



Cliente : MOSAIC FERTILIZANTES P & K LTDA.

Projeto : Complexo Mineroquímico de Araxá - CMA

Objeto : Barragem B6 – El. 980 m - Estudos sobre riscos geológicos, estrutural, sísmico e do comportamento hidrogeológico na área de influência da barragem

Docto. : Relatório Técnico
AR42-RT-02 Rev. 1 Janeiro de 2021

| Data | Rev. | Descrição | Por | Aprov. |
|----------|------|----------------------------------|-----|--------|
| 30/04/19 | 0 | Emissão inicial - Para aprovação | slo | pca |
| 15/01/21 | 1 | Revisão para a El. 980 m | slo | pca |
| | | | | |

Cópias: 1 via cliente / 1 via arquivo

São Paulo, 15 de janeiro de 2021.

MOSAIC FERTILIZANTES P & K LTDA.
Complexo Mineraloquímico de Araxá - CMA
Araxá – Minas Gerais

At. Eng^o Omar Mendes de Melo Junior
Gerência de Hidrogeologia e Geotecnia

Cc. Eng^o. Igor Leonardo Gama
Gerência de Geotecnia - Projetos

Ass. Barragem B6 – El. 980 m - Estudos sobre risco geológico, estrutural, sísmico e sobre comportamento hidrogeológico das descontinuidades estruturais na área da Barragem B6

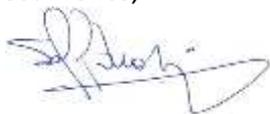
Prezado Omar,

Pela presente estamos encaminhando o relatório técnico referente ao estudo solicitado, mais especificamente: “estudos sobre o risco geológico, estrutural e sísmico e estudos sobre o comportamento hidrogeológico das descontinuidades estruturais na área de influência do empreendimento”.

Este estudo foi elaborado com base nos dados das investigações de campo realizadas para os projetos da Barragem B6, nas diversas etapas de pesquisa, especialmente das sondagens a percussão e mistas realizadas, e dados de bibliografia para o estudo sísmico.

Colocando-nos ao seu inteiro dispor para quaisquer esclarecimentos necessários, subscrevemo-nos.

Atenciosamente,



Silvio Luiz de Oliveira

| ÍNDICE | PÁGINA |
|---|---------------|
| 1. INTRODUÇÃO..... | 4 |
| 2. BREVE HISTÓRICO | 4 |
| 3. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA | 5 |
| 4. INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS | 5 |
| 4.1. GEOLOGIA REGIONAL | 5 |
| 4.2. GEOLOGIA LOCAL..... | 6 |
| 4.3. INVESTIGAÇÕES E ENSAIOS DE CAMPO..... | 8 |
| 4.4. DADOS DE HIDROGEOLOGIA | 15 |
| 4.5. ENSAIOS DE LABORATÓRIO | 16 |
| 5. DADOS DE GEOLOGIA ESTRUTURAL | 17 |
| 6. SISMICIDA NO BRASIL | 18 |
| 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS..... | 22 |

ANEXO

Desenho AR42-DE-005, R1
ART

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório apresenta os estudos solicitados pela Mosaic Fertilizantes, para atendimento a Lei Estadual de Minas Gerais, nº 23.291, de 25 de fevereiro de 2019, Capítulo II, artigo 7º, inciso I, letra e:

- **“Estudos sobre o risco geológico, estrutural e sísmico, e estudos sobre o comportamento hidrogeológico das descontinuidades estruturais na área de influência do empreendimento”.**

No caso, o estudo é para a área de influência da Barragem B6, que teve o seu dique inicial construído em 2019 (El. 945 m), e o primeiro alteamento por jusante (El. 950 m), com rejeitos ciclados, em 2020. Está em construção o segundo alteamento, também com rejeitos ciclados, também por jusante (serão todos os alteamentos), para a El. 955 m.

A Geoconsultoria elaborou os diversos projetos executivos para esta barragem, desde o do dique inicial, como os dos alteamentos, a cada 5,0 m, até a etapa final, com crista na cota 980 m. A licença de instalação desta barragem é até a El. 960 m.

O presente estudo está sendo realizado com os dados obtidos nas diversas etapas de investigações geotécnicas realizadas para os projetos do dique inicial e alteamentos da Barragem B6. Assim, no item 4 são detalhadas as investigações realizadas ao longo de 2011 a 2018.

As investigações a percussão ficaram restritas ao horizonte de solo, mas as sondagens mistas adentraram na rocha alterada e são, permitindo obterem-se dados também do maciço rochoso subjacente.

O dique inicial já está construído, com solo compactado, e **os diversos alteamentos foram projetados para jusante**, com uso do UF da ciclização, e construção de um septo argiloso no topo. Este septo estará ligado no dique inicial, formando um paramento de montante de baixa permeabilidade. Com isso, a formação de praia não terá aquele rigor necessário para uma barragem alteada apenas com rejeitos, mas deverá ser formada em cada etapa de alteamento.

2. BREVE HISTÓRICO

A Geoconsultoria elaborou em 2003 um plano diretor de disposição de rejeitos no CMA, e considerou a Barragem B6 como uma alternativa futura de local para disposição de rejeitos. Esta barragem é posicionada em vale contíguo ao da Barragem B5. Em 2008 elaborou um projeto conceitual desta barragem.

Em 2009 os estudos para a implantação da Barragem B6 foram retomados pela empresa Pimenta de Ávila. Em 2013 a Pimenta de Ávila elaborou o projeto executivo da Barragem B6, compreendendo o dique inicial com solo compactado, com crista na El. 945 m, e os alteamentos em etapas, com rejeitos ciclados e um septo argiloso a montante, até a El. 960 m. O licenciamento da Barragem B6 é até esta cota.

No ano de 2016 a Geoconsultoria foi contratada inicialmente para fazer um “cross-check” do projeto executivo, onde fez algumas propostas de ajustes no projeto. Em 2017 a Geoconsultoria foi contratada para elaborar um novo projeto detalhado, dentro das recomendações propostas no estudo anterior. Os projetos foram elaborados para o dique inicial (El. 945 m), e para as etapas de alteamento, a cada 5 m, da El. 950 até a El. 965 m. Posteriormente, em 2018 elaborou os projetos de alteamento para as elevações 970 e 975 m, e em 2020 elaborou o projeto executivo para o último alteamento, com crista na El. 980 m.

3. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Para a elaboração deste relatório foram consultados os relatórios da Geoconsultoria sobre os diversos projetos. Foram consultados os relatórios da Pattrol e Keller-Tecnogeo, que realizaram as investigações na Barragem B6, a Pattrol realizou as investigações de campo, a segunda realizou os ensaios de laboratório.

4. INVESTIGAÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

4.1. GEOLOGIA REGIONAL

A região de Araxá pertence a Província Ígnea Alto Paranaíba, que está inserida na Faixa Brasília. Esta província, de idade Neoproterozóica, está adjacente ao Craton do São Francisco. A província é representada por metassedimentos, predominando diversos tipos de xistos e quartzitos, e apresenta uma série de corpos intrusivos e extrusivos, de idade neocretácea, produto de um intenso magmatismo máfico-ultramáfico alcalino e ultrapotássico.

A **figura 1**, a seguir, apresenta o mapa geológico da Província Ígnea Alto Paranaíba, exibindo diversas intrusões, mostrando a de Araxá, ao sul, em azul, a de Tapira, mais ao sul, em vermelho, e as de Salitre, Serra Negra e Catalão I e II (estas 2 últimas em Goiás, a noroeste).

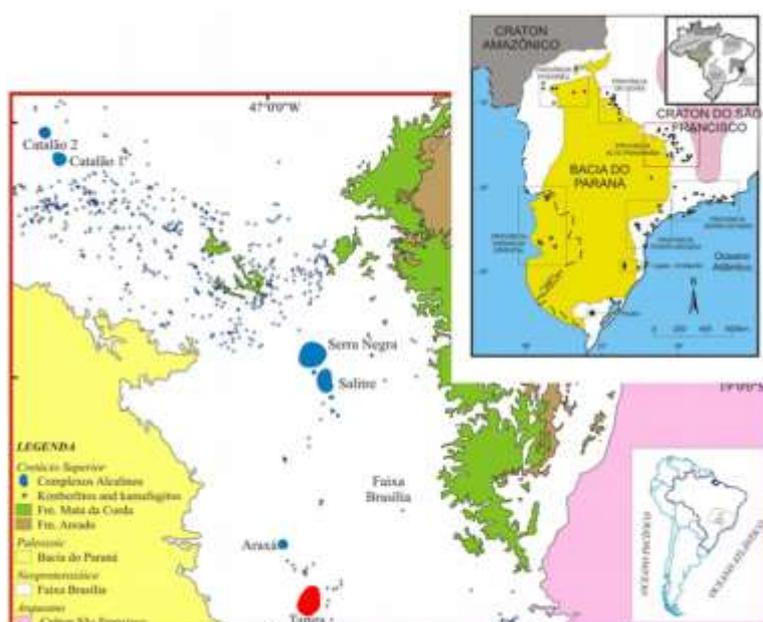


Figura 1 - Mapa geológico da Província Ígnea Alto Paranaíba, exibindo os domos intrusivos alcalinos. A estrutura de Araxá, ao sul, em azul, está próxima da de Tapira (Modificado de Jácomo, 2010).

Na figura acima a Faixa Brasília (branca) na região das intrusões de Araxá e Tapira, porção mais sul, é composta principalmente pelas rochas do Grupo Canastra (escama tectônica inferior), com litotipos dominantes de xistos com quartzitos. Nesta província ocorrem também rochas do Grupo Araxá (escama tectônica superior), compostas por mica-xistos, quartzitos, anfibolitos, granitos e pegmatitos.

No entorno do Domo de Araxá ocorrem xistos e quartzitos intercalados, formando ritmitos, classificados como Formação Rio Verde, do Grupo Ibiá (escama tectônica intermediária). A oeste ocorrem os sedimentos da Bacia do Paraná, bem mais recentes, e a leste as rochas do Craton São Francisco, conforme legenda apresentada na figura.

O complexo alcalino-carbonatítico do Barreiro corresponde a uma intrusão de forma semi-circular, com 4,5 km de diâmetro, com idade aproximada de 80 M.A.; pertencentes à Província Magmática do Alto Paranaíba, posicionados nos metassedimentos da faixa móvel Brasília. É formado por flogopititos cortados por 'necks', 'plugs' e veios carbonatíticos, veios e diques de apatitito, nelsonito e magnetitito, e veios tardios de barita e silexito. A apatita é o principal mineral de interesse econômico da Mosaic.

4.2. GEOLOGIA LOCAL

Conforme exposto no item anterior, no entorno do Domo de Araxá (Kcacb) ocorrem xistos e quartzitos intercalados, formando ritmitos, englobados na Formação Rio Verde (NPrv), do Grupo Ibiá.

A **figura 2** apresenta um mapa parcial da Folha de Araxá, cujo mapeamento foi desenvolvido por um convênio da CODEMIG com a UFMG.

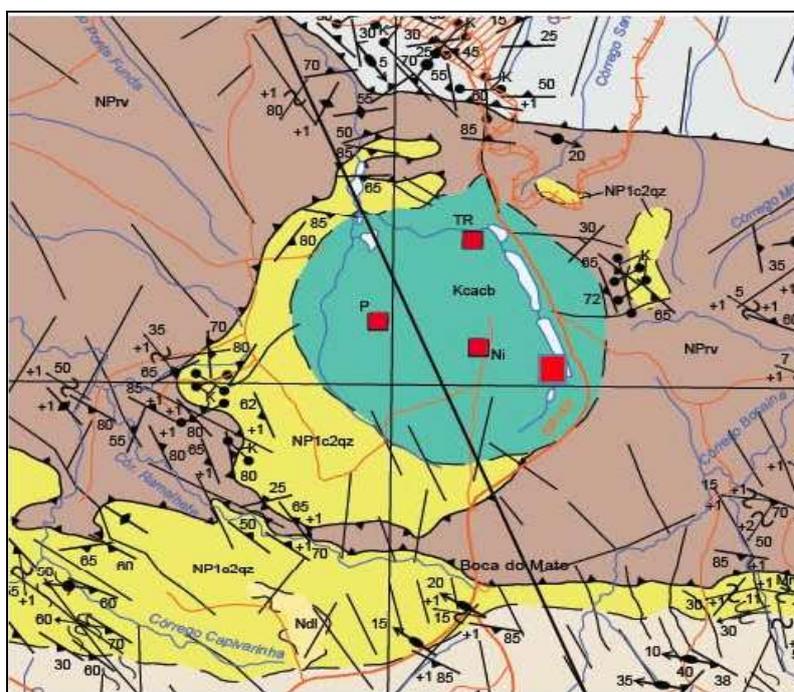


Figura 2 – Mapa da região do Domo do Barreiro; a Barragem B6 é a noroeste, na unidade NPrv, fora do mapa.

A Formação Rio Verde (NPrv) na área é composta por muscovita-quartzo xistos intercalados com muscovita-clorita xistos, todos finos, formando ritmitos com lâminas milimétricas a centimétricas, rico em quartzo remobilizado em veios ou olhos associados a carbonatos e pirita, de cor verde clara a avermelhada, quando intemperizada; apresenta fenitização, representada por enriquecimento em feldspato e anfibólio sódico, desde o contato com o domo, até aproximadamente 3 km de distância.

No contato do domo, desde a região, até o norte, mas pelo lado oeste, ocorrem quartzitos (amarelo), soerguidos pela intrusão, pertencentes a referida formação.

Ao norte da Formação Rio Verde ocorrem xistos da Formação Araxá (cor clara), com predomínio de muscovita-biotita-quartzo xisto, com intercalações de quartzitos micáceos, e anfibolitos, também granito e pegmatitos. Bem ao sul ocorrem diversos xistos, pertencentes ao Grupo Canastra.

A **figura 3** mostra uma imagem da área do CMA, de março de 2020, observando-se na porção superior direita a cidade de Araxá, e o complexo da Mosaic Fertilizantes, com as barragens B5 e a B6 no alto a noroeste, as barragens B1-B4 no centro, a B2 mais a montante, e a usina de concentração no centro da imagem.



Figura 3 – Imagem da região do Complexo da Mosaic – março de 2020.

A **figura 4** mostra uma imagem apenas da área das barragens B5 e B6, observando o vale, com plantação de eucalipto, o canal de lama e a pera ferroviária existente no alto do vale, praticamente ao lado da Barragem B4 (visão parcial).



Figura 4 – Imagem dos vales das barragens B5 e B6, com a pera ferroviária a montante.

4.3. INVESTIGAÇÕES E ENSAIOS DE CAMPO

Para a elaboração dos projetos da Barragem B6 foram programadas e realizadas investigações de campo e de laboratório.

Em 2011 e 2012 foram realizadas investigações, programadas pela Pimenta de Ávila, e executadas pela Pattrol, cujos resultados foram utilizados nos projetos elaborados posteriormente. Estas investigações foram realizadas visando a etapa inicial (crista na El. 945), e também as etapas de alteamento (crista nas El. 950 m / 955 m / 960 m).

Em 2017 a Geoconsultoria programou algumas sondagens complementares. Em 2018 foram programadas e realizadas novas investigações geotécnicas, 8 sondagens a percussão, para a região do dique de fechamento da ombreira esquerda.

As investigações realizadas e seus resultados, de campo e de laboratório, estão apresentadas nos relatórios dos projetos do dique inicial e alteamentos.

Um breve resumo das investigações de campo é apresentado a seguir, com algumas seções típicas, pelo eixo da barragem, e pelo talvegue. O desenho **AR42-DE-005** apresenta uma planta com a locação de todas as investigações realizadas, além das 2 seções citadas, longitudinal e transversal ao eixo, pelo talvegue principal, Córrego Toma Rastro.

No total foram realizadas 61 sondagens a percussão e 16 sondagens mistas. Foram realizadas também 33 sondagens a trado em áreas de empréstimo, e escavados 9 poços, para a coleta de amostras deformadas e indeformadas (blocos). Nas sondagens a percussão e mistas foram executados ensaios para cálculo de permeabilidade dos materiais da fundação, de infiltração no solo, e perda de água sob pressão na rocha.

O Córrego Toma Rastro na região da barragem apresenta um vale assimétrico, com declividade maior na encosta esquerda, e menor na direita, conforme se observa na seção longitudinal ao eixo, apresentada no desenho **AR42-DE-005**. A ombreira direita apresenta cotas mais elevadas, permitindo o fechamento do aterro na elevação 980 m. Já na ombreira esquerda o divisor de águas com a Barragem B5 apresenta cotas próximas a 967 m, localmente na 968 m, necessitando de um dique de fechamento do reservatório acima da elevação 965 m.

Por isto, nas obras de alteamento para a El. 965 m o extravasor muda de canal para torre e galeria, e começa a ser construído o dique de fechamento da ombreira esquerda da Barragem B6.

A **seção A** é longitudinal ao eixo da barragem, mostrando as 2 ombreiras e o talvegue. Nas ombreiras há um solo superficial coluvionar, argilo-siltoso a silto-argiloso, vermelho a amarelado, com espessura próxima a 6 m na ombreira esquerda, passando a solo residual de xisto, com espessura entre 10 e 15 m, e depois rocha alterada. Na ombreira direita o solo coluvionar apresenta até 4 m de espessura, muitas vezes com índice de penetração baixo, por isso sendo removido; sotoposto ocorre um solo residual, de xisto, com cerca de 10 m de espessura, passando a rocha alterada e rocha sã. Em ambas a rocha é um mica-xisto, cinzento. No talvegue ocorre um solo aluvionar argiloso, cinzento a preto, plástico, consistência muito mole, de origem aluvionar, que será integralmente removido. A espessura máxima é de 7 m no centro do vale, na sondagem SM-17-01 apresenta 4 m de espessura.

A **seção B** no desenho **AR42-DE-005** mostra o perfil do subsolo ao longo do talvegue, onde há fluxo de água, com pequenas vazões no período seco. Mas o córrego é perene. A vazão residual é próxima a 93 m³/h, ou seja, 26 l/s. No talvegue há um solo aluvionar orgânico, coloração preta a cinzenta, índice SPT baixo, caracterizando uma argila muito mole e plástica, com espessura variando entre 4 a 7 m, que foi removida para a construção do dique inicial e 1º alteamento, e deverá ser removida nos alteamentos, a jusante.

Este solo aluvionar está sobreposto ao solo residual maduro, silto-arenoso a areno-siltoso, índices SPT entre 8 e 35, normalmente aumentando em profundidade, coloração amarelada a cinzenta, espessura próxima a 5 a 6 m no talvegue, alteração de mica-xistos. Este solo passa em profundidade maior a menos alterado, gradando para um solo jovem, rocha alterada e rocha sã, cinzenta, que ocorre entre 20 e 25 m de profundidade.

As sondagens a trado foram realizadas visando a caracterização dos materiais de empréstimo para a construção dos aterros com solo. Os poços foram escavados para a coleta de amostras, e realização de ensaios em laboratório.

Nas sondagens a percussão e mistas foram executados ensaios para determinação da permeabilidade dos materiais, do solo e da rocha. Estes dados são importantes para o atual estudo, e serão mostrados a seguir, na **tabela 1**.

Nesta mesma tabela estão apresentadas a posição do nível de água em cada sondagem, conforme dados da Pattrol. Quase todos os furos mostraram-se secos, o nível de água foi registrado nos furos realizados na várzea, ou próximo a ela, nas encostas em cotas baixas.

| Sondagem - Local | Prof. N.A.(m) | Prof.Ensaio (m) | Horizonte | k (cm/s) |
|------------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------------|
| SP-01 - OD | >12,40 | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $1,49 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $3,77 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $0,62 \times 10^{-4}$ |
| SP-02 - OD | 0,15 | 3,60 a 3,90 | Residual maduro | zero |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | zero |
| SP-03 - OE | >19,36 | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $0,89 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $4,04 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $2,52 \times 10^{-5}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | $2,54 \times 10^{-5}$ |
| | | 15,60 a 15,90 | Residual maduro | $0,81 \times 10^{-5}$ |
| SP-04 - OE | >17,39 | 18,60 a 18,90 | Residual jovem | $1,31 \times 10^{-5}$ |
| | | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $0,72 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $4,87 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $2,51 \times 10^{-5}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | $2,95 \times 10^{-5}$ |
| SP-05 - OD | >18,39 | 15,60 a 15,90 | Residual maduro | $1,29 \times 10^{-5}$ |
| | | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $1,25 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $2,24 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $1,76 \times 10^{-4}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | $0,93 \times 10^{-4}$ |
| SP-06 - OD | >16,38 | 15,60 a 15,90 | Residual jovem | $0,50 \times 10^{-4}$ |
| | | 3,60 a 3,90 | Residual maduro | $4,19 \times 10^{-5}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $1,49 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $2,38 \times 10^{-5}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual jovem | $1,55 \times 10^{-5}$ |
| SP-07 - OE | >16,36 | 15,60 a 15,90 | Residual jovem | $0,61 \times 10^{-5}$ |
| | | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $1,09 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $3,88 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $0,74 \times 10^{-4}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | $0,66 \times 10^{-4}$ |
| SP-08 - OD | >15,31 | 15,60 a 15,90 | Residual jovem | $3,83 \times 10^{-5}$ |
| | | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $4,14 \times 10^{-5}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $1,67 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $0,96 \times 10^{-4}$ |
| SP-09 - OE | >14,30 | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | $4,79 \times 10^{-5}$ |
| | | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $1,02 \times 10^{-5}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $0,72 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $1,25 \times 10^{-5}$ |
| SP-10 - OE | >20,85 | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | $2,25 \times 10^{-5}$ |
| | | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $2,65 \times 10^{-6}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $2,77 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $4,79 \times 10^{-5}$ |
| | | 15,60 a 15,90 | Residual maduro | $0,64 \times 10^{-4}$ |
| | | 18,60 a 18,90 | Residual maduro | $4,84 \times 10^{-5}$ |
| | | | | $2,85 \times 10^{-5}$ |

| | | | | |
|-------------|--------|---------------|-----------------|-----------------------|
| SP-11 - OD | >16,32 | 3,60 a 3,90 | Residual maduro | $1,59 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $0,73 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $3,21 \times 10^{-5}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | $1,50 \times 10^{-5}$ |
| | | 15,60 a 15,90 | Residual jovem | $2,30 \times 10^{-5}$ |
| SP-12 - OD | >13,41 | 3,60 a 3,90 | Residual maduro | $2,14 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $3,81 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $1,68 \times 10^{-4}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual jovem | $1,09 \times 10^{-4}$ |
| SP-13 - T | 1,40 | 3,00 a 3,60 | Aluvião | impermeável |
| | | 6,60 a 6,90 | Aluvião | $0,68 \times 10^{-3}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $0,57 \times 10^{-3}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual jovem | $0,93 \times 10^{-5}$ |
| SP-14 - OD | >13,39 | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $0,67 \times 10^{-3}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $2,83 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $4,49 \times 10^{-5}$ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual jovem | $0,74 \times 10^{-4}$ |
| SP-15 - OD | >12,41 | 3,60 a 3,90 | Coluvio | $2,32 \times 10^{-5}$ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | $1,51 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | $0,89 \times 10^{-5}$ |
| SP-16 - OD | >19,37 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $0,80 \times 10^{-3}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Residual maduro | $0,75 \times 10^{-3}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $0,83 \times 10^{-3}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | $0,95 \times 10^{-3}$ |
| | | 12,00 a 15,00 | Residual jovem | $0,71 \times 10^{-3}$ |
| | | 15,00 a 18,00 | | $1,65 \times 10^{-4}$ |
| SP-17 - OD | >13,00 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $0,65 \times 10^{-3}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Coluvio | $3,88 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $2,25 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual jovem | $1,36 \times 10^{-5}$ |
| SP-18 - OD | >14,26 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $0,70 \times 10^{-3}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Coluvio | $0,56 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $3,61 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | $2,21 \times 10^{-5}$ |
| SP-19 - OD | >12,38 | 0,00 a 3,00 | Residual maduro | $0,70 \times 10^{-4}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Residual maduro | $1,09 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual jovem | $1,41 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual jovem | $1,04 \times 10^{-3}$ |
| SP-20 - OD | >19,28 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $0,78 \times 10^{-3}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Coluvio | $0,59 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Coluvio | $0,91 \times 10^{-5}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Coluvio | $1,48 \times 10^{-4}$ |
| | | 12,00 a 15,00 | Residual maduro | $2,50 \times 10^{-4}$ |
| | | 15,00 a 18,00 | Residual maduro | $1,79 \times 10^{-4}$ |
| SP-21 - OD | >14,23 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $1,14 \times 10^{-3}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Coluvio | $3,57 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $0,96 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual jovem | $0,62 \times 10^{-4}$ |
| SP-22 - OD | >8,42 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $4,98 \times 10^{-4}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Residual maduro | impermeável |
| | | 6,00 a 8,42 | Residual jovem | impermeável |
| SP-23 - T | >2,27 | 0,00 a 2,27 | Coluvio | impermeável |
| SP-24 - T | >13,07 | 0,00 a 3,00 | Aluvião | $0,65 \times 10^{-4}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Aluvião | $1,09 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Aluvião | $0,77 \times 10^{-3}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | $2,61 \times 10^{-4}$ |
| SP-101 - OE | >9,41 | 2,00 a 3,00 | Coluvio | $2,47 \times 10^{-5}$ |
| | | 4,00 a 5,00 | Residual maduro | $1,82 \times 10^{-5}$ |
| | | 7,00 a 8,00 | Residual jovem | $1,11 \times 10^{-5}$ |

| | | | | |
|---------------|----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|
| SP-102 - OE | >7,45 | 2,00 a 3,00 | Residual maduro | 0,57 x 10 ⁻⁴ |
| | | 4,00 a 5,00 | Residual maduro | 4,10 x 10 ⁻⁵ |
| | | 6,00 a 7,00 | Residual jovem | 3,41 x 10 ⁻⁵ |
| SP-103 - OE | >8,05 | 2,00 a 3,00 | Coluvio | 1,62 x 10 ⁻⁵ |
| | | 4,00 a 5,00 | Residual maduro | 1,19 x 10 ⁻⁵ |
| | | 7,00 a 8,00 | Residual jovem | 1,05 x 10 ⁻⁵ |
| SP-105 - OE | >11,45 | 2,00 a 3,00 | Coluvio | 4,93 x 10 ⁻⁵ |
| | | 4,00 a 5,00 | Coluvio | 1,88 x 10 ⁻⁵ |
| | | 7,00 a 8,00 | Coluvio | 1,21 x 10 ⁻⁵ |
| SP-106 - OE | >15,43 | 2,00 a 3,00 | Coluvio | 3,02 x 10 ⁻⁶ |
| | | 4,00 a 5,00 | Coluvio | 4,23 x 10 ⁻⁵ |
| | | 6,00 a 7,00 | Coluvio | 2,85 x 10 ⁻⁵ |
| SP-107 - OE | >8,45 | 2,00 a 3,00 | Coluvio | 2,06 x 10 ⁻⁵ |
| | | 4,00 a 5,00 | Residual maduro | 2,96 x 10 ⁻⁵ |
| | | 7,00 a 8,00 | Residual jovem | 2,06 x 10 ⁻⁵ |
| SP-108 - OE | >9,45 | 2,00 a 3,00 | Coluvio | 3,48 x 10 ⁻⁵ |
| | | 4,00 a 5,00 | Residual maduro | 2,96 x 10 ⁻⁶ |
| | | 7,00 a 8,00 | Residual jovem | 4,43 x 10 ⁻⁶ |
| SM-01 - OD | Não informado | 3,60 a 3,90 | Residual maduro | 0,91 x 10 ⁻⁴ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | 2,95 x 10 ⁻⁵ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual jovem | 1,65 x 10 ⁻⁵ |
| | | 21,07 a 23,07 | Rocha sã | 3,92 x 10 ⁻⁵ |
| | | 23,07 a 25,77 | Rocha sã | 3,90 x 10 ⁻⁵ |
| SM-02 - T | 2,10 | 3,60 a 3,90 | Residual maduro | 2,28 x 10 ⁻⁴ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual jovem | 2,49 x 10 ⁻⁴ |
| | | 11,50 a 13,77 | Rocha alterada | 0,83 x 10 ⁻³ |
| | | 13,77 a 15,32 | Rocha sã | 1,81 x 10 ⁻⁴ |
| SM-03 - OD | >15,63 | 3,60 a 3,90 | Residual maduro | 3,96 x 10 ⁻⁵ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | 2,72 x 10 ⁻⁵ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual jovem | 1,05 x 10 ⁻⁵ |
| | | 10,50 a 12,73 | Rocha alterada | 1,85 x 10 ⁻⁴ |
| | | 12,73 a 15,63 | Rocha sã | impermeável |
| SM-04 - OD | 0,48 | 3,60 a 3,90 | Aluvião | 1,84 x 10 ⁻⁴ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | 1,56 x 10 ⁻⁴ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual jovem | 1,65 x 10 ⁻⁴ |
| | | 11,82 a 14,32 | Rocha alterada | 2,10 x 10 ⁻⁵ |
| | | 14,32 a 15,92 | Rocha sã | 2,41 x 10 ⁻⁵ |
| SM-05 - T | 4,80 | 3,60 a 3,90 | Coluvio | 4,87 x 10 ⁻⁶ |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | 2,12 x 10 ⁻⁵ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | 2,75 x 10 ⁻⁴ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | 1,61 x 10 ⁻⁵ |
| | | 15,60 a 15,90 | Residual jovem | 0,88 x 10 ⁻⁵ |
| | | 18,00 a 20,77 | Rocha alterada | 2,90 x 10 ⁻⁴ |
| SM-06 - OE | >35,72 | 20,50 a 22,08 | Rocha sã | 0,52 x 10 ⁻³ |
| | | 3,60 a 3,90 | Coluvio | impermeável |
| | | 6,60 a 6,90 | Residual maduro | 3,73 x 10 ⁻⁶ |
| | | 9,60 a 9,90 | Residual maduro | 4,16 x 10 ⁻⁶ |
| | | 12,60 a 12,90 | Residual maduro | 0,60 x 10 ⁻⁵ |
| | | 15,60 a 15,90 | Residual maduro | 4,48 x 10 ⁻⁶ |
| SM-07 - OD | 11,50 | 18,60 a 18,90 | Residual jovem | 3,90 x 10 ⁻⁶ |
| | | 0,00 a 3,00 | Coluvio | 1,50 x 10 ⁻⁴ |
| | | 3,00 a 6,00 | Coluvio | 4,88 x 10 ⁻⁵ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | 0,74 x 10 ⁻⁴ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | 1,96 x 10 ⁻⁵ |
| | | 12,00 a 15,00 | Residual maduro | 0,65 x 10 ⁻⁴ |
| | | 15,00 a 18,00 | Residual jovem | 2,76 x 10 ⁻⁴ |
| 21,00 a 23,00 | Rocha alterada | 2,53 x 10 ⁻⁵ | | |

| | | | | |
|---------------|--------|---------------|-----------------|-----------------------|
| | | 23,00 a 25,00 | Rocha alterada | $1,81 \times 10^{-5}$ |
| | | 25,00 a 26,30 | Rocha sã | zero |
| SM-08 - OD | 5,27 | 0,00 a 3,00 | Aluvião | $1,64 \times 10^{-3}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Aluvião | $1,25 \times 10^{-3}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Aluvião | $0,80 \times 10^{-3}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | $2,69 \times 10^{-4}$ |
| | | 15,20 a 17,60 | Rocha alterada | impermeável |
| | | 17,60 a 19,10 | Rocha alterada | $1,49 \times 10^{-4}$ |
| SM-09 - OD | >37,04 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $2,54 \times 10^{-4}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Residual maduro | $1,02 \times 10^{-3}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $2,81 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | $1,46 \times 10^{-4}$ |
| | | 12,00 a 15,00 | Residual jovem | $0,60 \times 10^{-3}$ |
| | | 15,00 a 18,00 | Rocha alterada | $1,16 \times 10^{-4}$ |
| | | 18,00 a 21,00 | Rocha alterada | $0,90 \times 10^{-4}$ |
| | | 32,00 a 34,04 | Rocha sã | $1,00 \times 10^{-5}$ |
| SM-10 - OE | 10,83 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $4,49 \times 10^{-4}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Coluvio | $2,18 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $1,69 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual jovem | $0,62 \times 10^{-3}$ |
| | | 12,00 a 15,00 | Residual jovem | $0,74 \times 10^{-3}$ |
| | | 31,60 a 36,00 | Rocha sã | $1,33 \times 10^{-4}$ |
| SM-11 - OE | 12,37 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $0,89 \times 10^{-3}$ |
| | | 3,00 a 6,00 | Residual maduro | $4,20 \times 10^{-4}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $4,34 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | $2,75 \times 10^{-4}$ |
| | | 12,00 a 15,00 | Residual jovem | $0,58 \times 10^{-3}$ |
| | | 16,75 a 18,75 | Rocha alterada | $0,51 \times 10^{-3}$ |
| | | 18,75 a 20,88 | Rocha alterada | $4,50 \times 10^{-4}$ |
| SM-12 - OE | 15,50 | 0,00 a 3,00 | Coluvio | $0,65 \times 10^{-5}$ |
| | | 6,00 a 9,00 | Residual maduro | $1,21 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 12,00 | Residual maduro | $2,73 \times 10^{-5}$ |
| | | 12,00 a 15,00 | Residual maduro | $0,76 \times 10^{-5}$ |
| | | 15,00 a 18,00 | Residual maduro | $1,00 \times 10^{-5}$ |
| | | 18,00 a 21,00 | Residual jovem | $3,05 \times 10^{-6}$ |
| | | 21,00 a 24,00 | Residual jovem | $2,29 \times 10^{-6}$ |
| | | 51,00 a 53,00 | Rocha alterada | $1,45 \times 10^{-5}$ |
| | | 53,00 a 55,30 | Rocha alterada | $0,54 \times 10^{-5}$ |
| SM-17-01 - T | 13,85 | 4,00 a 5,00 | Residual maduro | $1,99 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 10,00 | Residual jovem | $0,83 \times 10^{-4}$ |
| | | 13,00 a 16,00 | Rocha alterada | $2,78 \times 10^{-4}$ |
| | | 16,00 a 19,00 | Rocha alterada | $4,88 \times 10^{-4}$ |
| | | 19,00 a 22,00 | Rocha sã | $1,15 \times 10^{-4}$ |
| | | 22,00 a 25,00 | Rocha sã | $4,79 \times 10^{-5}$ |
| | | 25,00 a 28,00 | Rocha sã | impermeável |
| | | 28,00 a 30,15 | Rocha sã | impermeável |
| SM-17-02 - OE | 13,59 | 4,00 a 5,00 | Residual maduro | $4,09 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 10,00 | Residual jovem | $1,92 \times 10^{-4}$ |
| | | 14,00 a 15,00 | Residual jovem | $1,99 \times 10^{-4}$ |
| | | 21,00 a 24,00 | Rocha alterada | $1,41 \times 10^{-4}$ |
| | | 24,00 a 27,00 | Rocha alterada | $1,48 \times 10^{-4}$ |
| | | 27,00 a 30,00 | Rocha alterada | $0,99 \times 10^{-4}$ |

| | | | | |
|---------------|--------|---------------|-----------------|-----------------------|
| | | 30,00 a 33,00 | Rocha alterada | $1,08 \times 10^{-4}$ |
| | | 33,00 a 36,00 | Rocha alterada | $0,99 \times 10^{-4}$ |
| | | 36,00 a 40,0 | Rocha alterada | $1,10 \times 10^{-4}$ |
| SM-17-03 - OE | >10,43 | 4,00 a 5,00 | Coluvio | $0,79 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 10,00 | Residual maduro | $3,65 \times 10^{-5}$ |
| | | 14,00 a 15,00 | Residual maduro | $1,58 \times 10^{-5}$ |
| | | 19,00 a 20,00 | Residual maduro | $3,42 \times 10^{-5}$ |
| | | 24,00 a 25,00 | Residual jovem | $1,16 \times 10^{-4}$ |
| | | 29,00 a 30,00 | Residual jovem | $0,98 \times 10^{-4}$ |
| SM-17-04 - OE | >8,04 | 4,00 a 5,00 | Coluvio | $1,13 \times 10^{-4}$ |
| | | 9,00 a 10,00 | Residual maduro | $1,87 \times 10^{-4}$ |
| | | 14,00 a 15,00 | Residual maduro | $0,84 \times 10^{-4}$ |
| | | 19,00 a 20,00 | Residual jovem | $1,12 \times 10^{-4}$ |
| | | 24,00 a 25,00 | Residual jovem | $0,82 \times 10^{-4}$ |
| | | 29,00 a 30,00 | Residual jovem | $0,65 \times 10^{-4}$ |

OD:ombreira direita / OE:ombreira esquerda / T:talvegue

Tabela 1 – Resultados dos ensaios para cálculo de permeabilidade nos materiais da fundação da B6.

No total foram realizados 228 ensaios de campo, de infiltração no solo, e perda de água sob pressão na rocha. Foi considerado o valor de maior permeabilidade nos ensaios de perda de água. Além disso, os resultados foram uniformizados até 5,00, ou seja, dado fornecido pela Pattrol de $7,93 \times 10^{-5}$ cm/s foi alterado para $0,79 \times 10^{-4}$ cm/s.

No solo coluvionar foram realizados 45 ensaios, no solo aluvionar são 9 ensaios, no solo residual maduro foram realizados 98 ensaios, no solo residual jovem são 41 ensaios, na rocha alterada foram realizados 22 ensaios, enquanto que na rocha sã foram realizados 13 ensaios.

Considerando apenas os dados finais de permeabilidade, independente do horizonte ensaiado, os resultados mostram a seguinte distribuição:

- 10^2 : nenhum resultado;
- 10^3 :: 26 ensaios;
- 10^4 : 95 ensaios;
- 10^5 : 84 ensaios;
- 10^6 : 11 ensaios;
- impermeável : 12 ensaios.

Estes dados mostram que a grande maioria dos ensaios forneceram uma permeabilidade para os materiais da fundação entre $5,0 \times 10^{-4}$ e $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s (179 ensaios – 78,5%), os demais mostram permeabilidade maior (26 ensaios – 11,4 %), mas na faixa de 10^{-3} cm/s, e os demais mostram permeabilidade mais baixa (23 ensaios – 10 %), inclusive com 12 ensaios sem infiltração de água.

Em relação aos horizontes de solo e rocha, as permeabilidades mostram os seguintes limites inferior (menor permeabilidade) e superior (maior permeabilidade).

- solo aluvionar : impermeável a $1,64 \times 10^{-3}$ cm/s;
- solo coluvionar : impermeável a $1,14 \times 10^{-3}$ cm/s;
- solo residual maduro : impermeável a $1,02 \times 10^{-3}$ cm/s;
- solo residual jovem : impermeável a $1,04 \times 10^{-3}$ cm/s;

- rocha alterada : impermeável a $0,83 \times 10^{-3}$ cm/s;
- rocha sã : impermeável a $0,53 \times 10^{-3}$ cm/s.

Conforme exposto anteriormente, os horizontes de solo e rocha, e **os valores mais frequentes de permeabilidade** para os materiais da fundação da Barragem B6 podem ser assim definidos:

- **Aluvião** – solo argiloso a argilo-arenoso, cinza, índice SPT entre 0 e 8, associado ao vale do Córrego Toma Rasto e a seu afluente. As permeabilidades variam entre 10^{-6} a 10^{-4} cm/s.

- **Colúvio** – solo argiloso a silto-argiloso, marrom avermelhado, índice SPT de 2 a 8, ocorrendo nas margens esquerda e direita do vale, e com permeabilidades que variam entre 10^{-6} a 10^{-4} cm/s.

- **Solo residual** – compartimentado em maduro e jovem, em função da resistência à penetração de golpes, e pelo grau de intemperismo. O solo maduro é caracterizado por um material silto-arenoso a areno-siltoso, índice N_{spt} entre 8 e 35, e cor variegada. O solo jovem caracteriza-se por material silto-arenoso a areno-siltoso, mas índice N_{spt} mais elevado, entre 35 e 50, e cor variegada. Os ensaios de infiltração realizados no solo residual, tanto maduro, como jovem, resultaram em valores de permeabilidades de 10^{-5} a 10^{-4} cm/s.

- **Rocha alterada** (micaxisto) – rocha com elevado grau de alteração, pouco coerente, muito fraturada e com recuperação inferior a 60%. Os ensaios de perda de água realizados resultaram em permeabilidades de 10^{-5} a 10^{-4} cm/s.

- **Rocha sã a pouco alterada** (micaxisto) – rocha pouco alterada a sã, coerente a muito coerente, fraturada a pouco fraturada, e com recuperação superior a 60%. Os ensaios de perda de água realizados resultaram em permeabilidades de 10^{-6} a 10^{-5} cm/s.

4.4. DADOS DE HIDROGEOLOGIA

Na grande maioria das sondagens a percussão o nível de água não foi encontrado. As sondagens tiveram uma profundidade média de 15 m, e o N.A. se encontra a profundidades maiores nas ombreiras, conforme mostra a seção A do desenho **AR42-DE-005**. Na várzea há fluxo de água, conforme se observa na seção B do mesmo desenho.

Diante dos poucos dados de medição do N.A., com a grande maioria dos furos secos, não foi possível elaborar um mapa de contorno do nível de água subterrâneo na área. Contudo, sabe-se que há água corrente no Córrego Toma Rastro, assim como no talvegue secundário a jusante do eixo da barragem, e o nível de água se encontra a profundidades acima de 15 m nas elevações maiores nas ombreiras.

A princípio, o fluxo de água subterrâneo local deve ser das encostas para o talvegue do córrego, e o regional para jusante.

Conforme exposto anteriormente praticamente não há estruturas (fraturas) abertas no subsolo na área pesquisada, pois os ensaios de infiltração no solo, e perda de água sob pressão na rocha

mostraram permeabilidades médias, nunca elevadas. Os testemunhos de rocha são pouco fraturados, há apenas deslocamentos devido à xistosidade da rocha na perfuração.

4.5. ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os resultados dos ensaios foram apresentados nos relatórios dos projetos realizados em 2017, 2018 e 2020. Foram realizados ensaios nos materiais da fundação, em 9 amostras coletadas em poços.

Foram realizados ensaios de caracterização, compactação, adensamento, permeabilidade e resistência (triaxial). As **tabelas 2 e 3** apresentam um resumo dos resultados destes ensaios.

| Poço | Prof. (m) | W (%) | LL (%) | LP (%) | GRANULOMETRIA (%) | | | | | | ρ_s (g/cm ³) | C (%) |
|-------|-----------|-------|--------|--------|-------------------|-------|--------|--------|--------|-------|-------------------------------|-------|
| | | | | | Argila | Silte | Ar.fin | Ar.méd | Ar.gr. | Pedr. | | |
| PC-01 | 1,50 | 36,5 | 40 | 28 | 29,3 | 33,7 | 23,1 | 8,9 | 3,4 | 1,7 | 2,77 | - |
| PC-02 | 1,20 | 31,7 | 44 | 27 | 49,7 | 19,8 | 17,8 | 5,8 | 2,8 | 4,1 | 2,66 | - |
| PC-03 | 1,40 | 25,3 | 33 | 21 | 3,7 | 37,5 | 24,2 | 12,2 | 9,8 | 12,7 | 2,77 | - |
| PC-04 | 1,30 | 36,4 | 52 | 28 | 6,2 | 41,6 | 16,2 | 16,2 | 8,8 | 11,0 | 2,76 | - |
| PC-05 | 1,50 | 24,9 | 42 | 22 | 13,4 | 39,3 | 28,2 | 10,1 | 2,2 | 12,8 | 2,71 | - |
| PC-06 | 2,00 | 30,3 | 50 | 31 | 28 | 43 | 27 | 3 | 1 | 8 | 2,78 | 85 |
| PC-07 | 2,00 | 15,2 | NP | NP | 11 | 49 | 24 | 8 | 1 | 8 | 2,80 | 93 |
| PC-08 | 2,00 | 11,9 | NP | NP | 11 | 68 | 19 | 6 | 0 | 6 | 2,83 | 85 |
| PC-09 | 2,00 | 13,6 | NP | NP | 16 | 49 | 25 | 7 | 1 | 2 | 2,81 | 84 |

Tabela 2 - Resultados de ensaios de laboratório – amostras da fundação.

A **tabela 3**, a seguir, apresenta os resultados de ensaios especiais sobre as mesmas amostras da tabela anterior, ou seja, ensaios triaxiais adensados rápidos saturados, adensamento uniaxial e permeabilidade em câmara triaxial.

| Poço | Prof. m | C % | Triaxiais CIU_{sat} | | | | Adensamento | | k cm/s |
|-------|---------|-----|-----------------------|-----------|-------|----------|-------------|---|-----------------------|
| | | | c' kPa | ϕ' ° | c kPa | ϕ ° | C_c | $C_v \times 10^{-4}$ cm ² /s | |
| PC-01 | 1,50 | - | 0 | 30 | 0 | 9,5 | - | - | - |
| PC-02 | 1,20 | - | 0 | 33,5 | 3,1 | 15,5 | - | - | - |
| PC-03 | 1,40 | - | 0 | 38,4 | 0 | 17,6 | - | - | - |
| PC-04 | 1,30 | - | 0,5 | 32,3 | 17,5 | 13,5 | - | - | - |
| PC-05 | 1,50 | - | 2,5 | 31,3 | 10,7 | 11,0 | - | - | - |
| PC-06 | 2,00 | 85 | 10 | 35,5 | 10 | 16 | 0,37 | 140-100 | $0,79 \times 10^{-5}$ |
| PC-07 | 2,00 | 93 | - | - | - | - | - | - | - |
| PC-08 | 2,00 | 85 | 15 | 34 | 7 | 16 | 0,41 | 140-85 | $3,30 \times 10^{-5}$ |
| PC-09 | 2,00 | 84 | 0 | 37 | 0 | 16 | 0,39 | 143-87 | $0,87 \times 10^{-4}$ |

Tabela 3 – Resultados de ensaios especiais – amostras da fundação.

A amostra do PC-06, a 2,0 m de profundidade, foi coletada ao lado da sondagem SM-10, e corresponde ao solo coluvionar. A permeabilidade obtida foi de $0,79 \times 10^{-5}$ cm/s, confirmando os dados de campo. O mesmo ocorre para a amostra coletada no poço PC-08, ao lado da

sondagem SM-09, no solo coluvionar, cujo valor de permeabilidade obtido foi de $3,30 \times 10^{-5}$ cm/s.

A amostra coletada no poço PC-09, escavado ao lado da sondagem SM-01, a 2,0 m de profundidade, corresponde ao solo residual maduro, e mostrou uma permeabilidade em laboratório de $0,87 \times 10^{-4}$ cm/s, também semelhante as obtidas nos ensaios de campo.

Assim, os dados dos ensaios de campo e de laboratório mostram permeabilidades bem semelhantes, quase sempre na faixa de 10^{-4} a 10^{-5} cm/s.

5. DADOS DE GEOLOGIA ESTRUTURAL

Conforme exposto, a área da Barragem B6 está localizada na Província Ígnea Alto Paranaíba, que está inserida na Faixa Brasília. Esta província está adjacente ao Craton do São Francisco, e é de idade Neoproterozóica.

A província é representada por metassedimentos, predominando diversos tipos de xistos e quartzitos, e apresenta uma série de corpos intrusivos e extrusivos, de idade neocretácea, produto de um intenso magmatismo máfico-ultramáfico alcalino e ultrapotássico.

Os mapeamentos realizados no passado mostram que a região de Araxá está estruturada em uma sinforma regional, com charneira caindo suavemente para noroeste. Na porção sul esta estrutura foi seccionada pela zona de cisalhamento da Bocaina.

Na região de Araxá ocorre a denominada escama tectônica representada pelo Grupo Ibiá, que se estende desde Araxá até próxima a Goiana, sempre posicionada entre as escamas Canastra, na base, e Araxá, no topo.

Estas 3 escamas tectônicas representam diferentes conjuntos litológicos gerados em diferentes ambientes sedimentares e tectônicos, soldados uns aos outros durante um episódio orogênico.

Foram mapeadas 3 fases deformacionais (D1 / D2 / D3), sendo a primeira (D1) atribuída a foliação (S1), paralela ao bandamento composicional (S0), a segunda fase (D2) gerou uma nova foliação (S2), com direção dominante N30E/20NW, e lineações; a terceira fase deformacional (D3) apresenta-se como zonas de cisalhamento transcorrentes, que definem feições lineares importantes, como a zona de cisalhamento da Serra da Bocaina, a sul da cidade de Araxá. Estes cisalhamentos são subverticais, e foi responsável pela configuração final da região. **Não há cisalhamentos mapeados na região do entorno da Barragem B6**, e as 2 ombreiras e talvez apresentem o mesmo tipo litológico.

O metamorfismo principal na região de Araxá ocorreu em torno de 630 Ma (isócrona Sm-Nd), e o alojamento de granitos nesta região e das escamas tectônica ocorreram após esta data, com resfriamento regional em torno de 566 Ma (K-Ar).

Assim, esta região de Araxá mostra-se uma história estrutural e evolução tectônica Neoproterozóica. Após mostraram condições de plataforma, com estabilidade estrutural e tectônica.

6. SISMICIDA NO BRASIL

A teoria tectônica demonstra que as regiões de encontro entre placas são responsáveis pela quase totalidade da energia sísmica liberada no planeta. Um pequeno percentual restante ocorre em locais distantes destas fronteiras, nas denominadas regiões intraplaca. O Brasil, como um todo, está localizado em uma área intraplaca, e relativamente distante das bordas, refletindo-se em uma menor atividade sísmica. Explicar a gênese da sismicidade intraplaca é um grande desafio, havendo diversos modelos propostos para explicar esta atividade.

As baixas quantidade e magnitude destes sismos levam os projetistas de edificações a tradicionalmente negligenciarem as ações sísmicas na concepção, na análise e no dimensionamento das edificações civis usuais.

Entretanto, obras como hidrelétricas, barragens, centrais nucleares, ou outros casos especiais, as avaliações que consideram tais eventos são normalmente realizadas, em especial por necessitarem de adaptação aos rigorosos padrões e códigos normativos internacionais.

Segundo Nóbrega & Nóbrega (Perigo Sísmico no Brasil e a Responsabilidade da Engenharia de Estruturas – 2016) os abalos mais fortes ocorridos no Brasil aconteceram em regiões pouco habitadas, provocando consequências mínimas para os grandes centros urbanos.

O estudo sísmico é muito importante para a engenharia geotécnica, especialmente para barragens de rejeitos, e mais especialmente para as alteadas por montante, que não é o caso da Barragem B6, a ser alteada sempre por jusante.

Materiais com propensões ao processo de liquefação podem levar a rupturas de barragens, a princípio, com boas condições de estabilidade, especialmente nas análises com parâmetros drenados, e mesmo não drenados, mas desconsiderando a aceleração de sismos.

Ao se comparar o Brasil a outras regiões do planeta, ou mesmo à América do Sul, pode-se constatar que a sua atividade sísmica é menor. E relativamente baixa. Poucos terremotos no Brasil ultrapassaram a magnitude 6,0, destacando-se o ocorrido na Serra do Tombador (MT) no ano de 1955, com magnitude 6,2 mb; o sentido no estado do ES, também em 1955, com magnitude 6,1 mb e epicentro no Oceano, a cerca de 300 km da costa; e o mais recente, em 2003, de magnitude 7,1 mb, em plena Floresta Amazônica, mas em função da grande profundidade do hipocentro, não foi sentido de forma significativa nas cidades mais próximas.

A **figura 5** apresenta um mapa elaborado pelo “**Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP)**”, apresentado no trabalho de Nóbrega & Nóbrega citado, evidenciando que o Brasil apresenta um perigo relativamente muito baixo, com acelerações horizontais características normalmente inferiores a 0,4 m/s². Como exceções, tem-se uma porção do Nordeste, reunindo

frações dos estados do RN, PB e CE, e a parte oeste das Regiões Norte e Centro-Oeste, devido à sua proximidade com a Cordilheira dos Andes.

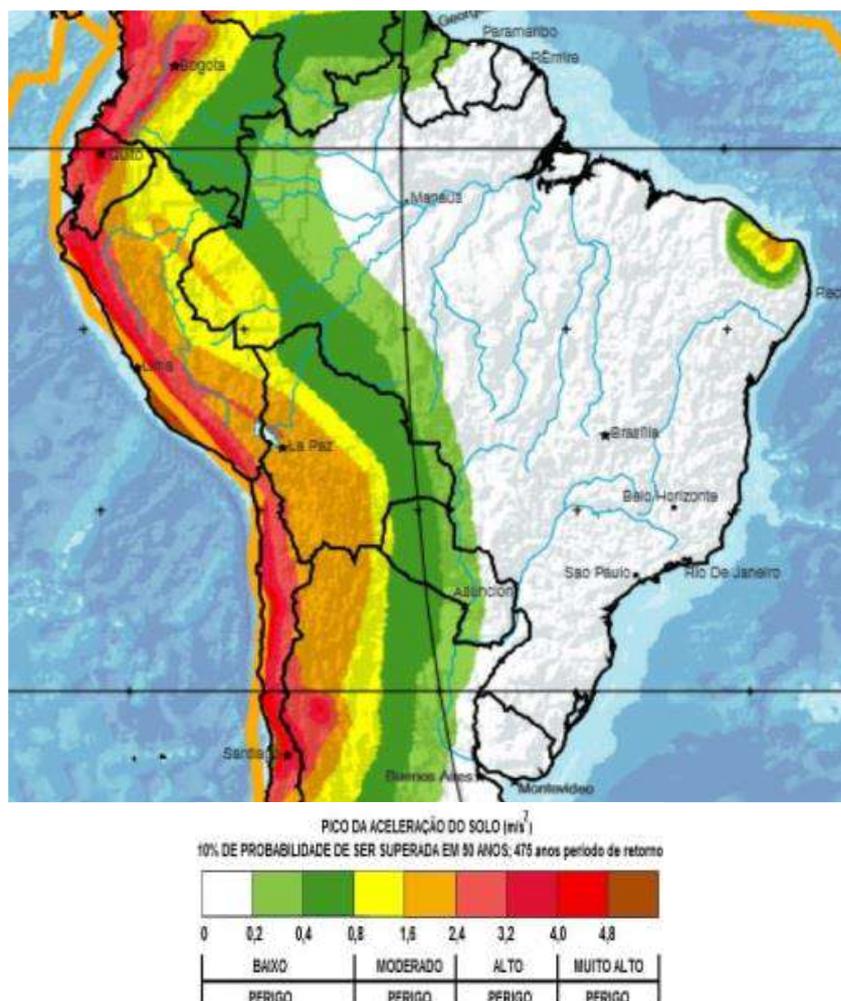


Figura 5 – Mapa da GSHAP, mostrando as faixas de aceleração do solo.

Segundo Lopes e Nunes (Intensidades Sísmicas de Terremotos, Revista da USP -2011) o nível de atividade sísmica no Brasil é classificado como baixo, com ocorrência média de menos de dois sismos com magnitudes maiores que 4 mb por ano, um sismo com magnitude maior que 5 mb a cada seis anos, e um sismo de magnitude 6 mb a cada 45 anos. Mesmo com frequência muito baixa, não é impossível a ocorrência de sismos com magnitudes de até 7,5 mb, sendo que, nesse caso, o período de recorrência desse tipo de evento no Brasil é em torno de 885 anos.

Para efeito de comparação, na região andina os sismos de magnitude superior a 5 mb ocorrem em média duas vezes por semana, e os de magnitude superior a 6 mb acontecem uma vez por mês.

Ainda segundo o mapa da GSHAP, o território brasileiro é dividido em cinco zonas sísmicas, conforme ilustra a **Figura 6** (Nóbrega & Nóbrega).

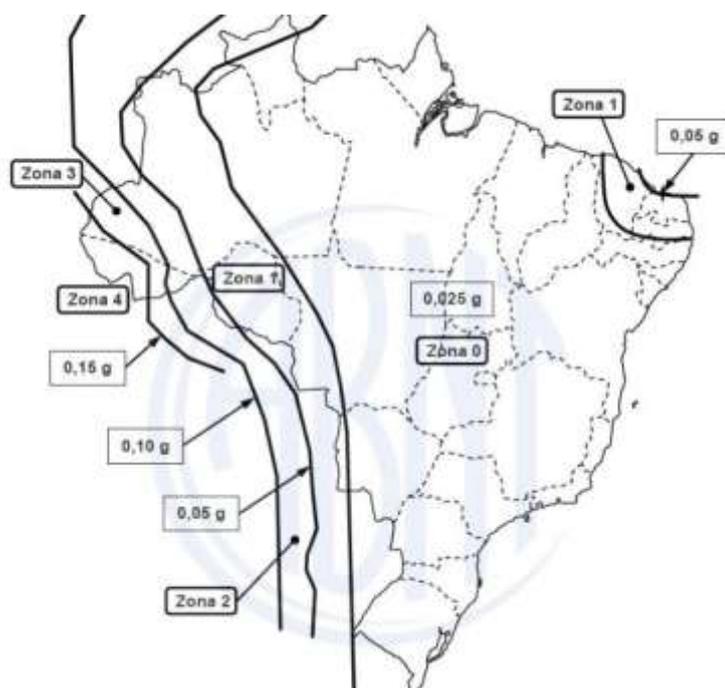


Figura 6 – Zoneamento sísmico do Brasil, segundo GSHAP.

Observa-se que a maior parte do território, incluindo o estado de MG, encontra-se situada na **Zona 0**, para a qual considera-se muito baixo o perigo sísmico, embora, historicamente, alguns dos eventos mais intensos tenham ocorrido nesta área, além dela ser o local onde se concentram os maiores centros urbanos e a maior quantidade de grandes estruturas como hidrelétricas, barragens, pontes, torres e edifícios altos.

Os valores atribuídos situam-se entre 2,5% (Zona 0) e 15% (Zona 4) de “g” (aceleração da gravidade), e estes valores referem-se a terrenos de rocha, onde não há amplificação sísmica pela fundação, mas para solo haverá amplificação. Ou seja, fundação mais rígida vibra menos; solos amplificam as ondas sísmicas, causando maior movimentação à estrutura, no caso, a barragem.

Foi realizada uma correlação entre magnitude e intensidade de sismos, considerando a escala Mercalli Modificada. Os sismos com aceleração de 1,5 a 4,0% de g correspondem a intensidade V (forte), ou seja, sentido por praticamente todas as pessoas, muitas despertam, as pessoas conseguem identificar a direção do movimento, líquido em recipiente é perturbado, objeto pequenos e instáveis são deslocados, portas oscilam, fecham e abrem, os movimentos de pêndulos podem parar.

Os terremotos são imprevisíveis, mas a boa engenharia não deve ser. Assim, o risco sísmico no Brasil é baixo, mas não é nulo. Diante disto, as análises de estabilidade realizadas para os projetos da Barragem B6 consideraram uma aceleração de 5% de g na horizontal, e 3% na vertical, atendendo recomendação da Eletrobrás. Os fatores de segurança para estas análises devem ser iguais ou superiores a 1,1.

Todos os relatórios técnicos ou os memoriais descritivos dos projetos da Barragem B6 apresentam as análises de estabilidade realizadas, desde o dique inicial, e para todos os alteamentos, até a El. 980 m, que é o último alteamento previsto.

O documento Geoconsultoria AR42-RT-04 apresenta as análises de estabilidade para o último alteamento da Barragem B6, para a El. 980 m. Os parâmetros utilizados estão citados neste relatório, e a posição do nível de água foi definida pelas análises de percolação, também apresentadas neste relatório.

Para a El. 980 m foram realizadas análises para a seção central, que passa pelo talvegue (D), por ser a mais crítica pela maior altura, e considerando rupturas circulares e planares, e parâmetros drenados, não drenados, e pseudo-estática (sismos).

Para esta última condição, as análises para a seção D são apresentadas a seguir, nas **figuras 7** (circular) e **8** (planar). Foi considerada uma aceleração de 5% na horizontal, e 3% na vertical, conforme recomendado pela Eletrobrás, e acima daquela especificada para a Zona 0 (2,5 % de g).

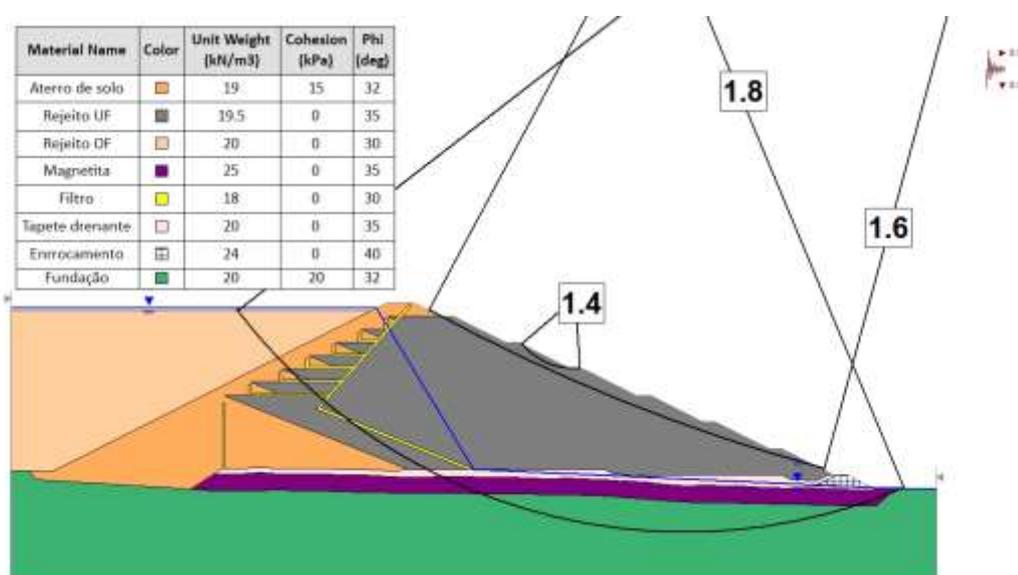


Figura 7 – Análise circular pseudo-estática ($FS = 1,4 > FS_{min}$).

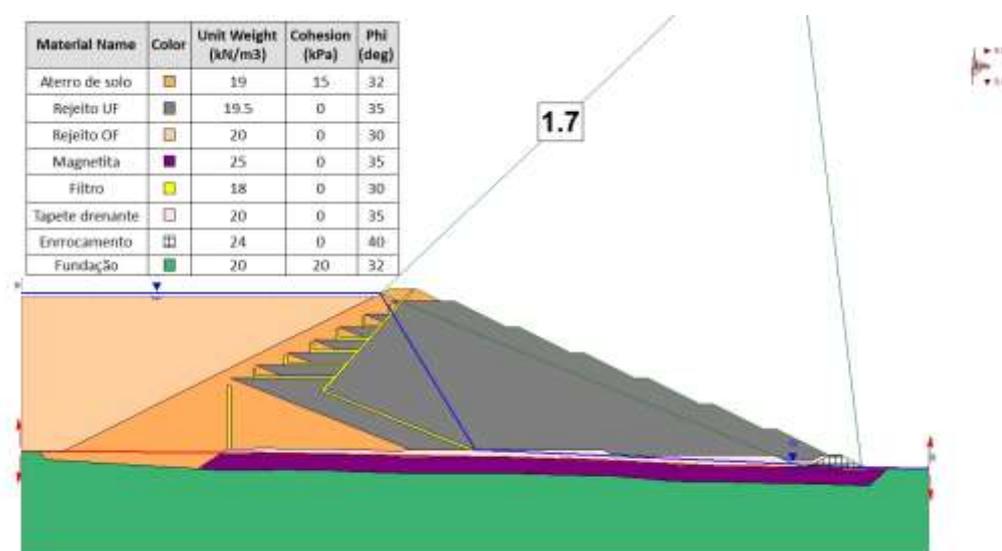


Figura 8 – Análise planar pseudo-estática ($FS = 1,7 > FS_{min}$).

Assim, as análises realizadas para a condição pseudo-estática, com simulação de sismos, mostram um aterro estável mesmo para a condição mais crítica.

A Mosaic Fertilizantes contratou um estudo de Análise de Perigo Sísmico para as barragens de rejeitos de Araxá e Tapira. Este estudo foi elaborado pela FUNEP – Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão, em julho de 2020.

A conclusão é de que a aceleração horizontal de pico (PGA) para tempo de retorno de 475 anos é de 0,019 g; e que para tempo de retorno de 2.500 anos é de 0,066 g. A Eletrobrás recomenda utilizar uma aceleração horizontal de 0,05 g, que foi usada nos projetos da Barragem B6.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados fornecidos mostram que a Barragem B6 teve sua fundação bem pesquisada, com sondagens adentrando no solo e também na rocha alterada e sã. O maciço rochoso é do tipo xisto, do Grupo Ibiá, que ocorre no entorno da intrusão alcalina.

Os solos mais porosos nas ombreiras, com índice N_{spt} mais baixo foram removidos, parte do material é de boa qualidade, por isso foi utilizado no reaterro. Houve remoções de até 5 m nas ombreiras. No talvegue o solo muito mole, plástico, foi inteiramente removido, até 7 m de espessura, e dispostos dentro do reservatório, bem a montante.

O maciço rochoso, tipo mica-xistos, é pouco fraturado. Os materiais mostraram permeabilidades baixas a médias, nunca muito elevado, com valores mais frequentes entre $5,0 \times 10^{-4}$ e $5,0 \times 10^{-5}$ cm/s. O nível de água encontra-se aflorante no talvegue, com água perene, e baixo nas ombreiras, com a grande maioria das sondagens não o atingindo até 15,0 m de profundidade.

Os dados sísmicos mostram que o Brasil se encontra em uma região intraplaca, com baixa quantidade e magnitude de sismos. Mesmos assim, nas análises de estabilidade acelerações devido a sismos foram consideradas, com valores de 5% na horizontal, e 3 % na vertical, conforme recomendação da Eletrobrás, e acima dos valores da **GSHAP**.

Diante disto, a Geoconsultoria considera que os riscos geológicos, estruturais, e de sismos são relativamente baixos, a pesquisa geotécnica foi extensa e detalhada. Com a operação da barragem o nível de água deve se elevar na região da barragem, fato considerado nos estudos de estabilidade, pois todos os materiais da fundação foram considerados saturados. A vazão residual deve ser garantida, mesmo nos períodos secos.



Anotação de Responsabilidade Técnica - ART
Lei nº 6.496, de 7 de dezembro de 1977
Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Estado de São Paulo

CREA-SP

ART de Obra ou Serviço
28027230210062660

1. Responsável Técnico

SILVIO LUIZ DE OLIVEIRA

Título Profissional: Geólogo

RNP: 2205756419

Registro: 5061558101-SP

Registro: 1150147-SP

Empresa Contratada: GEOCONSULTORIA LTDA

2. Dados do Contrato

Contratante: MOSAIC FERTILIZANTES P&K LTDA

CPF/CNPJ: 33.931.486/0019-60

Endereço: Avenida ARAFÉRTIL

Nº: 5000

Complemento:

Bairro: SETOR SUL

Cidade: Araxá

UF: MG

CEP: 38184-270

Contrato:

Celebrado em: 11/01/2021

Vinculada à Art nº:

Valor: R\$ 5.000,00

Tipo de Contratante: Pessoa Jurídica de Direito Privado

Ação Institucional:

3. Dados da Obra Serviço

Endereço: Rua TUCUNA

Nº: 722

Complemento:

Bairro: PERDIZES

Cidade: São Paulo

UF: SP

CEP: 05021-010

Data de Início: 11/01/2021

Previsão de Término: 18/01/2021

Coordenadas Geográficas:

Finalidade:

Código:

CPF/CNPJ:

4. Atividade Técnica

| Elaboração | | | Quantidade | Unidade |
|------------|--------|---------------------|------------|------------|
| 1 | Estudo | Estudos Geotécnicos | 15,00000 | homem hora |

Após a conclusão das atividades técnicas o profissional deverá proceder a baixa desta ART

5. Observações

Estudo de riscos geológicos, estrutural e sísmico e comportamento hidro geológico da barragem B6 de Araxá, EL986 m.

6. Declarações

Acessibilidade: Declaro que as regras de acessibilidade previstas nas normas técnicas da ABNT, na legislação específica e no Decreto nº 5.296, de 2 de dezembro de 2004, não se aplicam às atividades profissionais acima relacionadas.

7. Entidade de Classe

SINDICATO DOS GEÓLOGOS NO ESTADO DE SÃO PAULO - SIGESP

8. Assinaturas

Declaro serem verdadeiras as informações acima

SÃO PAULO 18 de JANEIRO de 2021

SILVIO LUIZ DE OLIVEIRA - CPF: 264.904.470-53

MOSAIC FERTILIZANTES P&K LTDA - CPF/CNPJ: 33.931.486/0019-60

9. Informações

- A presente ART encontra-se devidamente quitada conforme dados constantes no rodapé-versão do sistema, certificada pelo Nosso Número.

- A autenticidade deste documento pode ser verificada no site www.creasp.org.br ou www.confea.org.br

- A guarda da via assinada da ART será de responsabilidade do profissional e do contratante com o objetivo de documentar o vínculo contratual.

www.creasp.org.br
Tel: 0800 17 18 11
E-mail: acessar link Fale Conosco do site acima

