais foi projetado para gerenciar. O relatório usa como base do projeto a frequência de retorno de eventos de tempestade de 1.000 anos (ou seja, pico de vazão, Q_1 = 1.458 m³/s), bem como uma taxa de vazão assumida pelo bombeamento de rejeitos para o reservatório (ou seja, Q_2 = 0,222 m³/s) resultando em um pico de vazão total (Q) de 1.680 m³/s.[157]

[156] Arquivos do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
[157] Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.

5.8.2.5 Estabilidade Geotécnica

As análises de estabilidade geotécnica do Sexto Alteamento foram realizadas usando os métodos Bishop e Janbu implementados no programa XSTABL para condições de curto e longo prazo (isto é, não drenadas e drenadas). A abordagem é semelhante à utilizada para o Quinto Alteamento, onde os valores de resistência ao cisalhamento não drenado foram estimados por cálculo retroativo, assumindo um certo nível de estabilidade para essa condição existente. Para o Sexto Alteamento, entretanto, as resistências ao cisalhamento foram aumentadas em aproximadamente 15% com base em observações das condições existentes do Quinto Alteamento e na expectativa de que as resistências ao cisalhamento provavelmente seriam maiores do que o assumido no documento do projeto do Quinto Alteamento.[158]

As análises de estabilidade fornecidas para o Sexto Alteamento incluíram cálculos de FS para o Quinto Alteamento existente, o Quinto Alteamento após a construção do Sexto Alteamento, e do Sexto Alteamento. O Quinto Alteamento existente calculou FS de 1,46 e 1,26 para superfícies piezométricas normais e elevadas, respectivamente. Os FS do Quinto Alteamento, assumindo que o Sexto Alteamento fora construído e estava cheio, foram calculados como 1,38 e 1,27 para superfícies piezométricas normais e elevadas, respectivamente. O FS do Sexto Alteamento foi calculado como 1,46 e 1,39 para superfícies piezométricas normais e elevadas, respectivamente. A estabilidade da altura final da barragem (ou seja, para elevação de 945 m nmm) também foi avaliada em diversas condições, com um FS calculado de 1,46 para condições favoráveis do lençol freático e 1,39 para condições desfavoráveis do lençol freático.[159]

As análises de estabilidade do Sexto Alteamento reconhecem a presença de condições piezométricas altas, o impacto de condições piezométricas altas no FS calculado, o efeito crítico de ter uma zona com formação adequada de material de drenagem (por exemplo, praia) atrás da barragem e a sensibilidade dos resultados da análise de estabilidade não drenada para o valor da razão da resistência ao cisalhamento não drenado. As análises usaram hipóteses dos níveis piezométricos, natureza e extensão da praia e resistências ao cisalhamento não drenado dos materiais de rejeitos e bermas. O relatório reconheceu que o FS era inferior ao exigido (isto é, $FS_{exigido} \geq 1{,}5$)[160] e observa que poderia ser alcançado um FS superior a partir de condições piezométricas mais baixas.[161]

[158] Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
[159] Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
[160] Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
[161] Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.

5.8.2.6 Especificações da Construção

Não há especificações técnicas disponíveis sobre a construção do Sexto Alteamento.

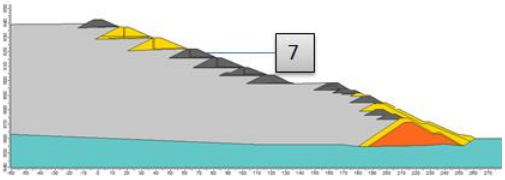
5.8.3 Instrumentação

O projeto previa a instalação de 10 piezômetros durante o Sexto Alteamento para monitorar a Barragem I.[162] O relatório do projeto do Sexto Alteamento também examina o monitoramento e os níveis d'água nos poços existentes para os quais o FS calculado contra ruptura de talude seria 1,30 ou 1,15.[163]

5.8.4 Complicações e Desvios

Não se observou qualquer complicação nos relatórios emitidos após o projeto do Sexto Alteamento.

5.9 Sétimo Alteamento: 2003



O Sétimo Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foi projetado pela Tecnosolo e consistia em um estágio para elevar a crista da Barragem I em 6 m para uma elevação média de 922,5 m nmm (elevação de 921,5 m nmm e 923,5 m nmm, nas ombreiras direita e esquerda, respectivamente).[164] Os documentos do projeto indicam avaliações semelhantes às realizadas para o Sexto Alteamento. As informações disponíveis incluem relatórios de análise de estabilidade e hidrologia, números de análise de estabilidade, atas das reuniões da fase de construção e desenhos da berma "as built". Foi fornecido um relatório de cálculo de estabilidade,[165] juntamente com ilustrações que mostram os resultados das análises de estabilidade.

---

162 Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
163 Relatório do Projeto do Sexto Alteamento, Tecnosolo.
164 Relatório de Estabilidade, Sétimo Alteamento (Tecnosolo 2001) ("Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo").
165 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.

5.9.1 Investigações Geotécnicas

Foram realizadas três sondagens SPT (SP1, SP2 e SP3) e testes geotécnicos para estimar os parâmetros do solo do Sétimo Alteamento.[166] A subsuperfície a montante da área da praia foi caracterizada por 5 m de rejeitos finos (arenoso, como areia siltosa) de densidade média sobrepostos por uma camada protetora de siltes argilosos com base formada por uma camada de rejeitos com granulometria de areia, de 10 a 20 m de espessura com compactação fofa a média.[167]

5.9.2 Abordagem do Projeto

5.9.2.1 Geometria

O Sétimo Alteamento foi projetado como um estágio único de 6 m de elevação de 916,5 m nmm a 922,5 m nmm (Figura 25). A elevação superior da ombreira direita (ou seja, elevação de 921,5 m nmm) do alteamento foi especificada para ser 2 m mais baixa que a ombreira esquerda (ou seja, elevação de 923,5 m nmm).[168]

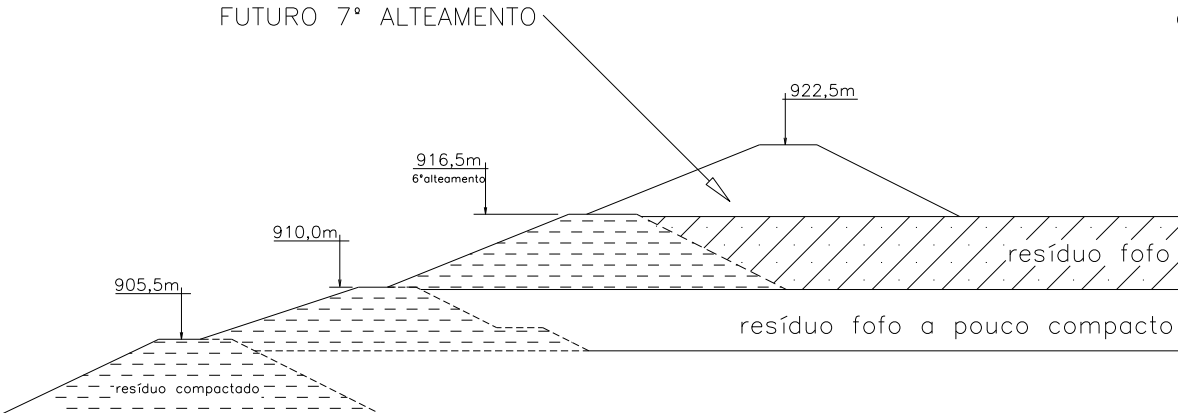


Figura 25: Seção transversal típica do Sétimo Alteamento[169]

---

166 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
167 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
168 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
169 Arquivos do Projeto do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.

5.9.2.2 Parâmetros dos Materiais Selecionados

A Tabela 9 exibe os parâmetros dos materiais selecionados para o Sétimo Alteamento. Os parâmetros geotécnicos foram estabelecidos com base em investigações e estudos prévios, amostras remoldadas testadas e sondagens específicas do Sétimo Alteamento.

Não foram utilizados os resultados de peso específico e coesão das investigações do Sétimo Alteamento devido a "…discrepância com valores adotados no passado (…) não justificar o uso desses valores."[170] Portanto, foram utilizados parâmetros previamente selecionados (Tabela 9). O projeto também afirmou que a resistência ao cisalhamento não drenado era difícil de determinar e, portanto, foram utilizados dados da investigação do Sexto Alteamento. Ganhos de resistência decorrentes da colocação do Sétimo Alteamento foram levados em conta nas camadas subjacentes, mediante a assunção de uma razão de resistência ao cisalhamento não drenado de 0,22. Utilizando essa premissa, em profundidades intermediárias, foi calculado e utilizado para as análises de estabilidade um S_u de 50 kPa.[171]

O relatório da análise de estabilidade afirma que "condicão [*sic*] mais crítica quanto a estabilidade pode ocorrer" ao longo da ombreira direita devido às condições de baixa compactação e saturação dos rejeitos da fundação.[172] Os rejeitos perto da ombreira direita foram caracterizados como potencialmente sujeitos à liquefação (por exemplo, por carga dinâmica) devido ao estado fofo e saturado.[173]

---

[170] Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
[171] Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
[172] Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
[173] Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.

Tabela 9: Parâmetros de materiais do Sétimo Alteamento[174]

Material	Peso Específico total (kN/m³)	Ângulo de Atrito (phi)	Coesão (kPa)	Resistência ao Cisalhamento Não Drenado (kPa)
Enchimento com solo argiloso	19	30	8.5	-
Rejeitos – compactado	27.5	40	0	-
Rejeitos – compacto médio	27	39.	0	-
Rejeitos – fofo a pouco compactado	26	37	0	50
Rejeitos – pouco compactado	26	38	0	-
Rejeitos – fofo	25	36.	0	30
Solos residuais	19	30	8.5	-
Solos coluviais	17	25	15	-

5.9.2.3 Drenagem Interna

Os desenhos do projeto indicam um filtro vertical (0,8 m de espessura) e um filtro horizontal (0,5 m de espessura) feitos de sinterfeed, construídos em forma de L (Figura 26). O sistema de escoamento se conecta a tubos de PVC perfurados, que desaguam em canais de drenagem periféricos, parecidos aos do Sexto Alteamento. Os desenhos e o relatório do projeto não descrevem os parâmetros exigidos dos materiais da camada drenante. O relatório não apresenta nenhum cálculo de filtração para avaliar a capacidade da camada de solo compactado a ser filtrada pelo sinterfeed.

[174] A tabela foi modificada do relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.

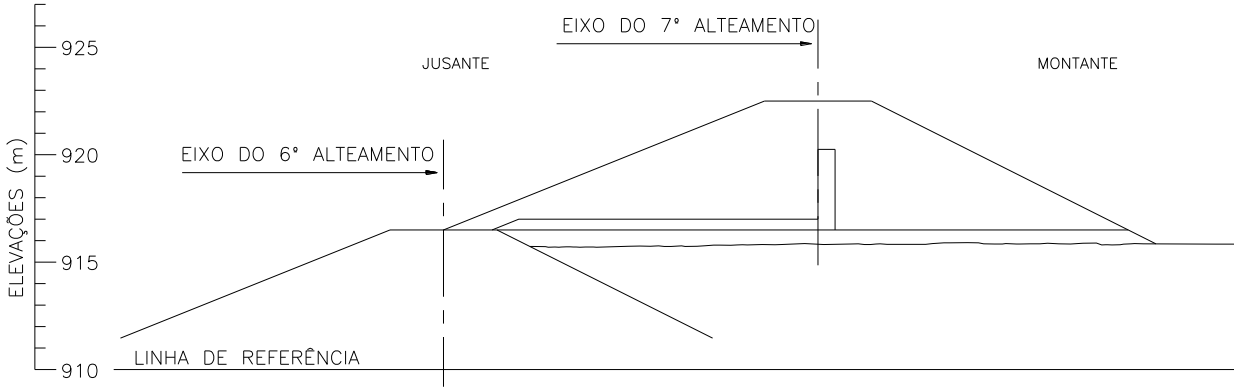


Figura 26: Características de drenagem do Sétimo Alteamento[175]

5.9.2.4 Gerenciamento de Águas Superficiais

Foi construído um sistema de redirecionamento de água ao longo da ombreira direita da barragem.[176] O projeto foi baseado nas mesmas metodologias e parâmetros que foram utilizados para o Quarto ao Sexto Alteamentos. O sistema foi desenvolvido para atender à necessidade de direcionar a água de uma elevação superior aos estágios anteriores para a Barragem VI, o que exigia estruturas mais robustas à medida que os alteamentos aumentavam a elevação da bacia.

5.9.2.5 Estabilidade Geotécnica

As análises de estabilidade geotécnica foram realizadas pelo método Spencer, implementado pelo programa UTEXAS3. A estabilidade foi avaliada para a condição final do Sexto Alteamento durante o projeto do Sétimo Alteamento. Foi calculado um FS de 1,57 em condições piezométricas normais, enquanto um FS de 1,18 foi calculado para uma condição piezométrica menos favorável, definida por um reservatório cheio e níveis piezométricos alcançando drenos verticais e mantas de drenagem horizontais de cada alteamento).[177] Com base nessas análises, foi recomendado que as atividades de monitoramento piezométrico continuassem ao longo de todo o Sétimo Alteamento.

A estabilidade do Sétimo Alteamento foi avaliada para condições drenadas e não drenadas. O relatório do projeto explicou que foram analisadas as condições não drenadas porque os métodos de construção poderiam criar condições não drenadas no alteamento, e foi estabelecido um FS

---

175 Arquivos do Projeto do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
176 Estudos Hidrológicos e Hidráulicos, Sétimo Alteamento (Tecnosolo, 2001) ("Relatório de hidrologia do Sétimo Alteamento, Tecnosolo").
177 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.

mínimo permitido de 1,20.[178] Foi calculado um FS de 1,57 na análise não drenada, assumindo a manutenção das elevações piezométricas normais.[179] Entretanto, durante condições piezométricas elevadas (ou seja, superfície freática nos sistemas de drenagem interna), o FS calculado é de 1,30. Além disso, análises não drenadas que adotam o valor mais favorável de S_u = 30 kPa resultaram em um FS de 1,25 para o talude a montante e FS <1 para o talude a jusante perto da ombreira direita.[180] Essa condição foi abordada nas recomendações do relatório, declarando que os recursos do projeto para o Sétimo Alteamento, quando construídos, deveriam evitar tais condições (por exemplo, a construção deve ser feita lenta e cuidadosamente para evitar um aumento nas poro-pressões).[181] Foi considerado alcançável um FS superior a 1,5 se os métodos de construção mantivessem sempre as condições drenadas.[182]

5.9.2.6 Especificações da Construção

Não há especificações técnicas disponíveis para a construção da berma do Sétimo Alteamento.

5.9.3 Instrumentação

O projeto previa a instalação de piezômetros e medidores de nível de água para monitorar a Barragem I. O relatório e os desenhos do projeto[183] mostram que foi proposta a colocação de 10 piezômetros[184] ao longo de cinco seções transversais da barragem. Foi emitido um plano de monitoramento piezométrico juntamente com o projeto do Sétimo Alteamento para estabelecer os níveis d'água que acionariam os níveis de ação para o FS calculado contra uma ruptura de talude de 1,30 ou 1,15.[185]

5.9.4 Complicações e Desvios

Uma eventual complicação de construção antecipada no projeto estava relacionada ao impacto de materiais fofos perto da ombreira direita durante a construção do alteamento na área, mas não foi identificada, nos documentos disponíveis, nenhuma menção a problemas associados a essa questão durante a construção.

As atas de reuniões durante o período de construção, de 15 de julho de 2002, declaram que a Ferteco (que na época já havia sido adquirida pela Vale) solicitou que uma construtora

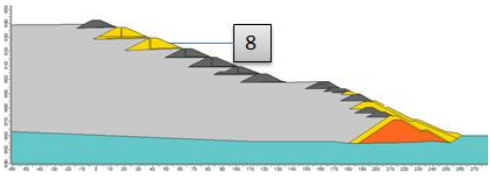
---

178 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
179 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
180 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
181 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
182 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
183 Arquivos do Projeto do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
184 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.
185 Relatório de Estabilidade do Sétimo Alteamento, Tecnosolo.

terceirizada (Construtora Impar) limpasse os drenos devido ao rápido aumento do nível d'água adjacente à barragem, para evitar a saturação do sistema de drenagem que poderia impactar negativamente a estabilidade.[186] Além disso, as atas da reunião de 25 de julho de 2002 declaram que a Ferteco solicitou novamente que a Construtora Impar fizesse continuamente a manutenção dos drenos para evitar problemas estruturais.[187]

5.10 Oitavo Alteamento: 2004

O Oitavo Alteamento (localização mostrada na figura à direita) foi projetado pela Tecnosolo e consistia em um estágio para elevar a crista da Barragem I a uma elevação média de 929,5 nmm. Os documentos do projeto disponíveis indicam a intenção do projetista de seguir a abordagem do Sétimo Alteamento. As informações disponíveis incluem um relatório geotécnico com figuras, um relatório de análise de hidrologia e desenhos desse alteamento "as built". Os documentos do projeto são de dezembro de 2003 e a berma foi construída em 2004.



5.10.1 Investigações Geotécnicas

O projeto do Oitavo Alteamento considerou os resultados de todas as investigações anteriores disponíveis sobre o local, além de duas investigações geotécnicas adicionais.[188] A primeira investigação adicional, de agosto de 2003, incluiu quatro sondagens SPT localizadas na praia de rejeitos e a coleta de quatro amostras que foram analisadas quanto à distribuição granulométrica e limites de Atterberg.[189] A segunda investigação foi realizada em 2003, quando oito sondagens (SPDAM 02 a SPDAM 05 e SPDAM 07 a SPDAM 10) foram avançadas a 30,45 m.[190] Os locais das sondagens não estão indicados na documentação disponível.

A estratigrafia de subsuperfície identificada durante a investigação para o Oitavo Alteamento foi composta pelos seguintes componentes, contado a partir da superfície da praia:

---

186 Atas da Reunião de 15 de Julho com a Construtora Impar, 15 de julho de 2002, Sétimo Alteamento.
187 Atas da Reunião de 25 de Julho com a Construtora Impar, 25 de julho de 2002, Sétimo Alteamento.
188 Relatório de Estudos Geotécnicos, Oitavo Alteamento (Tecnosolo, 2003) ("Estudos Geotécnicos do Oitavo Alteamento, Tecnosolo").
189 Quadro de Resultados de Ensaios, Oitavo Alteamento (Tecnosolo).
190 Estudos Geotécnicos do Oitavo Alteamento, Tecnosolo.

- Rejeitos lançados, classificados como areia siltosa e siltes arenosos geralmente presentes em camadas alternadas de baixa resistência e alta resistência, provavelmente resultantes dos procedimentos de depósito dos rejeitos. A Tecnosolo observou que a resistência dos rejeitos, medida por sondagens padrão de reconhecimento (SPTs), geralmente não aumenta com a profundidade, conforme esperado.
- Solos compactados de alteamentos anteriores.
- Solos de fundação, geralmente descritos como depósitos fluviais ou residuais de argila siltosa, silte argiloso, silte arenoso e areia siltosa.[191]

5.10.2 Abordagem do Projeto

5.10.2.1 Geometria

O Oitavo Alteamento foi projetado como um estágio de 7 m de uma elevação média de 922,5 m nmm para 929,5 m nmm. Os taludes a montante e a jusante eram consistentes com os projetos anteriores.

5.10.2.2 Parâmetros dos Materiais Selecionados

Foram relatados diversos resultados de ensaios de materiais, e sondagens foram resumidas nos documentos do Oitavo Alteamento, incluindo uma discussão de uma "seção máxima mais realista possível da barragem"[192] com referência à seção transversal do projeto incluída no relatório;[193] entretanto, não houve discussão sobre a seleção dos parâmetros de materiais para uso nas análises do projeto.

5.10.2.3 Drenagem Interna

O sistema de drenagem interna do Oitavo Alteamento era composto por um filtro vertical de 0,8 m de espessura e uma manta drenante de 0,5 m de espessura construídos em L.[194]

5.10.2.4 Estabilidade

As análises de estabilidade do Oitavo Alteamento não estão disponíveis.

---

191 Estudos geotécnicos do Oitavo Alteamento, Tecnosolo.
192 Estudos Geotécnicos do Oitavo Alteamento, Tecnosolo.
193 Arquivos do Projeto do Oitavo Alteamento, Tecnosolo.
194 Arquivos do Projeto do Oitavo Alteamento, Tecnosolo.

5.10.2.5 Especificações da Construção

As especificações da construção do Oitavo Alteamento não estão disponíveis.

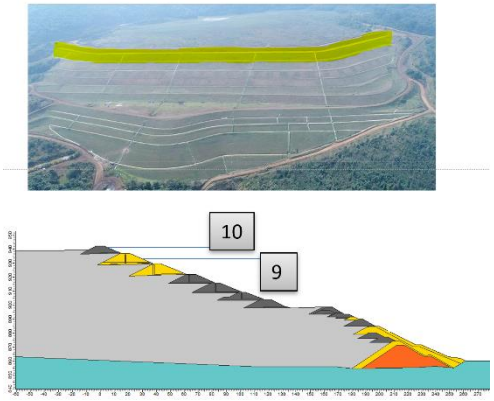
5.10.3 Instrumentação

Nos documentos disponíveis para revisão não há consideração sobre instrumentação.

5.10.4 Complicações e Desvios

Não há documentação disponível relativa a complicações e desvios do Oitavo Alteamento.

5.11 Nono e Décimo Alteamentos: 2008 e 2013



O Nono e o Décimo Alteamentos (localização mostrada na figura à direita) foram projetados pela Geoconsultoria e consistiam em um estágio, para cada alteamento, para elevar a crista da Barragem I em 7 m 5 m, para a elevação de 937 m nmm e 942 m nmm, respectivamente. O Nono e o Décimo Alteamentos são examinados em conjunto devido à sua natureza semelhante e momento do avanço das investigações, análises e documentos do projeto. Há documentos abrangentes do projeto disponíveis para ambos os alteamentos, incluindo desenhos do projeto, relatórios de análise de estabilidade e hidrologia, detalhes e resultados do programa de testes de laboratório, planos e resultados de investigação de campo, dados numéricos de análise de estabilidade e um relatório de laboratório dos resultados dos testes de rejeitos de praia. Além disso, o registro incluía um manual de operação, especificações técnicas para a construção de cada alteamento e um registro fotográfico substancial das condições próximas ao momento da construção. Não há relatórios de inspeção de construção disponíveis. Os documentos do projeto são de agosto de 2006. O Nono Alteamento foi construído em 2008 e o Décimo Alteamento foi construído em 2013.

5.11.1 Investigações Geotécnicas

As investigações geotécnicas dos Nono e Décimo Alteamentos foram realizadas em 2005 e 2006.[195] Os resultados do teste estão incluídos no Relatório de resumo dos testes de campo e de laboratório no Apêndice B. O trabalho de campo consistiu no seguinte:

- sondagens SPT na praia e na crista da barragem, incluindo a coleta de amostras inalteradas dos tubos Shelby e Osterberg;
- Ensaios de penetração de cone com dissipação da poro-pressão (CPTu) e ensaios de palheta;
- ensaios de densidade *in situ* dos rejeitos;
- coleta de amostras de blocos alterados e intactos na área da praia de rejeitos;
- sondagens com brocas na Barragem I e áreas de empréstimo;
- instalação de piezômetros e indicadores do nível d'água ("INAs") na praia e na Barragem I; e
- instalação de dois inclinômetros (INC-01 e INC-02).[196]

A profundidade máxima dos ensaios CPTu foi de 26 m, o que não penetrou em toda a profundidade dos rejeitos. Os testes de laboratório realizados nas amostras e os resultados do teste também constam do Apêndice B; os testes realizados durante a investigação incluíram distribuição granulométrica, teor de umidade natural, densidade e densidade relativa, limites de Atterberg, permeabilidade, Proctor normal, compressão triaxial e adensamento.

Os resultados dos testes forneceram informações adicionais significativas sobre a natureza e a variabilidade dos rejeitos que foram depositados antes do projeto do Nono Alteamento. As observações sobre as investigações geotécnicas fornecidas no relatório do projeto estão resumidas abaixo:

- O processo de sedimentação pretendido na área da praia (isto é, produzir segregação dos materiais com materiais mais grossos perto da barragem e materiais mais finos mais longe da barragem) não estava ocorrendo, particularmente na ombreira direita da barragem.
- Os alteamentos foram construídos usando rejeitos compactados, com os três primeiros alteamentos cobertos com argila (conforme visto anteriormente).

---

[195] Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2006) ("Relatório do Projeto do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria").
[196] Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

- Os rejeitos foram lançados hidraulicamente na praia ou submersos no represamento, resultando em camadas de diferentes densidades e resistências.
- Em alguns locais, foram identificadas condições de alta pressão piezométrica em profundidades superiores a 25 m abaixo da superfície, por testes de CPTu. A causa dessas condições era desconhecida, mas foi interpretada pelo projetista como sendo decorrente de uma camada de material mais grosso subjacente a rejeitos finos, o que resulta em uma condição de confinamento no fundo do vale.
- Os testes de CPTu indicam a presença de camadas onde o comportamento não drenado provavelmente controla a resistência ao cisalhamento, mas o relatório conclui que essas camadas são poucas e de extensão limitada (ou seja, abaixo do Quarto Alteamento e alguns metros abaixo do nível de rejeitos no momento do projeto, que teria sido aproximadamente na elevação de 928 m nmm).
- Os ensaios de palheta confirmaram o comportamento não drenado na Barragem I em áreas específicas (ou seja, não em todo o depósito de rejeitos).
- Os resultados dos testes de percolação indicam que a permeabilidade dos rejeitos varia de 1×10^{-7} m/s a 1×10^{-6} m/s. Em partes mais profundas da Barragem I, onde a barragem foi misturada com os solos, a permeabilidade varia de 1×10^{-8} m/s a 1×10^{-7}m/s.
- A densidade geralmente diminui e o conteúdo de finos aumenta à medida que a distância da praia aumenta.
- A ocorrência de materiais plásticos é limitada (observação: este comentário não foi específico para os rejeitos ou para a barragem).
- A granulometria dos rejeitos varia de areia fina até silte, com gravidade específica variando de 4 a 5. Os pesos específicos secos das amostras coletadas na área da praia apresentavam variação de 1,85 t/m^3 a 2,29 t/m^3. As densidades relativas de compactação geralmente apresentavam variação de 50% a 60%.[197]

5.11.2 Abordagem do Projeto

A abordagem do projeto do Nono e Décimo Alteamentos é ilustrada na Figura 27 e previa método de construção a montante. Os alteamentos foram projetados para serem construídos com rejeitos, sobrepostas com uma camada de cascalho (canga) laterítico ao longo da crista da barragem e do talude a montante, e vegetação no talude a jusante.

Durante os estágios iniciais do projeto, o projetista expressou preocupações em relação à estabilidade devido aos níveis d'água interpretados como artesianos em alguns dos piezômetros e

[197] Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

devido às incertezas sobre os métodos e materiais de construção usados nos estágios iniciais da barragem, o que levou à instalação de dois inclinômetros.[198] O projeto do Nono Alteamento foi desenvolvido com a expectativa de que seria o último alteamento, a menos que avaliações futuras de estabilidade, reprocessamento de rejeitos, licença ambiental e o cronograma para o desenvolvimento de uma instalação de armazenamento de rejeitos adicional permitissem futuros alteamentos da Barragem I. Durante o projeto conceitual do Nono e Décimo Alteamentos, foi considerada uma alternativa para a construção de uma nova barragem (Barragem 3 – Santana) para substituir a Barragem I e ser operada enquanto a Barragem I seria explorada/reprocessada e, depois, a Barragem I seria colocada novamente em operação.[199] Não há indicação de que essa alternativa tenha sido perseguida.

5.11.2.1 Geometria

O relatório do projeto do Nono e Décimo Alteamentos indica que os taludes a montante e a jusante foram projetados com 2H:1V e 2,4H:1V, respectivamente, semelhante aos alteamentos anteriores.[200] As cristas dos alteamentos deveriam ter 5 m de largura, com elevação de 937 m nmm e 942 m nmm, respectivamente.

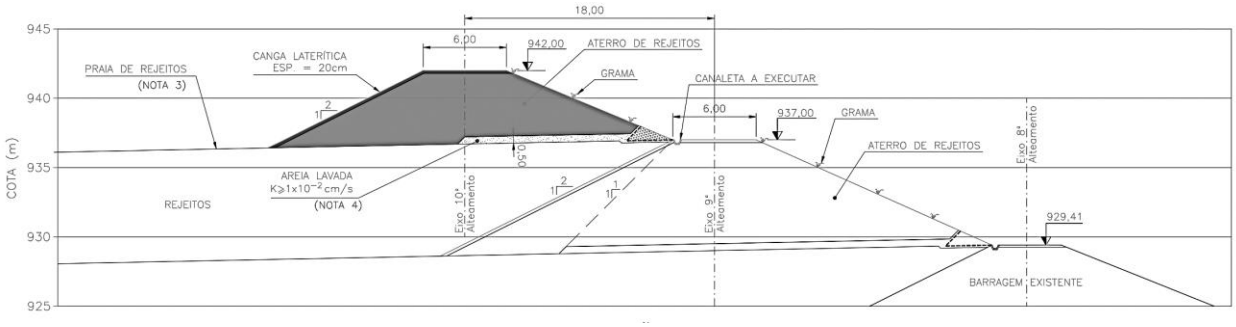


Figura 27: Nono e Décimo Alteamentos conforme projetados[201]

5.11.2.2 Parâmetros dos Materiais Selecionados

Foi determinado que os parâmetros dos materiais utilizados na análise da estabilidade dos taludes na condição drenada eram os mesmos que foram utilizados nos desenhos dos alteamentos

---

198 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

199 Estudo Conceitual de Disposição de Rejeitos na Barragem 1, Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2006) ("Estudo de Descarte do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria"); Projeto Sumário, Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2005).

200 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

201 Arquivos do Projeto do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria.

anteriores.[202] Os projetistas determinaram que os resultados dos testes de campo e de laboratório que eram parte da investigação realizada como parte dos Nono e Décimo Alteamentos confirmavam os resultados das investigações anteriores. Parâmetros não drenados de resistência ao cisalhamento foram derivados dos ensaios CPTu e FVT.[203]

5.11.2.3 Drenagem Interna

O projeto de drenagem interna era composto por uma camada drenante horizontal de 0,5 m de espessura que se estendia ao longo da metade a jusante da base do alteamento. A camada drenante é descrita como sendo composta por "…areia lavada, terminada em um dreno de brita…"[204], embora as características dos materiais de areia e brita não tenham sido especificadas e não tenha sido fornecido um cálculo de filtro para os materiais da camada drenante. O documento do projeto afirma que não foi adotada uma configuração em forma de L para o projeto do Nono e Décimo Alteamentos.[205] Entretanto, documentos posteriores do projeto[206] mostram que o Nono Alteamento foi construído com uma configuração de dreno em forma de L. O dreno vertical não foi incluído no projeto original porque se acreditava que o material da barragem tinha permeabilidade moderada, não represaria a água ao longo do seu talude a montante e seria mais eficiente na extração da superfície freática.[207]

5.11.2.4 Gerenciamento de Águas Superficiais

O sistema de gerenciamento de águas superficiais do Nono e Décimo Alteamentos foi projetado como uma extensão do sistema de gerenciamento de águas superficiais existente anteriormente. Foi projetado um sistema de decantação para controlar a elevação da água no reservatório e, consequentemente, a largura da praia. O sistema de decantação projetado era composto por três torres de concreto conectadas a uma estrutura retangular de concreto de 310 m de comprimento embaixo da ombreira direita para transportar a água da Barragem I para um canal a jusante que desembocava na Barragem VI. Foi construído um sistema de drenagem ao longo da ombreira direita para permitir o ensecamento dos rejeitos a montante, para melhorar a formação da praia. A intenção era estabilizar a área para manter a estabilidade adequada da barragem durante todo o desenvolvimento do Nono e Décimo Alteamentos.[208]

---

202 Estudo de Descarte do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria.
203 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
204 Estudo de Descarte do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria.
205 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
206 Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.
207 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
208 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

O sistema de águas pluviais da face a jusante da barragem foi projetado para transportar o escoamento da face da barragem resultante de um evento pluvial de duração de 25 anos. O projeto do sistema de escoamento consistia em canais de concreto moldados *in loco*, paralelos à crista da berma do Oitavo Alteamento existente e ao longo da face do Quarto ao Oitavo Alteamentos. Esses canais e vertedouros foram projetados para o escoamento de águas pluviais para o sistema de águas pluviais existente que havia sido construído durante os alteamentos anteriores.[209]

5.11.2.5 Estabilidade Geotécnica

As análises de estabilidade geotécnica foram realizadas para 10 seções usando o programa de computador SLIDE. Como parte das análises de estabilidade, um modelo de percolação foi criado usando o SLIDE para estimar as condições freáticas que existiriam na barragem após a barragem ter sido elevada e os rejeitos terem sido depositados atrás da barragem. O modelo de percolação foi calibrado com base nos dados piezométricos existentes e em testes de permeabilidade *in situ* e de laboratório.

Foram realizadas análises de sensibilidade para avaliar a influência de diversas condições, incluindo a presença de diferentes condições da praia, a presença de uma camada de materiais não drenados de extensão limitada embaixo do Quarto Alteamento e uma superfície freática elevada dentro da barragem. Também foram realizadas análises para identificar a altura da superfície freática, sob condições drenadas, que resultaria em um FS inferior a 1,5. Também foram realizadas análises de estabilidade para a escavação do sistema de gestão de águas superficiais perto da ombreira direita. Todas as análises produziram valores de FS próximos ou superiores a 1,5.[210]

O potencial de liquefação estática também foi avaliado para o Nono e o Décimo Alteamentos.[211] As análises foram realizadas assumindo condições saturadas nos rejeitos e foram baseadas nos resultados das curvas de tensão-deformação dos ensaios de laboratório de resistência ao cisalhamento triaxial em amostras intactas de rejeitos. Os ensaios de laboratório foram interpretados como preditivos de condições dilatantes, resultando na conclusão do relatório de que o material apresentava um baixo potencial de liquefação. O relatório do projeto não especifica quais ensaios de laboratório foram usados na análise.

---

209 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
210 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
211 Avaliação do Potencial de Liquefação, Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2008).

5.11.2.6 Preparação do Local

Os documentos do projeto incluem uma discussão sobre os métodos de construção que descreve os procedimentos a serem seguidos para construir os alteamentos.[212] As especificações de construção descrevem a limpeza de uma estrada de acesso para a construção do sistema de drenagem, a preparação de superfícies nas quais os alteamentos estavam para ser construídos e a construção de uma área perto da ombreira esquerda que poderia ser usada como poço de empréstimo, se os rejeitos não estivessem disponíveis.

5.11.2.7 Especificações da Construção

O Nono e o Décimo Alteamentos foram projetados para serem construídos com rejeitos compactados. Foi projetada a construção de uma face de cascalho (canga) laterítico nos taludes a montante e na crista, enquanto que era planejado o uso de gramado nos taludes a jusante. A areia para as camadas de filtro foi especificada como tendo não mais do que 5% de finos e pelo menos 20% de material com menos de 0,42 mm de diâmetro. Ensaios para os parâmetros dos materiais durante a fase de construção foram especificados para os rejeitos (incluindo granulometria, densidade, padrão Proctor e permeabilidade) e para o material da camada drenante de areia (testes diários de granulometria). Os ensaios de campo de densidade relativa foram especificados a uma frequência não inferior a um por 500 m^3 para rejeitos e um por 200 m^3 para areia de drenagem.[213] Parece ter sido dada flexibilidade às equipes de construção e inspeção em relação à configuração do alteamento ao implementar o projeto no campo: "A Fiscalização, assistida pelo Projetista, poderá aumentar ou diminuir as larguras e cotas das fundações e os taludes dos aterros e poderá proceder a revisões nas seções da barragem que considerar necessárias para que sejam obtidas estruturas seguras e econômicas, dentro da concepção apresentada nos documentos e desenhos do projeto."[214]

5.11.3 Instrumentação

O projeto previa a instalação de diversos tipos de instrumentos, incluindo:

- piezômetros abertos do tipo Casagrande, a serem instalados logo após a construção do alteamento a profundidades de aproximadamente 5 m nos rejeitos abaixo do pé a jusante da berma do Décimo Alteamento (por exemplo, PZC-39 na Figura 28);

---

[212] Especificações da Construção, Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2006) ("Especificações da Construção do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria").
[213] Especificações da Construção do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria.
[214] Especificações da Construção do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria.

- indicadores de nível d'água, a serem instalados após a construção do alteamento, no material da manta drenante (por exemplo, INA-37 na Figura 28) para monitorar a presença de água sob pressão nessa camada;
- marcos superficiais, instalados na crista da berma; e
- Indicadores do nível d'água na bacia de decantação.[215]

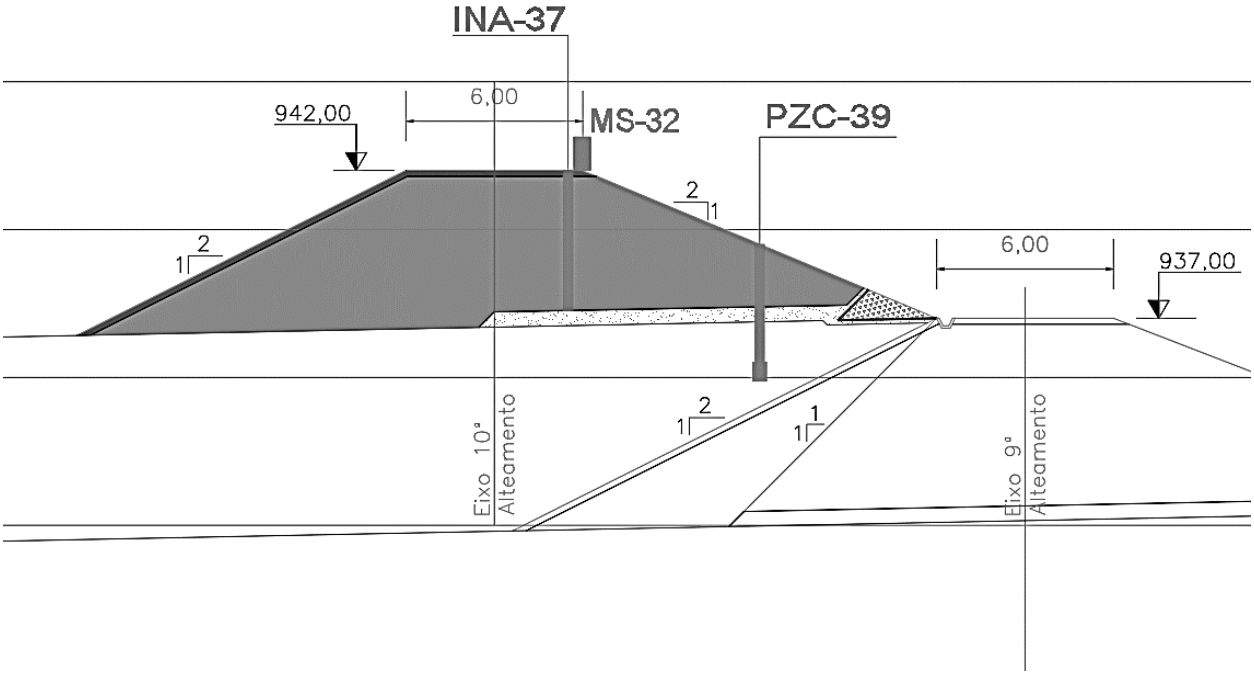


Figura 28: Plano de instalação do indicador do nível d'água e piezômetro no Nono e Décimo Alteamentos[216]

5.11.4 Complicações e Desvios

5.11.4.1 Seção "As Built" e Resultados dos Testes

A documentação "as built" para o Nono e Décimo Alteamentos mostra que eles foram construídos geralmente em consonância com o projeto e sem um recurso de drenagem interna vertical na berma do Nono ou Décimo Alteamento (Figura 29). Os relatórios de conformidade e os resultados dos testes dos materiais utilizados durante a construção para avaliar a conformidade dos mesmos em relação aos requisitos não estavam disponíveis. Além disso, não foram

[215] Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
[216] Arquivos do Projeto Conforme Construído do Nono e Décimo Alteamentos.

encontrados relatórios de materiais utilizados na construção; entretanto, relatórios subsequentes indicam que o Nono Alteamento foi construído usando argila compactada em vez de rejeitos, conforme previsto no projeto.[217]

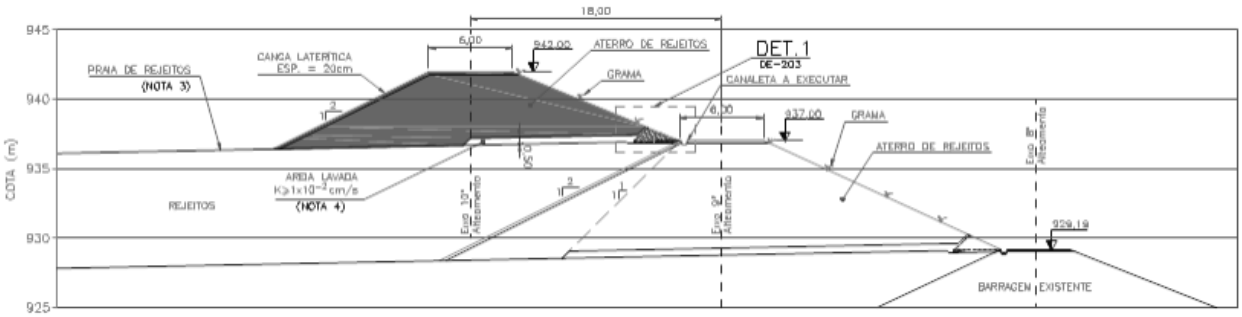


Figura 29: Nono e Décimo Alteamentos "as built"[218]

5.11.4.2 Taxa de Enchimento com Rejeitos

O relatório do projeto indicava que o índice de enchimento prevista do represamento atrás da barragem seria de aproximadamente 2 m a 3 m por ano após a construção do Nono Alteamento.[219] Entretanto, os valores reais de assoreamento eram de aproximadamente 6 m por ano (Figura 30).[220]

---

217 Revisão periódica de segurança da TÜV SÜD de 2018.
218 Arquivos do Projeto do Nono e Décimo Alteamentos Conforme Construídos.
219 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
220 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

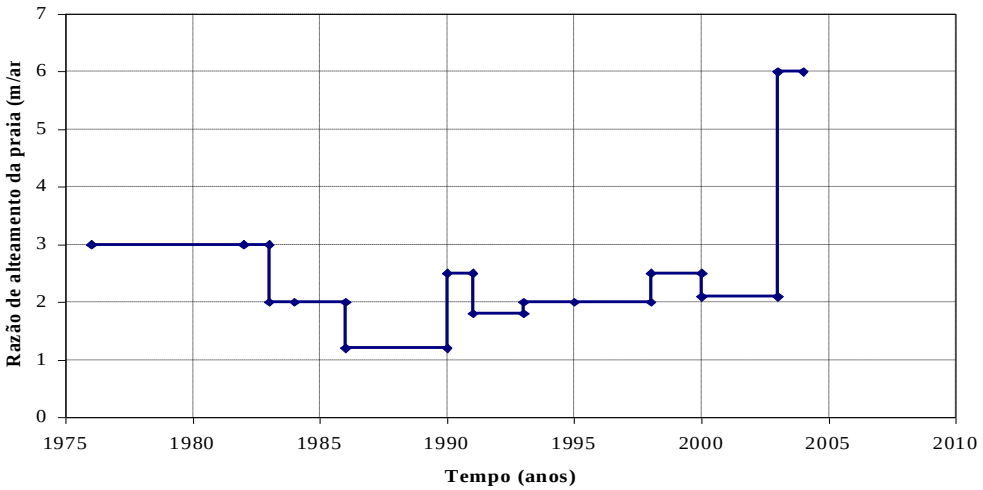


Figura 30: Carga de projeto do Nono e Décimo Alteamentos[221]

5.11.4.3 Percolação e Superfície Piezométrica Alta

Foram notadas percolações e condições de superfície freática alta nos documentos do projeto do Nono e Décimo Alteamentos. Os documentos indicam que era sabido que os níveis d'água na Barragem I flutuavam e que estudos anteriores subestimaram as condições freáticas na barragem. O relatório indicava que o nível d'água estava a 10 m do talude a jusante, perto da elevação de 904 m nmm e 898 m nmm, e depois caiu para 15 m abaixo do talude e que na elevação de 874 m nmm, o nível d'água aumenta novamente, aproximando-se do talude a jusante.[222] Também foi observada uma superfície freática rasa entre as elevações de 899 m nmm e 904 m nmm (terceiro e Quarto Alteamentos, respectivamente) e perto da crista da Barragem Inicial, na elevação de 874 m nmm. O relatório do projeto também indica que foram observadas percolações ao longo do talude a jusante, próximo do pé do Quarto Alteamento, aproximadamente na época em que o projeto estava sendo desenvolvido, e que os níveis d'água medidos na barragem e o tamanho da praia de rejeitos sugerem que a água só deveria ser visível nas estruturas de drenagem do Quarto Alteamento.[223] Não foram fornecidos detalhes dos locais reais das áreas de afloramento d´água. O relatório sugeriu que percolação vertical (ou seja, gradientes verticais) do fluxo do lençol freático através da Barragem I e os rejeitos resultaram em níveis mais altos de água em comparação com aqueles que seriam antecipados nos piezômetros.[224]

---

221 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultori.
222 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.
223 Relatório de Inspeção, Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2007) ("Relatório de Inspeção do Nono e Décimo Alteamentos, Geoconsultoria").
224 Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

5.11.4.4 Condições da Carga Piezométrica Alta

A avaliação de segurança indicou preocupação devido às altas condições piezométricas que ocorreram perto do Terceiro e Quarto Alteamentos (ou seja, elevações de 899 m nmm e 904 m nmm, respectivamente) e no talude da barragem inicial[225] devido a uma condição de confinamento na base do depósito de rejeitos nessas elevações.[226] O relatório do projeto concluiu que a profundidade em que essas condições ocorrem não suscitava preocupações relacionadas à estabilidade geral.[227]

6. EVENTOS PÓS-CONSTRUÇÃO DA BARRAGEM I

6.1 Introdução

Após o Décimo Alteamento ser concluído em 2013, não ocorreu nenhuma outra obra de alteamento da Barragem I. Conforme discutido na Seção 2.2, a Barragem I parou de receber rejeitos em julho de 2016. Após essa data, foram realizadas atividades e ocorreram eventos que podem fornecer informações com relação à condição e desempenho da Barragem I até a data do rompimento. As atividades e eventos que ocorreram após a conclusão do Décimo Alteamento estão descritos nesta seção e incluem atividades de gerenciamento de águas superficiais (Seção 6.2), instalação de drenos horizontais profundos (DHPs) (Seção 6.3), a ocorrência de percolação na barragem (Seção 6.4) e perfurações que foram realizadas durante vários meses antes do rompimento (Seção 6.5).

6.2 Sistema de Gerenciamento de Águas Superficiais

Em julho de 2016, quando a Barragem I parou de receber rejeitos, a construção do sistema de gerenciamento de águas superficiais da barragem tinha sido concluída em uma configuração que era praticamente a mesma no dia do rompimento. Entre julho de 2016 e a data do rompimento, as atividades associadas ao sistema de gerenciamento de águas superficiais envolviam gerenciar as águas superficiais no reservatório e manter os recursos de gerenciamento de águas superficiais na face da barragem, para que as águas fossem escoadas da barragem. Estas atividades são discutidas abaixo. Atividades separadas que foram realizadas para gerenciar o nível de água dentro dos rejeitos são discutidas na Seção 6.3.

---

[225] Avaliação de Segurança da Barragem I, Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2007).
[226] Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria; Avaliação da Piezometria, Nono e Décimos Alteamentos (Geoconsultoria, 2007).
[227] Relatório do Projeto do Nono e Décimos Alteamentos, Geoconsultoria.

6.2.1 Gerenciamento de Águas Superficiais no Reservatório

Desde o momento em que o Décimo Alteamento foi concluído, até o momento em que a Barragem I parou de receber rejeitos em julho de 2016, a profundidade das águas superficiais no reservatório era gerenciada na torre de decantação usando *stop logs* (barreiras colocadas no decantador para controlar o nível de água retida no reservatório), que podiam ser inseridas ou removidas na torre de decantação, a fim de aumentar ou diminuir a elevação da água na área do reservatório, conforme necessário para cumprir os objetivos operacionais da Barragem I.[228] Durante, ou próximo do mês de maio de 2016, presumidamente prevendo a decisão de parar a deposição de rejeitos, o volume de água no reservatório foi significativamente reduzido, deixando pouca quantidade de água parada no reservatório.[229]

Depois de parar o lançamento de rejeitos em julho de 2016, a verificação de uma baixa profundidade das águas superficiais no reservatório e a manutenção do sistema de drenagem de águas superficiais foram objeto de inspeções regulares. Relatórios de auditorias técnicas de segurança de 2016, 2017 e 2018, por exemplo, pedem para manter níveis baixos de água parada no reservatório.[230] Isto foi feito de diversas maneiras. Primeiro, em 25 de julho de 2016, uma berma de proteção foi estendida em 50 m ao redor da torre de decantação, proporcionando o controle dos fluxos de água na torre e permitindo um melhor gerenciamento da água no reservatório.[231] Segundo, desde julho de 2016, a superfície da água estava localizada longe da torre de decantação, evitando a drenagem por gravidade para as torres. Assim sendo, os esforços de desaguamento exigiram o bombeamento da área de águas paradas para a torre de decantação, de onde as águas superficiais escorriam para a Barragem VI. Assim, a fim de manter os níveis de águas superficiais baixos, foram projetados e instalados uma bomba e sistema de tubulação depois do desaguamento do reservatório ser concluído em meados de 2016. O sistema era composto por um sistema de bombas conectadas a uma tubulação de descarga, que direcionava a água para a torre de decantação (Figura 31).[232] Uma bomba de reserva era necessária, caso a bomba primária falhasse. O sistema só foi colocado em operação no final de 2018.

---

228 Barragem 1 Manual de Operação (Geoconsultoria 2016); Barragem de Rejeitos 1 Manual de Operação da Barragem (Geoconsultoria 2013).

229 Geoconsultoria 2016 Auditoria Técnica de Segurança.

230 Geoconsultoria 2016 Auditoria Técnica de Segurança; Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Laudo Técnico de Segurança de Barragem (Tractebel 2017) ("Tractebel 2017 Auditoria Técnica de Segurança"); Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Laudo Técnico de Segurança de Barragem (ANM) (TÜV SÜD 2018) ("TÜV SÜD 2018 Auditoria Técnica de Segurança ANM").

231 Correspondência por E-mail, 25 de julho de 2016.

232 Relatório de Anomalias 1 de Janeiro de 2018-27 de Janeiro de 2019 (Vale 2019) ("Vale 2018-19 Relatórios de Anomalias"); TÜV SÜD 2018 Auditorifa Técnica de Segurança.

Figura 31: Sistema de Desaguamento do Reservatório Após a Cessação da Disposição de Rejeitos[233]

No início de 2018, foi realizado um estudo para identificar todas as fontes da água que entravam na área do reservatório.[234] O objetivo era desviar toda a água que de outra forma entraria no reservatório. O estudo identificou uma nascente que contribuía com fluxo para a barragem, segundo informações, a uma vazão mensurada de 1,17 m^3/h.[235] Em julho de 2018, o desvio das águas da nascente para a torre de decantação foi concluído. Aparentemente, as atividades de construção no sistema de desvio continuaram e se expandiram nos próximos meses, conforme discutido no Apêndice D. Mais adiante em 2018, um poço e uma canaleta foram planejados como estrutura preventiva e complementar do sistema de captação da nascente, a fim de desviar a água da barragem;[236] mas não está claro se o sistema foi construído antes do rompimento.

Do início de 2018 até janeiro de 2019, houve relatos de requerimentos de manutenção e reparos no sistema de desaguamento de águas superficiais do reservatório.[237] Nos vários meses que antecederam o rompimento, houve relatos das bombas da Barragem I não estarem funcionando e estarem em manutenção, assim como relatos de desconexão das tubulações usadas para direcionar água das bombas até a torre de decantação e eventual reparo das tubulações.[238]

6.2.2 Gerenciamento das Águas Superficiais na Face Jusante da Barragem I

O projeto da Barragem I incluía recursos de drenagem de águas superficiais, a fim de coletar percolação e águas pluviais da face da Barragem I. Conforme discutido na Seção 5, a maior parte

---

233 TÜV SÜD 2018 Auditoria Técnica de Segurança ANM.
234 Relatório Descritivo dos Trabalhos de Desvio de Água do Reservatório da Barragem I – CFJ (Vale 2018) ("Relatório de Desvio de Águas Vale 2018").
235 Relatório de Desvio de Águas Vale 2018.
236 TÜV SÜD 2018 Auditoria Técnica de Segurança ANM.
237 TÜV SÜD 2018 Auditoria Técnica de Segurança ANM.
238 Agosto de 2018 Análise de Performance Periódica Da Barragem (Vale 2018); Vale 2018-19 Relatórios de Anomalias.

das obras de alteamento incluía uma extensão do sistema de drenagem de águas superficiais. O sistema de drenagem resultante era composto por um conjunto de canaletas revestidas de concreto, incluindo canaletas no pé de cada alteamento para direcionar a água na direção lateral, e canaletas descendo a face da barragem para direcionar a drenagem para o córrego na base da barragem. A finalidade do sistema era direcionar a água da face da barragem de maneira a evitar o galgamento das canaletas e empoçamento de água dentro ou perto das canaletas.

Problemas de desempenho no sistema de drenagem superficial da barragem foram observados e relatados várias vezes em toda a história da Barragem I.[239] Auditorias técnicas anuais de segurança da barragem, realizadas após a conclusão do Décimo Alteamento também identificaram problemas de desempenho com as canaletas, incluindo falta de drenagem adequada, danos no revestimento de concreto e excesso de vegetação e sedimentos nas canaletas.[240] Os esforços de mitigação incluíam o aumento do monitoramento, a redução dos entupimentos e melhorias na drenagem. Em particular, em 2018, várias canaletas tiveram sedimentos removidos, foi realizada terraplanagem para melhorar a drenagem inadequada em várias áreas, a vegetação foi removida onde necessário, a fim de evitar restrição do fluxo, e um dreno foi desentupido.[241] Também como parte dos esforços associados à melhoria do gerenciamento das águas superficiais, duas canaletas foram reconstruídas entre setembro e dezembro de 2018. Uma destas canaletas estava localizada perto da ombreira esquerda da barragem; a outra canaleta estava nas proximidades do DHP 15 (consulte a Seção 6.3).[242]

6.3 Drenos Horizontais Profundos

Conforme discutido na Seção 5, a drenagem da barragem e dos rejeitos foi prevista no projeto da unidade, desde as fases iniciais de planejamento da barragem. Foram incorporados tapetes drenantes laterais nos projetos das bermas, iniciando no Segundo Alteamento e continuando até o Décimo Alteamento. No início de 1993, tubos laterais chamados de "drenos sub-horizontais" foram instalados na barragem como parte das bermas e tiveram seu fluxo monitorado.[243] Durante todo o projeto e construção dos Nono e Décimo Alteamentos, de 2006 a 2013, houve referências

---

239 Veja, por exemplo, Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Laudo Técnico de Segurança de Barragem (Pimenta De Ávila Consultoria 2014) ("Pimenta De Ávila 2014 Auditoria Técnica de Segurança").

240 Veja Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Laudo Técnico de Segurança de Barragem (Pimenta De Ávila Consultoria 2013) ("Pimenta De Ávila 2013 Auditoria Técnica de Segurança"); Pimenta De Ávila 2014 Auditoria Técnica de Segurança; Relatório de Inspeção de Segurança Regular: Laudo Técnico de Segurança de Barragem (Pimenta De Ávila Consultoria 2015) ("Pimenta De Ávila 2015 Auditoria Técnica de Segurança"); Geoconsultoria 2016 Auditoria Técnica de Segurança; Tractebel 2017 Auditoria Técnica de Segurança; TÜV SÜD 2018 Auditoria Técnica de Segurança ANM.

241 Vale 2018-19 Relatórios de Anomalias.

242 Relatório Fotográfico sobre Obras Civis para Drenagens (Cogel 2018).

243 Informações de Monitoramento dos drenos são fornecidas no Relatório de Instrumentação no Apêndice C.

a condições piezométricas de campo e de percolação diferentes daquelas esperadas durante a fase de projeto, e análises de estabilidade atualizadas indicavam condições piezométricas elevadas.

No início de 2018, a Vale implementou uma nova modalidade de drenagem na forma de drenos horizontais profundos (conhecidos como "DHPs", conforme com a sigla em português). Os documentos de planejamento dos DHPs previam que a instalação de 11 DHPs na cota 898 m nmm e 21 DHPs na cota 880 m nmm produziriam rebaixamentos entre 8,3 m e 12 m em cerca de dois anos após sua instalação e que os DHPs seriam necessários somente na cota 880 m nmm, a fim de cumprir os objetivos de rebaixamento previsto no projeto.[244]

O plano para instalar os DHPs incluía o seguinte:[245]

- usar ar comprimido para fazer avançar a perfuração até os rejeitos, sem o uso de água;
- instalar revestimento de aço e então fazer avançar o furo, usando uma broca tricônica dentro do revestimento;
- introduzir água, uma vez que somente o torque da máquina seria insuficiente para estender o furo além de 60 m de profundidade, com retorno de água direcionado para uma canaleta abaixo da área de instalação;
- instalar o dreno horizontal; e os primeiros 5 m do dreno eram então grauteados com uma mistura de cimento/bentonita.

A instalação dos DHPs começou em fevereiro de 2018. Até junho de 2018, 14 DHPs tinham sido instalados (DHP 01 a 14).[246] A Figura 32 mostra as localizações dos DHPs instalados.

[244] Nova Simulação de Desaguamento da Barragem I de Rejeitos da Mina de Córrego do Feijãó (MDGeo 2018).
[245] Procedimento para Execução de DHP (AlphaGeos 2018).
[246] Relatório de Instalação dos Primeiros 13 DHPs.

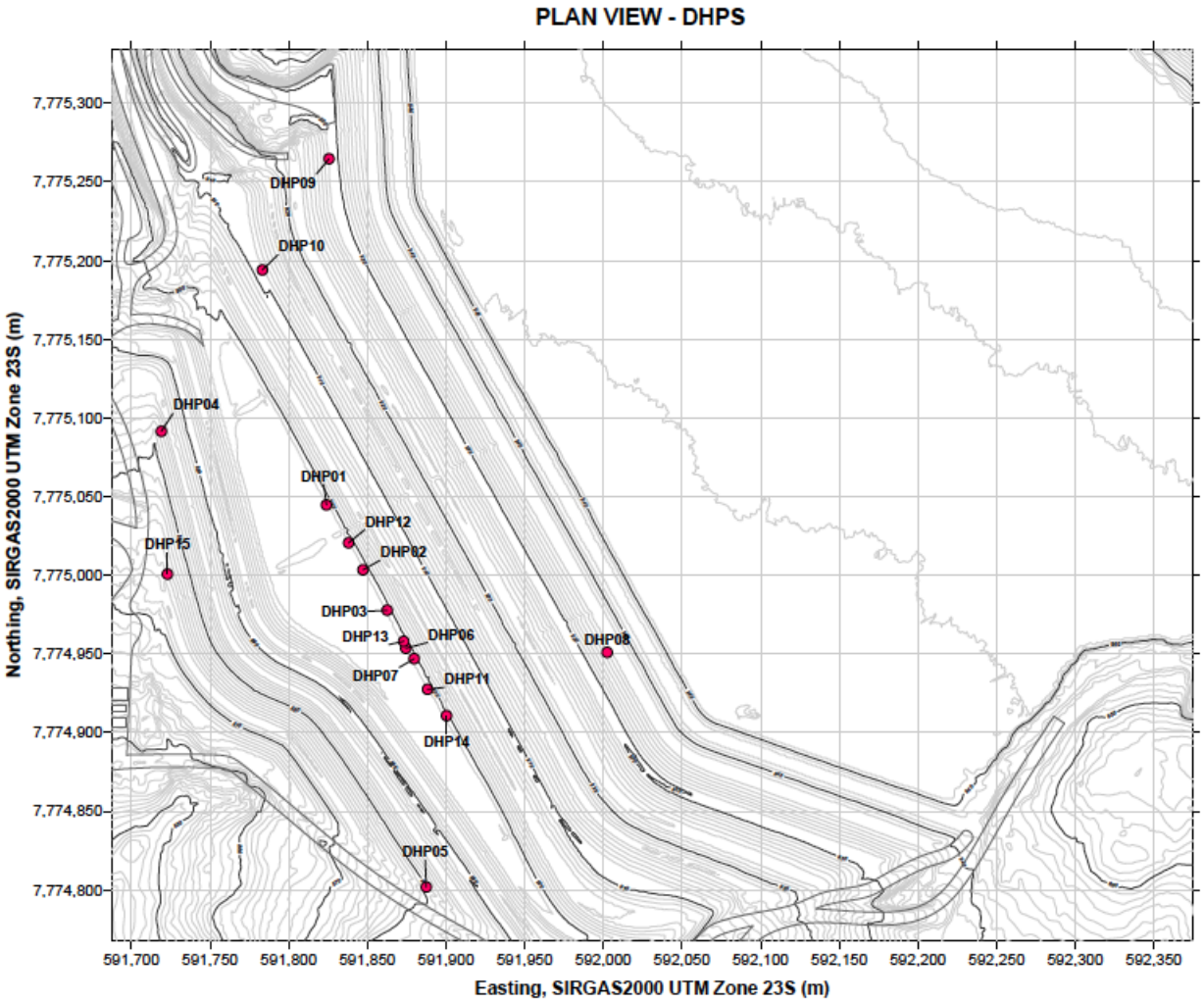


Figura 32: Localizações dos DHPs[247]

Um relatório de instalação dos DHPs descreve os procedimentos de instalação e fornece os registros dos 13 DHPs que foram instalados até o fim de maio de 2018.[248] Os registros indicam que nenhum dos DHPs alcançou o comprimento original de projeto de 100 m. O comprimento típico dos DHPs instalados era de cerca de 60 m e o comprimento máximo reportado foi de 81 m. O avanço da perfuração através da berma foi feito com uma pressão de ar de até 600 kPa, com pressão de água adicional de até 400 kPa aplicada nos rejeitos. O único problema reportado

[247] Figura 9-1 do Apêndice C – Dados Históricos de Instrumentação.
[248] Relatório de Instalação dos Primeiros 13 DHPs.

durante a instalação dos primeiros 14 DHPs foi que o DHP 6 estava instalado em uma profundidade de apenas 30 m, sem a instalação de tubo de PVC perfurado.[249]

6.3.1 Instalação do DHP 15

A instalação do DHP 15 começou na manhã de 11 de junho de 2018, fazendo-se um pré-furo através da Berma Inicial. A perfuração foi parada temporariamente entre 12:00 e 1:00 da tarde para o almoço.[250] Quando a perfuração foi retomada, foram encontrados problemas, entre eles: (i) perda de pressão no furo de sondagem à medida que ele passava da berma para os rejeitos; (ii) perda de recirculação de água no furo de sondagem, impedindo o avanço do furo; (iii) colapso aparente do furo ao redor da haste de perfuração e perda da haste de perfuração no furo. Em algum momento entre as 14h e 16h30, foi observada uma descarga localizada de água e finos de minério perto de uma canaleta de superfície a aproximadamente 15 m de distância e 7 m mais alto que o local onde o DHP 15 estava sendo instalado, conforme mostrado na Figura 33.[251] O radar detectou uma deformação pequena, porém rápida, em uma área ligeiramente acima do DHP 15, conforme descrito no Apêndice D. A análise subsequente de registros de sismógrafos próximos, realizadas pelo Painel, está descrita no Apêndice I.

[249] Memorando Técnico sobre a Instalação de DHP, 20 de junho de 2018 (Vale 2018); Relatório de instalação dos primeiros 13 DHPs.
[250] Boletins Diários de Obra da Instalação dos DHPs (Junho de 2018).
[251] Boletins Diários de Obra da Instalação dos DHPs (Junho de 2018).

Figura 33: Local da percolação observada perto do DHP 15[252]

Quando o fluxo foi observado, as atividades de instalação do DHP foram paradas e o furo foi grauteado no mesmo dia.[253] Técnicos trabalharam para mitigar o incidente, gerenciando a água de percolação e usando sacos de areia. Os sacos de areia foram empilhados aproximadamente até 80 cm de altura, com quatro pilhas de largura. Os níveis piezométricos nos piezômetros próximos PZM-7 e PZM-9 foram monitorados aproximadamente a cada 30 minutos, entre 15h30 e 19h25.[254] Durante este período, observou-se que os níveis subiram em aproximadamente 0,6 m e 3,5 m, respectivamente,[255] mas até as 19h25 naquele mesmo dia, eles haviam voltado aos níveis normais.[256] Pequenos aumentos de 0,3 m ou menos também foram registrados no PZM-16 e PZC-24.[257]

Em 14 de junho, durante uma inspeção de campo, foi descoberto um tubo bloqueado sob o solo, perto do local onde o DHP 15 foi instalado. Outro tubo bloqueado foi encontrado a aproximadamente 20 m do local do DHP 15. Quando o tubo a 20 m de distância do DHP 15 foi desbloqueado, os fluxos no DHP 15 diminuíram significativamente, assim como o fluxo no tubo

---

252 Barragem I, Apresentação da Instalação do DHP15 (Vale 2018). Texto adicionado pelos autores.
253 Memorando Técnico Sobre a Instalação de DHP, 20 de junho de 2018 (Vale 2018); Boletins Diários de Obra da Instalação dos DHPs (Junho de 2018).
254 11 de junho de 2018 Ficha de Inspeção de Segurança Regular (Vale 2018).
255 Barragem I, Apresentação da Instalação do DHP15 (Vale 2018).
256 11 de junho de 2018 Ficha de Inspeção de Segurança Regular (Vale 2018)
257 Correspondência por E-mail, 14 de junho de 2018. Estas informações não fazem parte das plotagens dos dados dos piezômetros fornecidas no Apêndice C.

encontrado perto do DHP 15.[258] Após 14 de junho de 2018, não foram mais observados finos de minério.[259]

Até 15 de junho de 2018, medidas corretivas tinham sido implementadas, a percolação foi controlada e os trabalhos estavam em andamento no sentido de consertar a canaleta de drenagem próxima danificada.[260] Por cinco dias após o incidente, a equipe emitiu um relatório diário de segurança. Nenhum outro DHP foi instalado após o incidente do DHP 15. A Figura 34 mostra uma imagem de uma semana antes da ruptura, destacando os locais do DHP 15 e da percolação observada em 11 de junho de 2018.

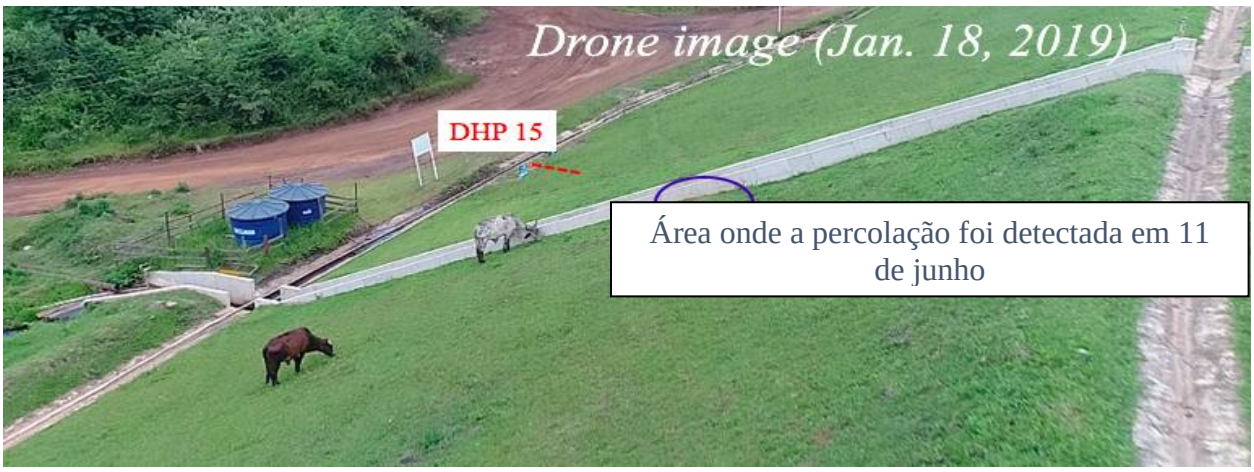


Figura 34: Imagem de 18 de janeiro de 2019, filmagem com drone

6.4 Percolação

Conforme discutido na Seção 5, o projeto da Barragem I incluía um sistema de drenos laterais e drenos de subsuperfície nos alteamentos, a fim de coletar e direcionar água para a superfície da barragem. Os fluxos destes drenos eram coletados em tubos e canaletas de drenagem superficial e eram monitorados através de medidores de vazão; os registros destes medidores de vazão são fornecidos no Apêndice C. Os drenos eram destinados a evitar que a percolação através dos alteamentos umedecesse a face jusante da barragem, o que poderia levar a uma instabilidade localizada ou geral da face da barragem.

[258] Memorando Técnico sobre a Instalação de DHP, 20 de junho de 2018 (Vale 2018).
[259] 14 de junho de 2018 Ficha de Inspeção de Segurança Regular (Vale 2018).
[260] 15 de junho de 2018 Ficha de Inspeção de Segurança Regular (Vale 2018).

A percolação foi observada e reportada várias vezes durante a história da Barragem I. Por exemplo, a percolação foi observada e reportada no Segundo Alteamento já em 1983,[261] e também foi observada e reportada na Berma Inicial durante o projeto do Quarto Alteamento em 1995. A percolação também foi reportada na época do projeto dos Nono e Décimo Alteamentos, concluídos em 2006; o relatório de projeto indica que a percolação foi observada ao longo do talude à jusante, perto do pé do Quarto Alteamento, na época em que o Nono e o Décimo Alteamentos estavam sendo projetados.[262]

Auditorias técnicas anuais de segurança da Barragem I, realizadas após a conclusão do Décimo Alteamento, no geral não identificam preocupações com percolação,[263] até uma auditoria em 2018, que indicava percolação em situação de transição de "boas práticas" para "não conformidade moderada", iniciando em março de 2018.[264] No entanto, relatos informais indicam que a percolação era uma ocorrência regular em partes da face jusante da barragem. Em julho de 2018, um relatório de avaliação periódica de desempenho indicou a presença de umidade perto da seção transversal 3 da barragem durante a construção do sistema de desvio de água,[265] e uma revisão das anomalias no período de um ano antes da ruptura identificou numerosos relatos de percolação e esforços subsequentes de mitigação.[266] Os esforços de mitigação incluíam o aumento do monitoramento, a redução dos entupimentos e melhorias na drenagem.

6.5 Programa de Perfuração em Progresso no Momento do Rompimento da Barragem

A partir de setembro de 2018, a Vale iniciou dois projetos, incluindo atividades de sondagem, na Barragem I. Um deles era o projeto "As-Is", que era um programa de exploração de subsuperfície destinado a coletar informações sobre as propriedades dos materiais da barragem. O segundo projeto envolvia a coleta de informações para desenvolver planos para o descomissionamento da barragem, incluindo a instalação de nova instrumentação. A perfuração para os dois projetos foi especificada para ser realizada utilizando perfuração à percussão onde possível e então métodos de perfuração rotativa, onde a perfuração à percussão não pudesse avançar no furo de sondagem.[267] Onde a perfuração não pudesse ser realizada usando estes

---

261 Revisão Técnica Suplementar - Análise de Estabilidade em Condições de Carga Não Drenada (Geoconsultoria); Relatório de Projeto do Quarto Alteamento.
262 Geoconsultoria, Relatório de Inspeção sobre o Nono e Décimo Alteamento.
263 Pimenta De Ávila 2013 Auditoria Técnica de Segurança , Pimenta De Ávila 2014 Auditoria Técnica de Segurança, e Pimenta De Ávila 2015 Auditoria Técnica de Segurança, que não mencionam preocupações com percolação. Veja também Geoconsultoria 2016 Auditoria Técnica de Segurança, e Tractebel 2017 Auditoria Técnica de Segurança, que mencionam que a percolação não foi observada.
264 TÜV SÜD 2018 Auditoria Técnica de Segurança ANM.
265 Julho de 2018 Análise de Performance Periódica da Barragem (Vale 2018).
266 Vale 2018-19 Relatórios de Anomalias.
267 Investigações Geotécnica de Campo: Especificação Técnica (TÜV SÜD).

métodos de perfuração, técnicas de sondagem usando brocas HQ (ou seja, 96 mm de diâmetro externo) e métodos de *double barrel* (wireline) foram especificados e aplicados.

O escopo de trabalho de cada um destes projetos parece ter sido o seguinte:[268]

- O projeto As-Is incluía 19 furos de sondagem a serem feitos, usando uma combinação de métodos de perfuração, incluindo percussão, hollow-stem auger e perfuração rotativa em rocha com circulação de água. Dos 19 furos de sondagem, oito foram executados antes da ruptura; um furo de sondagem adicional (B1-SM-21) estava em progresso no dia do rompimento. Os registros de sondagem disponíveis para análise indicavam que a perfuração era realizada com uma sonda GEO-115, mas não descrevem os equipamentos ou método de perfuração usados.[269] Nenhum relatório final de sondagem foi produzido para estes furos de sondagem. Todos os furos de sondagem que foram executados antes da ruptura foram na base da barragem, em solo natural, não na barragem em si. Assim sendo, eles não serão discutidos adiante.

- A investigação conduzida como parte do projeto de descomissionamento incluía três sondagens de CPTu, quatro testes sísmicos DMT, a instalação de quatro inclinômetros verticais e oito furos de sondagem em que piezômetros de corda vibrante seriam instalados. Os furos de sondagem que tinham sido executados antes da ruptura estão identificados na Tabela 10 e seus locais são mostrados na Figura 35. Todos os furos de sondagem identificados na Tabela 10 foram feitos na própria barragem. De acordo com os registros de sondagem disponíveis para análise, a sondagem foi realizada usando uma combinação de métodos de perfuração, incluindo perfuração à percussão e perfuração rotativa em rocha com circulação de água, por meio de uma sonda SDH-400, com um furo de sondagem de 86 mm de diâmetro.[270]

[268] TÜV SÜD 2018 Localização de Investigação Complementar; Investigações Geotécnica de Campo: Especificação Técnica (TÜV SÜD).
[269] Registros de Sondagem Geocontrole.
[270] Projeto Detalhado de Serviços de Investigação Geotécnica e Anexos (Fugro); Registros de Sondagem Fugro (3 de outubro de 2018 a 24 de janeiro de 2019).

Tabela 10: Furos de sondagem executados ou iniciados na Barragem I até a data da ruptura[271]

ID do Furo	El. Aprox. solo (m nmm)	Profundidade (m)	El. Do Fundo do Furo (m nmm)	Furo de Sondagem Iniciado	Furo de Sondagem Concluído	Comentários
INC-03	923	53	869,5	21 out 2018	3 nov 2018	
INC-04	923,6	40	854,6	3 out 2018	9 out 2018	
INC-05	895,1	47,5	869,5	17 out 2018	19 out 2018	
INC-06	923	45,5	869,5	7 nov 2018	13 nov 2018	
B1-SM-12	905	50,5	855	22 nov 2018	4 dez 2018	
B1-SM-07	898,5	41,5	857	23 nov 2018	29 nov 2018	
B1-SM-11	899	28,5	870,5	30 nov 2018	Desconhecido	As anotações do sondador não indicam se ou quando a sondagem foi concluída.
B1-SM-08	905	51,4	854	7 dez 2018	20 dez 2018	
B1-SM-09	929,5	76	853,5	7 jan 2019	11 jan 2019	
B1-SM-13	929	65,5	Igual ou abaixo de 863,5	21 jan 2019	N/A (em progresso em 25 jan 2019)	Esta sondagem estava em progresso no dia da ruptura. Anotações do sondador de um dia antes da ruptura estão disponíveis, mas não há anotações disponíveis para a data da ruptura.

[271] Projeto Detalhado de Serviços de Investigação Geotécnica e Anexos (Fugro); Vale Planta e Quadros de Locação de Instrumentação Complementar ; Registros de Sondagem Fugro (3 de outubro de 2018 a 24 de janeiro de 2019).

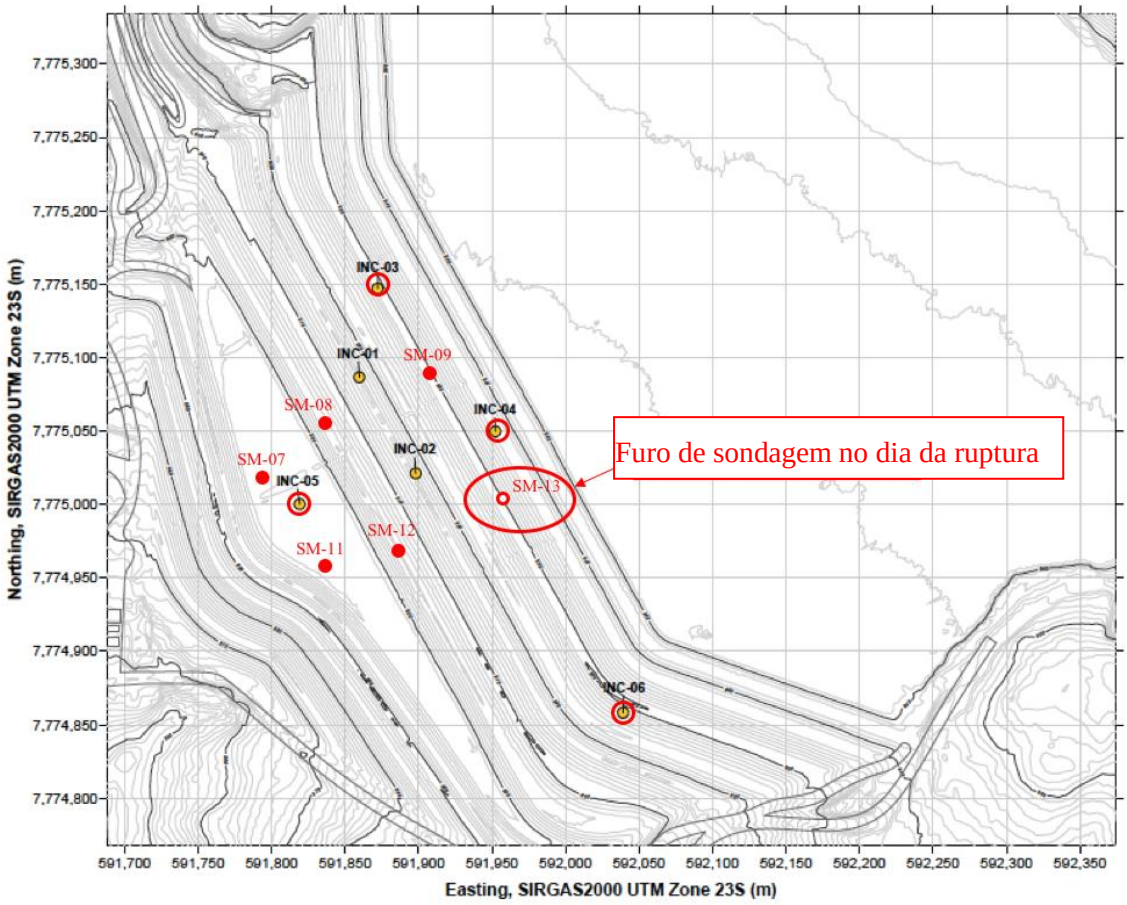


Figura 35: Furos de sondagem na Barragem I entre outubro de 2018 e a ruptura[272]

A perfuração do B1-SM-13 estava em andamento no dia do rompimento. Não há registro de sondagem ou outro relatório do sondador sobre a perfuração realizada no dia do rompimento. No entanto, registros de sondagem de todos os dias anteriores, incluindo o dia anterior ao rompimento, estão disponíveis. No dia anterior à ruptura, de acordo com os registros de sondagem,[273] a perfuração tinha avançado a uma profundidade de 65,5 m abaixo da elevação do solo, de aproximadamente 929 m nmm, até uma elevação de fundo de aproximadamente 863,5 m nmm. Esta era aproximadamente a elevação dos solos naturais abaixo dos rejeitos. Esta é a profundidade e a elevação em que a perfuração provavelmente iniciou no dia do rompimento. Além disso, registros mostram que o método de perfuração foi trocado, de percussão em

[272] Figura 8-1 do Apêndice C – Dados Históricos de Instrumentação, com os locais dos furos de sondagem adicionados.

[273] Registros de Sondagem Fugro (3 de outubro de 2018 a 24 de janeiro de 2019).

profundidades rasas para rotativo, quando o nível de água na barragem foi alcançado; assim sendo, é provável que a perfuração em B1-SM-13 estivesse sendo realizada usando métodos rotativos no dia do rompimento. Este método envolvia a recirculação de água no furo de sondagem. Na ocasião do rompimento, os sondadores tinham trabalhado naquela manhã e provavelmente avançaram com o furo de sondagem a partir do ponto de término do dia anterior, possivelmente avançando 15 m, a uma profundidade de aproximadamente 80 m.

Os registros de perfuração dos outros furos de sondagem não contêm indícios de problemas durante a perfuração. Em particular, o furo de sondagem mais próximo de B1-SM-13 era o B1-SM-09, que estava localizado na mesma elevação na barragem e aproximadamente a 50 m em direção à ombreira direita. Este furo de sondagem foi concluído cerca de duas semanas antes do furo de sondagem B1-SM-13 e a uma profundidade semelhante. Ainda, o furo de sondagem B1-SM-08, que foi perfurado seis semanas antes e a 50 m de distância de B1-SM-13, era o único outro furo de sondagem avançado até uma profundidade que possa ter encontrado solos abaixo dos rejeitos, semelhantes àqueles que provavelmente teriam sido encontrados pelo furo de sondagem B1-SM-13. Nenhum problema foi reportado para ambos B1-SM-09 ou B1-SM-08 nos registros de sondagem.[274]

[274] Registros de Sondagem Fugro (3 de outubro de 2018 a 24 de janeiro de 2019).