

EXECUÇÃO DO REFORÇO ESTRUTURAL DO BARRAMENTO PRINCIPAL DE USINA HIDRELÉTRICA

L.Filgueiras

Autor – Construtora Gmaia, Belo Horizonte, Brasil

L. Xavier

Co-autora – Construtora Gmaia, Belo Horizonte, Brasil

Resumo: O presente artigo visa apresentar as diretrizes gerais de projeto, análise e execução utilizados para o reforço do barramento principal de usina hidrelétrica de grande porte. Descrevemos condições para a correta execução do projeto executivo, assim como o bom desempenho e durabilidade das estruturas, sempre considerando os aspectos de segurança, confiabilidade e economia. O barramento principal é composto por fechamentos das margens esquerda e direita, vertedouro e tomada d'água de concreto compactado a rolo (CCR) e concreto convencional (CCV), com juntas de contração. A metodologia construtiva utilizada será constituída por blocos de concreto massa convencional com a finalidade de aumentar o peso próprio da estrutura, reforçando a estrutura original existente para atendimento aos coeficientes de estabilidade, motivado pela presença de sedimentos oriundos do rompimento da barragem localizada à montante da mesma.

Palavras-chave: Barramento, reforço de barragem, barragem, UHE.

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2010, foi criada a Lei Federal N° 12.334, que visava aumentar a segurança e as fiscalizações das barragens, criando-se a Política Nacional de Segurança de Barragens (PNSB). A PNSB tem como objetivo garantir os padrões de segurança destinados à barramentos com acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de sedimentos e à acumulação de resíduos industriais (BRASIL, 2010). A PNSB foi criada de maneira a garantir certos padrões de segurança, regulamentar ações e padrões, reduzir a possibilidade de acidentes, aumentar a segurança dentro de ambientes próximos aos barramentos e fomentar informações acerca da segurança de barragens.

Apesar das inúmeras vantagens da construção de barragens, são as suas eventuais falhas estruturais que causam apreensão, uma vez que os acidentes envolvendo essas obras são de gravidade elevada. Não é permissível conviver com tais riscos (Oliveira 2012).

O Barramento principal listado nesse artigo técnico é composto por fechamentos das margens esquerda e direita, vertedouro e tomada de água de Concreto Compactado a Rolo (CCR), e concreto convencional (CCV), com juntas de contração nas extremidades de cada bloco ao longo do barramento, conforme Figura 1.

O Circuito de Geração é composto pelo conjunto Tomadas de Água, Condutos Forçados e Casa de Força, sendo esta projetada em concreto convencional (CCV).

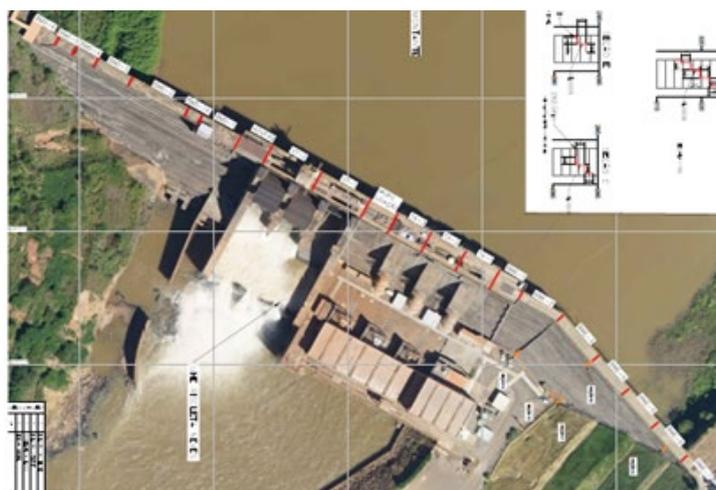


Figura 1. Barramento principal

Fonte: acervo digital da Gmaia

O acesso ao empreendimento se dá por vias não pavimentadas, sendo o acesso à ombreira direita do barramento mais distantes, uma vez que não existe passagem sobre o rio para veículos através do barramento da UHE. Os principais acessos à UHE estão destacados na Figura 2 em linhas vermelhas.

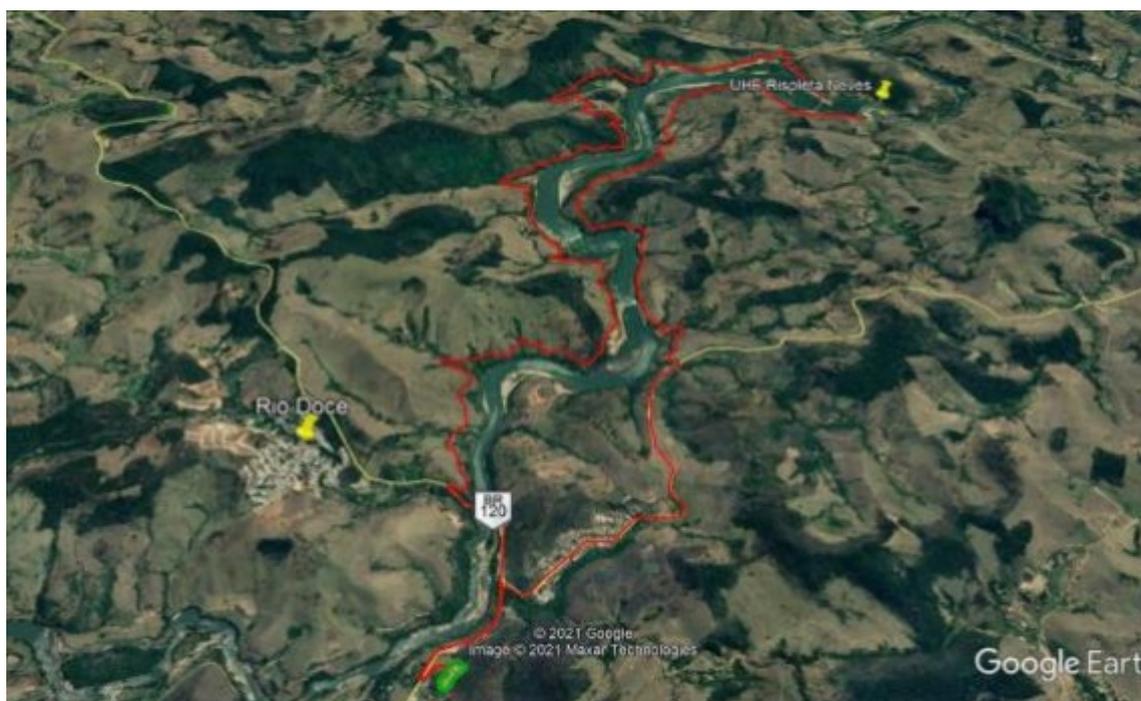


Figura 2. Principais acessos a UHE.
Fonte: acervo digital da Gmaia

A UHE foi uma das estruturas atingidas pelos sedimentos oriundos do rompimento da barragem em 2015. Após esse acidente a UHE ficou inoperante, sendo reavaliada e posteriormente reforçada. As análises de estabilidade foram necessárias devido à presença de sedimentos junto ao barramento, carregamento não previsto em projeto, além da atualização dos critérios em virtude da publicação do Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas da Eletrobrás (2003), posterior ao projeto e início de implantação do empreendimento.

As atividades previstas para o barramento da UHE envolvem lançamento de concreto à jusante, atendendo as boas práticas de engenharia como preparo de superfície, ancoragens entre concreto novo e existente, controle de temperatura do novo concreto, sistema de forma trepante, cura e demais fatores intrínsecos ao somatório das atividades executivas.



Figura 3. Modelagem do projeto utilizando tecnologia BIM

Fonte: acervo digital da Gmaia

Dentre as avaliações de estabilidade realizadas em cada bloco, foi constatado que o BME-1, BME-2, BME-3, BME-4, BME-5, BME-6, BMD-1, BMD-3, BMD-4, BMD-5, BMD-6 e muro de ligação (Figura 3) não atendiam aos critérios de projeto Eletrobrás na condição de carregamento referente ao retorno de NA operacional (reservatório cheio) e a manutenção do sedimento a montante do barramento.

Ressaltamos que, na época da construção da usina ainda não havia sido publicado os critérios de projeto Eletrobrás, ou seja, antes do reforço a usina se encontrava estável, mesmo com o sedimento depositado a montante e reservatório rebaixado.

2 PROCEDIMENTOS EXECUTIVOS E DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O Barramento é constituído por uma barragem de concreto, com crista na El. 330,00 m, tendo, na calha do rio, o Vertedouro com crista na El 311,00 m e a Tomada d'Água com soleira na cota 308,20 m.

As atividades de reforço previstas na UHE contemplam preenchimento de concreto convencional vibrado (CCV) e/ou concreto bombeável sobre o CCR, conforme indicado pelo Projeto Executivo, a jusante no pescoço de 12 (doze) estruturas do Barramento: BME-1, BME-2, BME-3, BME-4, BME-5, BME-6, BMD-1, BMD-3, BMD-4, BMD-5, BMD-6 e Muro de Ligação.

Basicamente, a UHE passou a necessitar de reforço atendendo aos critérios de segurança e estabilidade para o novo cenário de carregamento, sendo assim foi desenvolvido projeto

executivo (Figura 4) indicando o volume de concreto no qual cada bloco do barramento original deveria receber para atender os fatores de segurança mínimos estabelecidos.

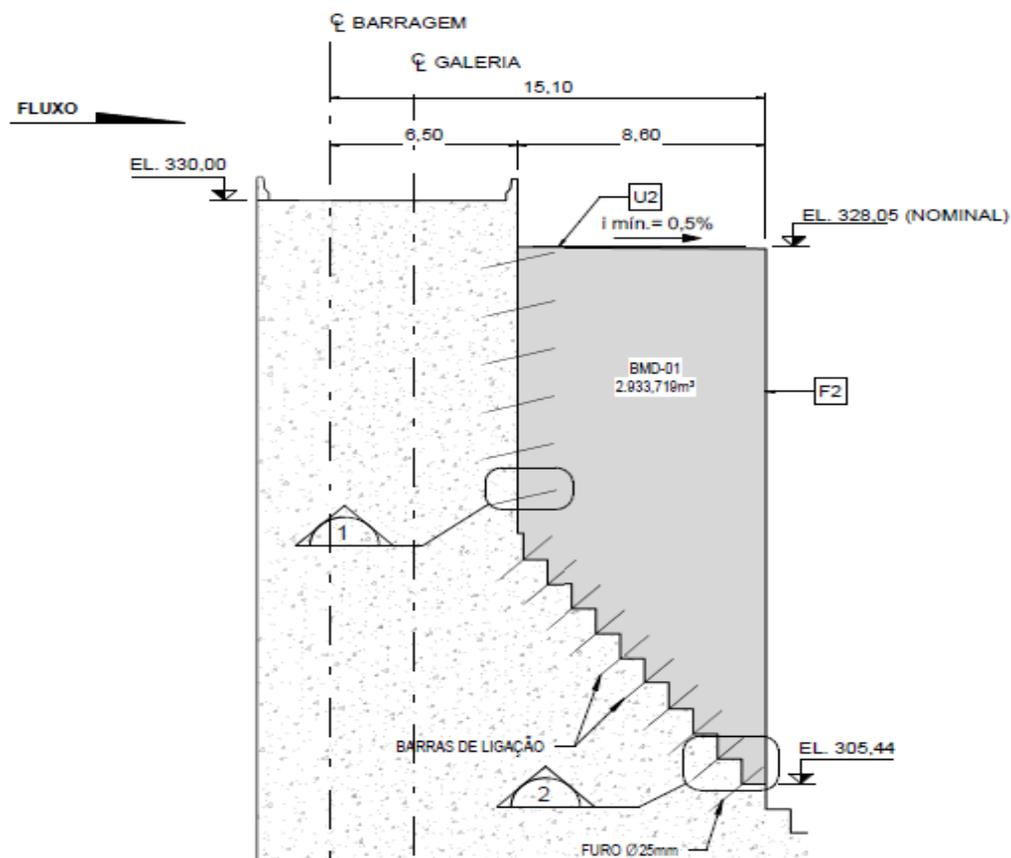


Figura 4. Seção transversal de reforço BMD-1.
Fonte: acervo digital da Gmaia.

O local destinado para o canteiro de obras fica localizado a margem esquerda a jusante do barramento, conforme identificado nas figuras 5, 6 e 7. Além do canteiro central, foram montadas duas frentes de serviço avançadas para dar apoio à equipe operacional, sendo elas: uma central de armação e uma central de forma. Para atender a demanda de concreto, foi montada uma central de concreto em outro local (figura 8 e 9). Para atendimento aos requisitos contratuais a obra implantou laboratório próprio, a cargo da Holanda Engenharia Ltda.



Figura 5. Localização do canteiro.
Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 6. Localização do canteiro.
Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 7. Implantação canteiro.
Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 8. Estrutura física do laboratório.
Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 9. Estrutura física do laboratório.

Fonte: acervo digital da Gmaia

3 FASE DE ANÁLISE

Primeiramente foram avaliados documentos da etapa de projeto executivo da construção da UHE, datados de 2002 a 2004, além de sondagens mecânicas, videoscopia, ensaios e relatórios de avaliação dos mesmos, realizadas/elaborados após o evento de ruptura da Barragem a montante da UHE, datados de 2021.

O objetivo dessa avaliação é tomar conhecimento do projeto, geometria, critérios e suas particularidades, de forma a subsidiar as análises de estabilidade das estruturas de concreto da usina para nova condição de carregamento, a partir dos reforços e fatores de segurança adotados, ou seja, definidos pela Eletrobras.

Após o rompimento da barragem a montante da UHE e o assoreamento do reservatório da Usina, vários estudos foram realizados para avaliar a integridade e a estabilidade das estruturas de concreto do barramento, Vertedouro e Tomada de Água.



Figura 10. UHE antes do rompimento da barragem a montante.

Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 11. UHE após rompimento da barragem a montante.

Fonte: Wikipédia, a enciclopédia livre (wikipedia.org)

4 REFORÇO DO BARRAMENTO

As análises de estabilidade indicaram a necessidade de reforço dos blocos BME-1, BME-2, BME-3, BME-4, BME-5, BME-6, BMD-1, BMD-3, BMD-4, BMD-5, BMD-6 e Muro de Ligação para atendimento aos critérios de estabilidade.

Em resumo foram avaliadas as combinações de carregamentos nas análises de estabilidade, alternando NA à montante e jusante, cota de sedimentos e nível de operação dos drenos.

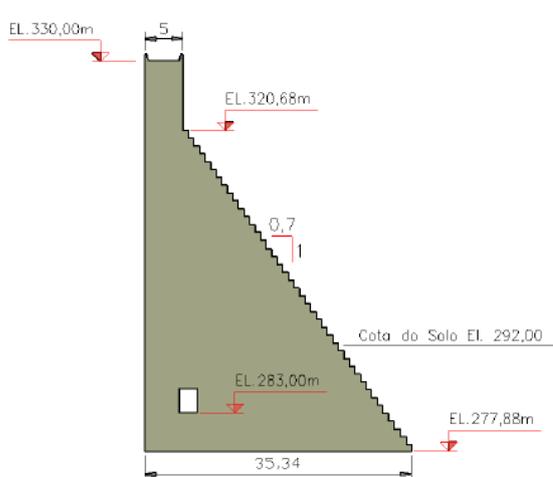


Figura 1: Seção Transversal - BME-2

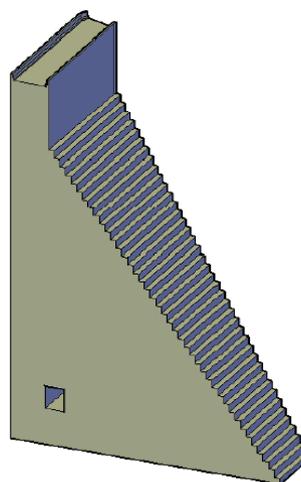


Figura 2: Vista de jusante - BME-2

Figura 12. Seção transversal e vista 3D

Fonte: gmaia

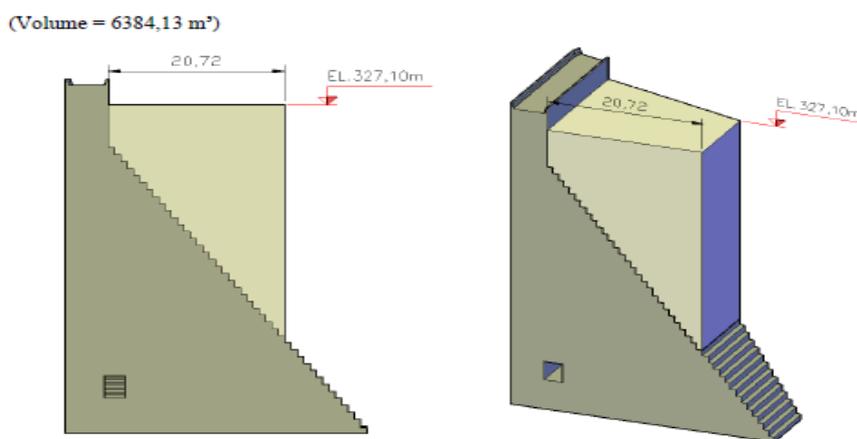


Figura 13. Seção transversal e vista 3D BME-2 com reforço

Fonte: gmaia

5 SERVIÇOS EXECUTADOS

Dando início as atividades de execução da obra, mesmo que em caráter experimental, foram iniciados os primeiros testes de hidrojateamento, com a finalidade de demonstrar a eficiência do método para limpeza do substrato em concreto existente do barramento da UHE.



Figura 14. Teste com o hidrojato.

Fonte: acervo digital da Gmaia

Na sequência de execução, foi iniciado o hidrojateamento da primeira camada do bloco BME02. Logo após foi iniciado o serviço de furação para a ancoragem das barras de ligação.



Figura 15. Execução de furos para ancoragem.

Fonte: acervo digital da Gmaia

Após a conclusão dos furos de ancoragem e limpeza dos mesmos, iniciou-se a fase de ancoragem das barras de ligação.



Figura 16. Ancoragem das barras de ligação.

Fonte: acervo digital da Gmaia

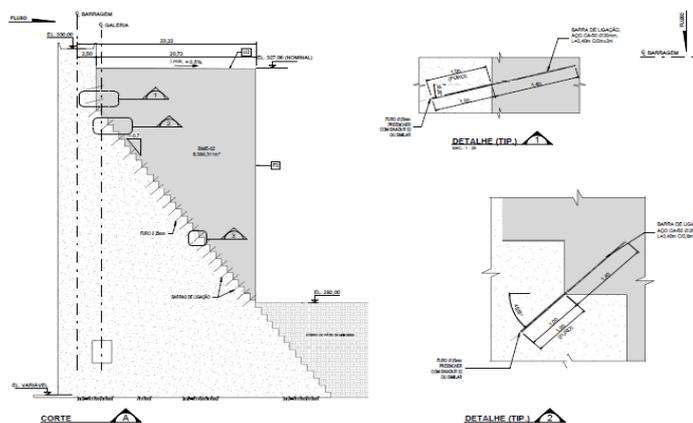


Figura 17. Detalhamento projeto reforço UHE - Ancoragem das barras de ligação.

Fonte: acervo digital da Gmaia

Com todas as etapas de hidrojateamento, ancoragem das barras de ligação e montagem das formas trepantes finalizadas, a construtora gmaia prosseguiu com a execução dos serviços de ancoragem e montagem de forma nos blocos BME-03 e BME-04.

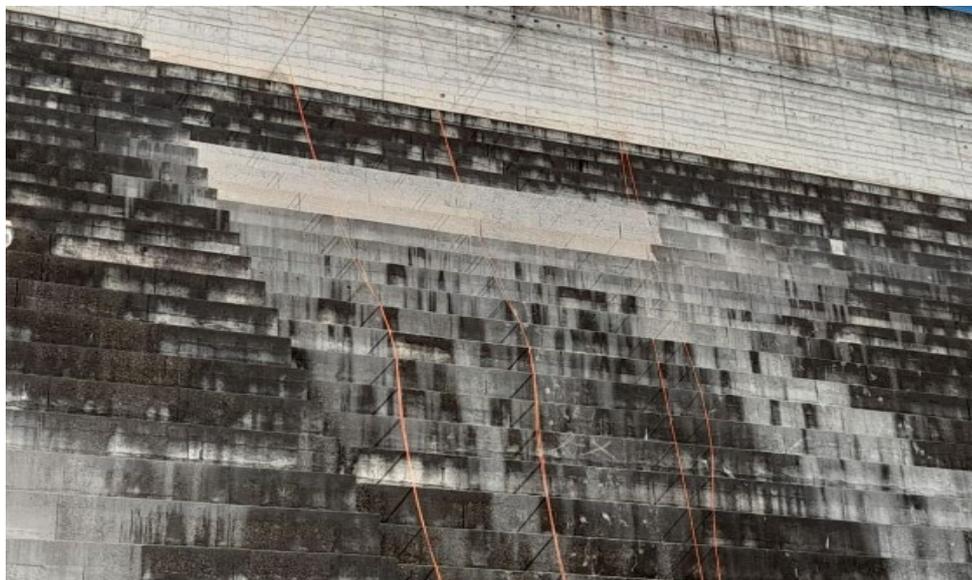


Figura 18. Hidrojateamento do BME-04.

Fonte: acervo digital da Gmaia

Foi realizada a primeira concretagem, mediante liberação do contratante nos blocos BME-02 e BME-03.



Figura 19. Concretagem da primeira camada do bloco BME-02.

Fonte: acervo digital da Gmaia

A superfície a ser concretada recebeu tratamento por meio de corte por água a alta pressão, com a finalidade de eliminar sujeiras, fungos, poeiras e partículas soltas, de modo a garantir boa aderência. Nos pontos onde houve infiltrações visíveis no barramento original, foram realizadas injeções de poliuretano no concreto do barramento.

5.1 Montagem de formas

As fôrmas e sistemas de ancoragem foram dimensionadas para suportar a pressão resultante do lançamento e vibração do concreto, estando rigidamente fixadas na posição correta e ser suficientemente estanques para impedir a perda de argamassa.



Figura 20. Sistema de formas trepantes.
Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 21. Sistema de tirantes internos – Forma.
Fonte: acervo digital da Gmaia

6 TECNOLOGIAS UTILIZADAS

6.1 Considerações da Tecnologia do Concreto Utilizado

Para a execução das estruturas de modo a atender as expectativas de cronograma da obra, foi estratégica a utilização de mistura de concreto do tipo convencional vibrado (CCV), de lançamento bombeado e, portanto, com as características de abatimento “*Slump*” e manutenção da trabalhabilidade compatíveis com o ciclo de produção requeridos, desde a liberação da mistura na central de concreto, transporte, lançamento, adensamento e cura.

Por se tratar de um bloco de concreto massa (simples / não armado), foi especificado o concreto de resistência característica (f_{ck}) igual a 12 MPa, controlado aos 90 dias de idade. Também foi definido pela projetista a massa específica do concreto mínima de 23 kN/m^3 ($\sim 2.300 \text{ kg/m}^3$) de acordo com os requisitos de estabilidade da estrutura para reforço do barramento.

Desta forma, em função das características específicas da mistura para o lançamento via bomba, exigiu-se um teor mínimo de argamassa e conseqüentemente de cimento, com teores de consumo de aglomerante variando entre 210 e 220 kg/m^3 .

Além do controle sistemático do abatimento *slump* e da determinação da resistência à compressão axial, também foi dada especial atenção para o controle da massa específica (Figura 25) e o monitoramento das temperaturas ambiente e do concreto no estado fresco (Figura 26).

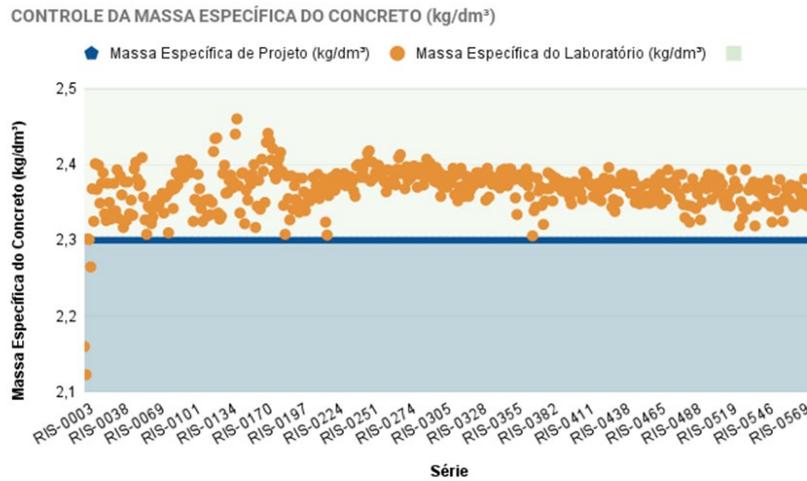


Figura 25. Controle da Massa Específica do Concreto

Fonte: acervo digital da Gmaia

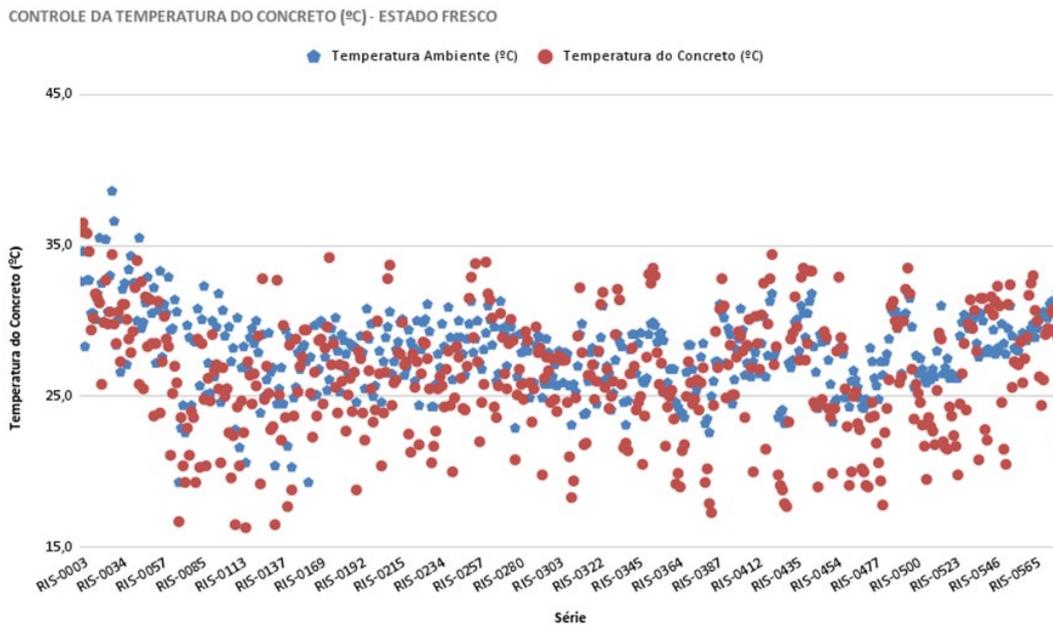


Figura 26. Monitoramento das temperaturas

Fonte: acervo digital da Gmaia

6.2 Estudo Térmico/Monitoramento da temperatura do concreto

De modo geral empregam-se as considerações técnicas das condições ambientais e recomendações práticas pertinentes para a mitigação das temperaturas dos concretos, no intento de diminuição do risco de fissuração dos concretos por origem térmica bem como na formação de etringita tardia (DEF).

O processo usual para cálculo de temperatura indicado na prática é relacionado a norma americana ACI 207, considerando o fluxo bidimensional de calor admitindo a seção transversal da estrutura (mais favorável à dissipação de calor) e da verificação unidimensional no caso de lajes e estruturas onde uma dimensão (altura) é muito menor do que as outras duas (largura e comprimento).

As condições específicas do plano de concretagem atenderam à limitação da temperatura máxima em qualquer região da massa de concreto, de modo a incidir 65°C, como premissa de mitigação da etringita tardia (Figura 23).

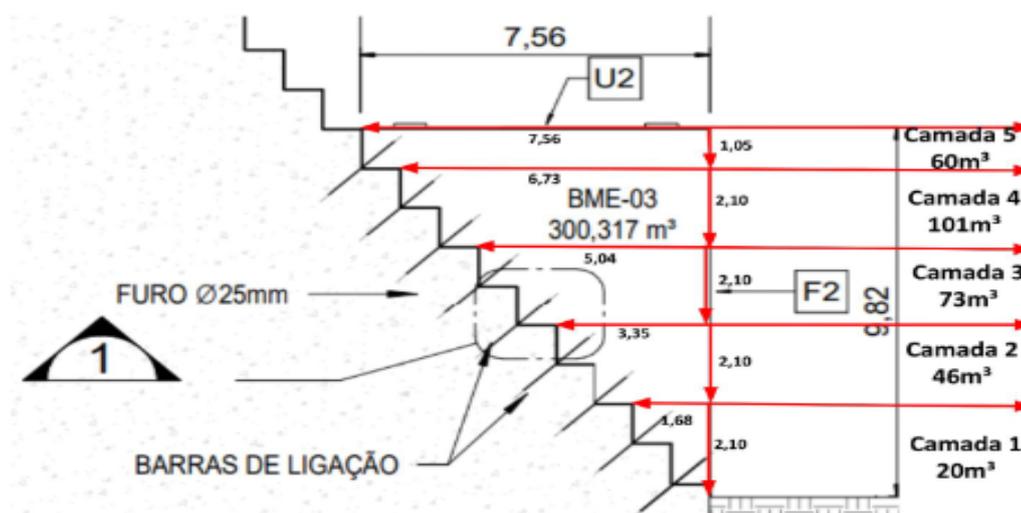


Figura 27. Croqui do plano de camadas inicial de concretagem.
Fonte: acervo digital da Gmaia.

É importante ressaltar que o maior risco era o da retração hidráulica/secagem, devido à elevada relação A/C das misturas (variando entre 0,90 a 1,05) e do clima quente. Portanto, foi redobrada a atenção dos processos de cura no campo, em especial nas primeiras idades, pois

o período mais crítico ocorre nas 72 horas de hidratação do cimento e desenvolvimento das resistências iniciais.

Os cálculos efetuados no estudo térmico indicaram que a temperatura $\leq 53,5^{\circ}\text{C}$ resultaria em conformidade aos coeficientes de segurança estabelecidos quanto ao risco de fissuração de origem térmica. Como observa-se no gráfico a seguir (Figura 28), as leituras nos termopares instalados apresentaram relativa folga neste caso, sendo o termômetro 02 instalado no centro de massa da camada instrumentada.

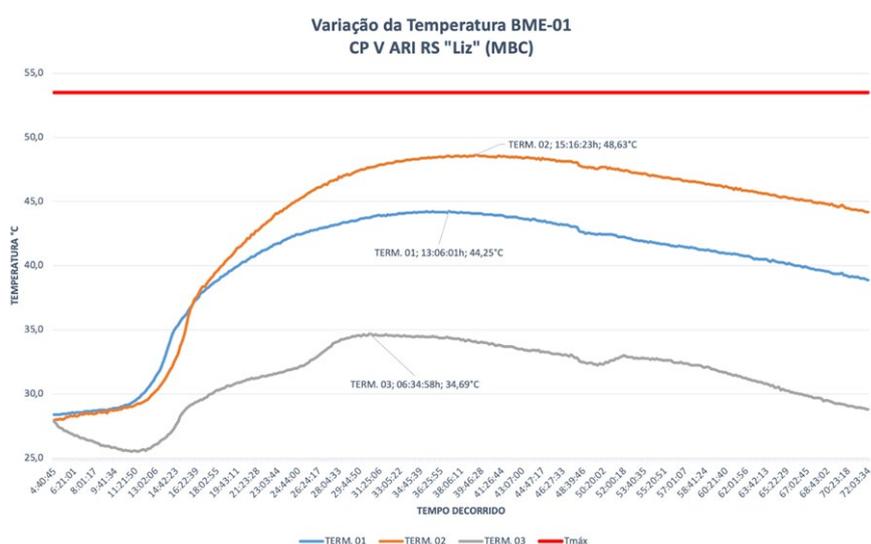


Figura 28. Monitoramento da evolução da temperatura – Bloco BME-01

Fonte: acervo digital da Gmaia

Com base nos estudos realizados, concluiu-se que não haveria a necessidade de algum sistema de pré ou pós resfriamento do concreto, principalmente em decorrência de 3 fatores muito importantes: (1) O calor de hidratação, relativamente baixo para o cimento adotado, igual a 279 J/g no instante de 41 h pelo método “Langavant”; (2) O baixo consumo de cimento das misturas, situando-se entre 210 a 220 kg/m³; O reduzido coeficiente de restrição de base “Kr”, já que os blocos possuem geometria favorável para a deformação livre.

O sucesso da simulação teórica com a execução prática é confirmado pela ausência de trincas/fissuras que possam ser atribuídas por origem térmica.

6.3 Utilização de BIM para planejamento e armazenamento de informações

A utilização dos softwares para execução dos projetos em “BIM”, permitiu que fosse feita uma melhor interação com o cliente, pois o projeto relacionado com programas de modelagem e planejamento melhorou o acompanhamento da obra.

Nas plataformas, foi possível, na fase de planejamento, visualizar a execução completa da obra, e após acompanhar o que foi realizado inserir vários dados pertinentes, como: temperatura do concreto, resistência após rompimento de corpos de prova, data de concretagem, entre outros, dados esses que facilitam a rastreabilidade futura.

Inicialmente foi feita a confecção do projeto em 3D. O software utilizado foi o programa REVIT da empresa Autodesk, com ele foi possível verificar a visão inicial da estrutura da barragem. (Figura 29).



Figura 29. Modelagem utilizando tecnologia BIM

Fonte: acervo digital da Gmaia

Logo após a confecção da geometria do projeto do estado inicial da hidrelétrica, foi feita a inclusão dos blocos que seriam executados, escopo este da obra.



Figura 30. Modelagem utilizando tecnologia BIM

Fonte: acervo digital da Gmaia

Após essa etapa é utilizado outro software da Autodesk para a renderização do projeto. Este software é o Autodesk Navisworks Manage, que consegue agrupar o software 3D com o cronograma da obra. (Figura 32).



Figura 31. Modelagem tecnologia BIM

Fonte: acervo digital da Gmaia

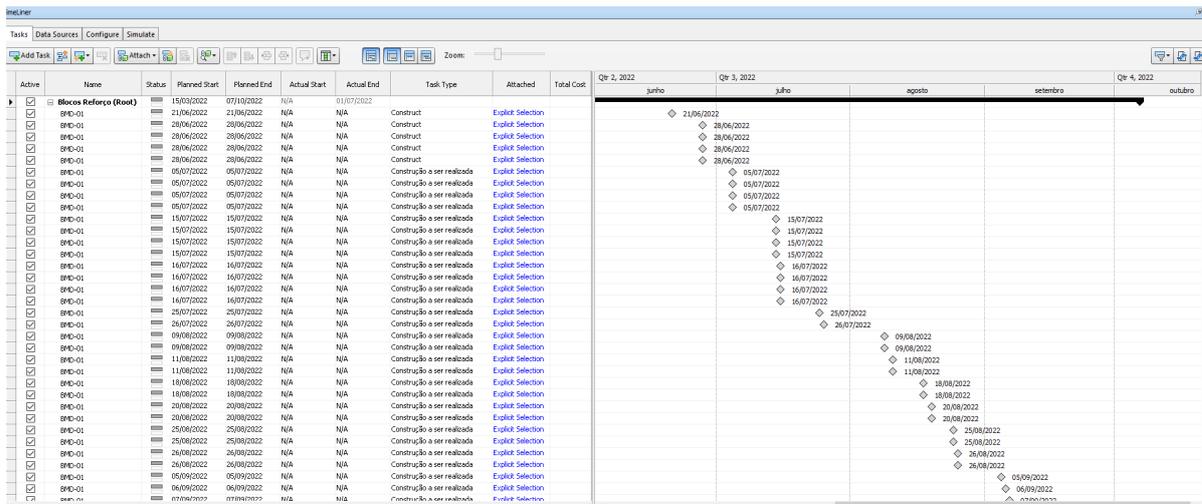


Figura 32. Etapas em azul a serem realizadas na obra

Fonte: acervo digital da Gmaia

Além das vantagens preliminares, os softwares possibilitam que se acrescente informações pertinentes a etapa da obra, conseguindo assim gerar uma melhor rastreabilidade do processo como um todo. No futuro, existindo a necessidade de rastrear algum evento na estrutura executada, pode se verificar informações como data de concretagem, rompimento do corpo de prova, volume executado, temperatura, entre outras.

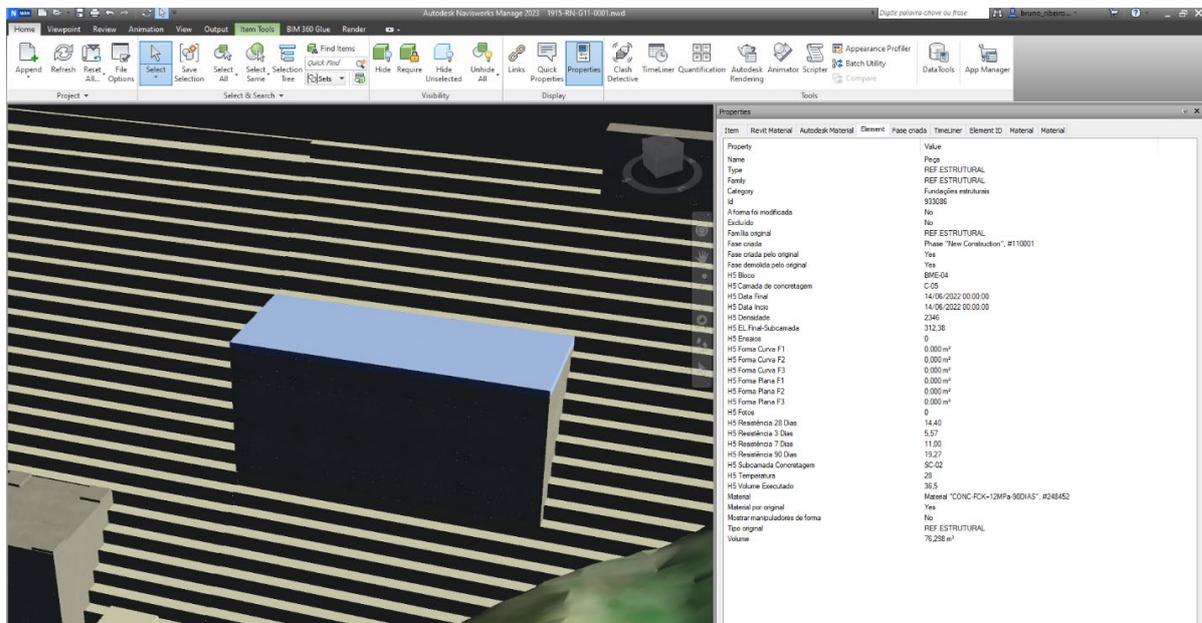


Figura 33. Desenvolvimento BIM – Dados do Bloco.

Fonte: acervo digital da Gmaia

6.4 Utilização de sistema topográfico com nuvens de pontos

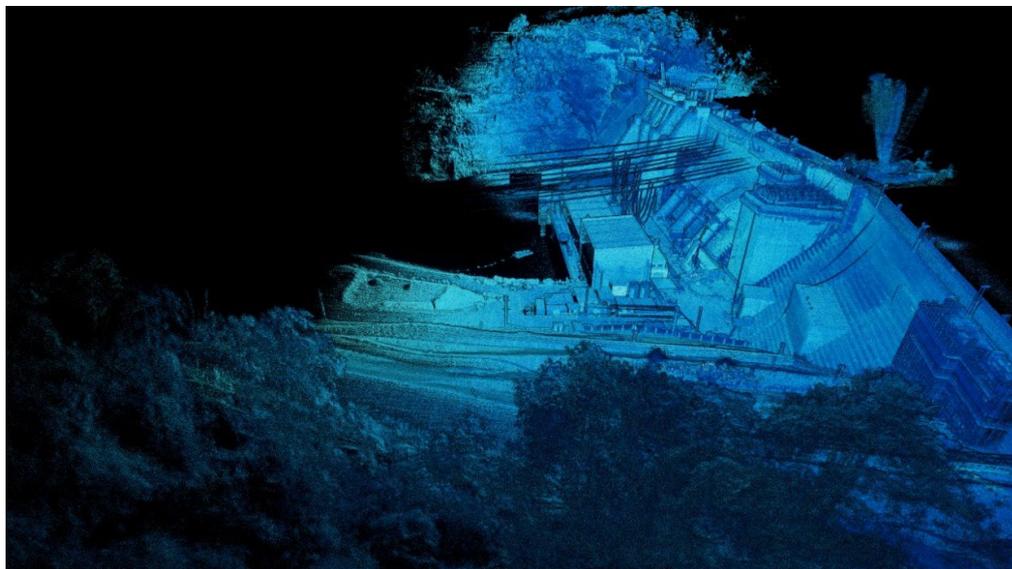


Figura 34. Nuvens de pontos

Fonte: acervo digital da Gmaia

O acompanhamento das concretagens da barragem foi realizado pelo Laser Scanner Hovermap que coleta até 600 mil pontos por segundos com precisão milimétrica.

Esse sistema é baseado em SLAM permitindo com que o laser se localize e mapeie de forma simultânea, resultando em um escaneamento contínuo e em movimento. (Figura 34).

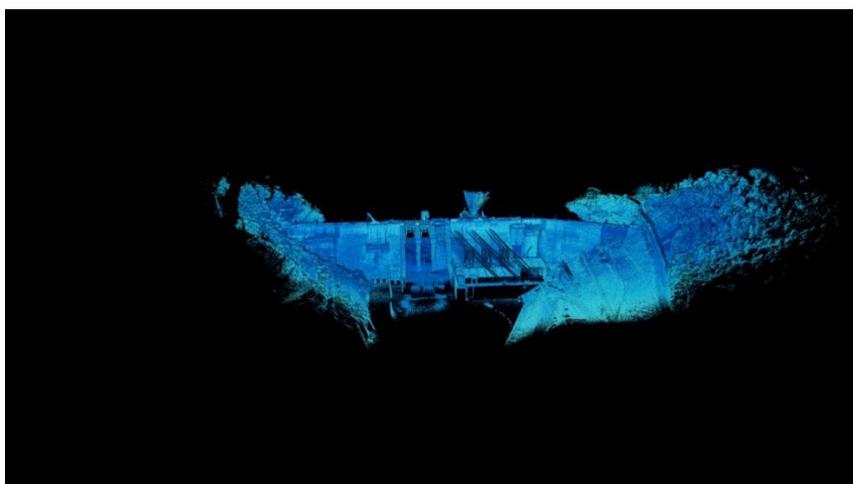


Figura 35. Nuvens de pontos

Fonte: acervo digital da Gmaia

A fim de facilitar o escaneamento e aumentar a segurança, utilizou-se o laser escaner embarcado a um Drone Matrice 300 RTK da DJI, permitindo um escaneamento a uma distância segura para o operador.

Como acessório foi utilizado uma Câmera GoPro Hero 9 Black acoplada ao laser, com a finalidade de colorizar a nuvem de pontos, gerando assim uma nuvem de pontos densa e colorizada. (Figura 37).

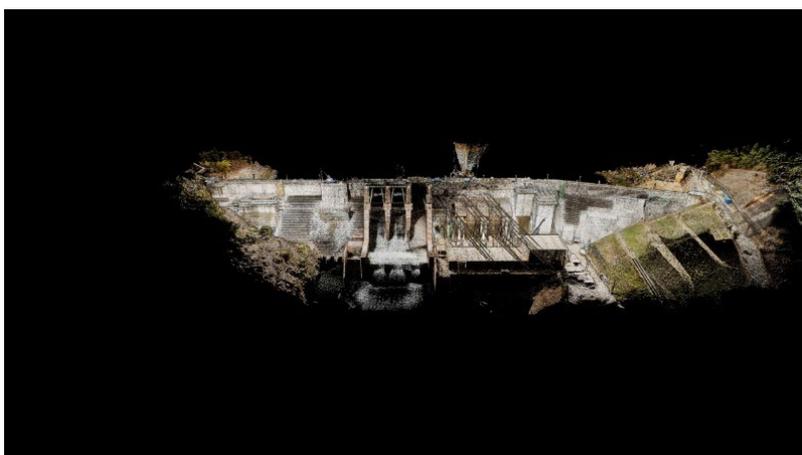


Figura 37. Nuvens de pontos

Fonte: acervo digital da Gmaia

6.5 Utilização de sistema de formas trepantes

O sistema de formas utilizadas durante a execução da obra é o Sistema Trepante. O princípio básico do SISTEMA TREPANTE consiste na reutilização da forma na próxima etapa de concretagem, apoiando-se na ancoragem prevista na camada executada anteriormente. (Figura 38).

Sua aplicação é indicada em estruturas especiais de obras industriais, pilares de pontes e de viadutos e em quase todas as estruturas de usinas hidrelétricas.



Figura 38. Bloco com forma trepante

Fonte: acervo digital da Gmaia

6.6 Construção de central de produção de concreto



Figura 39. Central de concretagem da construtora gmaia

Fonte: acervo digital da Gmaia

Em virtude do grande volume de concreto e da distância da obra até a concreteira mais próxima, foi construída uma central de concreto em ponto estratégico para atender a demanda de volume do reforço.

Parte do concreto da obra, na fase inicial, foi fornecido por concreteiras da região, medida adotada durante o processo de licença e construção da central de concreto.



Figura 40. Central de concretagem da construtora gmaia

Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 41. Central de concretagem da construtora gmaia

Fonte: acervo digital da Gmaia

6.7 Traço

Carta de Traço para Materiais na Condição Superfície Saturada-Seca (S.S.S.)

Especificações do Concreto

Resistência a Compressão Característica (f_{ck}): **12 MPa** Idade de Controle: **90 dias**
 Fator Água/Aglomerante Máx (a/c): **N/A** Abatimento "Slump" Nominal: **130 ± 30 mm**
 Consumo mínimo de aglomerante: **N/A** Espalhamento "Flow" Nominal: **- ± -**
 Tipo de lançamento: **Bombeado** Teor de Ar Incorporado Nominal: **3,0 ± 1,0 %**
 Diâmetro Máximo do Agregado (D_{máx}): **25,0 mm** Aplicação: **Concreto**

Código	Hora	Data	t'	Sd	Fcj	MFc	Ceq	A/C	Resultados / Ensaios	
EXP RIS 012	15:00	15/02/2022	1,282	4 MPa	17,1 MPa	4,37	217 kg/m ³	0,94	Slump 1	140 mm
									Flow	-
									Ar	5,8 %
									M.E. kg/m ³	2.309
									Agregados	
									% peso	% vol.
									34,8%	36,8%
									19,5%	18,9%
									13,8%	13,2%
									32,0%	31,3%
									0,0%	0,0%
									Aspecto:	4
									Temperaturas (°C)	
									Ambiente	24,7
									Cimento	23,3
									Água	23,0
									Concreto	23,4
						M.E. kg/m ³	1+m+A/C	Volume		
						2332	10,74	1000		

a	p	m	k	H	T.P. Total
4,802	4,046	8,848	0,59	9,569	3,7%
Resistência à Compressão Axial - NBR 5739					
Data	Idade (dias)	Resultado (MPa)	Rendimento (MPa/kg/m ³)	Cresc. entre as idades de ensaio	
22/02/2022	7	15,1	0,070	Não aplicável	
01/03/2022	14	19,2	0,088	27%	
15/03/2022	28	-	-	-	
12/04/2022	56	-	-	-	
				-	

7 CONCLUSÕES

O presente artigo apresentou as diretrizes gerais de projeto, análise e execução utilizadas no dimensionamento, verificações de estabilidade, carregamentos e métodos de cálculo das estruturas de reforço do barramento principal da usina hidrelétrica Risoleta Neves após o rompimento da barragem do Fundão.

As análises de estabilidade do barramento, para atender aos fatores de segurança considerados, resultaram em aumento de seção transversal de 12 (doze) blocos, condicionando aproximadamente 19,6 mil m³ de concreto adicionais, com peso específico mínimo de 2,3 ton/m³.



Figura 45. Antes do reforço
Fonte: acervo digital da Gmaia



Figura 46. Após reforço
Fonte: acervo digital da Gmaia

REFERÊNCIAS

- [1] ANM. Agência Nacional de Mineração. Classificação de Barragens de Mineração. Disponível em: <https://app.anm.gov.br/SIGBM/Publico/Estatistica>.
- [2] ANM. Agência Nacional de Mineração. Relatório anual de segurança de barragens de mineração 2019. 2020
- [3] ANM. Agência Nacional de Mineração. Segurança de barragens focada nas barragens construídas ou alteadas pelo método a montante, além de outras especificidades referentes. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/noticias/2019/notaexplicativa-sobre-tema-de-seguranca-de-barragens-focado-nas-barragens-construidas-ou-41-alteadas-pelo-metodo-a-montante-alem-de-outras-especificidades-referentes>.
- [4] BRASIL. Lei Nº 12.334, De 20 De Setembro De 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de sedimentos e à acumulação de resíduos industriais, [...]. Brasília, DF: Presidência da República, [2020].