

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/12

Análise de Incompatibilidade Entre Estudo Geotécnico Preliminar e Condição *In Situ* na Fundação da Barragem de Concreto CCR Germinal

Lucas Pereira Cavalcante

Engenheiro civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, lucaspengenharia@gmail.com

Eduardo Mendonça Mamede Filho

Engenheiro civil, Superintendência de Obras Hidráulicas, Fortaleza, Brasil, eduardomamedef@gmail.com

Naasson Jorge Duarte de Azevedo

Engenheiro civil, Superintendência de Obras Hidráulicas, Fortaleza, Brasil, naasson.azevedo@gmail.com

Fábio Roney do Nascimento Silveira

Geólogo, Superintendência de Obras Hidráulicas, Fortaleza, Brasil, fabio_roney@yahoo.com.br

RESUMO: Este trabalho visa apresentar um estudo de caso acerca da barragem Germinal, situada no município de Palmácia, no Estado do Ceará, que foi construída com Concreto Compactado a Rolo (CCR), com capacidade de acumulação de aproximados 2 hm³ e 28,5 m de altura. Esta obra acabou por se tornar um exemplo de projeto que não previu com exatidão as condições do subsolo rochoso. No caso da obra em questão, constatou-se durante a execução a presença de blocos de rochas soltos (tálus) e de fraturamentos sistemáticos não previstos pelas sondagens iniciais. O intenso fraturamento e alteração das rochas inseridas na zona de falha localizada no leito natural do rio foram pontualmente prejudiciais para a definição da profundidade da fundação neste local. Tal condição tornou necessária um acréscimo substancial do volume de concreto de regularização, além de ensaios de perda d'água e injeções de cimento, em relação ao inicialmente previsto no projeto executivo. Por consequência, foi elaborado um aditivo, após a execução dos serviços de limpeza do terreno e de serviços preliminares, devido à discrepância entre as premissas adotadas durante o projeto executivo e a situação *in loco*, nos locais de implementação da fundação e do canal de restituição. Como resultado, a incompatibilidade promoveu acréscimos de 2.818,65 m³ de concreto de regularização, além de 455 ensaios de perda d'água Lugeon e 1.343 kg de injeção de calda de cimento. Ao todo, os acréscimos apresentaram repercussão financeira de R\$ 922.597,58 representando balanço de 6,58% no valor da obra.

PALAVRAS-CHAVE: Fundação, Barragem, Incompatibilidade.

ABSTRACT: This work presents a case study about the Germinal dam, located in Palmácia County, in the State of Ceará, that was built with roller-compacted concrete (RCC), with dam volume of 2 hm³ and 28,5 m height. This construction ended up becoming an example of project that didn't accurately predicted the underground rock conditions. In the case of this dam, during execution, it was found the presence of loose rock blocks (tálus) and systematics fractures unforeseen in the initial surveys. The intense fracturing and rock alterations inserted in the fault zone located in the natural river bed were specifically harmful to the definition of the foundation depth in this location. This condition required a substantial increase of self-leveling concrete, in addition to water loss tests and cement grout injections, in relation to what was initially foreseen in the executive project. Consequently, an addendum was prepared, after the execution of the land cleaning and the preliminary services, due to the discrepancy between the assumptions adopted during the executive project and the *in loco* situation, in the places where the foundation and the diversion channel are implemented. As result, the incompatibility led to increases of 2.818,65 m³ of self-leveling concrete, as well as 455 Lugeon water loss tests and 1.343 kg of cement grout injection. In total, the increases had a financial repercussion of R\$ 922.597,58 representing a balance of 6,58% in the cost of the dam.

KEYWORDS: Foundation, Dam, Incompatibility.

1 INTRODUÇÃO

Em muitas obras de engenharia, independentemente do tipo de construção, há a necessidade de revisão dos documentos acerca dos projetos e orçamentos. Ademais, a negligência de um estudo geológico-geotécnico adequado em fase de projeto é capaz de gerar, futuramente, repercussões financeiras significativas e não previstas para correção de problemas não observados previamente. No âmbito de barragens, apesar de ser comum um estudo do local bastante rigoroso, tais obras ainda podem ser suscetíveis a estes problemas de planejamento e execução.

Cruz (1996) ressalta que a elaboração de um projeto de barragem está integralmente associado ao controle de percolação tanto pelo corpo como pelo maciço, e que dependendo da possível vazão de percolação, poderá haver necessidade de correções no local. Esse viés também deve ser aplicado para situações de fundações de barragens de concreto, haja vista que uma rocha bastante fraturada pode ser capaz de comprometer tanto a funcionalidade como a segurança da obra como um todo.

Nesse contexto, a Barragem Germinal – situada no Município de Palmácia, Ceará – pode ser citado como um exemplo de projeto que não previu com exatidão as condições do subsolo rochoso. No caso da obra em questão, constatou-se durante a execução a presença de blocos de rochas soltos (tálus) e de fraturamentos sistemáticos não observados nas sondagens da fase de projeto.

Dessa forma, foi necessário promover um tratamento da fundação mais adequado para a condição da rocha encontrada após escavação até sua cota de fundação. Tal problemática acarretou em acréscimos nos quantitativos relacionados às linhas de tratamento da fundação, assim como de concreto de regularização para garantir uma superfície adequada para a execução da fundação, principalmente no eixo do barramento.

2 ESTUDO DE CASO

2.1 Obra Analisada

A Barragem Germinal está localizada no município de Palmácia, no Estado do Ceará, barrando o rio Pacoti situado na bacia Metropolitana, na região à montante do rio citado com o rio Salgado. Iniciada em 2016 e concluída em 2017, tal obra é classificada como barragem de concreto homogênea, construída com o uso de Concreto Compactado a Rolo (CCR). A seguir, são apresentados na Tabela 1 os principais dados da barragem estudada.

Tabela 1. Ficha técnica da Barragem Germinal (JM, 2012).

Dados	Informações
Tipo de barramento	Concreto Gravidade CCR
Capacidade total de acumulação	2.014.427,22 m ³
Área de drenagem	94 km ²
Altura máxima	28,45 m
Largura de coroamento	6,00 m
Extensão	180,00 m
Vazão Máxima de Projeto (TR = 10.000 anos)	1.137,40 m ³ /s
Volume de concreto do maciço	55.840,00 m ³
Volume de escavação da fundação	104.630,00 m ³

O local estudado para sua implantação possui condições favoráveis para a construção e para a acumulação de recursos hídricos, além de apresentar certa proximidade à sede municipal de Palmácia. A Figura 1 apresenta a seção máxima da barragem.

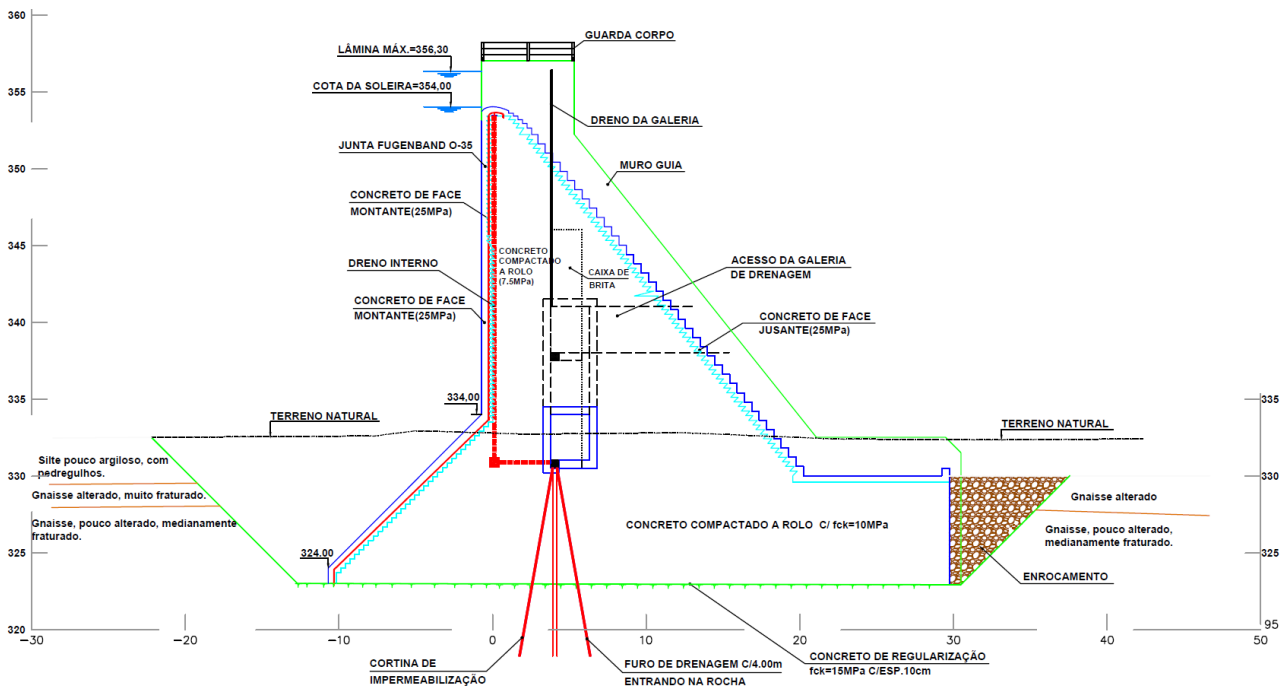


Figura 1. Seção máxima da barragem (adaptado de JM, 2012).

Infelizmente, a barragem acabou por se tornar um exemplo de projeto que não previu com exatidão as condições do subsolo rochoso. No caso da obra em questão, de acordo com o estudo geotécnico do projeto inicial, não foram previstos a expressiva presença de blocos de rochas soltos (tálus) e de fraturamentos sistemáticos na rocha localizada ao longo do eixo do barramento.

Tal fraturamento e o grau de alteração das rochas foram condicionantes para a definição da profundidade da fundação. Devido ao fato de não terem previsto tal condição geológica, o projeto de fundação da barragem não foi adequado tendo em vista as situações observadas *in loco*.

2.2 Geologia Local

A estrutura geométrica da barragem Germinal situa-se sobre rochas metamórficas de idade paleoproterozóicas denominadas por granada-biotita gnaiss, afetadas parcialmente por processos de migmatização, onde se observam micro dobramentos pigmáticos, e leitos quartzíticos. Inseridos neste contexto, ocorrem rochas metagraníticas de cor cinza-claro, e derrame granito pegmatítico pós-tectônico.

Conforme os estudos geológicos e geotécnicos, o conjunto litológico da área apresenta foliação e orientação mineral próximos aos do ângulo do eixo barrável, sendo eles de NW-SE e de N54°W respectivamente.

Quanto à questão de geologia estrutural, confirma-se que diversos eventos geológicos promoveram grandes alterações na rocha que comprometeram sua finalidade para fundação de barramento, ainda que a mesma seja classificada como de bom suporte para a estrutura do barramento. Como aspecto comprobatório, foram observadas diversas foliações, intrusão vulcânica em zona de falha, além de intensos fraturamentos em sua extensão, todas atuando como manifestações visíveis na rocha da área em questão, durante os serviços de tratamento da fundação.

No tocante às características geomecânicas da fundação, foram descritas através de amostra de mão, com auxílio de canivete e martelo geológico, de acordo com os procedimentos de classificação de Bieniawski (1974) e Barton (1989). Na área, foram mapeados quatro universos litológicos distintos, de acordo com as rochas observadas, com as seguintes características geomecânicas, conforme mostra a Tabela 2. Enquanto que o mapa geológico pode ser conferido na região do eixo de barramento pode ser observado a partir da Figura 2.

Tabela 2. Classificações das rochas de fundação (SOHIDRA, 2016)

Rocha observada	Classificações	Descrição
Granada-biotita gnaíse 1	A1/R5/C1/F3	Rocha sã, muito resistente, muito coerente, moderadamente fraturada (6 a 10 fraturas/metro)
Granada-biotita gnaíse 2	A3/R3/C3/F3	Rocha moderadamente alterada, medianamente resistente, medianamente coerente, moderadamente fraturada (6 a 10 fratura/metro)
Metagranito	A1/R5/C1/F3	Rocha sã, muito resistente, muito coerente, moderadamente fraturada (6 a 10 fraturas/metro)
Granito pegmatítico	A1/R5/C2/F3	Rocha sã, muito resistente, coerente, levemente fraturada (2 a 5 fraturas/metro)

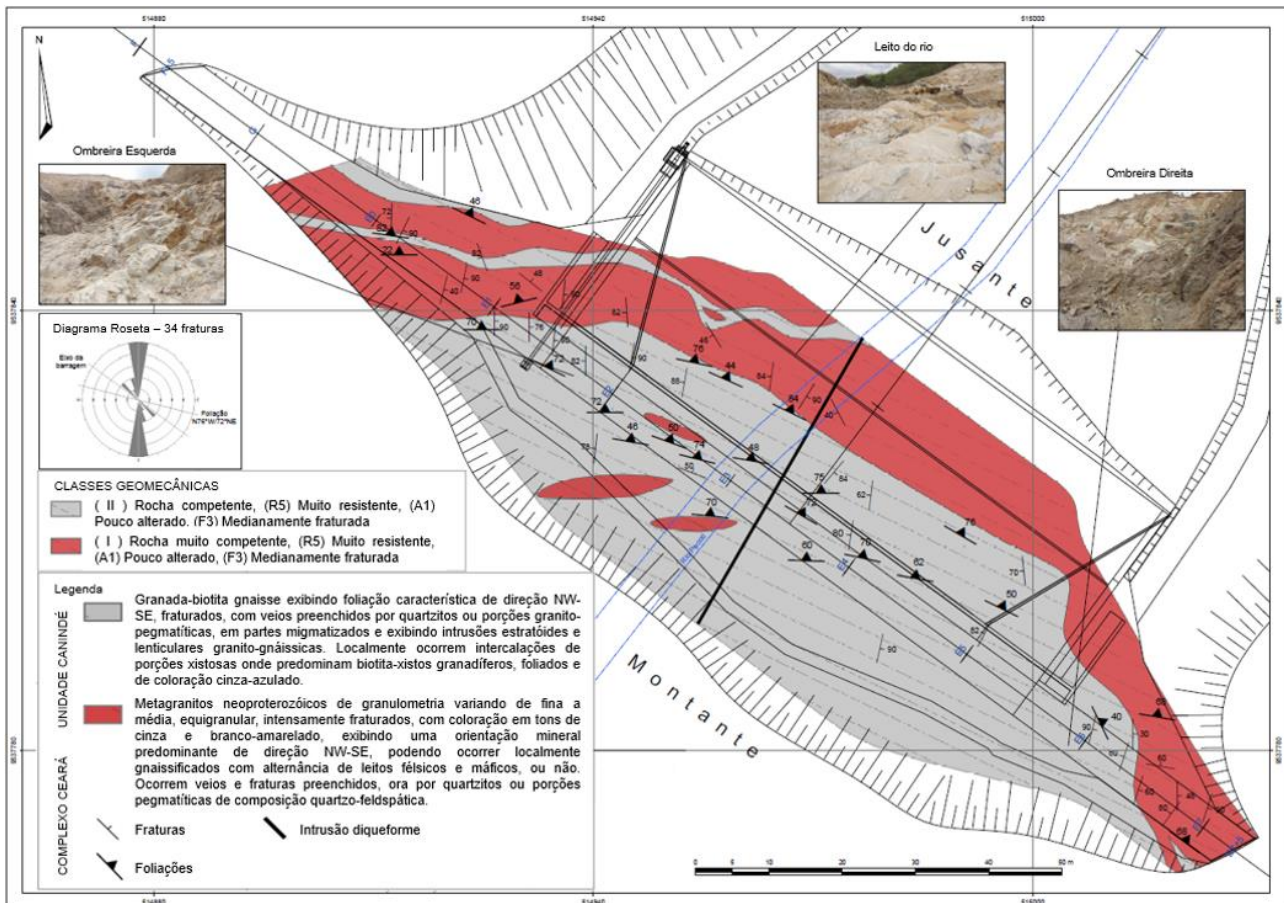


Figura 2. Mapa geológico do eixo de barramento

2.3 Problema Observado

Após a execução das escavações obrigatórias de materiais de 1ª, 2ª e 3ª categorias, até as cotas de fundação, foram identificadas certas incongruências entre o perfil de sondagem do projeto e a situação *in loco*. De acordo com o estudo geotécnico do projeto inicial, não foram previstas intercalações de rochas moderadamente alteradas, sistematicamente fraturadas, além de uma intrusão vulcânica perpendicular ao eixo do barramento, seguindo o leito natural do rio como entre as estacas E3+7,00 e E3+15,00 intensamente fraturada, demandando um incremento nas escavações da fundação, até cotas com condições geomecânicas favoráveis a instalação do empreendimento.

Em projeto inicial, foram realizadas ao longo do eixo do barramento 14 sondagens, sendo 13 rotativas e 1 SPT, sendo aproximadamente 1 a cada 20 metros, com complementares a cada 10 metros em locais de interesse. O resultados demonstraram a presença de seixo arenoso, no leito do rio, assim como camadas de profundidades variadas de silte argiloso, com posterior presença da rocha de fundação, segundo mapa geológico apresentado. A Figura 3 apresenta o perfil geológico-geotécnico no local do fraturamento observado, entre as estacas E3+7,00 e E3+15,00.

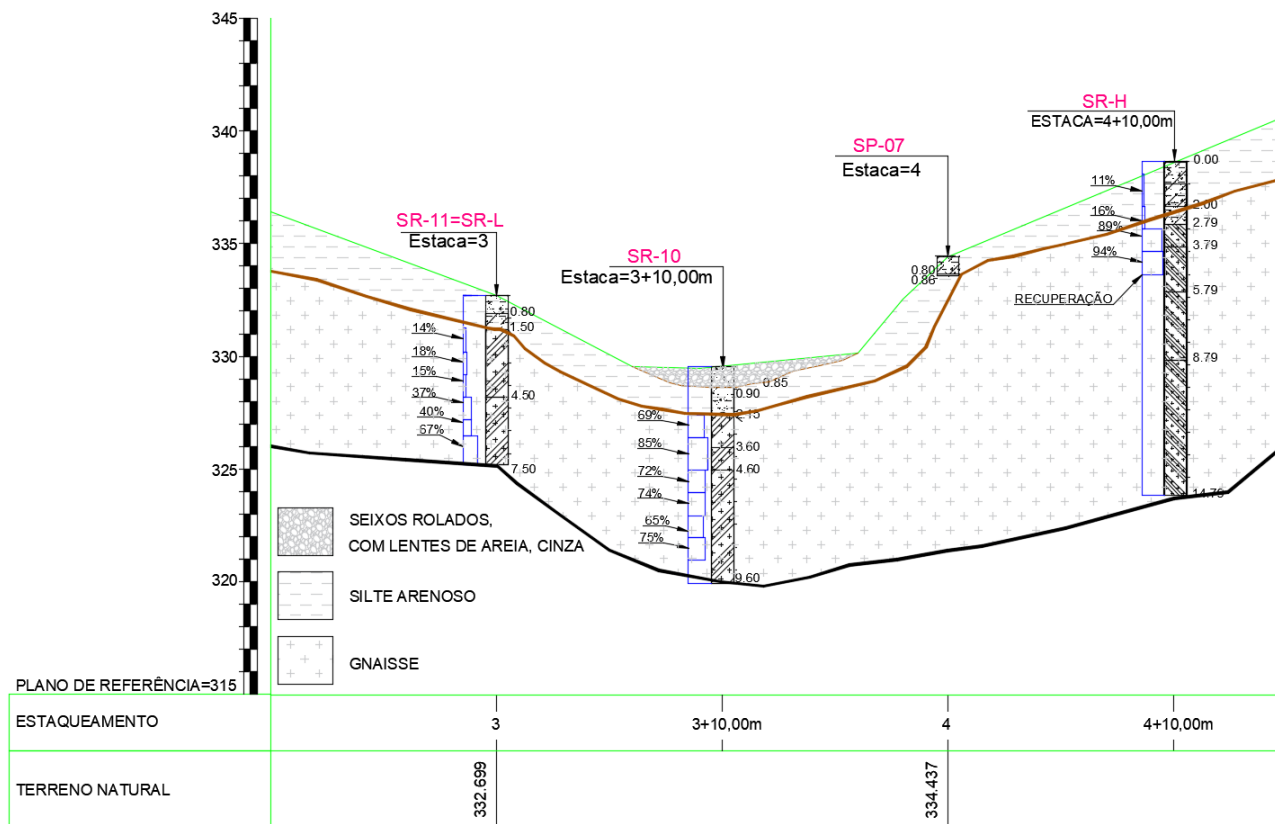


Figura 3. Recorte do perfil geológico/geotécnico entre as Estacas E2+10,00 e E4+15,00 no eixo da barragem

Esse perfil informa que há locais com bastante fraturamento, observados pelos dados de RQD conforme profundidade da sondagem. No entanto, no local onde foi executada a sondagem SR-10 foram observados, inicialmente, menores graus de fraturamento quando comparado aos demais resultados adjacentes. Durante os serviços de tratamento da fundação foi constatada a discrepância entre o projeto e a condição em campo.

Convém destacar que as sondagens a percussão e rotativas, apesar de serem bastante usuais nos estudos/projetos para reconhecimento de subsolo, tem certa restrição, pois são pontuais. Assim, a alta variabilidade do topo litológico na referida obra foi totalmente visualizado apenas em sua escavação, no estágio construtivo.

Nesse ponto em questão, distingue-se uma intrusão de rocha vulcânica, perpendicular às estruturas preferenciais, extremamente fraturada, exibindo faixas brechóides em variados graus de alterações, e ainda micro veios, centimétricos, preenchidos por material de composição carbonática.

Em verdade, o intenso fraturamento e alteração das rochas inseridas na zona de falha localizada no leito natural do rio foram pontualmente prejudiciais para a definição da profundidade da fundação neste local. Devido ao fato de não ter sido prevista tal falha geológica no projeto executivo da barragem, acerca de sua fundação, apresentou características destoantes em relação ao problema *in loco*.

Essa diversidade entre o perfil previsto em projeto e o real provocou mudanças orçamentárias, gerando a necessidade de remoção de vasto material rochoso, sendo estas, todas as porções de rocha que não se enquadravam nas condições geomecânicas aceitáveis para a segurança da obra. Tal situação propiciou uma geometria com acentuado desnível e bastante irregular para o assentamento da fundação.

2.4 Correções Adotadas

Após conferência das condições da rocha de fundação, e levando em consideração as características das rochas já elencadas, constatou-se durante os processos de escavação que seria inviável a execução da fundação em uma superfície regularmente plana como definido em projeto. Em verdade, a irregularidade da superfície determinada ocasionou obtenção de diferentes cotas de fundação pontualmente.

Inicialmente, os primeiros serviços corretivos foram de análise do fraturamento observado, por meio de testes e ensaios, tais como os ensaios de perda d'água Lugeon. Após detectar a condição de fraturamento do local, foram realizadas escavação e remoção do material inadequado para assentamento da fundação da barragem, destacando-se que a mesma foi executada até níveis onde a rocha remanescente apresentasse condições geomecânicas aceitáveis.

Vale ressaltar que também se constatou que além do grau de faturamento, a rocha também estava em avançado processo de argilitização. Dessa forma, foram removidas grandes quantidades de material argiloso presente no local do fraturamento, devido às condições da rocha intrusiva à montante, gerando uma cava de aproximadamente 2,5 metros de profundidade.

Em seguida, foram executados os serviços de limpeza e bombeamento da cava, confirmando que o relevo se encontrava com característica bastante irregular. A Figura 3 expõe o serviço de limpeza da rocha, com apresentação das direções preferenciais de fraturamento, enquanto que a Figura 4 apresenta uma foto da situação da rocha e do serviço de bombeamento e limpeza da cava.



Figura 3. Direções preferenciais de fraturamento da rocha de fundação (SOHIDRA, 2016).



Figura 4. Vista da cava proveniente do fraturamento da rocha durante bombeamento (SOHIDRA, 2016).

Por fim, a regularização da superfície foi executada com a aplicação de concreto para regularização, com teor de cimento de 150 kg/m³ e resistência de 10 MPa. Seu preenchimento foi realizado até as cotas de projeto, garantindo a inalteração do projeto executivo acima da fundação. A Figura 5 apresenta arquivo fotográfico da execução desse serviço.



Figura 5. Execução do preenchimento da fratura com concreto de regularização (SOHIDRA, 2016).

3 IMPACTOS FINANCEIROS

A incompatibilidade entre o estudo geotécnico de projeto e a condição *in situ* foi responsável por alterações de quantitativos em diversos itens de tratamento de fundação, assim como no concreto de regularização como um todo. No caso da fundação, as alterações afetaram as linhas de tratamento, tanto as principais como as de contato, injeção e drenagem.

Por consequência, foi elaborado um aditivo, após a execução dos serviços de limpeza do terreno e de serviços preliminares, devido a discrepância entre as premissas adotadas durante o projeto executivo e a condição *in situ*, na implementação da fundação e do canal de restituição. Contudo, não houve a necessidade de reformulação relacionada ao projeto do barramento principal.

Quantitativamente, a incompatibilidade promoveu, no geral, acréscimos de 2.818,65 m³ de concreto de regularização, além de 455 ensaios de perda d'água Lugeon e 1.343 kg de injeção de calda de cimento. A seguir, é apresentada na Tabela 3 os principais acréscimos quantitativos provenientes da incompatibilidade analisada.

Tabela 3. Principais acréscimos quantitativos da incompatibilidade na fundação da Barragem Germinal

Itens	Projeto	Aditivo	Acréscimo	Impacto
Concreto Regularização 150,0 kg/m ³ 10,0 MPa	515,60 m ³	3.334,25 m ³	2.818,65 m ³	547%
Ensaio de perda d'água tipo "Lugeon"	585 un	1.040 un	455 un	78%
Injeção de calda de cimento	105.300 kg	106.643 kg	1.343 kg	1,3%

Conforme citado, o impacto de consumo de concreto para regularização, com teor de cimento de 150 kg/m³ e resistência de 10,0 MPa, foi o mais expressivo, com uso geral na obra aproximadamente 6,5 vezes a quantidade estimada em projeto executivo. Logo abaixo, a Tabela 4 informa a repercussão financeira de cada item acrescido.

Tabela 4. Principais impactos financeiros da incompatibilidade na fundação da Barragem Germinal

Itens	Acréscimo	Preço Unit.	Valor
Concreto regularização 150,0 kg/m ³ 10,0 MPa	2.818,65 m ³	238,04	R\$ 670.951,45
Ensaio de perda d'água tipo "Lugeon"	455 un	550,53	R\$ 250.491,15
Injeção de calda de cimento	1.343 kg	0,86	R\$ 1.154,98

Quanto ao preço unitário de concreto de regularização, cabe ressaltar que o valor atribuído engloba tanto a produção (R\$ 217,90) quanto o seu lançamento (R\$ 20,14). Além disso, apesar de não possuir o maior preço unitário, este item se comprovou sendo o mais oneroso da correção do problema analisado, representando cerca de 73% do custo de correção, haja vista o acréscimo bastante relevante de seu quantitativo.

Ao todo, os acréscimos apresentaram repercussão financeira de R\$ 922.597,58. Quando comparado ao valor orçado em contrato da obra – este de R\$ 14.016.296,12 – constata-se que a incompatibilidade promoveu um acréscimo de custos com balanço de 6,58% do valor inicial da obra.

4 CONCLUSÕES

Sobre a Barragem Germinal, de forma sucinta, a ocorrência de uma condição geológica não prevista causou o acréscimo do investimento da obra em R\$ R\$ 922.597,58 no tocante a seu tratamento de fundação. Em verdade, o estudo geotécnico (pelas sondagens percussivas e rotativas) não foi capaz de prever a imensidão da falha na rocha em que a barragem seria assentada.

Dessa forma, para corrigir o problema, o volume de concreto de regularização foi acrescido em 2.818,65 m³, promovendo aumento de 547% em seu consumo e lançamento. Além disso, houve a necessidade de reavaliar os itens e serviços do projeto, justificando o encarecimento da obra para não prejudicar sua segurança.

A situação estudada permite concluir que incompatibilidades e deficiências nos projetos podem acontecer, ainda que sejam realizados estudos preliminares adequados. Além disso, é possível destacar que estudos imprecisos ou com menor rigor de detalhamento ao exigido para a obra são capazes de acarretar em custos imprevistos bastante significativos, podendo ser evitados priorizando mais detalhamentos nos estudos iniciais/preliminares na elaboração do projeto básico ou durante o desenvolvimento do projeto executivo.

AGRADECIMENTOS

À Superintendência de Obras Hidráulicas – SOHIDRA, em especial à toda equipe responsável pela Diretoria de Águas Superficiais – DASUP. Assim como, aos órgãos supervisores e projetistas, pela disponibilidade dos documentos em seus acervos necessários para a elaboração desse estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barton, N., Lien, R., Lund, J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics, 6(4), 189-236. <https://doi.org/10.1007/BF01239496>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications*. John Wiley & Sons, New York, 251p.
- Cruz, P. T. (1996). *100 Barragens Brasileiras: Casos Históricos, Materiais de Construção e Projeto*. Oficina de Textos. São Paulo, Brasil. 648 p.
- JM Engenheiros Consultores LTDA (2012). *Projeto Executivo da Barragem Germinal: Memorial Descritivo do Projeto*. Tomo 1. Superintendência de Obras Hidráulicas – SOHIDRA. Fortaleza. Jul. 2012.
- JM Engenheiros Consultores LTDA (2012). *Projeto Executivo da Barragem Germinal: Desenhos*. Tomo 2. Superintendência de Obras Hidráulicas – SOHIDRA. Fortaleza. Jul. 2012.
- SOHIDRA (2016). *Relatório Mensal Acerca da Barragem Germinal Julho e Agosto 2016*. Superintendência de Obras Hidráulicas – SOHIDRA. Fortaleza. Ago. 2016.