

NOTA TÉCNICA CT-GRSA nº 05/2022

Assunto: Avaliação dos documentos “Revisão 01 do Relatório Técnico – Monitoramento dos Sedimentos *intracalha* (Trechos 6 a 11) – Campanhas A, B, C e D (setembro e outubro de 2020)” e “ Complementação da aplicação do método analítico considerando o monitoramento intracalha de sedimento - setembro e outubro de 2020”, em atendimento aos Itens 7 e 8, do Eixo Prioritário 1 no âmbito da ACP - Eixos Prioritários.

1. INTRODUÇÃO

Em 19 de dezembro de 2019, foi expedida no âmbito da Ação Civil Pública nº 69758-61.2015.4.01.3400, uma decisão que homologou eixos prioritários temáticos, cujo objetivo foi dar celeridade às ações de reparação no contexto do rompimento da barragem de Fundão. Estabelecendo, para cada eixo prioritário, as entregas a serem realizadas pela Fundação Renova ao Comitê Interfederativo (CIF), o qual reportará ao juízo, com subsídio técnico dos órgãos competentes, suas considerações quanto ao cumprimento das obrigações da ACP.

Neste contexto, destacam-se no Eixo Prioritário 1 com o objetivo: a recuperação ambiental extra e intra calha, que possui dentre outros, o Item 7 - *Apresentar ao Sistema CIF relatório do monitoramento do comportamento/dinâmica do rejeito intracalha nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, até a UHE Risoleta Neves, do período seco de 2019 e o Item 8 - Apresentar ao Sistema CIF relatório do monitoramento do comportamento/dinâmica do rejeito intracalha dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce até UHE Risoleta Neves, para o período chuvoso 2019/2020, com avaliação quanto à efetividade do lag layer.*

Em atendimento aos Itens 7 e 8 do Eixo 1, em maio de 2021 a Fundação Renova peticionou na 12ª Vara Federal Cível/Agrária de Minas Gerais, o seguintes estudos:

- “Revisão 01 do Relatório Técnico – Monitoramento dos Sedimentos intracalha (Trechos 6 a 11) – Campanhas A, B, C e D (setembro e outubro de 2020)”, elaborado pela empresa de consultoria ambiental WORLEY, em atendimento à requisição do

Item 7 da ACP - Eixos Prioritários e em resposta às considerações feitas pelos órgãos de acompanhamento;

- “Complementação da aplicação do método analítico considerando o monitoramento intracalha de sedimento - setembro e outubro de 2020”, sendo este, desenvolvido pela GOLDER, em atendimento ao Item 8 do Eixo 1 da ACP - Eixos Prioritários.

Nesse sentido, a CT-GRSA, vem, por meio desta Nota Técnica, apresentar a análise dos documentos supracitados, com foco em **avaliar a eficácia do lag layer na contenção dos rejeitos intracalha**, assim como avaliar o cumprimento das requisições das Notas Técnicas CT-GRSA n° 15/2020¹, n° 20/2020² e n° 21/2020³ e, conseqüentemente da Deliberação CIF n° 425, de 24 de agosto de 2020⁴, estando esta Nota Técnica subsidiada pelo Parecer da Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda (Anexo 1).

2. HISTÓRICO E CONTEXTUALIZAÇÃO

A primeira abordagem do *lag layer*, dentro do contexto do manejo de rejeitos, foi apresentada no documento “Volume 1 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito (PMR) no Trecho 8 (CH2M, 2017)”. Neste documento, o *lag layer* é entendido como um “rejeito lavado”, sendo formado a partir da remoção do material mais fino (argila e silte), e assim, segundo os referidos autores, serviria como “uma camada selante entre a água do rio e o rejeito inconsolidado que se encontra abaixo”.

Para fundamentar essa hipótese, foi apresentada apenas uma referência: “Demonstração e Validação da Recuperação Natural Monitorada Avançada de Sites DoD” (*Demonstration and Validation of Enhanced Monitored Natural Recovery at DoD Sites, ESTCP, 2009*). A referência versa sobre projetos de remediação com a aplicação de métodos de capeamento de sedimento que apresentam a instalação de *thinner caps* (capeamentos finos), como uma camada para impedir o contato da água e biota aquática com sedimentos

¹ <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-GRSA/2020/cif-ct-grsa-nt-2020-15.pdf>

² <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-GRSA/2020/cif-ct-grsa-nt-2020-20.pdf>

³ <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-GRSA/2020/cif-ct-grsa-nt-2020-21.pdf>

⁴ <https://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/deliberacoes/2020/cif-deliberacao-425.pdf>

contaminados. No PMR do Trecho 8 é afirmado que: “o *lag layer* formado na calha do rio, teria a mesma função do *thinner caps* mencionado” e adota um valor que julga ser conservador de “40 cm, como uma espessura que serviria para a formação deste selo de cobertura, impedindo a exposição e a erosão do rejeito inconsolidado abaixo”, todavia sem apresentar comprovação científica.

Diversos documentos foram emitidos a respeito do PMR do Trecho 8, sendo consolidados pela Nota Técnica 0009/17 CT/GRSA/CIF. Neste documento, referente ao contexto dos rejeitos intracalha, foi explicitado que: “os órgãos ambientais entendem que as alternativas propostas não devem ser implementadas sem a realização de estudos complementares.”. **Em suma, foi solicitado a realização de estudos adicionais para complementação da caracterização ambiental e apuração do conhecimento acerca dos depósitos de rejeito em leito fluvial.**

Dessa forma, em atenção a NT 09/2017 CT/GRSA/CIF durante o período chuvoso 2017/2018, foram realizadas diversas atividades de caracterização ambiental, cujos resultados foram consolidados no documento intitulado “Volume 6 – Complementação da Aplicação do Plano de Manejo de Rejeitos no Trecho 8 – Rev-02 – julho de 2018”. Conforme o relatório apresentado, as conclusões de tais investigações indicaram, em referência ao contexto intracalha, a alternativa de manejo de rejeitos de “capeamento natural e monitoramento”, que se trata do *lag layer*.

Diante dos estudos complementares entregues no Volume 6 do PMR do Trecho 8, foi emitida a Nota Técnica CT-GRSA nº 08/2019⁵, na qual a Câmara Técnica dispôs em suas considerações finais:

Conforme o exposto no documento “Volume 6 – Complementação da Aplicação do Plano de Manejo de Rejeitos no Trecho 8 – Rev-02 – Julho de 2018”, conclui-se que, diante dos estudos apresentados, a presença do lag layer deve ser considerada como hipótese, não sendo aceita como argumento final para definir se os depósitos de rejeitos deverão permanecer na calha principal do rio Gualaxo do Norte, em todos os trechos impactados.

⁵ <http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/notas-tecnicas/CT-GRSA/2019/cif-ct-grsa-nt-2019-08.pdf>

A utilização do período de recorrência de 10 anos é uma referência inferior ao desejado e implica na efetividade de estabilização dos rejeitos para um dado período/frequência, e somente para o Trecho 8, não trazendo segurança aos membros da CT-GRSA. Desse modo, é fundamental a realização de um monitoramento contínuo visando estabelecer um conhecimento aprofundado das condições dos rios impactados, bem como a realização de estudos de pluviosidade/vazão com maiores tempos de recorrência visando avaliar o comportamento do “laglayer” frente a estes eventos.

Ressaltamos, que os critérios para tomada de decisão e para seleção das alternativas de manejo poderão ser revistos a partir dos estudos complementares nos termos da Nota Técnica IBAMA/SISEMA/IEMA No 002/2017 e Deliberação CIF nº 86.

A Fundação Renova deverá apresentar as informações e documentos relacionados em cada requisição, no prazo estipulado abaixo, a partir da aprovação desta nota em reunião ordinária do CIF. (grifo nosso)

Conseqüentemente, a Câmara Técnica fez uma série de requisições na Nota Técnica CT-GRSA nº 08/2019, incluindo requisitos mínimos para o monitoramento intracalha, visando entender melhor a dinâmica do *lag layer*, e assim, comprovar ou refutar o uso desta como uma camada selante dos rejeitos.

O CIF deliberou os encaminhamentos da Nota Técnica CT-GRSA nº 08/2019 por meio da Deliberação CIF nº 304, de 29 de julho de 2019⁶, que aprovou o PMR 8, devendo ser revisado periodicamente em consonância com os resultados dos estudos técnicos desenvolvidos nos demais Programas do TTAC, além de requisitar relatório de monitoramento nos trechos 6 a 11.

Em 30 de março de 2020, foi entregue o “Volume 14 - Monitoramento dos Sedimentos intracalha nos Trechos 06 ao 12”, no qual foi indicada uma redução da camada de rejeito inconsolidado e um correspondente aumento da espessura do *lag layer*.

Em atenção ao Volume 14, foi emitida a Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2020 (Anexo 2), em que o Igam considerou que faltavam evidências para confirmar o argumento

⁶ http://www.ibama.gov.br/phocadownload/cif/deliberacoes/2019/cif_deliberacao_304.pdf

apresentado no documento, de que a elevação da turbidez é controlada pela camada *lag layer*. Por conta disso, recomendou a revisão do documento, levando em consideração os apontamentos elencados pela Nota Técnica em questão, e que fosse incluída a análise dos dados do último período chuvoso 2019-2020 (dezembro, janeiro e fevereiro), quando foram observados períodos prolongados de anomalias positivas de água precipitável na bacia do rio Doce, que poderiam acarretar em um cenário bastante diferente do que foi apresentado.

A Nota Técnica CT-GRSA nº 15/2020, que teve como base a Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2020, consolidou o posicionamento dos membros da Câmara Técnica sobre o documento “Avaliação do estudo “Volume 14 – Monitoramento dos Sedimentos intracalha nos Trechos 06 ao 12”, referente ao item 7 do eixo prioritário 1, no âmbito do processo judicial nº 69758-61.2015.4.01.3400.”. Esta nota concluiu pelo cumprimento parcial do item judicial por não ter atendido todas as solicitações da NT CT-GRSA nº 08/2019, em especial quanto às medições de descarga sólida e líquida. Adicionalmente, foram listadas requisições para a aprovação do monitoramento implementado pela Fundação Renova.

Em 17/08/2020 foi emitida a Nota Técnica CT-GRSA nº 20/2020 acerca da “Avaliação da implementação do monitoramento do rejeito intracalha, conforme exigência da Deliberação CIF 304, Requisição 1 da Nota Técnica CT-GRSA 08/2019 e dos Itens 7 e 8 do Eixo Prioritário 1 da Ação Civil Pública 69758-61.2015.4.01.3400, pela Fundação Renova”, concluindo que houve uma paralisação do monitoramento após dezembro de 2019, com perda incalculável para o entendimento da dinâmica intracalha na bacia do rio Doce, tanto pela interrupção da série histórica de dados, como também pelo desperdício da oportunidade de observação da estabilidade do *lag layer*, em eventos raros de elevada pluviosidade, solicitando notificação à Fundação Renova, nos termos do TTAC.

Em 18/08/2020 foi emitida a Nota Técnica CT-GRSA nº 21/2020 acerca da Avaliação do “Relatório Final – Aplicação do Método Analítico para Avaliação do *lag layer*”, referente ao item 8 do Eixo Prioritário 1, no âmbito do processo judicial nº 69758- 61.2015.4.01.3400. Por meio desta Nota Técnica, a Câmara Técnica pontuou que o tema do *lag layer* já é discutido há quatro anos, e que ao longo desse tempo nunca foram apresentadas certezas necessárias de sua eficácia, principalmente por ausência de monitoramento do período chuvoso 2019/2020, por apresentar dados incompletos de monitoramento, dentre outros fatores. Diante de diversas

fragilidades, a Nota Técnica CT-GRSA nº 21/2020 reiterou as conclusões da Nota Técnica CT-GRSA nº 20/2020 e estipulou um prazo de 90 dias, sendo condizente para as conclusões dos trabalhos.

Apesar do documento “Relatório Final – Aplicação do Método Analítico para Avaliação do *lag layer*” ser referente ao item 8 do Eixo Prioritário 1, também evidenciou apontamentos referentes ao item 7 do Eixo Prioritário 1, pois ambos os itens tratam do monitoramento intracalha, porém o item 7 referente ao período seco e o item 8 ao período chuvoso com respostas necessárias sobre a estabilidade do *lag layer*.

O conjunto das Notas Técnicas CT-GRSA 15, 20 e 21/2020 subsidiaram então a Deliberação CIF nº 425, de 24 de agosto de 2021, que expressou o descumprimento parcial do item 7 e descumprimento total do item 8 do Eixo Prioritário 1. Ademais, foi requerido ao Juízo que intimasse a Fundação Renova para a retomada imediata do monitoramento intracalha, respaldado por um Plano/Protocolo de Proteção à Saúde dos trabalhadores que iriam atuar nas atividades de campo, conforme as restrições impostas pela pandemia da Covid-19 à época, visando que os prejuízos ao meio ambiente e sociedade não fossem perpetuados, visto que a Fundação Renova informou que não realizou o monitoramento no período chuvoso 2019/2020, mais precisamente janeiro de 2020, período de maior pluviosidade registrada após o rompimento da barragem de Fundão, até a época.

Nessa conjuntura, em 20/04/2021 a Fundação Renova protocolou nos autos do Processo Judicial o Memorando Técnico MT-001_209-535-7742_07, com suas considerações e respostas à Deliberação CIF nº 425/2020 e Notas Técnicas da CT-GRSA 15/2020, 20/2020 e 21/2020, e ainda o Relatório Técnico – Monitoramento dos Sedimentos intracalha (Trechos 6 a 11) – Campanhas A, B, C e D (setembro e outubro de 2020)”, como também o documento “Complementação da aplicação do método analítico considerando o monitoramento intracalha de sedimento - setembro e outubro de 2020”.

3. ANÁLISE TÉCNICA

a) 3.1. DA CONTRATAÇÃO DE CONSULTORIA ESPECIALIZADA

No decorrer temporal, em virtude do TAC-Gov surgiu a possibilidade de contratação de consultoria para subsidiar as análises das Câmaras Técnicas em temas técnicos específicos. Sendo assim, a CT-GRSA elaborou edital para contratação de consultoria especializada (Edital FLACSO 09/2021) para subsidiar processo de seleção pública conduzido pela Faculdade Latino-Americana de Ciências Sociais (FLACSO).

Dos candidatos inscritos e elegíveis, foram aprovados dois, com desistência do primeiro lugar, assumindo o trabalho da análise o segundo colocado, Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda.

i) 3.1.1. DO PARECER TÉCNICO DA CONSULTORIA

O Parecer Técnico Final (Anexo 1) foi emitido em 18/03/2022, o qual está sendo utilizado como um dos subsídios desta Nota Técnica, principalmente quanto ao Item 8 do Eixo Prioritário 1 da ACP.

Em termos de conteúdo, o Parecer Técnico foi avaliado pela CT-GRSA que considerou adequado o conteúdo do relatório. Destaca-se que foram considerados pela consultoria, além do documento da Fundação Renova:

- Nota Técnica CT-GRSA n° 21/2020: Avaliação do “Relatório Final – Aplicação do Método Analítico para Avaliação do *lag layer*”, referente ao item 8 do eixo prioritário 1, no âmbito do processo judicial 69758-61.2015.4.01.3400;
- Notas Técnicas CT-GRSA n.º 15/2020 e n.º 20/2020;
- Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do *lag layer* e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos extremos; e Relatório Final – Aplicação do Método Analítico para Avaliação do *lag layer*. Relatórios anteriores que definiram as metodologias para avaliar a estabilidade do *lag layer* e seu efeito no encouraçamento dos rejeitos. Foi avaliado para conferência de dados anteriores e observar a evolução do processo de monitoramento e modelagem adotados;
- Volumes 1, 2, 4, 5 e 9 do Plano de Manejo de Rejeitos elaborados para o Rio Doce, referentes aos trechos 6 a 11. Apresentam dados de relevância do

monitoramento dos sedimentos e rejeito nos trechos de interesse dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, que se relacionam aos dados de interesse e foram utilizados no estudo avaliado para verificar a evolução temporal dos parâmetros analisados;

- MERRITT et al. (2009). *Case Study Review: Demonstration and Validation of Enhanced Monitored Natural Recovery at DoD Sites, ESTCP Project ER-0827*. Apresentam estudos de caso de monitoramento de recuperação natural de áreas com sedimentos contaminados pertencentes ao Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, em regiões marinhas (enseadas e porto costeiro). Propôs utilizar efeitos de capeamento para contenção de contaminantes em sedimentos. Foi utilizado como base para a hipótese da camada de *lag layer* como camada de encouraçamento para imobilização dos rejeitos originados do rompimento da barragem de Fundão, em 2015.

O Parecer Final da Consultoria se inicia com uma introdução que contextualiza brevemente o histórico que levou à sua emissão, com contextualização sobre o movimento dos sedimentos (coesivos e não coesivos) nos escoamentos com superfície livre, contendo revisão e explanação sobre os conceitos e aspectos técnicos que são afetos ao tema, construindo, assim, toda uma base técnica/teórica para fundamentar as colocações e conclusões referente à documentação apresentada por parte da Fundação Renova, permitindo uma ampla compreensão e defesa de suas posições e conclusões.

b) 3.1.2. Do item 5 do Parecer - Respostas dos parecerista aos questionamentos da CT-GRSA

Visando ser assertivo quanto a efetividade do *laglayer*, a CT-GRSA fez três perguntas aos pareceristas que sintetizaram seus principais pontos de incerteza. Estes questionamentos foram respondidos no item 5, o qual se recomenda a leitura na íntegra, todavia, **se replica aqui a parte inicial/objetiva da resposta:**

PERGUNTA 1: *Considerando a referência “Case Study Review: Demonstration and Validation of Enhanced Monitored Natural Recovery at DoD Sites, ESTCP Project ER-0827. Authors: MERRITT, K.A.; Conder, J.M.; Magar, V.S.; Kirtay, V.J.; Chadwick, D.B.), a qual foi base inicial para a construção da proposta do LAG LAYER (VOLUME 1. APLICAÇÃO DO PLANO DE MANEJO DE REJEITO NO TRECHO 8 REVISÃO 0). Tem-se que os três estudos de caso desta referência se tratam de duas enseadas e uma área portuária, ou seja, amplas áreas marinhas, áreas estas cuja dinâmica hidráulica se diferencia de um rio, questiona-se se seria aplicável a extrapolação de tal técnica de recuperação de áreas marinhas para um ambiente de rio dadas as diferentes dinâmicas dos ambientes?*

RESPOSTA: *“Sim, não existem limitações para a extrapolação das técnicas de recuperação apresentadas no estudo de MERRIT ET AL. (2009) para ambientes fluviais, desde que elas sejam dimensionadas considerando as condições hidrodinâmicas desses ambientes. [...]”*

PERGUNTA 2: *O lag layer é estável pensando em um cenário de longo prazo e chuvas de diversos tempos de recorrência? Em outros termos, em uma chuva de grandes proporções, e grande vazão de água nos rios afetados pelo rejeito, o “lag layer” seria capaz de resistir a essa vazão de água e não expor os rejeitos à coluna d’água?*

RESPOSTA: *“Os modelos analíticos indicam que não, já que ele seria remobilizado em sua totalidade mesmo para eventos de baixo tempo de recorrência (< 10 anos). Além disso, os dados de monitoramento indicam redução das camadas de lag layer e rejeitos que, mesmo com as incertezas inerentes ao processo, trazem a necessidade de precaução. Evidências nesse sentido foram obtidos ao longo de todo o trabalho (monitoramento estratigráfico, análises granulométricas da descarga sólida, estimativa do volume de lag layer e rejeitos remanescentes nos trechos de estudo e modelos analíticos de início de movimento e profundidade de remoção). Informações de grande valor foram perdidos com a não realização do monitoramento no evento mais extremo observado desde a ruptura da barragem e com a mudança dos métodos de amostragem e interpretação dos resultados nas campanhas subsequentes. [...]”*

PERGUNTA 3: *É factível afirmar que a proposta de Fundação Renova, de uso do denominado "lag layer" naturalmente formado, para contenção de rejeitos, é cabível para o cenário do rio Doce ou trata-se de hipótese?*

RESPOSTA: *“Com os dados apresentados até o momento, o uso do lag layer formado nos trechos estudados para contenção de rejeitos, por capeamento, é apenas uma hipótese, não corroborada pelos resultados. [...]”*

(Minerva, 2022)(grifo nosso)

Cabe observar a resposta da Minerva a primeira pergunta da CT-GRSA, a respeito da possibilidade de extrapolação da técnica para o ambiente de rio, tem-se que o *lag layer* proposto pela Fundação Renova é naturalmente formado, não sendo uma camada projetada e depositada de material selante como o verificado nos estudos de caso de MERRIT ET AL. (2009), ou seja, apesar de não haver limite para extrapolação da técnica, não foi precisamente esta que se verificou no caso do desastre da SAMARCO.

c) 3.1.3. Das considerações Finais e conclusões dos pareceristas

Destaca-se aqui:

Considerando que não houve monitoramento no período de maiores vazões observadas desde a ruptura da barragem de Fundão (janeiro de 2020), e que o modelo conceitual e os métodos amostrais e de interpretação dos resultados se alteraram na campanha do relatório avaliado, em relação ao que era praticado nas campanhas anteriores a esse evento, há comprometimento da consistência da série histórica tanto para a interpretação comparativa dos dados, como para o estabelecimento de análises de tendência. Assim, os dados devem ser interpretados com parcimônia, quando comparados aos resultados de relatórios anteriores, porque surgem incertezas em relação ao que pode ter acontecido nesse intervalo.

[...]

Com o embasamento técnico exposto e pelo princípio da precaução, não é possível ter confiança nos efeitos de encouraçamento promovidos pelo lag layer observado para a imobilização física e química do rejeito inconsolidado intracalha[...]. Como os resultados não tem sido promissores para essa opção de manejo, técnicas de

extração dos rejeitos e remediação ex situ devem ser consideradas, também com estudos de impactos e adoção de medidas mitigadoras.

(Minerva, 2022)(grifo nosso)

d) 3.2. DA ANÁLISE DO MONITORAMENTO INTRACALHA PARA O PERÍODO SECO E CHUVOSO

Em atendimento ao item 7 - Eixo 1 da ACP Eixos Prioritários, a Fundação Renova protocolou junto ao CIF, em 30 de março de 2020, o documento intitulado “Volume 14 – Monitoramento dos Sedimentos Intracalha nos Trechos 06 ao 12”. Tal documento foi encaminhado para a CT-GRSA no dia 31 de março de 2020, para análise e subsídio ao CIF. A CT-GRSA emitiu no dia 15 de julho de 2020 a Nota Técnica CT-GRSA 15/2020, em análise ao documento apresentado pela Fundação Renova.

Em resposta a esta Nota Técnica, a Fundação Renova peticionou em maio de 2021 na 12ª Vara Federal Cível/Agrária de Minas Gerais, no âmbito do Processo Judicial 1024354-89.2019.4.01.3800 – ACP Eixos Prioritários, a “Revisão 01 do Relatório Técnico – Monitoramento dos Sedimentos intracalha (Trechos 6 a 11) – Campanhas A, B, C e D (setembro e outubro de 2020)”, elaborado pela empresa de consultoria ambiental WORLEY.

Das 9 recomendações da Nota Técnica CT-GRSA nº 15/2020, apenas 2 recomendações foram consideradas pela CT-GRSA como não atendidas ou as justificativas apresentadas não foram acatadas, quais sejam:

Item 2.3. C) Padronização dos gráficos de estratigrafia.

No que tange os resultados das medições estratigráficas, a Fundação Renova considerou a requisição como **Apropriada**, entretanto, o Igam emitiu a seguinte sugestão, por meio da Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2021 (Anexo 4):

[...] Para os próximos relatórios sugere-se, para melhor entendimento dos gráficos, ao invés de colocar nomes das campanhas usar o mês ou o período (seca, chuva ou transição).

Nesse sentido, a CT-GRSA, conclui para a necessidade de adequações para os próximos relatórios, de modo a contemplar as sugestões apontadas pelo Igam, com o intento de promover maior clareza na leitura dos gráficos apresentados.

Item 2.4 B) Realização de análises mineralógicas das camadas estratigráficas, em complementação às análises de metais.

No que concerne a tal requisição, a Fundação Renova considera como **Parcialmente Apropriada**, e traz o seguinte apontamento:

“Considerando que os sedimentos naturais podem ter concentrações mais elevadas de ferro e manganês em comparação com o rejeito, concentrações desses parâmetros mais elevadas nas camadas mais grosseiras da estratigrafia do leito são compatíveis com a geoquímica local e os processos hidrossedimentológicos que levam a formação do lag layer. Dessa forma, entende-se que não é necessária a realização de análises mineralógicas para investigar esses resultados. ”

Por conseguinte, o Igam trouxe a seguinte consideração em sua análise na Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2021:

“...apenas a análise tátil-visual dos testemunhos de sedimentos/rejeitos não é suficiente para a classificação de camadas como substrato natural, lag layer e rejeito inconsolidado. Contudo, tendo em vista que está sendo conduzido pela Fundação Renova projetos para identificação do rejeito, tal como o “finger print”, buscando, portanto, métodos para identificação do rejeito, o Igam entende que os resultados destes projetos podem subsidiar a avaliação ora apresentada para a identificação das camadas dos rejeitos intracalha.

Desta forma, a CT-GRSA considera que apenas a análise tátil-visual dos testemunhos de sedimentos/rejeitos não é suficiente para a classificação de camadas como substrato natural, lag layer e rejeito inconsolidado. Além disso, enquanto não se tem algum meio de identificação da assinatura do rejeito, deve permanecer a solicitação de análises mineralógicas das camadas

estratigráficas para complementação da análise tátil-visual efetuada em campo, no intuito de ratificar a presença dos rejeitos. Ainda no contexto do *finger print*, tem-se que a atual proposta de estudo conduzida pela BHP já foi reprovada pela CT-GRSA. Adicionalmente, no intuito de contribuir com a interpretação dos resultados mais elevados de ferro e manganês nas camadas mais grosseiras do leito, solicita-se que a metodologia de análise dos testemunhos seja apresentada nos próximos relatórios, no sentido de se verificar, por exemplo, como o material é analisado, se há peneiramento do material mais grosseiro ou é feita a maceração de uma parte do material, dentre outros.

Em 18/08/2020 foi emitida a Nota Técnica CT-GRSA nº 21/2020 acerca da Avaliação do “Relatório Final – Aplicação do Método Analítico para Avaliação do *lag layer*”, referente ao item 8 do Eixo Prioritário 1. Nesta NT, a CT-GRSA pontuou, dentre outras questões, a ausência do monitoramento do período chuvoso 2019/2020, o que provocou um impacto na construção de uma série histórica do monitoramento intracalha. Diante de diversas fragilidades, a Nota Técnica CT-GRSA nº 21/2020 reiterou as conclusões da NT CT-GRSA nº 20/2020, que avaliou a implementação do monitoramento do rejeito intracalha, conforme exigência da Deliberação CIF nº 304:

Solicitamos que o Comitê Interfederativo (CIF), em articulação com a Instância de Assessoria Jurídica (IAJ/CIF) notifique a Fundação Renova, nos termos da Cláusula 247 do TTAC, respaldado no DESPACHO n. 00242/2020/NMAF/SAP/PFMG/PGF/AGU NUP: 02001.015753/2020-97 – “Competências e atribuições do CIF e Câmaras Técnicas. Matéria ligada a eixos temáticos judicializados. Vedação irrestrita de discussão e análise. Inexistência. Fixação de fluxo indicativo procedimental” (Anexo 18) e comunique o fato imediatamente ao Juiz da 12ª Vara, responsável pela ACP Eixos Prioritários, para que as devidas providências também sejam tomadas.

Além disso, solicitamos que o Comitê Interfederativo (CIF) notifique a Fundação Renova para a retomada imediata do monitoramento intracalha, respaldado por um plano/protocolo de proteção à saúde dos trabalhadores que irão atuar nas atividades de campo, restrições no contato com população com a população local, bem como demais restrições impostas pela pandemia da Covid-19, visando que os prejuízos ao meio ambiente e sociedade não continuem sendo perpetuados.

Na mesma data da entrega do relatório de monitoramento do período seco, em 20/04/2021, a Fundação Renova protocolou nos autos do processo judicial o Memorando Técnico MT-001_209-535-7742_07, em resposta à Deliberação CIF nº 425/2020 e Notas Técnicas da CT-GRSA 15/2020, 20/2020 e 21/2020, e ainda o Relatório Técnico “Complementação da aplicação do método analítico considerando o monitoramento intracalha de sedimento - setembro e outubro de 2020”.

No que tange ao monitoramento em si, já que a análise da efetividade do *lag layer* fora subsidiada por um parecer técnico de um especialista e, conseqüentemente já tratada nos itens acima desta NT, a abordagem tratará apenas dos dados de monitoramento do período referente do relatório, ou seja, o período chuvoso (setembro e outubro de 2020). Para tanto, foi solicitado subsídio ao Igam, que emitiu a Nota Técnica nº 16/IGAM/GEMOQ/2021 (Anexo 5), na qual, dentre outros pontos, aponta:

Item - 6.1.3.2. *Comparação Entre Campanhas*

Sugere-se a utilização de referências bibliográficas que corroborem com as indicações apontadas para justificar as diferenças observadas entre as campanhas.

Na seguinte frase: “no período relativamente curto avaliado entre as campanhas 0 e E é muito pouco provável que tenham ocorrido alterações da mobilidade química (e.g., afetando o potencial de lixiviação) desses parâmetros em dois sentidos nessa camada.”

Sugere-se esclarecer os seguintes pontos:

- 1. Com base em quais argumentos foi considerado um período relativamente curto entre as campanhas 0 e E. Existem referências que confirmam que o período foi relativamente curto?*
- 2. Essas diferenças nas concentrações não poderiam indicar que essas camadas estão em constante movimentação e interação com a coluna d’água? Além disto, é necessária a apresentação de mais evidências para tal afirmação.*

Sobre o teste de correlação de Pearson feito entre o percentual de frações finas e a as concentrações dos parâmetros, para testar a hipótese de que a redução das concentrações teria relação com a redução da concentração de frações finas, chegou-se a seguinte conclusão: “Verifica-se que em geral os coeficientes de correlação foram baixos, de forma que esta hipótese foi descartada.”

Com base nos dados apresentados faz-se necessário esclarecer quais os dados foram utilizados para os testes, quais as comparações foram

realizadas e se o N amostral foi suficiente para chegar à conclusão de descartar a hipótese testada.

Na Nota Técnica nº 16/IGAM/GEMOQ/2021 o Igam ainda apresenta alguns gráficos que salientam que pelo monitoramento realizado por este órgão, no âmbito do Programa Águas de Minas, na comparação entre a série histórica de monitoramento no período pré-rompimento e o ano de 2020, período pós-rompimento, observa-se uma piora nos resultados de turbidez, manganês total e ferro dissolvido. Para esses parâmetros foram registrados em 2020, valores superiores aos da série histórica e aos 3 últimos anos após o rompimento da barragem (anos de 2017, 2018 e 2019).

Esses resultados demonstram que, após 5 anos do rompimento, ainda se observam alterações na qualidade das águas do Trecho 1 (rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce, a montante da UHE Risoleta Neves). Portanto, deve ser avaliada com cautela a efetividade da camada *lag layer* como barreira física para a eventual ressuspensão do rejeito inconsolidado. Nesse sentido e, com base no monitoramento realizado pelo Igam, entende-se que ainda faltam evidências para confirmar o argumento de que a elevação da turbidez é controlada pela camada *lag layer*. Assim, reforça-se a indicação para a realização de campanhas de monitoramento dos testemunhos de sedimentos visando avaliar o comportamento desse compartimento, especialmente durante os períodos chuvosos. Para tanto, a importância da realização de coletas em períodos logo antes e logo após eventos de cheia, o que implicaria em uma maior frequência das coletas durante os períodos chuvosos.

Em suma, todas estas orientações, no que tange à continuidade do monitoramento dos sedimentos intracalha, devem ser levadas em consideração para as próximas campanhas de monitoramento, sejam do período seco, seja do chuvoso.

Vale salientar ainda que, os dados gerados pelos monitoramentos dos sedimentos intracalha são de grande importância para o registro histórico do comportamento dos sedimentos e rejeitos no leito dos rios impactados pelo rompimento da Barragem de Fundão, além de ser subsídio para outros projetos, seja do Sistema CIF, dos órgãos ambientais ou mesmo de pesquisas e projetos de instituições de ensino e pesquisa, dentre outros.

O monitoramento dos sedimentos intracalha, investiga para cada final de período seco e chuvoso, por meio de sondagens intracalha, características estratigráficas, granulométricas e químicas em 33 transectos com 3 sondagens intracalha em cada (margem esquerda, centro e margem direita), ao longo dos Trechos 6 a 11 do Programa Manejo de Rejeitos, além de um transecto na porção fluvial do Trecho 12, contemplando, portanto, os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce. Para tanto, são gerados:

- **Análises químicas a partir de amostras compostas:** Alumínio, Antimônio, Arsênio, Bário, Boro, Cádmio, Chumbo, Cobalto, Cobre, Cromo, Ferro, Fósforo, Manganês, Mercúrio, Molibdênio, Níquel, Prata, Selênio, Vanádio e Zinco.
- **Análises físicas:** Análises granulométricas (Argila, Silte, Areia Muito Fina, Areia Fina, Areia Média, Areia Grossa, Areia Muito Grossa, Pedregulho Fino, Pedregulho Médio, Pedregulho Grosso e Pedra de Mão), a partir de amostras simples (por camada/sondagem), Estimativa de Volumes de Rejeito e *lag layer*, Área de Influência, Área Impactada do trecho, Análise estratigráfica por meio da descrição dos testemunhos em campo, perfil topobatimétrico obtido em cada transecto e a cada campanha.
- **Monitoramento de Descarga Líquida e Sólida:** turbidez, vazão, velocidade média, velocidade máxima, profundidade, largura e nível d'água.
- **Análise tátil-visual dos testemunhos de sedimentos/rejeitos:** A identificação das diferentes camadas estratigráficas foi baseada principalmente na análise tátil-visual dos sedimentos encontrados durante as sondagens.

Vale salientar que, conforme supramencionado, cabe ainda a realização de análises mineralógicas das camadas estratigráficas, em complementação às análises de metais, visto que apenas a análise tátil-visual dos testemunhos de sedimentos/rejeitos não é suficiente para a classificação de camadas como substrato natural, *lag layer* e rejeito inconsolidado. A análise mineralógica aqui deve ser entendida como um estudo com a finalidade de caracterizar os sedimentos que compõe a carga de fundo (material carregado no leito do rio), descrevendo, portanto, sua característica física por meio das etapas de fracionamento da amostra; identificação das camadas sedimentares; quantificação em relação a porcentagem dos minerais, além de possibilitar a elaboração de coluna estratigráfica.

Visto que a modelagem e os estudos do *lag layer*, a partir das análises dos relatórios e do parecer do especialista por meio do Anexo 1, apontaram, que a formação desta camada não oferece estabilidade efetiva para os rejeitos intracalha dos rios impactados, não podendo, conseqüentemente, ser tratado como uma forma de manejo de rejeitos, mas sim, apenas mais uma forma de monitoramento do comportamento dos rejeitos intracalha, sendo esta análise suficiente e final acerca da temática do *lag layer*. Neste sentido e, baseado nas orientações dadas pelo especialista no referido Anexo 1, o monitoramento intracalha deve continuar com as adequações recomendadas pelo especialista, buscando registrar o comportamento das camadas naturais no leito do rio, que estão em constante modificações devido ao comportamento hidrológico, típico dos rios, todavia, agora objetivando fornecer subsídios a outras opções de manejo intracalha, conforme previsto nas notas técnicas emitidas inicialmente por esta Câmara.

Em consequência do exposto, solicita-se que nos próximos relatórios de monitoramento, ou consolidação destes, não sejam mais abordadas discussões a respeito da estabilidade/eficácia do *lag layer* para contenção de rejeitos, sendo conclusa sua ineficácia.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E REQUISIÇÕES

Considerando todo o acompanhamento realizado pelo CIF e pela CT-GRSA, referente ao monitoramento dos depósitos de rejeito intracalha, evidenciado pelas diversas Notas Técnicas e deliberações supracitadas.

Considerando que o objetivo principal do Plano de Manejo de Rejeitos é apresentar diretrizes, conceitos, metodologias, técnicas, critérios e indicadores para tomada de decisão quanto ao manejo dos rejeitos para elaboração e execução de projetos aplicáveis nas áreas afetadas pelo rompimento da Barragem de Fundão.

Considerando que o fluxo de manejo de rejeitos construído, de maneira participativa pela CT-GRSA, Fundação Renova, Universidades e outros atores envolvidos, possui como premissa a adoção de um modelo de tomada de decisão, a partir de critérios que avaliam as alternativas de manejo, hierarquizando em função dos impactos e benefícios socioambientais.

Considerando que os critérios para tomada de decisão e para seleção das alternativas de manejo poderão ser revistos a partir dos estudos complementares nos termos da Nota Técnica IBAMA/SISEMA/IEMA N° 002/2017 e Deliberação CIF n° 86.

Considerando a importância do monitoramento intracalha, para os períodos seco e chuvoso, que vai além da já concluída avaliação da eficácia e estabilidade do *laglayer*, para o entendimento da dinâmica de transporte e remobilização dos sedimentos, apoiando as decisões de manejo de rejeitos e recuperação ambiental da bacia e possibilitando a formação de um banco de dados (série histórica) para apoiar a tomada de decisões dos órgãos ambientais.

Considerando que para o contexto intracalha a Fundação Renova apresentou como alternativa de manejo o *laglayer*, afirmando que este seria capaz de ser efetivo na retenção do rejeito depositado no leito dos rios para diferentes tempos de recorrências de chuvas intensas (2, 5, 10 e 100 anos), ou seja, ele funcionaria como uma camada de encouraçamento para imobilização dos rejeitos, contribuindo para evitar a ressuspensão dos rejeitos originados do rompimento da barragem.

Considerando que o *laglayer* não se mostrou efetivo como camada selante/encouraçamento dos rejeitos localizados abaixo desta para o manejo de rejeitos intracalha na bacia do rio Doce, a partir das avaliações técnicas realizadas pela CT-GRSA ao longo do acompanhamento de todas as ações do PMRs.

Considerando o Parecer Técnico de Análise do documento “Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020” e da eficácia do *laglayer* na contenção dos rejeitos intracalha de autoria da Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda, que corroborou a posição da CT-GRSA, afirmando que os dados de monitoramento apresentados demonstram uma linha de evidência de remobilização do rejeito intracalha. Tal situação é corroborada pela abordagem de modelagem (modelos analíticos), a qual também evidenciou a remobilização do *lag layer* com tempo de recorrência inferior a 10 anos.

Considerando que, a Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda. em diversas oportunidades ao longo do texto, destacou a importância da execução dos Estudos de Avaliação de Risco à Saúde Humana e a Avaliação de Risco Ecológico com foco em gerenciamento em

Áreas Contaminadas, bem como estudos de ecotoxicidade, como ferramentas decisórias acerca da remoção dos rejeitos.

Considerando que a Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda. recomendou que o uso de técnicas de extração dos rejeitos e remediação *ex situ* devem ser consideradas, acompanhadas de estudos de impactos e adoção de medidas mitigadoras, tendo em vista a ineficácia do *lag layer*.

Considerando que a entrega dos Estudos hidrossedimentológicos atualizados (transporte de sedimentos) e respectivo monitoramento irão identificar e apresentar como está ocorrendo a ressuspensão do material.

Considerando que os órgãos ambientais que compõem a CT-GRSA entendem que em locais específicos dos rios impactados, onde ocorre de maneira mais significativa o processo de deposição, deverá ocorrer a remoção do material depositado, sendo, prioritariamente: o reservatório do Dique S4, UHE Risoleta Neves e UHE Baguari, permitindo assim reduzir o material disponível na bacia e ampliar a contenção de sedimentos nas UHEs.

Considerando que, os dados produzidos no âmbito do Sistema CIF, poderão determinar ações de remoção/manutenção do material depositado, a partir dos resultados de estudos considerados norteadores, sendo eles: os PMRS ainda em análise e em elaboração, os estudos vinculados ao Gerenciamento de Áreas Contaminadas e o estudo hidrossedimentológico. A avaliação do PMR dos Trechos ainda não aprovados para os estados do Espírito Santo e Minas Gerais poderão ensejar ações de remoção de rejeitos nos reservatórios da UHE Aimorés e UHE Mascarenhas, a depender dos resultados encontrados.

Diante do exposto, visto que o *lag layer* não apresentou eficácia na contenção do rejeito e que portanto, não corresponde a uma alternativa viável para o manejo de rejeitos intracalha, a CT-GRSA vem requerer que a Fundação Renova apresente um PMR intracalha atualizado, em volume único. Este PMR deverá ser elaborado considerando:

- e) Todas as informações já disponibilizadas até o momento, contemplando os resultados e considerações sobre o *lag layer* emitidas pela CT-GRSA e pela consultoria Minerva

- Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda, apontando que o mesmo não pode ser considerado como alternativa de manejo para o contexto intracalha;
- f) Remoção de material depositados nos locais de acumulação: Dique S4, UHE Risoleta Neves e UHE Baguari, permitindo ampliar a contenção de sedimentos;
 - g) Resultados dos estudos vinculados ao gerenciamento de áreas contaminadas, que poderão demandar a adoção de medidas de intervenção, que envolvam a remoção do material e reabilitação das áreas impactadas;
 - h) Resultados dos estudos hidrossedimentológicos previstos no Eixo 1, item 10.1 da ACP.

Para a entrega do PMR intracalha atualizado, considerando os itens listados acima, a Fundação Renova deverá apresentar uma proposta de Plano de Trabalho com o conteúdo, premissas, etapas e cronograma que irão compor o PMR intracalha, a ser apresentado em 20 dias à CT-GRSA, em reunião gerencial a ser agendada pela coordenação da CT-GRSA, a contar da aprovação desta Nota Técnica pelo CIF.

Em relação ao monitoramento intracalha, reiterando que este visa além da já concluída avaliação da eficácia e estabilidade do *lag layer*, a Fundação Renova deverá continuá-lo para os períodos seco e chuvoso, até que os órgãos ambientais entendam que este monitoramento possa ser suspenso, no âmbito do acompanhamento dos Planos de Manejo de Rejeitos, em conformidade com as recomendações elencadas nesta Nota Técnica e nas já emitidas pela CT-GRSA (Notas Técnicas da CT-GRSA 08/2019, 15/2020, 20/2020 e 21/2020).

A Fundação Renova deverá apresentar uma proposta de continuidade do monitoramento intracalha conforme as recomendações emitidas pela CT-GRSA e a consultoria Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda. Nesta proposta de continuidade, a Fundação Renova deverá avaliar a viabilidade da incorporação do monitoramento intracalha a outros monitoramentos em execução, visando otimizar as ações e acompanhamento dos órgãos ambientais. Esta nova proposta não deve mais incluir em suas avaliações discussões a respeito da eficácia do *lag layer* em conter os rejeitos, visto que é tema conclusivo, todavia, apresentar um entendimento do comportamento dos rejeitos na calha do rio, a exemplificar locais de deposição, susceptibilidade destes locais a dragagem, comportamento dos bancos de sedimento, a taxa de remobilização dos rejeitos, entre outros que possam dar suporte às ações de manejo intracalha, ou para apoiar a tomada de decisões dos órgãos ambientais.

Além da apresentação de uma proposta para continuidade do monitoramento intracalha, a Fundação Renova deverá apresentar junto à CT-GRSA os resultados das campanhas de monitoramento que ainda não foram protocolados, em complementação aos documentos já entregues no âmbito da ACP - Eixos Prioritário. Estes documentos deverão ser apresentados, em até 30 dias à CT-GRSA, a contar da aprovação desta Nota Técnica pelo CIF, já sob as orientações desta nota técnica.

Considerando a interrupção do monitoramento no ano de 2020 sem prévio conhecimento e aprovação do Sistema CIF, conforme explicitados pelas Notas Técnicas CT-GRSA 15/2020, 20/2020 e 21/2020 e, conseqüentemente pela Deliberação CIF nº 425, de 24 de agosto de 2020, tratando, portanto, de uma ação pretérita sem condições de realização

Diante do exposto, o item 8 do Eixo Prioritário 1 é dado como parcialmente cumprido, devendo ser aplicadas as sanções previstas no TTAC, conforme solicitado nas referidas Notas Técnicas. Ainda, requer que tal monitoramento deva ser continuado na esfera administrativa para acompanhamento do comportamento dos sedimentos, nos termos e objetivos citados anteriormente.

Quanto a avaliação da efetividade do *lag layer*, entende-se que tal item foi cumprido por identificar que esta opção de manejo de rejeitos na porção intracalha da bacia do rio Doce é **ineficaz para a contenção dos rejeitos** sendo necessária a revisão do Plano de Manejo de Rejeitos na porção intracalha de todos os trechos, como já discutido nesta Nota Técnica. Entende-se ainda que pela suficiência do relatório da consultoria Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda e da análise desta câmara técnica, não sendo necessária mais qualquer entrega acerca da estabilidade e eficácia do *lag layer*, pois este não é capaz de conter os rejeitos, restando o item parcialmente cumprido sem possibilidade de cumprimento pleno.

Por fim, quanto ao item 7 do Eixo Prioritário 1, entende-se como cumprido, contudo, requer-se que as ações de monitoramento sejam continuadas na esfera administrativa para acompanhamento do comportamento dos sedimentos, devendo este monitoramento ser ajustado às recomendações da consultoria da CT-GRSA e da presente nota técnica.

Além das recomendações descritas no corpo desta Nota Técnica, a CT-GRSA solicita o atendimento das requisições dispostas abaixo no Quadro 01: Síntese das requisições:

Quadro 01: Síntese de requisições

ID	Requisição	Prazo
1	Apresentar à CT-GRSA, uma proposta preliminar com o conteúdo, premissas, etapas e cronograma para elaboração do Plano de Manejo de Rejeitos para o contexto intracalha da bacia do rio Doce.	20 dias corridos, após aprovação desta Nota Técnica pelo CIF.
2	Apresentar um Plano de Manejo de Rejeitos para o contexto intracalha atualizado, em volume único, considerando: <ol style="list-style-type: none"> 1. Todas as informações já disponibilizadas até o momento, contemplando os resultados e considerações sobre o <i>lag layer</i> emitidas pela CT-GRSA e pela consultoria Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda, apontando que o mesmo não pode ser considerado como a melhor alternativa de manejos para o contexto intracalha; 2. Remoção de material depositados nos locais de acumulação: Dique S4, UHE Risoleta Neves e UHE Baguari, permitindo ampliar a contenção de sedimentos; 3. Resultados dos estudos vinculados ao gerenciamento de áreas contaminadas, que poderão demandar a adoção de medidas de intervenção, que envolvam a remoção do material e reabilitação das áreas impactadas; 4. Resultados dos estudos hidrossedimentológicos. 	Prazo a definir, após a aprovação do Plano de Trabalho referente à Requisição 1.
3	Apresentar uma proposta de continuidade do monitoramento intracalha conforme as recomendações emitidas pela CT-GRSA, principalmente as contidas no item “3.2” desta nota técnica, bem como no parecer Parecer Final da Consultoria Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda (Anexo 1).	20 dias corridos, após aprovação desta Nota Técnica pelo CIF.
4	Apresentar junto à CT-GRSA os resultados das campanhas de monitoramento que ainda não foram protocolados, em complementação aos documentos já entregues no âmbito da ACP - Eixos Prioritário, já atendendo as orientações da presente nota técnica.	30 dias corridos, após aprovação desta Nota Técnica pelo CIF.
5	Não sejam mais abordadas discussões a respeito da estabilidade/eficácia do <i>laglyer</i> para contenção de rejeitos, sendo concluso sua ineficácia.	Imediato

Vitória, 06 de maio de 2022.

Equipe Técnica responsável pela elaboração desta Nota Técnica:

- Carolinne Lorranna Santos Dias (Feam/MG);
- Gilberto Fialho Moreira (Feam/MG);
- Heitor Soares Moreira (Igam/MG).
- Luis Gabriel Menten Mendoza (Feam/MG);
- Patrícia Rocha Maciel Fernandes (Feam/MG);
- Thales Del Puppo Altoó (Iema/ES);



Thales Del Puppo Altoó
Instituto Estadual de Meio Ambiente - IEMA/ES
Coordenação da CT-GRSA
Ad Referendum

Anexo 1: Parecer Final da Consultoria Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda

PARECER TÉCNICO

Análise do documento “Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020” e da eficácia do *lag layer* na contenção dos rejeitos intracalha.

...

1. INTRODUÇÃO

Este parecer, elaborado pela Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda. e o Prof. Dr. Luiz Evaristo Dias de Paiva, visa a atender o Edital Flacso n.º 009/2021, originado do Termo de Parceria n.º 4800018024 firmado entre a Faculdade Latino-Americana de Ciências Sociais (Flacso), a Fundação Renova e o projeto “GERENCIADOR CIF”, para elaboração de parecer a respeito de documentos de caracterização e monitoramento dos sedimentos e rejeitos nos leitos fluviais impactados pelo rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em 05 de novembro de 2015 e que resultou no lançamento de 45 milhões de metros cúbicos de rejeito. Em específico, a análise foca no estudo apresentado pela Fundação Renova intitulado “Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020”.

Esse estudo foi elaborado em atendimento ao item 8 do Eixo 1: “Apresentar ao Sistema CIF relatório do monitoramento do comportamento/dinâmica do rejeito intracalha nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce até UHE Risoleta Neves, para o período chuvoso 2019/2020, com avaliação quanto à efetividade do *lag layer*”, e visa apresentar os resultados do monitoramento intracalha realizado entre setembro e outubro/2020, nos trechos 6 a 11 dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, com o objetivo geral de investigar o comportamento dos sedimentos intracalha no período. O seu objetivo específico é avaliar a efetividade do *lag layer* para evitar a ressuspensão dos rejeitos depositados no leito do rio, a partir de monitoramentos da estratigrafia de transectos intracalha, monitoramento periódico de parâmetros fluviométricos, campanhas de medições de descargas líquida e sólida, análise de processos fluviais, transportes de sedimentos etc.

Já este parecer busca avaliar a metodologia, os dados e os resultados de todos os tópicos avaliados no referido estudo, isto é: modelo conceitual utilizado; métodos de amostragem; a análise da estratigrafia dos transectos monitorados, da granulometria dos sedimentos de cada camada e sua análise química; o monitoramento da descarga líquida e sólida e a correlação entre os parâmetros; a estimativa do volume de rejeitos e *lag layer* remanescentes; e os métodos analíticos para definição da mobilidade do grão (início do movimento) e da profundidade de remoção do leito; apontando algumas lacunas e sugerindo adequações ou informações complementares necessários. O aspecto principal que se deseja verificar é a efetividade do *lag layer* na retenção do rejeito depositado no leito dos rios para diferentes tempos de recorrências de chuvas intensas (2, 5, 10 e 100 anos), ou seja, como aquele contribui para evitar a ressuspensão dos rejeitos originados do rompimento da barragem.

Também foram consultados outros documentos emitidos no processo de gerenciamento de rejeitos nos trechos relacionados, como estudos de monitoramento, notas técnicas, pareceres e planos de manejo de rejeitos.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE O MOVIMENTO DOS SEDIMENTOS NOS ESCOAMENTOS COM SUPERFÍCIE LIVRE

[PEIXOTO, 2015; PAIVA, 2007; PAIVA 1988]

Para o equacionamento da problemática da dinâmica do escoamento dos sedimentos nos escoamentos com superfície livre é inevitável se considerar as seguintes premissas básicas:

- O escoamento se transcorre num compartimento ambiental constituído de uma mistura bifásica com o leito do curso d'água moldando-se em distintas configurações de fundo, associada a um regime de escoamento, com impactos diretos na resistência ao escoamento. Esta distinção é importante sobretudo porque as equações que orientam a estimativa da resistência hidráulica nos ambientes com leitos rígidos devem apresentar abordagem diferentes daquelas empregadas para os escoamentos com leitos móveis. Nas equações de leitos rígidos a resistência é tratada de maneira global, associada a uma rugosidade dos contornos do leito rígido. Ao passo que a descrição da resistência aos escoamentos com leitos em movimento requer a separação da resistência global em duas parcelas: uma parcela da resistência devida à superfície e outra devida às configurações de fundo.

- A segunda consideração a se observar é se na parte sólida da mistura bifásica predominam os chamados sedimentos não coesivos ou se a predominância é dos sedimentos coesivos, uma vez que nestes casos, há alterações variadas na dinâmica e na resistência ao escoamento, sobretudo porque os sedimentos coesivos apresentam propriedades particulares importantes, muitas vezes não observadas nos sedimentos não coesivos. São exemplos clássicos de características particulares aos sedimentos coesivos: os processos de adsorção e floculação com impactos diretos na porosidade do depósito; no peso específico e na consolidação. Para PEIXOTO (2015) “**o termo sedimento coesivo refere-se a partículas inorgânicas sedimentáveis de granulometria fina**” e o que normalmente se caracteriza como granulometria fina é o sedimento com diâmetro inferior de 60µm com maior susceptibilidade de apresentar características coesivas [KLAR, 1991; COSTA, 2015; PEIXOTO,2015]

Mas as diferenças associadas aos sedimentos coesivos em relação aos não coesivos vão além das diferenças na dinâmica do escoamento, sobretudo porque, nos compartimentos ambientais, os sedimentos mais finos se consolidam numa mistura que consiste dos próprios sedimentos, além de água, matéria orgânica e às vezes gases, formando o que popularmente se denomina de lama, com capacidade para conceber diferentes tipos de impactos ambientais, em virtude da capacidade de adsorção, trazendo ao compartimento ambiental os mais diversos níveis de poluição pela capacidade desses sedimentos agregarem microrganismos, metais pesados, nutrientes e microcontaminantes. Em tópicos subsequentes, descreve-se “**en passant**” algumas das características do transporte de sedimentos não coesivos e outras inerentes ao transporte de sedimentos coesivos, com o intuito de fundamentar em conceitos essenciais a avaliação sobre o documento “**COMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO CONSIDERANDO O MONITORAMENTO INTRACALHA DE SEDIMENTO – SETEMBRO E OUTUBRO DE 2020**”.

2.1. Sobre o transporte de sedimentos não coesivos nos escoamentos com superfície livre

[COIADO, 2002-2003; COIADO & PAIVA, 2005; SIMONS & SENTURK, 1992; ECKHARDT, 1998; GARDE & RAJU, 1985, GRAF; 1971; PAIVA&PAIVA, 2001; KOLLER,2016].

As principais linhas de pesquisa do transporte de sedimentos em escoamentos com superfície livre podem ser sistematizadas em quatro categorias distintas: estudo do início do movimento sólido no leito; estudos das deformações de fundo; estudo da resistência hidráulica ao escoamento e, por fim, o estudo do movimento sólido por arraste e em suspensão.

O estudo do início do movimento das partículas sólidas tem particular importância nas pesquisas referentes ao transporte de sedimentos, por estabelecer critérios que definem os canais naturais como de leitos rígidos ou erodíveis. No entanto, devido ao fato de seu caráter aleatório ser variável no tempo e no espaço, a sua descrição na natureza torna-se de difícil observação, razão pela qual os dados mais confiáveis têm sido resultado de experiências de laboratório.

Em geral, três enfoques são adotados para estudo do início do movimento da partícula de sedimentos: um com base na velocidade crítica, no qual se considera o impacto do líquido; outro, em que é considerado o emprego da tensão de cisalhamento crítica do leito, considerando os efeitos de fricção do arrasto do escoamento; e, por último, o que considera o uso da força de sustentação, onde se contempla a diferença de pressão devido às flutuações do gradiente de velocidade.

Shields (1936) apud SIMONS & SENTUK (1992) apresentou um dos primeiros critérios para o estudo do início do transporte sólido, baseando-se em análise dimensional. A **figura 1** apresenta o diagrama de Shields, que foi desenvolvido para escoamentos uniformes e permanentes, sobre leitos constituídos de material não-coesivo e uniforme.

Trata-se do critério mais conhecido para o estudo do início do transporte sólido. Este critério permite facilmente distinguir as regiões de movimento e de repouso do sedimento, além da influência das forças hidrodinâmicas no movimento das partículas menores, enquanto, para as partículas mais grosseiras, são apresentadas como dominantes as forças de sustentação turbulentas e as de arraste por pressão diferencial sobre o sedimento. Três regiões distintas são identificadas por autores como GRAF (1971) no diagrama de Shields. Abaixo, descreve-se um resumo sobre as três regiões¹.

- Região 1: $[D < \delta]$ e $R_* \leq 10$. As partículas são encobertas pelo filme limite laminar e seu movimento se deve principalmente aos efeitos das forças viscosas. O parâmetro de Shields é inversamente proporcional ao número de Reynolds.

- Região 2 – $[D \cong \delta]$ e Reynolds $10 < R_* < 400$. Nesta região, fica caracterizada a transição entre o escoamento laminar e o turbulento. O movimento da partícula passa a depender tanto das ações da viscosidade quanto das ações da turbulência. Nesta região, o parâmetro de Shields assume o seu valor mínimo, ou seja:

$$\frac{\tau_c}{D \cdot (\gamma_s - \gamma)} = 0,03, \text{ que se observa para valores de } R_* \approx 10.$$

- Região 3 - $[D < \delta]$ e Reynolds $R_* \geq 400$. Com o aumento gradativo da turbulência e, conseqüentemente, do número de Reynolds, a espessura da camada laminar tende a desaparecer, sendo sobreposta pela presença da rugosidade do grão. A rugosidade do leito contribui para a turbulência e o parâmetro de Shields independe do número de Reynolds, assumindo um valor constante igual a 0,06.

$$\frac{\tau_c}{D \cdot (\gamma_s - \gamma)} = 0,06, \text{ que se observa para valores de } R_* > 400$$

¹ τ_c : tensão de cisalhamento crítica; R_* : Número de Reynolds do cisalhamento; D: Diâmetro do sedimento; δ : Espessura da subcamada limite laminar; γ_s : peso específico do sedimento; γ : Peso específico da água; ν - viscosidade cinemática da água.

O diagrama de Shields publicado em 1936 personifica o conceito de tensão tangencial crítica de cisalhamento nos escoamentos com superfície livre como um dos parâmetros mais importante nos projetos de estabilidade de canais erodíveis e pode ser usado também para a orientação no critério inicial para dimensionar os canais artificiais de drenagem urbano contribuindo à decisão de dimensionar o conduto como de leito rígido ou leito móvel.

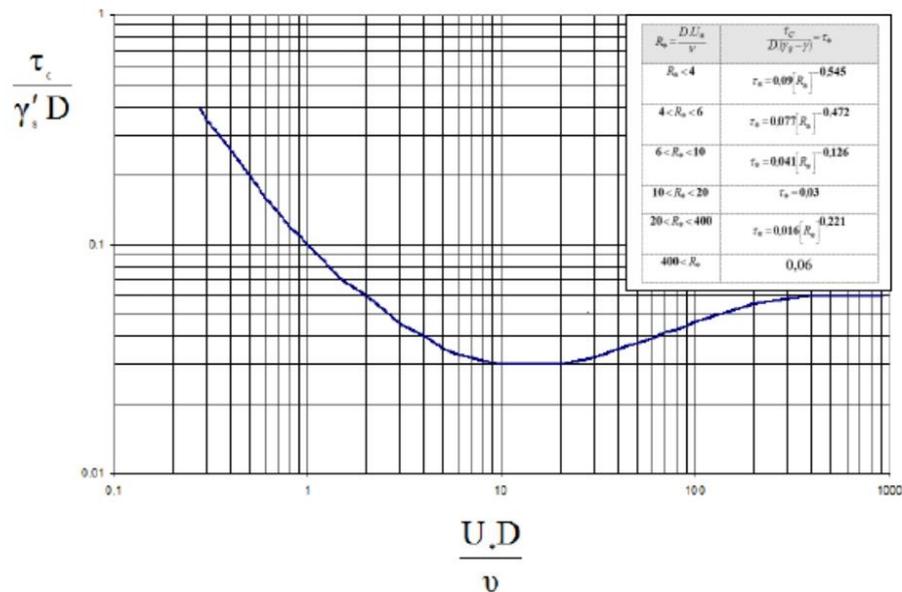


Figura 1. Diagrama de Shields (1936) para início do movimento [apud PAIVA, 2007; PAIVA, 2012]

Após o critério de Shields (1936) se destacar como um dos mais usuais na identificação do início do transporte sólido dos escoamentos com superfície livre. Outras alternativas e equações surgiram para relacionar o início do transporte de sedimentos nos escoamentos com superfície livre, seja amparando-se no critério da tensão crítica, ou na velocidade crítica [PAIVA, 2007; PAIVA, 2012]. Notadamente, no período compreendido entre os anos 1930 e 1990 do século passado, diversas tentativas foram feitas buscando-se encontrar uma relação entre a dinâmica do escoamento e início do transporte de sedimentos. Todavia é possível se fazer algumas distinções nos modelos que se amparam no conceito da tensão crítica e naqueles baseados na velocidade crítica requerida para o início do transporte sólido.

As equações empíricas baseadas na tensão crítica (τ_c) têm a forma $\tau_c = \varepsilon [(\rho_s/\rho) - 1] \cdot D^\lambda$, na qual, tem-se: ρ_s (massa específica do sedimento); ρ (massa específica da água) da água e “D” é um diâmetro característico da amostra do material do leito ao passo que “ ε ” e “ λ ” são constantes numéricas. Entretanto, as constantes podem assumir valores inteiros ou fracionados [GARDE E RAJU, 1985]. Portanto, se o critério de escolha do diâmetro representativo do material do leito não for bem embasado se desencadearão erros expressivos na escolha da equação de início do transporte sólido, sobretudo porque se para um determinado diâmetro maior não se acusa transporte, para outro de textura menor poderá ocorrer.

No que se refere as equações baseadas na velocidade crítica (U_c) nota-se que o início do transporte sólido é impactado sobremaneira pelo número de Froude do escoamento (lado esquerdo da equação) e por uma relação que expressa uma rugosidade relativa $\frac{U_c}{\sqrt{(y_s - \gamma) \cdot D / \rho}} = \beta \left(\frac{H}{D}\right)^\eta$ (lado direito da equação) na qual β e η são constantes que variam de acordo com o critério estabelecido para cada autor e mostra

a importância encimada, não apenas do diâmetro representativo do material do leito (D), como também da profundidade (H) no critério de seleção da equação apropriada para estabelecer o início do transporte sólido nos escoamentos com superfície livre.

Hjulström em 1935 (apud GRAF, 1971; KOLLER, 2016), apresentou outro estudo baseado na velocidade média do escoamento e no diâmetro característico da amostra (D). O diagrama de Hjulström se diferencia do diagrama de Shields pela possibilidade de se avaliar perspectivas de erosão, deposição e transporte dos sedimentos quando se compara a dinâmica do escoamento pelas variações da velocidade e o seu potencial para promover alterações na morfologia do curso d'água, pela perspectiva de mobilidade do material do leito de certo tamanho (D) sujeito a ação de determinada velocidade.

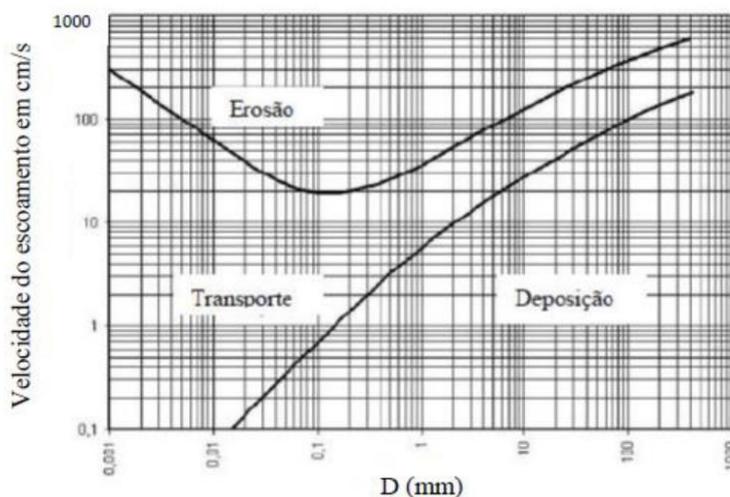


Figura 2. Diagrama de HJULSTRÖM (1935) para identificação das perspectivas de transporte, de erosão, ou de deposição de sedimentos [apud KOLLER, 2016; GRAF, 1971]

Identificada a mobilidade do leito, dá-se início os processos de formação das configurações de fundo e o surgimento dos regimes de escoamentos com impactos diretos nas alterações na resistência ao escoamento. Destarte, a ação do escoamento sobre um leito de material não-coesivo, geralmente areia ou cascalho, promove o surgimento de cinco tipos de configurações de fundo, sendo elas: LEITO PLANO, RUGAS, DUNAS, TRANSIÇÃO E ANTIDUNAS, cujo aparecimento está associado aos regimes de escoamento dos leitos aluvionares.

SIMONS & RICHARDSON (1961) foram visionários e são referências até hoje indispensáveis nos estudos da resistência ao escoamento com superfície livre ao apresentaram importante estudo sobre a associação da evolução das formas de fundo com um parâmetro que remetesse a evolução da dinâmica do escoamento. Segundo os autores, a situação inicial é de um escoamento líquido sobre um leito de partículas sólidas em repouso. Mas, com o aumento gradativo da velocidade do líquido, formam-se diferentes configurações de fundo que, segundo o critério de SIMONS E RICHARDSON (1961) são moldadas à medida que se identifica a evolução da turbulência do escoamento aferida pela variação gradual do número de Froude (Fr), tal como se ilustra à figura 3. Todavia, o aumento da turbulência do escoamento promove também alterações diretas em distintas variáveis partícipes da dinâmica do escoamento, tal como se resume no quadro 1, adaptado de PAIVA (1988).

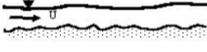
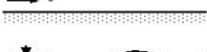
Nº DE FROUDE	ESQUEMA DA CONFIGURAÇÃO	TIPO
$F_R < 0,15$		PLANO
$0,15 < F_R < 0,30$		RUGAS
$0,30 < F_R < 0,60$		DUNAS
$0,60 < F_R < 1,3$		PLANO OU ONDULADO
$F_R > 1,3$		ANTIDUNAS

Figura 3. Evolução das formas de fundo, segundo Simons & Richardson (1961) “apud” WILSON-Jr. & PAIVA (2003)

Com a presença das configurações de fundo surgirão alterações significativas nos regimes de escoamentos e na evolução do transporte de sedimentos. Os regimes de escoamento dos leitos aluvionares variam conforme a alteração das características do escoamento, do fluido e do material do leito, condicionando a rugosidade de forma, correspondente à resistência de forma devida às deformações do leito. A resistência total do fundo resulta da adição da correspondente à forma com a superficial, esta última devido à rugosidade dos grãos. Assim, ainda segundo da teoria de SIMONS E RICHARDSON (1961), do ponto de vista das variações do leito decorre impactos no transporte do sedimento e na rugosidade que estão intrinsecamente alinhados aos regimes de escoamento aluvionares, os quais serão brevemente destacados na sequência:

- Regime inferior de escoamento:** corresponde à ocorrência das rugas e dunas. É caracterizado por uma rugosidade de forma elevada, determinante na resistência total do escoamento.
- Regime de transição:** corresponde à fase de desaparecimento das dunas até o surgimento do leito plano, sendo a rugosidade do leito muito instável e dependente da regressão das dunas.
- Regime superior de escoamento:** corresponde à ocorrência do leito plano e antidunas. A rugosidade de forma passa a ser pouco significativa, predominando a rugosidade superficial.

O quadro 1 traz as percepções baseadas no estudo de SIMONS E RICHARDSON (1961) e suplementam as informações antes sobreditas (figura 3), mantendo articulação direta com as primeiras informações trazidas na aludida figura.

Configurações de fundo	Características	Regime de escoamento
<p>Leito Plano sem movimento</p> <p>$Fr < 0,15$: apenas alguns grãos se movimentam por arraste, com o leito mantendo-se plano.</p>	<p>Ocorrem antes do início do movimento. São típicas de sedimentos mais finos (menores do que 0,60 mm). Ocorrem para descargas pequenas ou ausência do transporte de sedimentos</p>	<p>É considerada como uma das primeiras configurações do baixo regime, mesmo não se tendo ainda uma configuração bem definida.</p>
<p>Rugas</p> <p>$0,15 < Fr < 0,30$: o transporte em suspensão é incipiente e o deslocamento por arraste é predominantemente por rolamentos e deslizamentos, com alguns grãos dando pequenos saltos. Aparecem as primeiras rugas.</p>	<p>São configurações típicas de materiais finos que geralmente ocorrem em baixas vazões. A concentração de sedimentos em suspensão é relativamente baixa (10 a 200 ppm). A resistência de superfície é elevada "n" (Coeficiente de Manning) variando de 0,018 a 0,035. Apresentam forma sinusoidal ou triangular. São de pequenas dimensões e as dimensões são praticamente independentes das dimensões do escoamento</p>	<p>Configurações típicas do baixo regime. A rugosidade de forma é predominante, em relação a rugosidade de superfície. Apresentam altura e comprimento da ordem de centímetros.</p> <p>Nos leitos constituídos de sedimentos de diâmetros da ordem de 0,60 mm predominam as deformações do tipo dunas e rugas. Entretanto, rugas se forma apenas para areias com diâmetros inferiores a 0,60 mm</p>
<p>Dunas</p> <p>$0,30 < Fr < 0,60$: inicia-se o transporte em suspensão. Aumentam-se as irregularidades do leito e surgem as dunas.</p>	<p>Ocorrem para sedimentos relativamente grossos. Maiores que 0,60 mm. Apresentam concentrações em suspensão maiores do que aquelas para as rugas. A concentração é da ordem de 100 a 1200 ppm. Apresentam resistência ao escoamento elevada "n" variando de 0,018 a 0,05. Em geral, o comprimento é maior do que a altura</p>	<p>Configurações típicas do baixo regime. A rugosidade de forma é predominante, em relação a rugosidade de superfície. Apresentam altura da ordem de centímetros, mas o comprimento pode atingir valores acima de metro.</p>
<p>Transição entre dunas e antidunas</p> <p>$0,60 < Fr < 1,30$: intensifica-se o movimento dos sedimentos na camada superior. Diminuem os períodos de repouso e o leito torna-se novamente plano ou ondulado, pelo aumento progressivo do transporte em suspensão.</p>	<p>A transição consiste em uma configuração com condições intermediárias entre as dunas e o fundo plano com transporte de sedimentos, com elevada taxa de sedimentos em suspensão e alternância entre dunas e fundo plano. As concentrações de sedimentos nessa fase são altas da ordem de 1500 a 3000 ppm.</p>	<p>Corresponde à fase de desaparecimento das dunas até o surgimento do leito plano, sendo a rugosidade do leito muito instável e dependente da regressão das dunas. A resistência ao escoamento pode ser impactada pela resistência de forma e da superfície</p>
<p>Antidunas</p> <p>$Fr > 1,30$: as formas onduladas se transformam em antidunas, que se propagam contra a corrente líquida. O escoamento é muito turbulento e o transporte das partículas em suspensão é predominante.</p>	<p>As antidunas são formas de fundo simétricas, quase sinusoidais, em fase com as ondas da superfície d'água. Surgem para números de Froude muito elevados e dependendo das propriedades do escoamento podem deslocar-se para jusante ou para montante.</p>	<p>Corresponde ao surgimento de antidunas e o regime superior de escoamento. Corresponde a ocorrência do leito plano e antidunas. A rugosidade de forma passa a ser pouco significativa, predominando a superficial.</p>

Quadro 1. Resumo dos estudos das configurações de fundo em escoamento com superfície livre (adaptado de PAIVA, 1988)

O estudo das configurações de fundo tem como objetivo avaliar a interação da fronteira do escoamento com o transporte de sedimentos, permitindo estimar as resistências hidráulicas aos escoamentos. Devido à complexidade de se definir precisamente a geometria da fronteira móvel, tanto os estudos das deformações de fundo, quanto os da resistência hidráulica não estão ainda totalmente solucionados. A abordagem para o entendimento da dinâmica das formas de fundo pode ser pensada por três vertentes: a primeira deles é pela medição direta da altura da configuração de fundo, através de

levantamentos topobatimétricos para o acompanhamento da sua evolução no leito. Se a opção for pela medição da altura das deformações de fundo, tem-se a possibilidade de se estimar a descarga de sedimentos por **arraste do leito (qB)** empregando-se a Equação das Dunas e Rugas [$qB = 0,50 (1 - Pw) V_s h$] conhecendo-se a porosidade do material do leito (Pw); a velocidade de deslocamento da duna (V_s) e a altura da configuração de fundo (h) [SIMONS, RICHARDSON & NORDIN, 1965; CARVALHO, 1995; WILSON-Jr. & PAIVA, 2003; PAIVA, 2007; PAIVA, 2012].

Outra alternativa é optar por fazer a previsão do regime de escoamento e, uma vez estabelecido o regime, vislumbra-se a perspectiva de associá-lo a uma configuração de fundo particular. Normalmente, os parâmetros mais usuais para esta previsão são a potência da corrente; o número de Froude do escoamento e o diâmetro representativo do material do leito. A terceira alternativa complementa a segunda alternativa, através da aplicação de modelos analíticos que permitam estimar a altura e o comprimento das configurações de fundo. As referências especializadas são (CARVALHO, 1995; GARDE & RAJU, 1985; GRAF, 1971; KOLLER, 2016; SIMONS & SENTÜRK, 1992; JULIEN & KLASSEN, 1995; RANGA RAJU & SONI, 1976; RAUDKIVI, 1976; STRASSER, 2002; VANONI, 1975; VAN RIJAN, 1984c; YALIN, 1964; Allen, 1963 apud SIMONS & SENTURK, 1992).

No rol dos estudos consagrados na literatura merece destaque aquele devido a VAN RIJAN (1984a, 1984b & 1984c), sobretudo porque o seu método permite não somente o cálculo da descarga de sedimentos, mas também realizar a previsão do regime de escoamento e a estimativa das medidas das configurações de fundo, através de uma relação simples entre o comprimento da configuração e a profundidade do escoamento. Ademais, o método alia dados de canais de laboratório e dados de campo, além de incorporar na sua definição o enfoque de Bagnold (1966) apud PAIVA & PAIVA (2001) “que considera que o movimento da partícula no fundo é dominado pela força de gravidade, enquanto o efeito da turbulência é considerado de menor importância” VAN RIJAN (1984c) também calcula a máxima altura teórica do salto da partícula para determinada condição de escoamento e considera que todas as partículas presentes no escoamento numa altura maior do que a do máximo salto teórico são transportadas em suspensão. O método está bem detalhado nas referências [PAIVA & PAIVA, 2001; SCAPIN, 2005; SCAPIN, PAIVA & BELING, 2007; PAIVA, 2007; PAIVA, 2012].

Nas pesquisas de VAN RIJAN (1984a, 1986b, 1984c) foram empregados 84 experimentos realizados em canais de laboratório e 22 conjuntos de dados de campo. O diâmetro do sedimento variou de 0,19 mm a 2,30 mm e de 0,40 mm a 3,60 mm para os dados de laboratório e de campo, respectivamente. Em VAN RIJAN (1984c), a classificação das formas de fundo é assumida como governada principalmente pela descarga de sedimentos transportada por arraste, sendo basicamente descrita pelo diâmetro adimensional da partícula e pelo parâmetro de intensidade de transporte, ambos definidos ulteriormente.

VAN RIJAN (1984a) define que o transporte de sedimentos por arraste ocorre numa espessura teórica dada pela equação 1. É admitido também que todas as partículas presentes em uma camada de altura maior do que as alturas correspondentes ao limite máximo da altura teórica calculada são transportadas em suspensão. Assume-se ainda que o transporte de sedimentos pode ser descrito pelos parâmetros adimensionais de ACKER & WHITER (1973). A altura teórica dos saltos foi obtida por estudos com sedimentos de granulometria variando na faixa de 100 μ m a 2000 μ m e com velocidades de cisalhamento variando na faixa de 0,02 m/s a 0,14 m/s. Admitindo uma rugosidade efetiva do leito como sendo duas vezes o diâmetro representativo do material do leito, foi definida a expressão para a estimativa da altura teórica dos saltos, tal como se apresenta na equação 1. Nesta equação, as variáveis são: h_t (altura teórica dos saltos); D (diâmetro representativo do material do leito); D^* [diâmetro adimensional da partícula segundo ACKERS & WHITE (1973) calculado pela equação 2]; T (parâmetro de transporte de VAN RIJAN). Nas equações 2 a 6 as variáveis ainda não definidas são: C^* (Coeficiente de Chézy referente a rugosidade de superfície; U_{*c} [velocidade crítica de atrito para

início do movimento, calculada segundo o critério de Shields (1936) apud VAN RIJN (1984a)]; U'_* (velocidade de cisalhamento do escoamento relativa à rugosidade de superfície, R_H' (refere-se ao raio hidráulico relativo à rugosidade de superfície²); D_{50} (diâmetro mediano do material do leito); D_{90} (diâmetro do sedimento tal que 90% da distribuição granulométricas tem diâmetro inferior)

$$\frac{h_t}{D} = 0,30 D_*^{0,70} T^{0,50} \quad (1)$$

$$D_* = D_{50} \left[\left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \frac{g}{v^2} \right) \right]^{1/3} \quad (2)$$

$$T = \frac{(U'_*)^2 - (U_{*c})^2}{(U_{*c})^2} = \left[\left(\frac{U'_*}{U_{*c}} \right)^2 - 1 \right] \quad (3)$$

$$U'_* = \frac{U \sqrt{g}}{C'} \quad (4)$$

$$C' = 18 \log \left[\frac{12 R_H'}{3 D_{90}} \right] \quad (5)$$

As **equações 6 e 7** foram obtidas através de regressão e possibilitam a determinação da altura e do comprimento (h) das configurações de fundo em função da profundidade (d) da corrente e das características do escoamento (resumido no parâmetro de transporte (T) que expressa a mobilidade da partícula) além do diâmetro característico do material do leito. Combinando as equações (6) e (7) obtêm-se uma relação fácil para a obtenção do comprimento da configuração de fundo (L_c) em função da profundidade do escoamento (d), conforme equação 8

$$\frac{h}{d} = 0,11 \left(\frac{D_{50}}{d} \right)^{0,30} (1 - e^{-0,5T}) (25 - T) \quad (6)$$

$$\frac{h}{L_c} = 0,015 \left(\frac{D_{50}}{d} \right)^{0,30} (1 - e^{-0,5T}) (25 - T) \quad (7)$$

$$L_c = 7,33 d \quad (8)$$

As **equações 6 e 7** foram plotadas, respectivamente nas figuras 4a e 4b, para diferentes valores de “T” Nota-se que para $T=0$ ou $T \geq 25$ tem-se $h=0$ caracterizando pelo critério de Van Rijn (1984) a configuração de leito plano. Associa-se o primeiro caso ($T=0$) ao baixo regime, sem início de movimento, e sem configuração de fundo definida. Quando se inicia a mobilidade do grão de sedimento caracterizada pela evolução gradual do aumento do parâmetro de transportes (T), nota-se que a relação “h/d” vai aumentando até o limite de $T=5$ (trecho ascendente da curva). Este comportamento está associado a hegemonia do transporte por arraste, na dinâmica do transporte de sedimentos, em relação ao transporte em suspensão, padrão típico do baixo regime, o que faz favorecer a deposição dos sedimentos e, conseqüentemente, a influência no aumento da altura das configurações de fundo.

² R_H' - Raio hidráulico relativo à rugosidade de superfície, com correção das paredes laterais, calculado pelo procedimento de Vanoni e Brooks (1957) apud PAIVA & PAIVA (2011)

O trecho descendente da curva com o parâmetro “T” variando de 5 a 25 é característico do regime superior de escoamento, com maior potência da corrente, o que faz predominar o transporte de sedimentos em suspensão e, como consequência, ocorre a redução da altura das configurações de fundo onde toda a camada ativa do leito estará submetida ao mais alto grau de turbulência. Se por hipótese o parâmetro de transporte atingir valores maiores do que 25 suscitarão valores negativos para a altura das configurações de fundo, caracterizando o processo erosivo intenso do leito e a ruptura da situação de equilíbrio do substrato natural do curso d’água.

Ao se apreciar a equação (8) e as reflexões apresentadas nos dois parágrafos sobreditos avalia-se que fica evidente o que normalmente se constata na literatura sobre a informação da variação diferenciada da geometria das formas de fundo com o aumento da potência do escoamento. A variação da altura da duna é mais sensível as flutuações da dinâmica do escoamento, flutuação esta traduzida pela variação do parâmetro de Transporte (T). No caso da altura da duna, a tendência é de haver redução, especialmente no regime superior traduzido pelo aumento gradual do aludido parâmetro T, enquanto o comprimento mostra-se mais sensível ao aumento da profundidade da corrente líquida. (VAN RIJN, 1988; CHANG,1988; YALIN, 1977, GARDE&RAJU,1985; SIMONS & SENTURK, 1992). Yalin (1964) apud SIMONS & SENTURK (1992), em estudo sobre as configurações de fundo, concluiu que o comprimento das dunas e rugas é muito maior do que a altura, podendo atingir valores da ordem de cinco vezes a profundidade e igualmente tem ligação expressiva com o diâmetro mediano do material depositado, podendo (o comprimento) atingir escores da ordem de mil vezes o diâmetro mediano do material do leito.

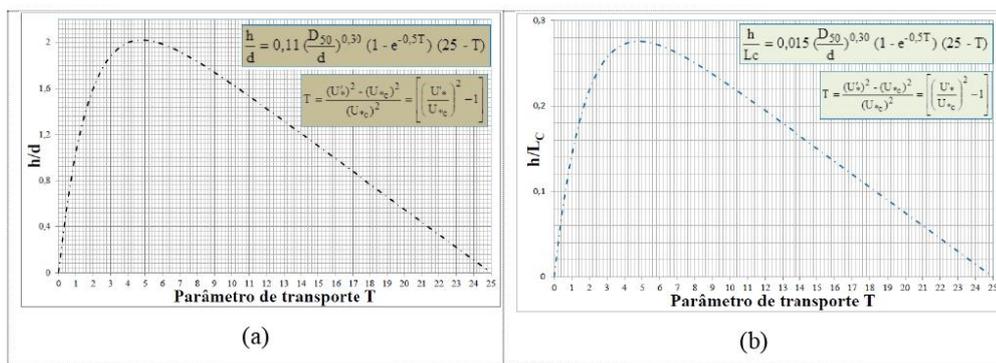


Figura 4. Variação da altura das configurações de fundo com o parâmetro de transporte (T)

Continuando o propósito de apresentar algumas informações sobre as principais linhas de investigação sobre a dinâmica do escoamento dos sedimentos não coesivos nos escoamentos com superfície livre ratifica-se que o detalhamento e a descrição da resistência ao escoamento têm particular importância nos estudos em escoamentos em condutos livres ou forçados. Em ambos os casos, a resistência ao escoamento gera dissipação de energia, que não é mais recuperável. Diante disso, surge a real necessidade de se desenvolverem modelos para estimar essas perdas nos projetos hidráulicos.

Nos cursos de águas naturais, como já relatado, uma parte dessa energia se dissipa pela contribuição das formas de fundo e outra parte pela granulometria do sedimento do leito, caracterizando a resistência de superfície [SIMONS & SENTURK, 1992]. Portanto, se nos critérios adotados para definir a mobilidade do grão de sedimentos for identificado que o leito não se desloca o problema hidráulico é abordado com as equações aplicáveis a fronteira rígida e aquelas atribuídas a Prandtl (1925-1926); a equação de Chézy (1769); a equação de Manning (1895); a equações de Manning-Strickler (1923); aquela de Meyer-Petter e Müller (1948) e por último a equação de Keulegan (1938) são exemplos clássicos aplicáveis a esses casos.

Todavia, se for identificada a mobilidade do leito, a abordagem do problema da resistência ao escoamento deve ser tratada pelas metodologias apropriadas. Einstein e Barbarossa (1952) apud SIMONS & SENTURK (1992) foram os primeiros a proporem a divisão da resistência total em duas parcelas. A partir de então outros seguidores, como Engelund (1966) e Alan e Kennedy (1969) citados em GARDE & RAJU (1985), adotaram o mesmo princípio e desenvolveram suas metodologias para a estimativa da resistência ao escoamento em separado.

A literatura especializada apresenta uma série de outros métodos apropriados para este objetivo. Engelund e Hasen (1966) apud SIMONS E SENTURK (1992) adota a divisão da declividade da linha de energia e apresenta um método que além de viabilizar a previsão do regime de escoamento para os canais naturais, permite o dimensionamento do canal contemplando as resistências de superfície. Os métodos ora citados, para leito rígido ou móvel, podem ser encontrados em GARDE & RAJU, 1985; SIMONS & SENTURK, 1992; GRAF, 1971; MOLINAS & WU, 1998; VANONI, 1975; SILVA & WILSON-JR, 2005]

A acurácia da estimativa da descarga de sedimentos nos escoamentos com superfície livre desperta grande interesse entre os engenheiros e pesquisadores que lidam com transporte de sedimentos e é um dos principais objetivos dos estudos relacionados à Hidráulica Fluvial. Para a determinação da quantidade de sedimentos transportada em um curso de água, pode-se optar por duas alternativas. A primeira delas é a medição direta pelo emprego de amostradores ou acumuladores. A segunda faz uso de uma das diversas equações disponíveis na literatura. Porém, ambos os métodos têm limitações, seja pela impossibilidade dos amostradores coletarem amostras que representem precisamente a descarga transportada, seja pelas simplificações normalmente atribuídas aos diversos métodos e equações de estimativa. Diante dessas incertezas, o “TASK COMITEE”, citado em PAIVA (1988), alerta para uma série de observações sobre a utilização das fórmulas de transporte de sedimentos e para os critérios de medições da descarga sólida:

- Há uma urgente necessidade de se testarem as fórmulas propostas sob uma variedade de condições como as encontradas na prática da Engenharia.
- Uma análise sistemática das condições requeridas para cada fórmula e para cada faixa de condições em que essa fórmula possa ser empregada é necessária.
- De maior importância pode ser uma listagem das condições sob as quais cada fórmula não deve ser aplicada.
- A falta de uma equação de transporte de sedimentos apropriada tende a limitar o progresso no desenvolvimento de relações com bases físicas entre a morfologia do canal e a produção de sedimentos.
- Ausência de uma relação apropriada para os rios naturais faz as interpretações de relações empíricas tênues e dependentes das considerações requeridas para cada fórmula de transporte de sedimentos;
- As relações originadas de canais de laboratório dificilmente contemplarão todas as intervenções impostas pela natureza ao transporte dos sedimentos.

A bibliografia que trata do assunto [VANONI, 1975; GARDE & RAJU, 1985; PAIVA, 1995; PAIVA, 1988; SIMONS & SENTURK, 1992; COIADO, 2002-2003; PAIVA, 2007] trazem uma quantidade substancial de métodos para quantificar o transporte de sedimentos. No decorrer do século XX, muitas equações foram testadas com dados medidos em rios. Todavia, muitas delas foram obtidas de estudos de laboratório, em que as condições ensaiadas nem sempre condizem com as observadas nos escoamentos naturais [HABERSACK & LARONE, 2002].

As equações que estimam a descargas de sedimentos usando a diferença entre a tensão tangencial do escoamento e uma tensão crítica de início de transporte são normalmente denominadas equações do tipo de Du Boys. A precisão da estimativa da descarga de sedimentos na camada do leito pelas

equações do tipo Du Boys (1879) apud GARDE E RAJU (1988) está condicionada à precisão da estimativa das tensões tangenciais envolvidas e pode fornecer diferentes valores da descarga de sedimentos estimada por um mesmo método, devido a variedades de critérios empregados para o cálculo da tensão crítica de início de transporte [COIADO & PAIVA, 2005].

Por fugir dos objetivos do parecer, as metodologias para o levantamento de dados de campo mais tradicionais em hidrossedimentologia não serão exploradas (CARVALHO, 1995). Todavia os procedimentos e métodos com esta finalidade estão disponíveis em distintas publicações (GARDE&RAJU, 1985; PONCE,1990; SIMONS & SENTURK, 1992; CARVALHO, 1995; PAIVA, 1988; PAIVA, 1995; PAIVA, 2007; BICALHO,2006).

No que se refere as tendências atuais de se buscar a alternativa de se obter resultados indiretos pela obtenção de dados de turbidez serão apresentadas algumas ponderações. Uma das principais alternativas colocadas para justificar essa tendência está na facilidade da obtenção da informação da turbidez [CHAGAS, 2015; BARTELS ET AL, 2014; BRASIL ET AL, 2014; CARDOSO ET AL, 2012; LIMA ET AL, 2011; PINHEIRO ET AL, 2013; VESTENA ET AL, 2007; SARI ET AL; 2015; CARVALHO ET AL, 2004], mas é importante estabelecer as diferenças clássicas entre os procedimentos tradicionais e aqueles obtidos com a turbidez. Os turbidímetros medem o parâmetro “a partir do comparativo do espalhamento de um feixe de luz ao passar pela amostra, com o espalhamento de um feixe de igual intensidade ao passar por uma suspensão padrão” (Silva-Jr et al., 2012) citado em CHAGAS (2015). Entretanto alguns autores admitem que “as respostas espectrais obtidas por um sensor de turbidez na água não apresentam uma relação” universalmente aceita com a concentração de sedimentos em suspensão, sendo necessários esforços adicionais para calibrar essa relação com a **realidade local através da coleta de amostras no mesmo instante em que o sensor registra a leitura da turbidez** para que se possa obter uma boa correlação entre a turbidez e a concentração de sedimentos em suspensão [MANZ ET AL, 2011].

VESTENA ET AL (2007) enfatiza “que a relação turbidez e concentração de sedimento em suspensão apresenta algumas limitações, em virtude de que as partículas finas apresentam turbidez específica muito maior do que aquelas partículas grossas. Morris e Fan (1997) apud VESTENA ET AL (2007) comentam que a medida da turbidez é muito sensível à concentração de materiais finos e pouco sensíveis à areia. CARVALHO ET AL (2004), ao apresentar resultados de pesquisa relacionado as concentrações de sedimento em suspensão (SS) e a turbidez em duas pequenas bacias no município de Santa Maria, Estado do Rio Grande do Sul, concluíram que a presença de areia na composição do material em suspensão prejudicou a sensibilidade do turbidímetro. Esses autores ainda afirmam que “é bastante limitado o uso da relação turbidez versos concentração de sedimento em suspensão, para as duas sub-bacias envolvidas na pesquisa “devido a não confiabilidade dos resultados encontrados a partir do valor de turbidez de 527 Ntu e 505 Ntu, respectivamente”.

Ainda no trabalho de CARVALHO ET AL (2004) são apresentadas distintas citações bibliográficas nas quais se destacam os prós e os contras do uso de informações de turbidez e sua relação com a concentração de sedimentos em suspensão. Walling (1977) apud CARVALHO ET AL (2004) “com base em suas experiências no rio Creedy, Inglaterra, afirma que bons resultados podem ser obtidos se o instrumento de determinação da turbidez for calibrado para uma situação particular, com relativa homogeneidade no tipo de rocha e uma predominância de silte e argila no tamanho das partículas carreadas”. Ainda segundo CARVALHO ET AL (2004), Gerald (1984), estudando as relações entre absorção de luz por partículas suspensas e a concentração destas partículas, em várias classes granulométricas, observou que a sensibilidade do turbidímetro diminui com o aumento do tamanho das partículas. “Conclui que a turbidez, como forma de avaliar a concentração de partículas em suspensão, deve ser utilizada em cursos d’água que possuam predominância de partículas do tamanho de silte e argila em suspensão”

Dentre os procedimentos tradicionais para a medição da descarga de sedimentos em suspensão um deles é adotar o procedimento conhecido como igual incremento de largura (CARVALHO, 1995). De uma maneira bem simplista, consiste em subdividir a seção transversal do escoamento em subseções convenientemente espaçadas em intervalos iguais para a coleta da concentração da mistura bifásica (água e sedimentos) em cada uma das verticais, com o intuito de obter a concentração fazendo-se uma varredura na coleta ao longo de toda a coluna d'água, em cada uma das seções selecionadas para amostragem. Obtém-se, assim, a viabilidade de uma amostragem integrada ao longo da coluna d'água e a possibilidade de integrar a concentração de sedimentos tanto na vertical quanto na horizontal, diferentemente do que se faz ao medir com o turbidímetro, instalada em um ponto específico da seção do escoamento.

As evidências debatidas nas referências renomadas sobre os procedimentos de medição usando turbidez e os métodos tradicionais leva-nos a acreditar, com base em evidências experimentais, que a medição pelo processo da varredura completa da seção transversal, seja usando amostradores analógicos ou por outros que permitam cobrir toda a seção transversal em profundidade e largura como os ADCPs possam imprimir melhores confiabilidades aos resultados das medições das concentrações de sedimentos em suspensão (CARVALHO, 1995; STRASSER, 2002; PAIVA, 1995; PAIVA, 2007).

Além das evidências sobreditas existe ainda, para suplementar nossas reflexões, os ditames conceituais que nos orientam a acreditar nos procedimentos tradicionais como a melhor alternativa para a medição da descarga de sedimentos nos escoamentos com superfície livre. Quando pautamos nossas medições pelos procedimentos tradicionais estamos respeitando a gênese da distinção entre a descarga de sedimento originado do leito do rio e aquele emanado da bacia hidrográfica. A descarga de sedimentos nos rios é composta das parcelas da descarga de arraste, onde admite-se que nesta o sedimento desliza, rola, ou salta sobre a camada ativa do leito, mantendo com este leito um contato quase que permanente, alternando período de repouso e de deslocamentos, e aquele sedimento em suspensão transportado pela ação das forças de advecção e difusão turbulenta. A descarga total de sedimentos originada do leito do rio é definida pela soma da descarga de sedimentos transportada por arraste do leito mais a descargas em suspensão originada do leito. Normalmente a descarga do leito mantém boas correlações com a vazão do escoamento. Ao se adotar este procedimento intrinsecamente inclui-se no computo da descarga de sedimentos total uma maior heterogeneidade de frações granulométricas, aumentando a possibilidade de se contemplar a presença de silte; argila; areia e pedregulhos [ALFREDINE; 1983, PAIVA, 2007].

O transporte de sedimentos em suspensão originado da bacia hidrográfica é normalmente chamado de carga de lavagem e tem sua definição orientada por uma textura particular aos sedimentos finos. O quadro 2 exemplifica propostas de alternativas de contemporizar a difícil tarefa de separar os sedimentos da carga de lavagem daqueles que compõem o leito do curso d'água. COIADO (2002-2003) pondera que quantitativamente, os sedimentos transportados na camada do leito, em geral, são menos expressivos do que os do transporte em suspensão, mas esses sedimentos têm fundamental importância na dinâmica do movimento dos sedimentos em escoamentos com superfície livre, devido às suas interações com as formas de fundo e às suas intervenções na resistência hidráulica ao escoamento.

Autor	Definição para carga de lavagem
Raudkivi, 1976	Material de granulometria menor do que 0,0625 mm
Einstein, 1950	10% do material mais fino encontrado no fundo do rio
Alvarez & Flores, 1996	Carga de lavagem corresponde ao sedimento cujo diâmetro é menor do que o D_{10}
Shen, 1971	Carga de lavagem é aquela predominantemente composta por silte, argila e areia fina

Quadro 2. Critérios para a definição da carga de lavagem [PAIVA, 2007]

Mesmo ciente de que o maior aporte de sedimentos para as bacias calhas dos rios ocorrem no período de aporte expressivo da descarga de sedimentos em suspensão emanadas da carga de lavagem é preciso observar a relação entre a variação sazonal da vazão dos rios com as variações da precipitação. Xu (2002) apud BICALHO 2006 revela que “durante a estação seca, a maior parte do sedimento em suspensão no rio provém da erosão no canal, gerando sedimentos com maior granulometria. Na estação chuvosa, a erosão do solo das encostas causadas pelo escoamento superficial gera um sedimento relativamente mais fino que é transportado até as calhas dos rios”. As variações da descarga de sedimentos ocorrem no sentido do estirão do curso d’água e nas seções transversais. BICALHO (2006) comenta a susceptibilidade da ocorrência de maior poder erosivo e a tendência do aporte de sedimentos de granulometria elevada nas partes altas da bacia. Já na direção de jusante a tendência é a de ocorrência de fragmentação do sedimento, reduzindo a granulometria e o poder erosivo, ao passo que os processos de sedimentação são aumentados.

No sentido longitudinal do curso d’água, observa-se geralmente maior produção de sedimentos na parte alta da bacia, com maior erosão e transporte de sedimentos, sendo esses de granulometria maiores, e observa-se no sentido de jusante que esses materiais vão se fracionando, tornando-se sedimentos de granulometria cada vez menor, sendo que a erosão vai diminuindo e a tendência de sedimentação do material tende a aumentar (BICALHO, 2006). A distribuição dos sedimentos ao longo da seção transversal é variável também em função da velocidade de corrente. No centro das seções do curso d’água a tendência é de se ter maiores velocidades e menores concentrações, ao passo que próximo a margem é comum haver maior concentração em virtude das menores velocidades e sedimentos com texturas mais elevadas [CARVALHO, 1995].

O transporte em suspensão é fundamentalmente impactado pelas seguintes variáveis: a difusão turbulenta, que é traduzida por uma troca contínua de partículas através do escoamento em todas as direções; o transporte advectivo na direção do escoamento, que é provocado pela transferência de quantidade de movimento do fluido para a partícula; e a decantação das partículas devido à ação da gravidade [SIMONS E SENTURK, 1992]

Operando convenientemente a equação geral diferencial do transporte de sedimentos e difusão turbulenta, para o caso particular do escoamento turbulento permanente bidimensional, com a variação da concentração de sedimentos apenas na vertical, obtêm-se a equação do perfil de concentração na forma integral, tal como se mostra nas equações (10) e (11), nas quais tem-se: $C(y)$ (concentração de sedimentos para uma determinada cota y da coluna d’água); C_a (é uma concentração de referência distanciada de “ a ” em relação ao fundo do canal) “ d ” é a profundidade do canal z (parâmetro que engloba as características do sedimento e a turbulência do escoamento); w (velocidade de sedimentação da partícula); U^* (velocidade de atrito junto ao fundo do canal) e por último “ k ” (é a constante de von Kármán)

$$\frac{C(y)}{C_a} = \left(\frac{d-y}{y} \frac{a}{y-a} \right)^Z \quad (10)$$

$$z = \frac{w}{U_* k} \quad (11)$$

Na Figura 5 mostram-se várias curvas relacionando $(y - a)/(d - a)$ e C/C_a para diversos valores de Z , fixando-se $d/a = 0,05$. Nota-se que, para qualquer valor de Z , a concentração é mais elevada próximo ao leito e decresce em direção à superfície. A distribuição vertical é mais uniforme para pequenos valores de Z , o que pode ser atribuído aos sedimentos mais finos e/ou às características dos escoamentos de turbulência mais elevada. Os sedimentos de granulometrias maiores, que implicarão maiores valores de Z , permanecerão mais concentrados próximo ao leito.

Como se viu nas discussões sobredita a eficácia entre a correlação entre concentração e turbidez fica comprometida pelas seguintes condições:

- O levantamento de dados com turbidez é altamente impacta pela textura do material.
- A turbidez normalmente é medida num ponto específico do escoamento.
- Para a obtenção dos dados de turbidez é requerida a calibração criteriosa in situ do turbidímetro para se obter alguma correlação com a concentração.
- O monitoramento da turbidez não promove a varredura de toda a seção transversa do curso d'água
- A concentração de sedimentos varia sobremaneira com a turbulência e com a textura do material.

Por todas essas ponderações julga-se prematuro orientar as medições da concentração de sedimento em suspensão através de informações de turbidez.

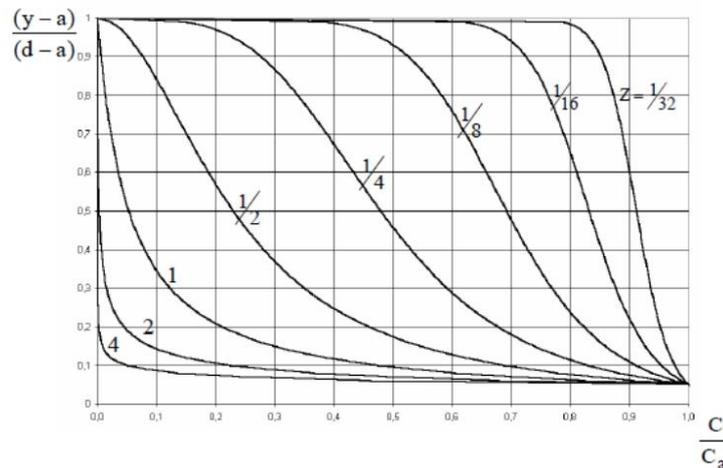


Figura 5. Gráfico de Rouse (1937) para diferentes valores de "z" [apud SIMONS & SENTURK, 1992]

2.2. Elementos conceituais sobre o transporte de sedimentos coesivos

(KLAR, 1991; ESTIGONI ET AL, 2012; PEIXOTO, 2015; COSTA, 2015]

Quando avaliamos as particularidades inerentes a abordagem do transporte de sedimentos coesivos em comparação com aquelas inerentes ao transporte de sedimentos não coesivos, notamos que uma das primeiras diferenças que se apresenta está pelo viés das características físicas inerentes a textura dos sedimentos. Os sedimentos que são tratados como sedimentos coesivos são aqueles com diâmetros inferiores a $60\mu\text{m}$, enquanto os que os sedimentos não coesivos são formados por areias, pedregulhos e partículas mais grosseiras [ESTIGONI ET AL, 2012; PEIXOTO, 2015]. A particularidade de apresentar textura fina faz com estes sedimentos sejam transportados predominantemente em suspensão. Os estudos da dinâmica do movimento dos sedimentos coesivos mantem maior repercussão nas coleções de águas oceânicas nos estuários e em ambientes lenticos.

Todavia, como dito antes, na dinâmica do escoamento com superfície livre as diferenças associadas aos sedimentos coesivos em relação aos não coesivos, vão além das diferenças na textura, sobretudo porque nos compartimentos ambientais os sedimentos finos se consolidam numa mistura que consiste dos próprios sedimentos, além de água, matéria orgânica e às vezes gases, formando o que popularmente se denomina de lama, com capacidade para conceber diferentes tipos de impactos ambientais em virtude da capacidade de adsorção trazendo ao compartimento ambiental os mais diversos níveis de poluição pela capacidade desses sedimentos agregarem microrganismos, metais pesados, nutrientes e outros contaminantes.

É de conhecimento amplo que a distribuição e o aglomerado de partículas do maciço sólido do material consolidado se organizam em elementos estruturais formando o que se denomina de estrutura do solo. Para KLAR (1991) essa estrutura é complexa, dificultando a ratificação de metodologia que exerça como precisão prática e precisa a estrutura do solo, impondo a necessidade de avaliações qualitativas para a se decidir sobre a melhor reflexão sobre a distribuição dos constituintes do material consolidado. “A propriedade da fase sólida de formar unidades estruturais complexas a partir de unidades estruturais menores é denominada de capacidade de agregação” do solo [KLAR, 1991].

Nos compartimentos ambientais como rios, lagos e reservatórios, a estrutura dos depósitos dos sedimentos coesivos começam a se formar mesmo quando estes sedimentos ainda estão sendo transportados em suspensão, em virtude de que, havendo quantitativos elevados do material particulado em suspensão, há intervenção nos processos de floculação e por conseguinte a deposição do material transportado se potencializa, pelo aumento da velocidade de sedimentação quando o material particulado se aglutina em flocos. ESTIGONI ET AL (2012) comenta que “vários equacionamentos são propostos na literatura que envolve uma relação proporcional entre concentração do sedimento em suspensão e a velocidade de deposição” [ESTIGONI ET AL, 2012; TAMURA, 2017].

No MANUAL DE EROSIÃO E SEDIMENTAÇÃO DA U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR BUREAU OF RECLAMATION (2006) ratifica-se a ação dos efeitos gravitacionais nos processos de deposição dos flocos de agregados de sedimentos coesivos em virtude do aumento da velocidade de sedimentação. Segundo o manual, o peso de uma partícula individual não é suficiente para promover a deposição quando a partícula está suspensa na água, em virtude de que mesmo as pequenas flutuações de velocidades turbulentas já são suficientes para vencer o seu peso e mantê-la em suspensão. Todavia, somente com a floculação pode ocorrer os processos de sedimentação. O manual também apresenta o estudo desenvolvido por Krone em 1962 e o estudo desenvolvido por Cole & Miles em 1983, ratificando que a velocidade de sedimentação é diretamente proporcional a elevação do transporte de sedimentos em suspensão em decorrência dos processos de floculação dos sedimentos coesivos.

Destarte, é imperativo associar a formação e a consolidação do material depositado na intracalha de rios com o material emanado da bacia hidrográfica em virtude de que a estrutura do solo começa a se formar a partir da fragmentação da rocha. Igual atenção deve-se dar as características químicas do material transportado e igualmente daquele que constitui o depósito. A predominância de cátions variados devidos a distintos componentes químicos do sedimento pode alterar por demais a estrutura do solo em detrimento do predomínio da presença de outro. Por exemplo: se por hipótese na massa de sedimentos predominar a presença de sódio no solo ocorrerá a tendência de dispersão, mas se o predomínio for de elementos aglutinadores, como o cálcio ou o alumínio, estimula-se o processo de floculação. Ainda, segundo KLAR (1991), o tipo de argila afeta a estabilidade dos agregados. Solos com maiores presenças de caulinitas terão maiores estabilidades se comparados àqueles em que o predomínio é de montmorilonita. Ainda segundo o autor, os solos com maior presença de óxido de ferro (como os latossolos do quadrilátero ferrífero) e carbonatos de cálcio são mais susceptíveis aos processos de aglutinação.

Observa-se de antemão que ações destinadas a análise do material consolidado, sob a ótica da textura e de análise química, ganham importância encimada na avaliação da vulnerabilidade do material se ressuspender ou não para o seio da massa líquida. Para Moreira (2020) apud COSTA (2015) depósitos de sedimentos nutridos por “hidróxidos de ferro, alumínio, manganês e substâncias húmicas” ratificam fases minerais e orgânicas que conferem propriedade de adsorção aos sedimentos, com impactos no acúmulo, no transporte e na biodisponibilidade de metais traço em ambientes aquáticos”. Soares et al. (2004) apud COSTA (2015) comenta que “durante o transporte no sistema fluvial, elementos traço em forma de soluto tornam-se complexados e adsorvidos ou absorvidos em sedimentos em suspensão ou em sedimentos finos de fundo. COSTA (2015) comenta que há sugestões em trabalhos anteriores para que “a análise da composição dos sedimentos deve ser realizada nas frações granulométricas mais finas dos sedimentos (silte e argila), pois se observa uma maior afinidade dos elementos traço com estas frações”.

Ao prestigiar os distintos trabalhos sobre a temática dos estudos dos sedimentos coesivos, fica evidente que “a sedimentação dos materiais particulados emanados da suspensão” além de depender da textura e das propriedades químicas do material, dependem também da sua densidade e é ainda potencializada pela formação de flocos. Ademais, a turbulência do escoamento também influencia na floculação e na sedimentação. [TANURA, 2017; PEIXOTO, 2015; COSTA, 2015; KLAR, 1991; ESTIGONI ET AL, 2012].

Para PEIXOTO (2015), os processos de formação de flocos estão relacionados a pelo menos três tipos de colisão pelas partículas suspensas no escoamento. O primeiro tipo é devido ao movimento Browniano; o segundo tipo é devido a sedimentação diferencial, em virtude das colisões provocadas por sedimentos com granulometria variadas em decorrências da velocidade de sedimentação diferentes associadas aos tamanhos dos sedimentos. E, por último, o grau de turbulência do escoamento, em virtude de que as flutuações nas tensões “cisalhantes causadas pela turbulência geram deformações no escoamento, resultando na quebra dos flocos”.

Além da floculação, outro efeito de grande importância na dinâmica do escoamento dos sedimentos coesivos são os aspectos de consolidação. “A consolidação é a consequência dos efeitos continuados dos processos de sedimentação nos cursos d’águas naturais e “uma vez depositadas” as partículas se acomodam no fundo, expulsando a água dos seus interstícios, trazendo como uma das primeiras consequências a diminuição dos índices de vazios no decorrer do tempo, o que pode potencializar a resistência do leito à erosão”. A consolidação do material dos sedimentos depositados nos leitos dos cursos d’águas trazem outras consequências essenciais à dinâmica do escoamento dos sedimentos coesivos, com alteração na porosidade e na massa específica do material depositado; normalmente o que se observa é uma redução na porosidade e um aumento na massa específica [PEIXOTO, 2015; MANTOVANELLI, 2016]. Para PEIXOTO (2015) a expulsão da água dos interstícios do maciço devido a consolidação do leito promove alterações nas propriedades físicas do material depositado porque a “sobrecarga que os sedimentos das camadas superiores causam nos sedimentos das camadas inferiores, culmina no aumento da massa específica do depósito de acordo com a profundidade abaixo do leito. O processo de consolidação faz reduzir lentamente a cota do leito e, diferentemente do processo de sedimentação, pode durar anos até se restabelecer por completo no leito do curso d’água [PEIXOTO, 2015].

MANTOVANELLI (2016) ratifica as percepções de ESTIGONI ET AL (2012) sobre o comportamento dos processos erosivos dos sedimentos coesivos. Segundos os autores, ao contrário do que ocorre com os processos erosivos dos sedimentos não coesivos, a erosão nos sedimentos coesivos pode ocorrer por grão isolados ou por blocos de grãos. A taxa de erosão dos sedimentos coesivos é geralmente calculada em função da diferença da tensão de cisalhamento de fundo e a tensão crítica de erosão. Todavia, ESTIGONI ET AL (2012) comentam que, devido ao processo de consolidação atuando nas camadas inferiores do depósito, requer-se maiores potências da corrente para a ocorrência

de erosão dessas camadas, “de modo que somente após a erosão de uma camada inteira, e se as tensões cisalhantes críticas cederem é que haverá o processo erosivo nas camadas mais profundas.

“Assim, para um leito consolidado, quanto mais fundo, maior será a tensão necessária para causar erosão. MANTOVANELLI (2016) apresenta uma série de propriedades do maciço de depósito e seus impactos nos processos erosivos para os sedimentos coesivos. Segundo MANTOVANELLI (2016) a resistência à erosão de solos coesivos diminui com o aumento do peso específico e do índice de plasticidade. Ao passo que o índice de erodibilidade aumenta com o aumento dos índices de vazios e aumenta também com o aumento da temperatura do solo e da água. No quadro 3, adaptado de MANTOVANELLI (2016), resume-se as relações entre os parâmetros sobreditos e os impactos na erosão dos sedimentos coesivos. Para ESTIGONI ET AL (2012), para complementar a elucidação sobre os processos de consolidação dos sedimentos coesivos, é preciso incorporar os efeitos do pH da água ou de salinidade, que tendem a alterar a atração elétrica responsável pela coesão dos sedimentos.

Quando cada uma dessas propriedades aumenta isoladamente ⇒	O grau de erodibilidade ganha o seguinte comportamento
Peso específico ↑	Diminui ↓
Índice de plasticidade ↑	Diminui ↓
Índice de vazios ↑	Aumenta ↑
Temperatura do solo ↑	Aumenta ↑
Temperatura da água ↑	Aumenta ↑

Quadro 3. Influência das características do depósito nos processos de erosão dos sedimentos coesivos. Fonte: Adaptado de MANTOVANELLI (2016)

Neste capítulo, foram apresentados pontos importantes do estudo do início do transporte sólido; estudos das formas de fundo; estudos das resistências hidráulicas e sobre os estudos do transporte de sedimentos. Os aspectos relacionados a obtenção de dados através de medições de turbidez foram debatidos e foram apresentados elementos fundamentais do transporte de sedimentos coesivos, em virtude de que essas informações darão sustentação às análises e às conclusões do parecer. Os assuntos foram abordados por julgar que o contato com as matérias apresentadas se torna imprescindível ao embasamento teórico para a fundamentação das percepções e conclusões sobre a análise do documento “Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020” e da eficácia do *lag layer* na contenção dos rejeitos intracalha.

3. DOCUMENTOS AVALIADOS

Para a elaboração deste relatório, foram avaliados os seguintes documentos:

- **COMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MÉTODO ANALÍTICO CONSIDERANDO O MONITORAMENTO INTRACALHA DE SEDIMENTO – SETEMBRO E OUTUBRO DE 2020:** Elaborado por Golder e apresentado pela Fundação Renova em maio/2021. Esse é o estudo de objeto do edital, que apresenta os resultados do monitoramento intracalha realizado entre setembro e outubro/2020, nos trechos 6 a 11 dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, com o objetivo geral de investigar o comportamento dos sedimentos intracalha no período e o objetivo específico de avaliar a efetividade do lag layer para evitar a ressuspensão dos rejeitos depositados no leito do rio, a partir de monitoramentos da estratigrafia de transectos intracalha, monitoramento periódico de parâmetros fluviométricos, campanhas de medições de descargas líquida e sólida, análise de processos fluviais, transportes de sedimentos etc. Buscou-se avaliar os métodos utilizados para chegar aos resultados e, quando cabível, interpretar esses resultados frente aos conhecimentos de hidrossedimentologia e estratigrafia e as informações que se deseja conferir. A partir de então, será referido pelo nome ou por GOLDER (2021).
- **Nota Técnica CT-GRSA nº 21/2020: Avaliação do “Relatório Final – Aplicação do Método Analítico para Avaliação do lag layer”, referente ao item 8 do eixo prioritário 1, no âmbito do processo judicial 69758-61.2015.4.01.3400.** Apresenta considerações a respeito de relatório anterior ao citado acima, elaborado sobre os mesmos objetivos, do ano de 2020, a respeito das correções necessárias e sugestões de encaminhamentos. Buscou-se verificar se os encaminhamentos propostos foram seguidos, ou se foram adotadas medidas suficientes para corrigir as deficiências e retratar melhor o cenário que se deseja conhecer.

Além disso, foram considerados também os seguintes documentos:

- Notas Técnicas CT-GRSA n.º 15/2020 e n.º 20/2020, de assunto similar à nota técnica descrita e relacionada a relatórios anteriores.
- Relatório Final – Metodologia para avaliar a estabilidade do lag layer e a possibilidade de remobilização da calha fluvial em eventos hidrológicos extremos; e Relatório Final – Aplicação do Método Analítico para Avaliação do lag layer. Relatórios anteriores que definiram as metodologias para avaliar a estabilidade do lag layer e seu efeito no encouraçamento dos rejeitos. Foi avaliado para conferência de dados anteriores e observar a evolução do processo de monitoramento e modelagem adotados.
- Volumes 1, 2, 4, 5 e 9 do Plano de Manejo de Resíduos elaborados para o Rio Doce, referentes aos trechos 6 a 11. Apresentam dados de relevância do monitoramento dos sedimentos e rejeito nos trechos de interesse dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, que se relacionam aos dados de interesse e foram utilizados no estudo avaliado para verificar a evolução temporal dos parâmetros analisados.
- MERRITT et al. (2009). *Case Study Review: Demonstration and Validation of Enhanced Monitored Natural Recovery at DoD Sites, ESTCP Project ER-0827*. Apresenta estudos de caso de monitoramento de recuperação natural de áreas com sedimentos contaminados pertencentes ao Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América, em regiões marinhas (enseadas e porto costeiro). Propôs utilizar efeitos de capeamento para contenção de contaminantes em sedimentos. Foi utilizado como base para a hipótese da camada de lag layer como camada de encouraçamento para imobilização dos rejeitos originados do rompimento da barragem de Fundão, em 2015.

4. PARECER TÉCNICO

Neste parecer técnico aborda-se as percepções sobre eventuais lacunas na metodologia apresentada no relatório “**Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020**” e da eficácia do *lag layer* na contenção dos rejeitos intracalha.”, com o objetivo de avaliar a efetividade do *lag layer* para evitar a ressuspensão dos rejeitos depositados nos leitos dos cursos impactados pelo rompimento da barragem de rejeitos de mineração de Fundão, ocorrido em 05 de novembro de 2015. Em primeira etapa, buscou-se descrever o conteúdo do documento avaliado, especificamente em relação aos seus aspectos metodológicos (o que foi realizado). Em um segundo momento, apresentou-se os resultados, a interpretações e o parecer dos responsáveis pela elaboração do presente relatório, buscando obter informações que subsidiem a avaliação acerca da efetividade do *lag layer* para os fins propostos.

4.1. Contextualização do Estudo Analisado

Segundo GOLDER (2021), a campanha de monitoramento de sedimentos intracalha (campanha E) ocorreu entre setembro e outubro de 2020, com o objetivo de investigar o comportamento dos sedimentos do leito fluvial dos trechos 6 a 11 do Plano Manejo de Rejeitos do Rio Doce, a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves e atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão, e se sucedeu a quatro campanhas de monitoramento realizadas entre julho e dezembro/2019 (A, B, C e D). Foi feito uso de sondagens intracalha para monitorar as características estratigráficas, granulométricas e químicas em 33 transectos ao longo desses trechos, nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, somado a um transecto no Trecho 12 (rio Doce). Os objetivos específicos definidos foram: “*avaliar a evolução estratigráfica das camadas dos sedimentos intracalha; avaliar os aspectos granulométricos e químicos dos sedimentos intracalha amostrados; estimar o volume remanescente de rejeito nos trechos estudados; correlacionar as medições de descargas líquidas e sólidas, com a turbidez no período de amostragem; e aplicar métodos analíticos para investigar o provável comportamento dos sedimentos intracalha em diferentes cenários de vazão dos cursos d’água.*” Dentre as questões que se busca responder destaca-se a hipótese do uso da camada denominada *lag layer*, de material mais grosseiro depositado no topo da estratigrafia local, como camada de encouraçamento, isto é, capaz de imobilizar os rejeitos intracalha inconsolidados, impedindo a sua exposição e erosão.

Para este estudo, GOLDER (2021) definiu as camadas estratigráficas presentes no leito dos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce (trechos 6 a 12) em um modelo conceitual (Figura 6 e 7) contendo as seguintes camadas, definidas conforme texto em destaque:



Figura 6. Modelo conceitual a montante do Reservatório de Candonga, empregado em Golder (2021). Fonte: Golder, 2021.

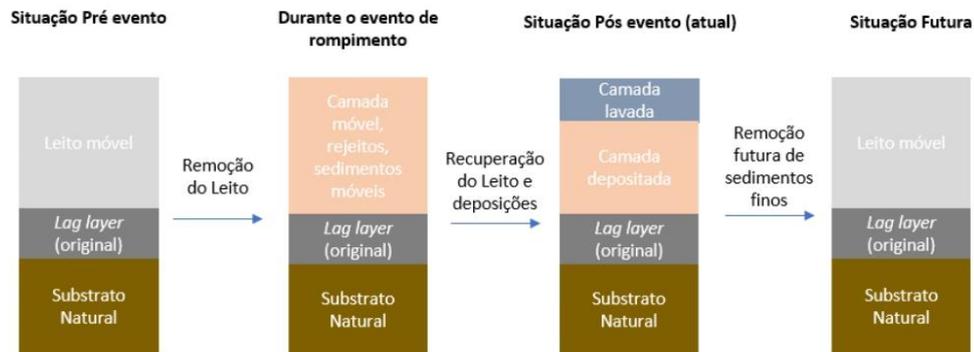


Figura 7. Modelo conceitual a jusante do Reservatório de Candonga, empregado em GOLDER (2021). Fonte: GOLDER, 2021.

“Leito Móvel (LM): corresponde à camada superficial de composição essencialmente arenosa, mais facilmente remobilizável por fluxos de energia moderada, mais frequentes ao longo do ano.

Lag layer (LG): conforme o observado nesta campanha de monitoramento, camada de composição granulométrica grossa, dominada por pedregulhos (> 2 mm de diâmetro), com presença secundária de areia. Sedimentos finos (< areia muito fina) são irrisórios (< 10%). É comum a presença de clastos de minérios de ferro (Itabiritos) e quartzo/quartzitos. As frações mais finas dão cores amarronzadas/alaranjadas devido à alteração de óxidos de ferro. É comum a presença de clastos imbricados, como produto do fluxo travivo responsável pela “lavagem” desta camada, carreando os sedimentos finos.

Rejeito (RE): camada composta essencialmente por material silteoso/arenoso fino proveniente do beneficiamento do minério de ferro e previamente estocado na barragem de Fundão. A presença subordinada de pedregulhos é interpretada como uma fácies sedimentar do rejeito no contexto intracalha, provenientes da assimilação deste material por erosão do leito do rio pelo fluxo após o rompimento da barragem. Sendo assim, camadas descritas por campanhas anteriores como “lag layer com rejeitos” ou “lag layer B” foram consideradas e comparadas às camadas de rejeito na presente campanha. A composição granulométrica predominantemente fina e sua origem de deposição pelo fluxo de detritos, que assimilou água, resulta em características plásticas, altamente coesiva. A coloração é alaranjada/marrom, devido à abundância de óxidos de ferro;

Substrato Natural (SN): corresponde ao material presente no leito do rio anteriormente ao evento de erosão e deposição de rejeitos causado pelo rompimento da barragem de Fundão. Desta forma, é uma camada mais heterogênea, podendo estar relacionada tanto a sedimentos fluviais depositados pré-evento e não erodidos (tipo aluvião), bem como se referir à rocha alterada que foi erodida e exposta no leito do rio pela onda de rejeitos (tipo saprólito; Figura 10). No primeiro caso, o tipo aluvião, sua composição é formada por predomínio, em proporções altamente variáveis (ver seção 6.1.2), de areia e pedregulhos, de composições litológicas/mineralógicas

semelhantes ao lag layer, com clastos de Itabirito, quartzo e quartzito. Já para o segundo caso, tipo saprólito, é caracterizado por coloração amarelada e visualização de texturas reliquias da rocha (e.g. texturas de granitoides com alterações de minerais) e com contatos abruptos e planares com o material sobrejacente, resultado da erosão causada pelo fluxo de detritos.”

Observa-se que o modelo foi modificado em relação àquele apresentado nos estudos anteriores, com a inclusão de uma camada de leito móvel (antes contemplada no *lag layer*) e considerando a antiga camada “*lag layer* com rejeitos” apenas como rejeitos, como destacado pela referida empresa e transporte no quadro 4.

CLASSIFICAÇÃO PMR 2018 (CHM) ⁽¹⁴⁾	CLASSIFICAÇÃO MONITORAMENTO 2019 (WORLEY, 2020)	CLASSIFICAÇÃO MONITORAMENTO 2020 (ESTE RELATÓRIO)
Rejeito lavado	Lag Layer A	Leito móvel Lag layer
Rejeito inconsolidado(a)	Lag Layer B (com rejeito)	Rejeito
	Rejeito inconsolidado	
Substrato natural	Substrato natural	Substrato natural

Quadro 4. Modificação na classificação estratigráfica ao longo dos estudos realizados nos trechos 6 a 11 do PMR. Fonte: Golder, 2021.

Também foram realizadas modificações nos métodos de amostragem de sedimentos na campanha E GOLDBER (2021) das campanhas de monitoramento anteriores; enquanto nessas se utilizou *liner* de 44 mm, naquela foi empregado amostrador de 75 mm de diâmetro com sondagem por *vibracore* ou martetele de impacto e aplicação adicional de pá ($h < 0,3$ m) ou draga Van Veen ($h > 0,3$ m) para coleta dos sedimentos mais grosseiros, com diâmetro representativo superior a 75 mm. As curvas granulométricas foram, então, combinadas pelo método de distribuição de frequências de Fripp & Diplas (1993), quando se utilizou os dois métodos simultaneamente. A autora alegou que essa nova forma de amostragem permitiria representar melhor os sedimentos grosseiros que compõe o *lag layer*, o que é coerente. O método utilizado para avaliar o encurtamento de testemunho consistiu em atribuir que toda a profundidade não recuperada corresponde à camada de rejeitos, nos pontos em que esses ocorrem, por ser um material de maior plasticidade; nos pontos em que não ocorrem, a correção consistiu em atribuir valores a cada camada mantendo a proporção encontrada no testemunho recuperado (encurtado). Já para análise granulométrica, a empresa optou por realizar amostragem simples por camada, em detrimento das amostras compostas realizadas nas campanhas anteriores, alegando que “*permitiu constatar uma tendência de maior proporção de finos (< areia fina – 0,250 mm) nas margens em relação ao centro para todas as camadas, conforme esperado para o contexto intracalha no qual, em geral, a velocidade e energia de fluxo são maiores no centro do talvegue, mantendo os finos em suspensão.*”

As sondagens foram realizadas após levantamento batimétrico. Para a distribuição dos transectos, foi informado por GOLDBER (2021) que:

“Neste contexto, a área considerada para o monitoramento dos sedimentos intracalha contemplou os Trechos 6 a 11, além de um ponto na porção mais a montante do Trecho 12, com característica fluvial, totalizando uma extensão de aproximadamente 107 km nos rios Gualaxo do Norte, Camargo, Carmo e Doce (até o remanso do reservatório da UHE Risoleta Neves).”

“[...] Como o principal objetivo do monitoramento é verificar a evolução do comportamento das camadas de lag layer e rejeito no contexto intracalha, os pontos de coleta de amostras seguiram as mesmas localizações dos transectos rios investigados nas campanhas anteriores. No total, 34 transectos.”

“Para caracterização e avaliação da estratigrafia dos transectos investigados, foram realizadas sondagens em três pontos, localizados próximo à margem esquerda, no centro do talvegue e próximo à margem direita, totalizando 99 pontos de sondagem. Desta forma, foi possível investigar a estratigrafia das camadas e suas variações laterais na seção intracalha. O posicionamento das sondagens buscou seguir o mesmo das campanhas anteriores, realizadas em 2018 (JACOBS CH2M, 2018abcde) e 2019 (WORLEY, 2020), sendo alterado alguns centímetros ou metros a jusante ou montante somente em situações de impossibilidade de penetração (e.g. afloramentos rochosos, camadas não penetráveis aos métodos aplicados) ou ainda em virtude da necessidade de realização de sondagens adicionais por ponto para obtenção de volume de amostra necessário às análises laboratoriais (seção 5.3).”

Para as análises químicas, segregou-se o material coletado em diversas frações granulométricas, para as quais foram analisadas as concentrações de uma série de metais. Esses metais foram disponibilizados para a análise espectroscópica por meio da digestão ácida da matriz, conforme os métodos de referência da USEPA 3051A, e os procedimentos analíticos também se basearam nas diretrizes dos manuais da USEPA (como descrito por GOLDBERGER, 2021).

Os resultados das análises químicas foram comparados com valores de *baseline*, descritos como dados geoquímicos disponíveis na literatura para sedimentos fluviais antes do evento da ruptura da barragem de Fundão. Os valores de *baseline* foram determinados a partir dos valores do terceiro quartil (a 75%) na distribuição da série de dados para cada parâmetro de interesse. Segundo os próprios autores, a utilização desses *baselines* para comparação carecem com incertezas originadas da utilização de diferentes métodos na quantificação dos parâmetros de interesse em cada estudo, com metodologia analítica diferente da adotada.

Também se comparou os dados de cada camada entre si para avaliar anomalias nas camadas com influências dos rejeitos e com os valores de referência da Resolução CONAMA 454/2012, que *“Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional.”*, na ausência de resoluções que forneçam valores de referência de qualidade ou de investigação para sedimentos fluviais no meio natural.

Quanto ao monitoramento para descargas líquidas e sólidas, foi informado que:

“O monitoramento da descarga líquida e sólida foi conduzido pela LABMAR Análises e Soluções Ambientais (LABMAR) entre setembro e novembro de 2020 em 8 dos 33 transectos selecionados entre os trechos 6 e 11. Estes pontos foram definidos como pontos representativos das condições nos trechos monitorados e apresentados junto à CT. Os transectos amostrados foram: T06T04, T07T01, T08T10, T09T37, T09T50, T09T53, T10T01 e T10T14. Para cada transecto foram planejadas amostragens semanais ao longo de seis semanas.

Os trabalhos incluíram medições de turbidez, vazão, velocidade média, velocidade máxima, profundidade, largura e nível d'água. A medição de turbidez foi realizada em campo com auxílio de um turbidímetro portátil. Devido aos danos observados nas réguas limimétricas a medição de nível d'água foi limitada aos pontos e campanhas nos quais as mesmas puderam ser utilizadas, quando as réguas estavam danificadas estes resultados não puderam ser coletados. As medições de descarga líquida foram realizadas com auxílio de um Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) modelo

RiverSurveyor M9 juntamente com um Differential Global Positioning System (DGPS) e um tripé com uma base RTK para garantir a precisão.”

“Durante o monitoramento foram coletadas amostras de água para determinação da concentração de sólidos suspensos totais ao longo de toda a seção do rio utilizando garrafa amostradora. Sedimentos de fundo (ou leito) foram amostrados utilizando draga tipo busca-fundo (e.g. Petersen ou Van Veen).”

Em relação aos cálculos de estimativa de descarga sólida, foi relatado:

“As estimativas de descarga sólida foram feitas com bases em dados brutos e cálculos amplamente difundidos na literatura (CARVALHO 2008). Por fim a descarga sólida foi estimada utilizando o método modificado de Einsten Colby & Henbree (1955), descrito em Carvalho (2008). Estes resultados são apresentados como descarga sólida em suspensão, descarga sólida de leito e a descarga sólida total, medidas em t/dia e fornecidos em laudos em PDF.”

Já os cálculos de correlação entre parâmetros de descarga sólida e líquida foi realizado pela Análise de Correlação de Pearson, com resultados significativos para p-valor < 0,05 (95% de confiança). Os parâmetros correlacionados foram: descarga líquida e turbidez, descarga líquida e sólidos suspensos totais (SST), com dados de todos os trechos e por trecho.

A estimativa do volume de rejeitos remanescente foi realizada por três métodos distintos, conforme GOLDER (2021):

“Nos métodos 1 e 2 os volumes foram calculados multiplicando as espessuras médias de rejeitos e lag layer em um transecto pela sua área de influência. No método 1, utilizado em Worley (2020), as espessuras das camadas do leito foram definidas através de dados de monitoramento das campanhas de 2019 e 2020 (total de 34 transectos) e extrapolação das espessuras para os demais transectos que foram monitorados durante a elaboração dos Planos de Manejo de Rejeitos dos trechos 6 a 11 mas que não foram incluídos nos monitoramentos de 2019 e 2020 (dos 103 transectos monitorados no PMR menos 34 transectos do monitoramento de 2019 e 2020, resultando em 69 transectos). Para a extrapolação foram utilizados como referência dados de espessura levantados durante a elaboração dos Planos de Manejo de Rejeitos (campanha zero) e as variações de espessuras verificadas nos transectos monitorados em 2019 e 2020 em comparação com a campanha zero. A principal diferença do método 2 em relação ao método 1 é que as espessuras das camadas do leito foram baseadas apenas em dados de monitoramento das campanhas de 2019 e 2020 e as espessuras para os transectos não monitorados foram obtidas através de extrapolação de dados dos transectos imediatamente a montante e a jusante que foram monitorados na campanha em questão. Ou seja, não foram feitas extrapolações entre campanhas.”

“No método 3 o volume de rejeitos foi calculado utilizando abordagem similar à apresentada nos métodos 1 e 2, porém adicionando um ajuste baseado em critérios granulométricos, conforme apresentado em Worley (2020). Para esse ajuste considerou-se que sedimentos com tamanho de partícula <0,2 mm presentes nas camadas de rejeito e nas camadas superiores consistiriam em rejeitos, independente da camada na qual está presente (e.g. lag layer). Sendo assim, trata-se de um método mais conservador em relação à estimativa do volume rejeitos, à medida que sedimentos naturais do rio certamente apresentam alguma fração <0,2 mm.”

Foram realizados estudos hidráulicos e hidrológicos para definir os parâmetros de entrada nos modelos analíticos de transporte de sedimentos, sendo de importância fundamental para a parametrização dos referidos modelos. Para tanto, foram utilizados os dados disponíveis, isto é, levantamento topográfico por meio de sensoriamento remoto com sensor ativo a laser (LIDAR), levantamentos topobatimétricos das 33 seções monitoradas, bases hidrográficas ortocodificadas da Bacia do Rio Doce e registro de quatro estações fluviométricas da ANA:

- Uma no Rio Gualaxo do Norte, entre os transectos T09T37 e T09T45: 563370000 (Fazenda Ocidente);
- Duas no Rio do Carmo: 56535000 (Acaiaca) e 56335001 (Acaiaca Jusante), a montante da foz do Rio Gualaxo do Norte;
- Uma no Rio Piranga, a montante da foz no Rio do Carmo / Doce: 56110005 (Ponte Nova Jusante)

As vazões de referências e os hidrogramas dessas estações foram regionalizados para os pontos de referência pelo método das áreas. Foram construídas duas séries sintéticas, na confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo (Série Sintética 1) e do Rio do Carmo com o Rio Piranga (Série Sintética 2), pela soma dos hidrogramas regionalizados para cada rio, nos pontos logo a jusante da confluência. Os métodos utilizados são de referência e amplamente utilizados em estudos hidrológicos, sendo suficientes para preencher a lacuna de dados primários.

Avaliou-se a distribuição de probabilidades que melhor se ajusta à série de vazões máximas anuais para cada estação e série sintética, conforme recomendação do SEAF (Sistema Especialista em Análise de Frequência de Eventos Hidrológicos Máximos Anuais), com valores altos de confiança (89% a 98,8%), e se obteve as vazões máximas para cada tempo de recorrência simulado (2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos).

Para a regionalização das vazões das séries de referência (estações fluviométricas e séries sintéticas) para cada transecto avaliado, utilizou-se os métodos *Index Flood* no Rio Gualaxo do Norte, que é mais indicado para grandes áreas de drenagem, com distribuições heterogêneas de precipitação e cobertura do solo, e o método das áreas para os rios do Carmo e Doce, onde foi notada distribuição homogênea de precipitações anuais médias. As vazões médias diárias foram convertidas em vazões máximas instantâneas pela aplicação do coeficiente de Fuller. Novamente, os métodos foram aplicados adequadamente, nas condições recomendadas para seu uso.

Os parâmetros hidráulicos e de geometria (velocidade da água, largura no NA máximo, profundidade máxima e média) foram obtidos para as vazões máximas em cada tempo de recorrência estimado por meio de simulação hidrodinâmica no HEC-RAS, no regime permanente e gradualmente variado com essas vazões máximas.

Já para estimar a efetividade do *lag layer*, foram aplicados métodos analíticos para determinado estado de mobilidade do grão (início do movimento, ou o maior diâmetro mobilizável por vazão igual a de cada tempo de retorno considerado, “*verificando se há uma variação temporal e espacial na vazão necessária para iniciar o transporte dos sedimentos presentes no leito dos rios da área de estudo*”) e a profundidade de remoção de sedimentos do leito do rio, em cada transecto monitorado.

No primeiro caso, utilizou-se método baseado no diagrama de mobilidade de Yalin & Karahan (1979), que é uma modificação do diagrama de Shields (1936) e faz uso da relação entre o número de Reynolds do grão (R_{*c}) e o parâmetro de mobilidade de Shields (Θ_c), associado à curva de suspensão de Bose & Dey (2013) (figura 8). O primeiro método permite verificar se determinado diâmetro de sedimento se encontra imóvel (abaixo de uma curva de imobilidade) ou móvel (acima da mesma), enquanto o segundo permite distinguir entre a carga de leito (entre as curvas de imobilidade e de suspensão) e a carga em suspensão (acima dessa). O tempo de retorno impactou, principalmente, no parâmetro raio

hidráulico do canal “RH”, aproximado por sua profundidade média (h), já que cada vazão considerada impactaria em um valor diferente para esse parâmetro. Os estudos foram realizados com os diâmetros D50 e D90

$$\theta_c = \frac{\gamma_w h S}{(\gamma_s - \gamma_w) D}$$

$$R_{*c} = \frac{\sqrt{ghSD}}{\nu}$$

Em que “h” é o raio hidráulico do canal, “S” a declividade média do trecho, “ γ_s ” o peso específico do grão, “ γ_w ” o peso específico da água, “D” o diâmetro do sedimento avaliado, “ ν ” a viscosidade cinemática do fluido e “g” a aceleração da gravidade local.

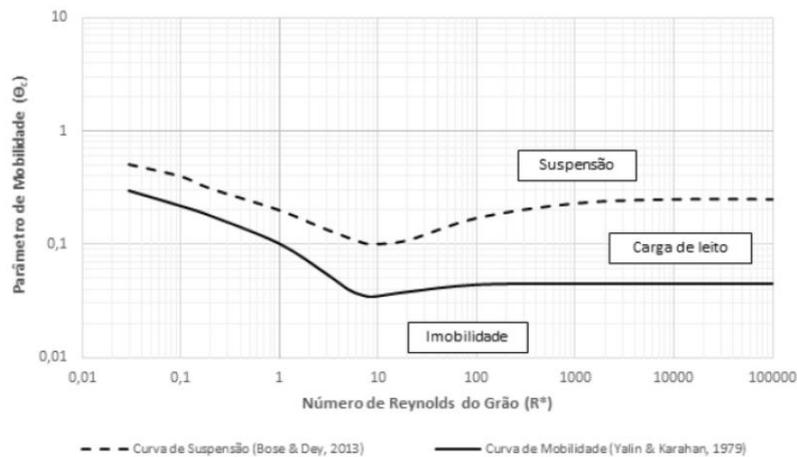


Figura 8. Diagramas utilizados para diagnosticar o estado do movimento dos grãos avaliados. Fonte: BOSE & DEY, 2013; GOLDER, 2021.

Quanto ao cálculo da profundidade de remoção dos sedimentos do leito, foram utilizadas diferentes equações para os casos em que há ou não efeito protetivo à erosão (encouraçamento). Esse foi definido por GOLDER (2021) como:

“De acordo com Pemberton e Lara (1984), caso o leito do rio tenha uma massa de grãos imóveis igual ou superior a 10% (i.e, igual ou superior ao D90), o leito desenvolverá uma camada protetiva à erosão. Caso haja este material, a profundidade de remoção do leito é suavizada. Em caso negativo, o leito remove-se sem o efeito de proteção e, portanto, a uma profundidade maior.

Para considerar este efeito, primeiramente deve-se calcular o tamanho do grão estável para cada TR com o intuito de compará-lo com o D90 das amostras de lag layer de cada seção. Caso o D90 seja maior ou igual ao tamanho do grão estável, este efeito de proteção à erosão pode ser considerado nos cálculos de profundidade de remoção.”

O diâmetro imóvel mínimo (tamanho do grão estável) foi calculado considerando o diâmetro que resulta em um parâmetro de mobilidade de Shields igual a 0,045 (limiar de imobilidade para números de Reynolds do grão superiores à 100) quando se utiliza o critério de Yalin & Karahan (1979).

Caso o D90 seja superior ao diâmetro imóvel mínimo (efeito protetivo à erosão), foi utilizado o modelo analítico de Borah (1989), que considera que a profundidade de remoção do leito (Z_t) é função da diferença entre a profundidade da camada ativa do leito (T) e o diâmetro do menor grão imóvel (D_x), em que o primeiro é função do segundo, da fração do leito igual ou mais grosso que esse diâmetro (P_x) e à porosidade do leito (e), que por sua vez é função do diâmetro mediano do leito (D_{50}).

$$Z_t = T - D_x$$
$$T = \frac{D_x}{(1 - e)P_x}$$
$$e = 0,245 + \frac{0,0864}{(0,1 D_{50})^{0,25}}$$

Já nos casos em que o D90 é inferior ao diâmetro imóvel mínimo (sem encouraçamento), os autores utilizaram os modelos analíticos de Blench (1969), Lacey (1930) e Neill (1973), nos quais a profundidade de remoção do leito é função da profundidade da coluna d'água, das vazões analisadas, e do diâmetro mediano, em diferentes formulações, aplicando-se fatores de correção de acordo com a curvatura e inclinação do leito.

4.2. Análise dos Resultados do Estudo

Para a análise dos resultados do estudo e sua interpretação, buscando-se obter as informações desejadas, foram utilizados também os documentos disponibilizados para pesquisas, visando suplementar as informações à análise do relatório principal. Optou-se por dividir o texto seguindo a mesma ordem temática dos assuntos abordada no relatório "Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020". Essa ordem também contribui para fornecer diferentes linhas de evidência a respeito da metodologia empregada para avaliar a efetividade do *lag layer* no encapsulamento do rejeito.

4.2.1. Modelo conceitual e definições

No relatório de GOLDER (2021), foi informado que:

“A taxa de transporte de sedimentos em canais fluviais e, portanto, a mobilidade do leito, varia de acordo com a granulometria das partículas, profundidade da água, declividade longitudinal do rio e a energia da corrente das águas. Como a energia do fluxo aumenta com a velocidade e a velocidade aumenta durante eventos de maior vazão, o volume dos sedimentos transportados também aumentam durante estes eventos. Sedimentos de menor diâmetro podem ser remobilizados com menor energia comparado a sedimentos mais grossos e quando são mobilizados tendem a permanecer em movimento por mais tempo, eventualmente, se depositando em ambientes de menor velocidade, como remansos fluviais e oceanos.

Portanto, os sedimentos de maior diâmetro tendem a permanecer no leito por mais tempo, enquanto aqueles de menor diâmetro tendem a ser transportados mais frequentemente e em resposta a aumentos

pouco expressivos da velocidade (energia) de fluxo. Desta forma, tende a ocorrer, naturalmente, a seleção de sedimentos com diâmetros maiores no leito fluvial, por insuficiência de energia de fluxo para movê-los a jusante.”

Somando-se ao que foi descrito, nota-se que a taxa de descarga de sedimentos depende também dos regimes fluviais que estão associados às formas de fundo, com impactos diretos nas distintas modalidades de transporte de sedimentos em suspensão e arraste, envolvendo uma relação bilateral entre a resistência ao cisalhamento e as taxas de descargas de sedimentos. No baixo regime, predominam as formas de fundo do tipo dunas e rugas, que levam a maior incidência do transporte de sedimentos por arraste. Já no alto regime, há tendência de predomínio da descarga de sedimentos em suspensão. Esses regimes estão associados às energias específicas do escoamento e, de forma direta, à profundidade da água (que se relaciona ao raio hidráulico) e a declividade longitudinal do rio, como descrito no parágrafo em destaque.

De acordo com a abordagem de SIMONS & RICHARDSON (1961), as distintas variações de regime estão intrinsecamente relacionadas a potência do escoamento, mutando-se a cada variação da aludida potência: cada regime tem uma configuração de fundo diferente. No caso do rio Gualaxo do Norte e no horizonte de um escoamento em trecho de rio com distintas características geomorfológica, cobrindo uma extensão de mais de 100 km, é muito provável que seja de se encontrar variados regimes de escoamento. Assim, é importante avaliar a variação desses regimes em função das características do fluxo e dos sedimentos para o melhor embasamento dos estudos, levando em consideração essas resistências aos escoamentos, sobretudo porque, nos escoamentos com superfície livre predominam as configurações de fundo do tipo dunas e rugas (STRASSER, 2002). As rugas são configurações típicas de materiais finos que geralmente ocorrem em baixas vazões. A concentração de sedimentos em suspensão é relativamente baixa (10 a 200 ppm). A resistência de superfície é elevada “n” (Coeficiente de Manning) variando de 0,018 a 0,035 e os ditames baseados em razões experimentais orientam que nos leitos constituídos de sedimentos de diâmetros da ordem de 0,60 mm predominam as deformações do tipo dunas e rugas, com rugas predominando para leitos constituídos de sedimentos com textura inferior a 0,60 mm (SIMONS & SENTURK, 1992). Relembrando ainda que outra característica relevante no baixo regime é o predomínio da descarga de sedimentos por arraste em detrimento do transporte de sedimento em suspensão. O regime superior condiciona o surgimento de antidunas ou leito plano, com movimento intenso de sedimento em suspensão. A rugosidade de forma passa a ser pouco significativa, predominando a rugosidade superficial. Portanto, recomenda-se a promoção de estudos que permitam avaliar esses regimes para que se possa fornecer elementos mais consubstanciados para a melhor definição sobre a eficácia do *lag layer*.

Além do impacto do regime de escoamento e da granulometria, há também influência da estrutura das camadas de sedimento no leito móvel ou nas camadas expostas à erosão, que vão ter grande impacto na sua resistência ao cisalhamento e, por consequência, à erosão/ressuspensão. A estrutura está relacionada à distribuição das partículas de sedimento ao longo das camadas e em seu interior, bem como a compactação, consolidação e coesão desse material. Somada à estrutura, a consolidação das camadas também está relacionada à pressão a qual está submetida, que depende da profundidade da coluna d’água, bem como da profundidade e peso específico das camadas de sedimentos sobrepostas, e da presença de materiais coesivos ou floculação, propriedade que foi observada no rejeito, mesmo que a textura desse se concentre na faixa de silte. Camadas mais compactas ou coesivas vão apresentar maior resistência à erosão e à difusão do que aquelas mais granulosas ou rarefeitas, já que as forças internas são mais elevadas e a percolação de água no interior dos vazios dos grãos é menor. Da mesma forma, o modo como essa erosão se processa é diferente, sendo laminar e superficial em camadas mais compactas (devendo-se considerar, contudo, efeitos de capilaridade), enquanto naquelas mais rarefeitas pode ser mais profunda e até difusiva. Já para camadas coesivas, pode acontecer grão a grão ou em blocos. Nota-se que, quando se observa predomínio de sedimentos uniformes de frações

grosseiras, a resistência à compactação será maior, enquanto a interação entre as partículas será menor; já as camadas com predomínio de finos ou mesmo bem distribuídas podem se consolidar com mais facilidade. A matéria orgânica também tem efeito notável sobre a estrutura dos solos e sedimentos, e o conhecimento de sua contribuição é importante para verificar como se dá o comportamento de cada camada de sedimento. Ainda, há efeitos de heterogeneidade e anisotropia. Dessa forma, a textura (granulometria) não pode ser considerado individualmente ao se avaliar a propensão de mobilização do leito.

Assim, é também importante poder mensurar o grau de coesão do sedimento estudado. Em primeiro lugar, para se conhecer o material em questão, e, em segundo lugar, pelo fato de que seu comportamento em ambiente natural irá se modificar significativamente de acordo com o esse grau, sobretudo na forma como a sua sedimentação ocorre, e como varia a sua resistência à erosão. Entretanto, em termos de modelagem de transporte, não é tão importante determinar diretamente o grau de coesão, e sim o efeito que isso pode causar nas variáveis que interferem diretamente no transporte, *e.g.*, o efeito da floculação na velocidade de sedimentação ou na resistência ao cisalhamento.

Deve-se diferenciar, também, o *lag layer*, descrito pela autora do estudo avaliado como uma camada de textura mais grosseira retida no leito, após a seleção das partículas finas por efeitos erosivos e difusivos, do efeito de encouraçamento, ou a formação de uma camada protetora, com maior resistência ao cisalhamento / erosão, sobre uma coluna de sedimentos. O primeiro é definido, predominantemente, em função da granulometria, embora o segundo depende de outros processos hidrodinâmicos, hidrossedimentológicos e litológicos. Uma camada de textura grosseira não oferecerá efeitos significativos para o encouraçamento se a energia associada ao escoamento é suficiente para movimentá-la com maior profundidade e frequência, enquanto uma camada de textura mais fina (areia) ou bem distribuída, mas compacta ou até mesmo coesiva, pode ser eficaz, como foi avaliado em MERRITT et al. (2009).

Os próprios autores apresentam definição mais adequada para o encouraçamento, que é:

“Na literatura não existem valores absolutos de granulometria para definir uma camada encouraçada ou pavimentada. No entanto, diversos autores propõem que o termo couraça (armour) deveria ser utilizado para se referir à camada superficial grossa que resiste a vazões de intensidade média (< 10 anos de tempo de retorno), mas se mobiliza em vazões extremas (> 100 anos de tempo de retorno), enquanto o termo pavimento (pavement) deveria ser utilizado para a camada imóvel em vazões de inundação extremas (> 100 anos de tempo de retorno) (BRAY e CHURCH, 1980; PARKER ET al., 1982; ROLLET, 2007; RICHARDS e CLIFFORD, 1991).”

Nota-se que, nessa definição, os outros elementos que atuam no encouraçamento ou na pavimentação, além da granulometria, podem ser contemplados, e está diretamente relacionada ao que se deseja verificar no estudo, isto é, a eficácia do *lag layer* na contenção dos rejeitos depositados no leito do rio.

Acertadamente, foi descrito que processos de baixa frequência e alta intensidade podem mobilizar o *lag layer* ou mesmo a camada de encouraçamento ou pavimentação, com retirada também de material subjacente (no caso, o rejeito), pela grande energia específica associada a esses escoamentos. Entretanto, deve-se contemplar também os efeitos cumulativos de eventos de média intensidade e maior frequência, que podem erodir gradualmente as camadas superficiais encouraçadas (ou não) e impedir a sua consolidação. Nota-se que a erosão e o aumento gradual do transporte de sedimentos por arraste ou suspensão no tempo ocasiona dissipação de energia, que leva a uma redução também gradual da intensidade dos processos erosivos ao longo da duração do evento. Ou seja, ao se manter uma intensidade de energia de escoamento em determinada duração do evento, a taxa da erosão pode

ser decrescente, e não constante. Isso repercute, também, num efeito mais protetivo das camadas superiores quanto à erosão dos sedimentos mais profundos, bem como no aumento aparente do coeficiente de rugosidade da equação de Manning (CHOW, 1988). Já nos eventos de média intensidade, alta frequência e mesma duração, os efeitos cumulativos, ao longo de um tempo igual àquele de recorrência dos eventos de altíssima intensidade, podem até ser superiores, já que a soma da duração daqueles instantes iniciais, quando a intensidade do transporte de sedimentos erodidos ainda é baixa, é maior, e o tempo de reposição de sedimentos com efeito protetivo é menor. Embora possa ser menos esperado, essa hipótese também deve ser contemplada nos estudos, para não se ignorar outros fenômenos ou efeitos que podem atuar sobre a consolidação das camadas de sedimentos.

Em relação ao modelo conceitual, a alteração na classificação estratigráfica pode ser considerada positiva, pois há maior padronização e coerência nos critérios utilizados, em especial a classificação de camada com rejeitos misturada a material grosseiro na própria camada de rejeitos, ao invés do modelo anterior de *lag layer* com rejeitos, confuso e em desfavor da segurança, e a fragmentação do *lag layer* com a inclusão de leito móvel (camada superficial de partículas mais finas (areias), antes *lag layer A*), embora essa mudança tenha sido em desfavor da segurança. Entretanto, essa reclassificação dificultou a comparação com os resultados anteriores, como será esclarecido nos tópicos seguintes, impedindo, em alguns momentos, verificar a evolução das camadas entre as situações observadas antes e após o evento de cheia não monitorado de janeiro de 2020, considerado o mais intenso da série história desde a ruptura da barragem.

Além disso, há pouca clareza na definição do que foi considerado leito móvel, já que afirma ser “camada predominantemente arenosa e mais superficial no leito do rio, com granulometria mais fina que o *lag layer* e passível de remobilização por eventos fluviais mais frequentes que aqueles capazes de remobilizar o *lag layer*.”, sem detalhar quais são esses eventos fluviais mais frequentes, ainda mais ao se considerar que o *lag layer* na maioria dos pontos foi mobilizado em eventos tão frequentes como de recorrência de 2 a 5 anos. Entende-se que ficou classificado como leito móvel todo material menos grosseiro (areias) depositado nas camadas superficiais que não se encaixa na definição de *lag layer* e que não tem a mesma natureza do rejeito. Entretanto, é importante ressaltar que é difícil conceber esta separação na prática, uma vez que o critério estabelecido foi apenas a textura do sedimento. Dessa forma, poderia ser mais prudente seguir o que se relata na campanha D, onde se considerou o leito móvel como parte do Lag Layer, já que essa camada também oferece algum efeito protetivo, uma vez que a erosão ocorre gradualmente ao longo da profundidade; isso teria um impacto negativo, contudo, na uniformidade e homogeneidade da camada. Em relação ao impacto dessa consideração nos modelos analíticos de início do movimento ou de profundidade de remoção, trata-se de limitação do próprio modelo, justificando adotar modelos mais complexos que contemplam a influência de toda a distribuição granulométrica.

Na construção do modelo conceitual, foi informado que “Quanto maior área de drenagem, maiores as vazões naturais do rio.”, e que “Para avaliar o impacto físico potencial da onda de cheia devido ao rompimento da barragem de Fundão, as vazões que ocorreram depois do rompimento foram comparadas com as vazões associadas a diferentes períodos de retorno em diferentes seções dos cursos d’água.” Essas argumentações tem sustentação frágil sob a ótica da dinâmica do escoamento fluvial, sobretudo porque não se deve fazer prognósticos em seções subsequentes do escoamento sem medições recentes com frequências elevadas e sem que se forneçam as informações das vazões de *background*. O rompimento da barragem de Mariana alterou completamente os regimes dos rios do entorno, tornando difícil estabelecer as descrições hidrodinâmicas, sobretudo pelas alterações naturais da dinâmica de escoamento. Além disso, a relação de contribuição das vazões da bacia de contribuição para o curso d’água não depende apenas da área de contribuição da bacia, como também das suas características climáticas (diferentes regimes de precipitação), geológicas, de cobertura de solo, intervenções antrópicas e índices físicos e geomorfológicos.

Observa-se, também, que a retenção de sedimentos em reservatórios provoca mudanças substanciais nos regimes de vazões líquidas e na capacidade de transporte de sedimentos. Os impactos da disposição de sedimentos em reservatórios são perceptíveis tanto nas áreas deste, quanto a montante, quanto a jusante do reservatório, e vem de encontro ao princípio do auto ajustamento dos leitos dos cursos d'água (CARVALHO, 1995). Nesse sentido, à pg. 40 foi informado que:

“Já nos trechos a jusante da barragem de Candonga, houve uma atenuação da velocidade e força do fluxo da onda de rejeitos e materiais arrastados devido à presença da barragem, que promoveu a deposição de parte do volume de rejeitos liberados e outros sólidos carregados pelo escoamento dos rejeitos (GOLDER, 2016a). Dessa forma, nos trechos a jusante da barragem de candonga esse fluxo de rejeitos e materiais carregados pelo seu escoamento provavelmente não teve força suficiente para remover o lag layer original do leito do rio, conforme apresentado acima na discussão de vazões associadas à onda de rejeitos e detritos.”

O texto em pauta é contraditório, sobretudo porque, quando ocorre a deposição de sedimentos em barragens e reservatórios, a tendência de jusante é aumentar o poder erosivo em decorrência do aumento da energia cinética do escoamento e da redução da carga de sedimentos transportada.

Ainda em relação ao modelo conceitual (Figura 6 e Figura 7), foi apresentado por GOLDER (2021):

“Ressalta-se que esse modelo conceitual visa representar condições da estratigrafia do leito mais comuns verificadas com base nos resultados de levantamentos e monitoramentos já realizados e não fornecer uma análise detalhada de especificidades que possam ocorrer ao longo do sistema fluvial analisado. Ressalta-se também que o que se busca com esse modelo conceitual é avaliar o comportamento da estratigrafia do leito em determinadas seções ao longo do tempo e não o transporte de sedimentos entre seções do leito. Dessa forma, não são abordados nesse modelo conceitual os mecanismos que podem causar a alteração da sequência estratigráfica do leito, mas sim a evolução temporal dessa estratigrafia como resultado de diversos mecanismos atuantes na dinâmica de sedimentos.”

A representação descrita se encaixa bem como modelo conceitual para interpretação dos resultados de monitoramento da estratigrafia, mas não para os modelos analíticos de transporte e erosão (início do movimento e profundidade erodida), que é um objetivo do relatório exigido pela Câmara Técnica (CT-GRSA) na Nota Técnica 21/2020. Nota-se que as “especificidades que possam ocorrer ao longo do sistema fluvial” e os mecanismos que alteram a sequência estratigráfica do leito estão intimamente relacionados ao desenvolvimento da estratigrafia e seu entendimento é de fundamental importância para a construção de prognósticos quanto à estabilidade do *lag layer* e sua eficácia na contenção dos rejeitos depositados. Não foi contemplada, também, a contribuição da fração orgânica de sedimentos no modelo conceitual.

Além disso, a formação de um “*lag layer bem desenvolvido (com alto grau de seleção granulométrica, espessura e imbricação) sotoposto a um leito*” não é garantia de imobilização dos resíduos em um longo horizonte temporal, já que é um processo dinâmico e cíclico, de deposição, consolidação, erosão, lavagem etc. A ocorrência de um leito móvel não pode ser considerada apenas após a consolidação do *lag layer*, mas durante todas as etapas, já que são materiais que são constantemente passíveis de apontamento e transportados entre os trechos, com possível aumento após a ruptura, pelas alterações na cobertura do solo e nas características do leito. Ainda, o modelo, principalmente a situação futura, é apenas uma hipótese (central) do estudo, sem comprovação. Os próprios autores afirmam, acertadamente, que:

“Ressalta-se que, conforme mencionado anteriormente, o lag layer apresenta características dinâmicas, sofrendo interferências do meio em que está inserido e, assim como qualquer material presente nos leitos de rios, pode ser transportado dependendo das condições de vazão e do meio sob o qual está inserido. Por isso, este estudo buscará investigar a situação mais atual das camadas de sedimentos do leito fluvial e o comportamento do lag layer frente à diferentes condições hidráulicas.”

Embora o modelo conceitual não tenha contemplado essas diferentes possibilidades de comportamento estratigráfico dos sedimentos com as diferentes condições hidráulicas e hidrológicas.

4.2.2. Amostragem e Estratigrafia

4.2.2.1. Metodologia

Foram realizadas modificações nos métodos de amostragem de sedimentos na campanha E (GOLDER, 2021) das campanhas de monitoramento anteriores; enquanto nessas se utilizou *liner* de 44 mm, naquela foi empregado amostrador de 75 mm de diâmetro com sondagem por *vibracore* ou martelete de impacto e aplicação adicional de pá ($h < 0,3$ m) ou draga Van Veen ($h > 0,3$ m) para coleta dos sedimentos mais grosseiros, com diâmetro representativo superior a 75 mm. As curvas granulométricas foram, então, combinadas pelo método de distribuição de frequências de Fripp & Diplas (1993), quando se utilizou os dois métodos simultaneamente. A autora alegou que essa nova forma de amostragem permitiria representar melhor os sedimentos grosseiros que compõe o *lag layer*, o que é coerente. Embora tenha se relatado sondagem por *vibracore* em profundidades superiores a 1,0 m e *direct push* (marteleto) em profundidades inferiores, as fichas de sondagem indicam predomínio do uso de sondagem por martelete na maior parte dos pontos, mesmo naqueles com profundidade acima de 1,0 m. Ambas as técnicas sofrem com recuperação reduzida (encurtamento de testemunho) para sedimentos aluviais inconsolidados em áreas alagadas, principalmente aqueles mais finos, mas o primeiro é geralmente indicado para amostras deformáveis e apresenta maior recuperação. A capacidade de penetração na coluna de sedimentos foi reduzida em relação às campanhas anteriores, embora ainda representativa do objeto de estudo, assim como a recuperação. Na Nota Técnica CT-GRSA n.º 21/2020, foi recomendado que a amostragem com pá ou draga fosse realizada apenas nos transectos em que a frequência granulométrica seja bimodal, o que é o caso para a maioria dos transectos em que ocorre tanto rejeitos finos e coesivos, quanto material grosseiro do *lag layer*, quanto camada superior móvel com material arenoso.

Nota-se, contudo, que essa mudança nos procedimentos de amostragem impactou bastante os resultados obtidos entre a campanha do documento avaliado e as anteriores, seja nas incertezas (recuperação das amostras) ou na distribuição e frequência granulométrica representada, em aspectos como: distribuição e profundidade das diferentes camadas de sedimentos e rejeito, com efeito na comparação da evolução dessas camadas no tempo e na estimativa do volume de rejeitos depositados; diâmetros representativos de cada camada (com incremento elevado na campanha mais recente), com influência no início do movimento do transporte e na profundidade de remoção no evento de cheia; dentre outros. Dessa forma, torna-se difícil a comparação da campanha avaliada com as anteriores, a avaliação de tendências no tempo e a construção de prognósticos, comprometendo o objetivo do monitoramento. Isso é grave ao se considerar a ausência de campanha de monitoramento durante o evento de cheia dos primeiros meses de 2020, o maior desde a ruptura da barragem, que ocorreu entre as campanhas anteriores e a atual e forneceria informação fundamental para avaliação da estabilidade e evolução do *lag layer* e eficácia do encouraçamento. Assim, com a não realização dessa campanha e essa modificação nos métodos amostrais e no modelo conceitual, pode-se considerar que a série histórica do monitoramento estratigráfico de sedimentos foi comprometida, com dados obtidos em

condições muito diversas. Nota-se, também, que o monitoramento é o instrumento de maior confiabilidade para compreensão dos fenômenos e efeitos que atuam sobre os sedimentos locais, embora muito lento e custoso, de modo que essas perdas podem atrasar em muito a compreensão do cenário estabelecido. Como as incertezas são altas em todos os cenários, sugere-se que se busque uma padronização metodológica em todas as campanhas, para que se possa comparar apenas dados obtidos em situações similares.

O método utilizado para avaliar o encurtamento de testemunho (atribuir que toda a profundidade não recuperada corresponde à camada de rejeitos, nos pontos em que esses ocorrem) está a favor da segurança e de acordo com a situação esperada conceitualmente, já que a camada de rejeitos apresenta plasticidade algumas ordens de grandeza superior às demais e, portanto, sofre mais efeitos de compressão e expansão. Também foi adequado e representativo o uso de amostras simples em cada sondagem ao longo das seções transversais

Em relação à distribuição dos transectos, conforme descrito no tópico 4.1, observa-se, na figura 08 do relatório e em seu apêndice 02, que alguns transectos ficaram distanciados em demasia em relação aos demais, como aqueles do trecho 09 (o maior deles, de 58 km, no médio e baixo Gualaxo do Norte). Apesar de se ter apresentado as coordenadas e arquivos *shapefile*, poder-se-ia ter apresentado tabela exibindo as distâncias entre os transectos que facilite o entendimento, sobretudo porque entre as distâncias de separação podem revelar diferentes manchas de deposição de sedimentos, em virtudes das alterações morfológicas em plantas e em perfil dos compartimentos morfológicos ao longo do curso d'água. Como essas características morfológicas do rio, os regimes fluviais e a distribuição de sedimentos são bastante heterogêneas, pode haver grande perda de informação.

O levantamento de seções topobatimétricas em cada transecto monitorado é essencial para as simulações computacionais, e foi realizado de acordo com métodos consolidados e de alta acurácia. Entretanto, para identificação de eventual movimentação no leito do trecho analisado, faz-se necessária também a realização de batimetrias no sentido longitudinal do curso d'água, em alguns trechos de interesse.

4.2.2.2. Resultados

Segundo GOLDER (2021), no estudo avaliado, algumas variações na espessura da camada de rejeitos de determinados transectos podem ser explicadas como:

“Ainda assim, alguns transectos apresentaram aparente aumento significativo da espessura de rejeito, o que provavelmente está associado um ajuste mais conservador adotado para o encurtamento de testemunhos (seção 5.4; Apêndice 4) do que foi feito nas campanhas anteriores. Este ajuste associou a espessura de testemunho não recuperado integralmente à camada de rejeito, quando esta foi detectada na sondagem. Sendo assim, os aparentes aumentos na espessura de rejeito entre as campanhas de 2019 e 2020 podem estar associados aos ajustes adotados para compensar o encurtamento dos testemunhos, visto que não foram identificados mecanismos físicos que pudesse levar ao aumento dessas espessuras, e as próximas campanhas de monitoramento, nas quais serão aplicados os mesmos métodos de sondagem e ajustes para encurtamento, ajudarão a entender melhor a dinâmica sedimentar das camadas alvo.”

Embora seja de bom tom avaliar as incertezas que atuam sobre os resultados, essas não podem ser usadas como justificativas para a sua interpretação, de forma a não descredibilizar a metodologia adotada (e caso essas incertezas comprometam em demasia os resultados, poder-se-ia revisar a metodologia adotada). Além de indefinição sobre a consistência da metodologia para o levantamento

das informações, atribuir aos “critérios de ajuste de encurtamento de testemunho” a variação das espessuras das camadas de rejeitos é tecnicamente inapropriado. Nesse sentido, o encurtamento da camada de espessura e a hipótese de que esse se relacionada exclusivamente à camada de rejeito são incertezas, mas tem sustentação científica (por ser aquela a camada mais plástica, com algumas ordens de grandeza superior às demais) e foi o método adotado para tratar o problema da baixa recuperação do testemunho. Assim, deve-se adotar, pelo princípio da precaução, que a variação da camada de rejeitos, se for significativa, é real, principalmente quando também haver indicativo de que elas ocorreram nas camadas superiores.

Ainda, o fato de se ter incluído camada de leito móvel arenoso no modelo conceitual não justifica a redução das camadas de *lag layer* como efeito aparente pela mudança nesse modelo, como foi justificado em algumas ocasiões, já que ela apresenta textura diferente daquela que define o *lag layer*. Já quanto ao substrato natural, a incerteza associada à profundidade máxima de penetração do método é mais significativa e pode justificar as variações negativas encontradas, quando não se observa efeito erosivo nas camadas sobrepostas.

Para o trecho 06, foi observado substituição dos sedimentos mais grossos do *lag layer* e aqueles do rejeito residual por frações arenosas do leito móvel na margem direita do transecto T06T02; remobilização de rejeitos à jusante no transecto T06T03; desenvolvimento significativo de *lag layer* no transecto T06T04; desenvolvimento e estabilidade de *lag layer* em alguns pontos do transecto T06T06; e redução das camadas de *lag layer* no T06T08, com flutuação sem tendência definida na camada de rejeito residual.

Já para o trecho 07, notou-se significativa presença de rejeitos nos transectos T07T01 e T07T02 e camada de *lag layer* de até 0,3 m, com redução generalizada na campanha recente (Golder, 2021), associada à remobilização no período chuvoso de 2020.

Para o trecho 08, observou-se redução do *lag layer* e aumento de rejeitos no centro e margem direita do transecto T08T02; *lag layer* de até 1,2 m no T08T05, com redução em relação à campanha A (de 2019). Já nos transectos T08T06 e T08T10 nota-se grande espessura da camada de rejeitos, com relativa estabilidade ao longo das campanhas, e pequena espessura de *lag layer*, com indícios de redução na campanha avaliada, com substituição por leito móvel, com exceção do centro do transecto T08T06, o que pode estar associado às mudanças no modelo conceitual. Os autores (Golder, 2021) demonstraram as características morfológicas e fisiográficas únicas do transecto T08T06, com desaceleração brusca do fluxo após queda d'água e alargamento do canal, com formação de ilha aluvial em barra. Nota-se que essa ilha é mobilizável em eventos de alta energia, como ocorreu com a ruptura da barragem de Fundão, e que vem se recuperando com a deposição do próprio rejeito, embora a cobertura vegetal incipiente e de vegetação invasora resistente com baixa cobertura indique estado de grande degradação. Essas características específicas desse transecto o tornam pouco representativo do modelo conceitual adotado, predominando outros efeitos de sedimentação e retenção.

Ainda, para o trecho 09, percebe-se grande variação nas camadas de interesse no transecto T09T01 (redução do *lag layer*, após tendência crescente nas campanhas anteriores, e aumento da espessura de rejeitos, que pode representar erosão do *lag layer* no evento de cheia e deposição de rejeitos erodidos de montante, ou incertezas amostrais). No transecto T09T03, em que se observava significativa espessura de camada classificada como *lag layer* (variando entre 1,0 m e 1,5 m na margem esquerda nas campanhas de 2019), foi observada forte redução na sua espessura nas margens esquerda e no centro do canal, com aumento na margem direita, que os autores atribuíram a incertezas no posicionamento da sondagem, sem demonstração. Já nos transectos T09T04 e T09T08, em que também se notava significativa presença de *lag layer* (>0,5 m), nota-se aumento na espessura de rejeitos em alguns pontos (em especial na margem direita do último) e redução generalizada do *lag layer*, atingindo espessuras da ordem de 0,3 m, que pode indicar comportamento similar ao descrito para o primeiro transecto do trecho. Para o transecto T09T17 houve o desaparecimento da camada de

rejeito na margem esquerda (presente entre 0,3 m e 0,6 m nas campanhas de 2019) e manutenção ou aumento do *lag layer*, com espessuras significativas. Já no T09T22 houve supressão da camada de *lag layer* (com espessuras entre 0,1 m e 0,9 m) e do rejeito nas três sondagens realizadas e desenvolvimento de leito móvel. Nos transectos T09T37, onde havia significativa presença de *lag layer*, bem como no T09T45, houve grande supressão dessa camada e substituição por leito móvel com textura arenosa, assim como no T09T50, no qual também se observou aumento da espessura de rejeitos.

Já no trecho 10, observou-se flutuação nas camadas de *lag layer* e rejeito no transecto T10T01, com redução do primeiro no centro e margem direita e aumento na margem esquerda, seguido por desenvolvimento de leito móvel com profundidade entre 0,2 m e 1,0 m. No T10T05, foi constatada presença e espessamento de *lag layer* nas margens e supressão no centro. Em geral, a deposição de sedimentos nas margens é facilitada, pelas menores velocidades de escoamento. Nos transectos T10T06 e T10T12 notou-se estabilidade do *lag layer* na margem esquerda e centro, com profundidades de até 1,2 m, e supressão na margem direita, com impressão de serem trechos mais estáveis e com tendência de deposição de sedimentos. Os transectos T10T14 e T10T15 também apresentaram tendência de redução do *lag layer*, assim como nos transectos T10T23 e T10T24, no qual esse foi substituído por leito móvel, embora estes só apresentem dados de duas campanhas e, portanto, são inconclusivos.

Os transectos do trecho 11 (T11T02 e T11T05), que corresponde a trecho de alta energia específica com a formação do Rio Doce, notou-se possível remobilização do *lag layer* e dos rejeitos. Por fim, no único transecto do trecho 12 (T12T01), na região de remanso do reservatório de Candonga, não se constatou a presença de rejeitos ou *lag layer*, apenas leito móvel arenoso, com espessamento para a margem direita. Esse trecho não apresenta uma distribuição representativa que permite avaliar a distribuição dos sedimentos no sentido longitudinal ou se a situação amostrada corresponde à normal.

Em geral, observou-se tendência de redução da coluna de rejeitos nos trechos em que esses foram detectados com mais frequência (6 ao 9), com aumentos detectados em alguns transectos dos trechos 8 e 9. O *lag layer* foi detectado na maioria dos transectos com a presença de rejeitos, em espessuras variáveis, no geral inferiores à de campanhas anteriores, com certa estabilidade no trecho 6 e redução nos demais (para a maior parte dos transectos, já que dados médios não são muito representativos de condições ambientais heterogêneas e causam perda de informações). Embora o trecho 8 seja aquele com a maior concentração de rejeitos, a espessura do *lag layer* é, em geral, inferior aos dos demais trechos, com indícios de remobilização. O trecho 7 foi aquele que apresentou maior tendência aparente de remobilização do *lag layer* e dos rejeitos. Nos trechos 10 a 12, observou-se aparência de remobilização dos sedimentos e rejeitos para jusante. O desenvolvimento de camadas profundas de leito móvel em alguns trechos indica significativa atividade no transporte de sedimentos de leito e a ocorrência de energias elevadas, o que é compatível com as declividades longitudinais informadas (da ordem de 0,1%).

Apenas a análise visual dos transectos não permite avaliar tendências com precisão, sugerindo-se aplicar testes estatísticos não-paramétricos para esse fim, como o teste de Mann-Kendall. A comparação entre as campanhas do período chuvoso de 2019 e do final de 2020, entretanto, é prejudicada pela mudança nos métodos amostrais e no modelo conceitual, bem como por possíveis deslocamentos nos pontos de sondagem, a recuperação limitada do testemunho e menor profundidade de penetração (que permitiria verificar a redução de toda a coluna de sedimentos). Com a ruptura da série histórica justamente em torno do evento de maior precipitação, perde-se informações de fundamental importância para avaliação do *lag layer*.

Cabe ressaltar que as avaliações médias de cada camada do modelo conceitual (por transecto e por trecho) realizadas no tópico 6.1.1.8 do estudo de GOLDER (2021) devem ser tratados com parcimônia e até evitadas, já que o uso de valores de tendência central em amostras com distribuição tão variada e não uniforme incorre em grande perda de informação, podendo levar a conclusões equivocadas. Nota-

se também desencontro entre os métodos inerentes aos dados apresentados na Figura 43 e 44 daquele estudo, dificultando as avaliações e conclusões do perfil estratigráfico nos resultados das campanhas apresentadas.

Embora muito inconclusivos, os dados indicam mobilidade das camadas de rejeito e *lag layer* em eventos de maior energia, como na cheia do verão de 2020, que não corroboram a hipótese do *lag layer* existente nos trechos avaliados como camada de encouraçamento.

4.2.3. Granulometria

Os procedimentos para determinação da granulometria foram descritos no tópico 4.2.2, portanto aqui se avaliará os resultados encontrados. Os dados granulométricos foram apresentados para cada transecto, cada camada e cada ponto ao longo da seção transversal, o que é de relevância para verificar padrões e alterações nos sentidos longitudinal, transversal e vertical. Eles também foram comparados com dados de dois transectos de brancos, não afetados pelo evento de ruptura (T06T01 e T09T53).

Como destacado no tópico 4.2.2, a mudança nos métodos amostrais causou a ruptura da série histórica e impede a comparação dos resultados da análise granulométrica da campanha do estudo avaliado com aqueles das campanhas anteriores, como destacado pela própria GOLDER (2021):

“Em virtude das adaptações metodológicas de amostragem, com adoção de amostrador de maior diâmetro junto a amostragem com pá e draga para o lag layer, e adicionalmente a subdivisão das classes granulométricas de diâmetro acima de 2 mm, a comparação dos dados granulométricos com campanhas anteriores não é apresentada no presente relatório. A amostragem com pá e draga realizada para o lag layer naturalmente resultou em maiores proporções de frações grossas, especialmente para granulometrias das frações pedregulho e pedra de mão, o que poderia resultar em comparações e interpretações equivocadas de que as camadas de lag layer evoluíram para composição geral mais grossa. As comparações entre campanhas serão retomadas com os resultados das próximas campanhas, nas quais os métodos de amostragem atuais serão mantidos, podendo-se avaliar de forma adequada a evolução das composições granulométricas.”

Nesse sentido, é improvável que a composição granulométrica sofra tamanha alteração significa num intervalo de tempo de um ano para outro. Isso poderia acontecer se uma alteração significativa ocorresse na bacia no mesmo período, ou por consolidação ou por floculação do material que venha a se depositar no leito do curso. Essa mudança, no entanto, altera os parâmetros relacionados à distribuição granulométrica de entrada dos modelos analíticos, como os diâmetros representativos D50 e D90, por maior representação das frações mais grossas, e, por consequência, resulta em menor mobilidade avaliada.

No sentido transversal, foi possível observar tendência de aumento na contribuição percentual de frações mais finas nas margens do que no centro, o que já é esperado frente às diferenças de velocidade da corrente entre esses pontos. Entretanto, nota-se que essa tendência foi mais preponderante nos pontos brancos e para o substrato natural, enquanto nos pontos com presença de *lag layer* e rejeitos, ambas as camadas apresentaram certa homogeneidade transversal. Em um evento de cheia, a largura da seção inundada aumenta, assim como as profundidades das margens do leito regular, de modo que as velocidades e energias tendem a ser bem maiores do que durante o escoamento regular, com diferenças ainda maiores nas margens (em relação ao escoamento regular) que no centro do canal, e se observa consequente redução no valor aparente do coeficiente de atrito/rugosidade (CHOW, 1998). Além disso, adotou-se modelos unidimensionais para as simulações hidrodinâmicas e para os modelos de início de movimento, que não apresentam detalhamento suficiente para descrever o gradiente de

velocidade no sentido transversal, de modo que as pequenas diferenças notadas na classificação granulométrica pouco contribuem para o modelo.

Nos pontos de branco, nota-se que a média das frações granulométricas do substrato natural apresentou maior predomínio das frações mais grossas (acima de areia grossa) do que o *lag layer* nos pontos de centro, e o oposto nas margens, o que pode indicar alterações no regime hidrodinâmico ou na característica dos sedimentos aportados da bacia, já que, nesse caso, ambas as camadas são originadas da bacia e sem influência do evento de lançamento. Contudo, apenas duas seções com três pontos de sondagem não são suficientes para verificar essa tendência ou representar adequadamente a natureza dos sedimentos naturais dos rios locais, ainda mais ao se considerar a grande heterogeneidade geomorfológica e de cobertura do solo.

Nos valores médios de todos os pontos, a camada denominada leito móvel apresentou predomínio da fração areia, com 25% de areia fina, 20% de areia média e 18% de areia grossa. Os trechos de maior energia, como o T08, T09 e T10, apresentaram aumento das frações mais grossas, com redução nos trechos de jusante, em área de remanso.

Já para o *lag layer*, observou-se predomínio de frações grossas (entre 40% e 60% acima de pedregulho), com certa homogeneidade lateral e longitudinal, e nenhuma diferença estatisticamente significativa dos pontos de branco (que, no entanto, são pouco representativos). Além disso, nota-se que, no geral, há médias de frações finas superiores a 10%. Em relação a esses dados, GOLDER (2021) afirmou que:

“Estas duas características demonstram que o lag layer apresenta, de forma geral, comportamento homogêneo em termos de distribuição granulométrica tanto longitudinalmente ao longo dos trechos investigados do sistema fluvial, quanto lateralmente nos transectos, corroborando seu caráter de camada de encouraçamento, com maior seleção e transporte de finos resultando em concentração de sedimentos dominados por frações de pedregulho e, conseqüentemente, remobilizados em menor frequência.”

Entretanto, é difícil atrelar homogeneidade nas características das camadas avaliadas no tocante à textura do material, considerando-se que os trechos tem grande extensão e se observa grande heterogeneidade nas características geomorfológicas e de cobertura da bacia hidrográfica, o que alterará as características granulométricas e geomorfológicas nos trechos do curso d'água, no tocante às seções e a textura do material depositado. Ainda, como já foi apresentado, apenas a análise granulométrica não fornece informações suficiente para se descrever a mobilidade dos sedimentos presentes, já que existem outros fatores igualmente importantes, com os regimes de escoamento, a descarga sólida de montante e a estrutura do material (grau de compactação/consolidação, coesão etc.). Portanto, essa argumentação em destaque tem sustentação frágil, e não está compatível com os resultados observados no monitoramento estratigráfico e dos modelos analíticos.

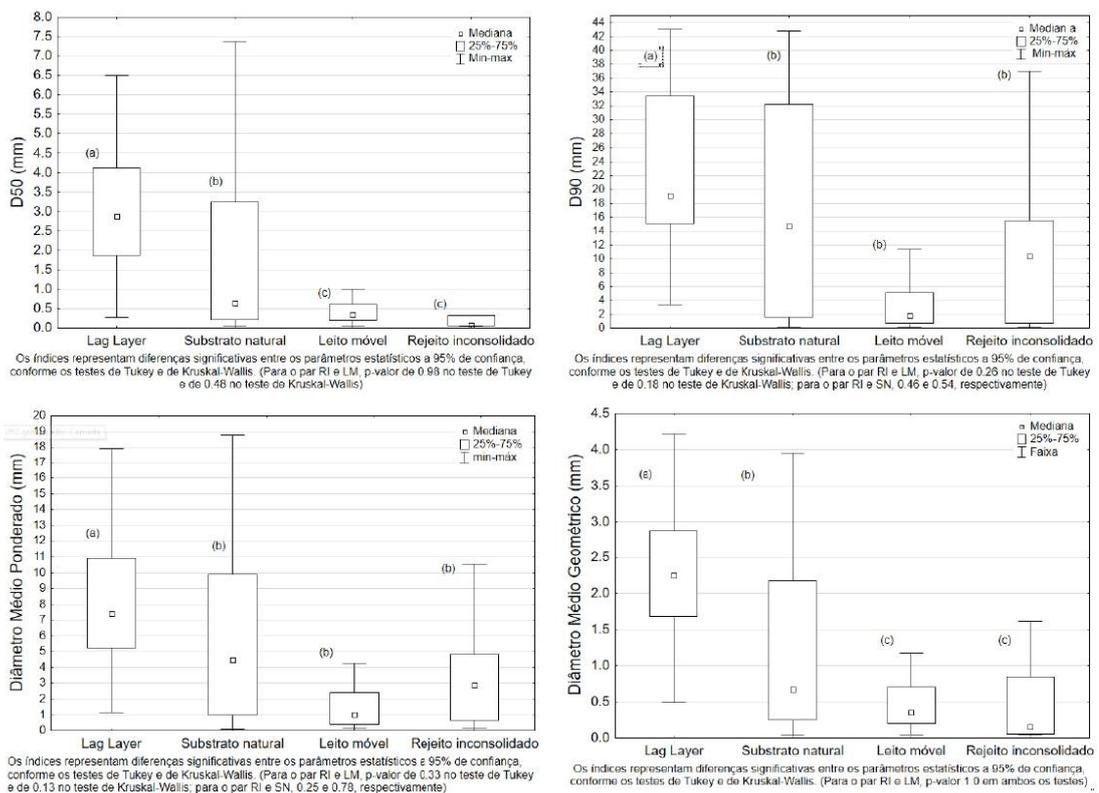
Na camada de rejeitos, foi observado predomínio de frações finas e muito finas: silte (média em 35%) e areias finas, com até 65,5% abaixo de areia fina). Nos pontos de jusante, observou-se significativa presença de pedregulho (entre 20% e 30%), principalmente no centro do canal, o que corrobora a hipótese da origem desse material pela assimilação do sedimento natural erodido durante a onda de cheia do evento de ruptura. A presença desse material altera a estrutura da camada e pode ter impacto positivo (se há grande segregação ou se afeta a coesão) ou negativo (se é bem distribuído e homogeneizado) para a ressuspensão do material, o que deve ser investigado com mais cautela.

O substrato natural também apresentou predomínio de frações mais grossas e alta variabilidade longitudinal, o que é normal em bacias de áreas grandes e heterogêneas.

Os gráficos das figuras 46 a 49 do relatório de GOLDER (2021) não são elucidativos com relação às análises granulométricas, em virtude de que são apresentadas apenas as porcentagens das categorias

dos elementos texturais dos dados levantados, deixando dúvidas com relação aos diâmetros característicos dos materiais que compõem o leito dos cursos d'água objeto das análises granulométricas. Nesse sentido, torna-se difícil fazer uma avaliação precisa dos resultados granulométricos apresentados, devido à amplitude elevada dos intervalos utilizados nas classes granulométricas usuais, como as apresentadas na Tabela 16. Por exemplo: quando o texto se refere a "Nota-se a relativa homogeneidade da camada lag layer ao longo dos trechos analisados nos quais sua presença foi descrita, com composições médias acima de 40% para frações pedregulho" se 90% do total citado (40%) apresentar diâmetro da ordem de 2mm, a avaliação estaria similar para uma definição de areia muito grossa, o que poderia alterar a avaliação da análise com relação a estabilidade do Lag Layer em função das características hidrodinâmicas do regime de escoamento predominante. Portanto, é precipitado falar em homogeneidade da camada Lag Layer em função dos dados apresentados. Assim sendo, é interessante apresentar os dados dos diâmetros da análise granulométrica, das curvas de acumulação ou de permanência e de uma estatística descritiva mínima.

Por conta disso, os autores do presente parecer consultaram os dados brutos apresentados no apêndice 07 e realizaram a análise dos diâmetros representativos com o uso de ferramentas de estatística descritiva para construir os gráficos apresentados na Figura 9.



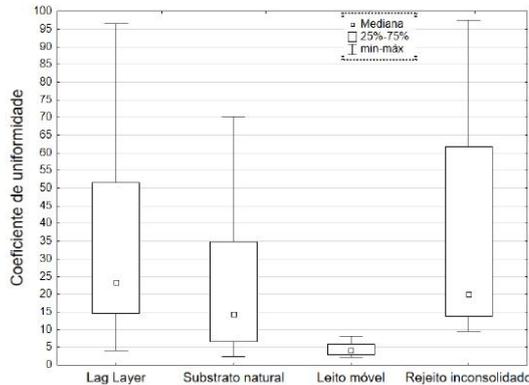


Figura 9. Diagramas de caixa (box plot) para a distribuição granulométrica dos sedimentos em cada camada do modelo conceitual, para os seguintes parâmetros: A) D50; B) D90; C) Diâmetro Médio Ponderado; D) Diâmetro Médio Geométrico; E) Coeficiente de uniformidade. Elaborados pelos autores do presente relatório com os dados brutos apresentados. ERRATA: Onde está escrito teste de Kruskal-Wallis, de fato é o teste *post hoc* de comparações múltiplas das médias classificadas, aplicável para esse teste.

Em relação ao coeficiente de uniformidade (Figura 9-e), que é importante para avaliar o quão bem distribuídos são os diâmetros dos grãos das amostras de solo e sedimentos (uniforme ³quando inferior a 5, moderadamente entre 5 e 15 e desuniforme acima de 15), observa-se que, das 200 amostras, 95 são desuniformes, 56 moderadamente e apenas 49 apresentam uniformidade. Isso impacta no predomínio de distribuições não uniformes e até não unimodais. Nota-se, na Figura 9-e, que o *lag layer* e o rejeito inconsolidado apresentam até 75% das amostras com má uniformidade, e nenhuma uniforme, enquanto o leito móvel exibe uniformidade moderada e homogênea (baixo desvio padrão e mínima amplitude) para todas as amostras. Essa desuniformidade quer dizer, principalmente, que há a contribuição de uma ampla faixa de frações granulométricas, e não o predomínio de determinada classe granulométrica em relação às demais, como se busca demonstrar para o *lag layer*. A principal implicação desse fato é a dificuldade de se utilizar diâmetros representativos como o D50 e o D90 para a descrição das amostras. Para o rejeito inconsolidado, isso pode estar relacionado à mistura dos sedimentos de granulometria grosseira erodidos do leito durante a passagem da onda de cheia originada do evento de ruptura, e o modelo conceitual anterior, embora equivocado ao classificar essa camada como *lag layer* misturado a rejeitos, pode estar mais adequado ao separá-la da camada de rejeitos com granulometria exclusivamente fina. Poder-se-ia, assim, classificar com camada de rejeitos A e B, por exemplo, com maior uniformidade textural. A mesma análise poderia ser realizada para as camadas de *lag layer* e de substrato natural. Normalmente o que se observam para as amostras de leito móvel é que elas são moderadamente uniformes, por serem compostas de sedimentos mais associados ao tipo e cobertura do solo e presentes e aos regimes de escoamento, sedimentação e transporte que ocorrem nos trechos.

Essa análise pode ser reforçada pela comparação com os diagramas de caixa para os diâmetros representativos (D50, D90, diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico). Em geral, recomenda-se o diâmetro médio geométrico como o mais representativo para frações com distribuição não uniforme e diferentes da normal. Nota-se que as amostras da camada de rejeito inconsolidado apresentam ótima homogeneidade em relação ao diâmetro mediano (de 50% passante, ou D50) (blocos mais achatados), com baixo desvio padrão e amplitude e na faixa de areia média a silte (<0,5 mm), mas grande variação para o diâmetro D90, que também é bastante heterogêneo nas

³ Entende-se como uniforme o predomínio de determinado diâmetro em toda a amostra, resultando em uma curva granulométrica mais verticalizada.

outras camadas, o que indica que esse é muito pouco representativo e que a heterogeneidade se concentra nas frações mais grossas. Já para o *lag layer* observa-se grande variação entre as amostras para todos os diâmetros utilizados, o que não corrobora a hipótese de que ela apresenta comportamento homogêneo longitudinal e transversalmente, embora a distribuição das classes atribuídas a cada faixa de diâmetro tenha dado essa impressão. O diâmetro médio geométrico, de fato, é o que melhor representa as características texturais médias das camadas analisadas. Nota-se que, apesar do predomínio na fração de pedregulho, a tendência das amostras se encontra próxima ao limite inferior dessa classe, com mediana em 2,2 mm e 75% das amostras abaixo de 3,0 mm, com impacto no comportamento dessa camada diante das diferentes condições hidrodinâmicas. Além disso, há grande heterogeneidade entre as amostras de cada camada, o que dificulta o tratamento delas como camadas de propriedades similares ao longo de todo o curso d'água, e essa variabilidade (baixa uniformidade e heterogeneidade) indica a limitação de se utilizar apenas a granulometria como critério de definição das camadas e para simular os efeitos dos processos erosivos.

Entretanto, ao se comparar estatisticamente as distribuições de cada diâmetro representativo entre as amostras (por testes *post hoc* de Tukey (para teste ANOVA-F, paramétrico) e de comparações múltiplas das medidas classificadas (para teste de Kruskal-Wallis, não-paramétrico), nota-se que o *lag layer* difere significativamente das outras camadas independentemente do diâmetro utilizado. Desse modo, nota-se que a diferenciação dessa camada por critérios granulométricos é corroborada; embora haja grande variação textural entre as diferentes amostras de *lag layer*, ela raramente se confunde com as demais camadas. Já em relação ao leito móvel e o rejeito inconsolidado, esses apresentam distribuição similar (sem diferenças estatisticamente significantes) para todos os diâmetros representativos, de modo que se torna difícil diferenciá-las com base apenas na textura e podendo haver influência do rejeito ressuspensionado no leito móvel de jusante, embora o leito móvel seja mais uniforme (concentrado na fração de areia fina e média). Já ao se utilizar o D90 e o diâmetro médio ponderado (DMP), menos representativos, essas camadas também se confundem com o substrato natural.

4.2.4. Análises químicas

Foi relatado que as maiores medianas de concentração em cada camada foram Ni no leito móvel, Ba, Co, Mn e Hg no *lag layer*, Fe, P, Cr, Cu e Zn no rejeito inconsolidado e Al, As, Pb e V no substrato natural. Também se relatou que *“Para maior parte dos parâmetros avaliados a diferença entre as medianas de concentrações não excedeu 25% na comparação entre a camada com concentração mais elevada e a camada com a segunda concentração mais elevada, o que não sugere uma associação específica entre o elemento e a camada.”*, com exceção de bário (33% maior) e mercúrio (35%) no *lag layer* e ferro (40%) e fósforo (32%) no rejeito, mas que esses dois últimos ainda se encontram abaixo dos *baseline* locais. A principal distinção notada na concentração de metais nos rejeitos foi a maior homogeneidade dos valores, em relação ao daqueles sedimentos contaminados por fontes geogênicas ou antropogênicas distintas.

Por fim, foi apresentado que:

“As camadas com resultados acima dos valores usados como referência de baseline foram:

o Leito móvel: Al, Ba, Pb, Co, Cu, Hg e V.

o Lag layer: Ba, Cu e Hg.

o Rejeito: Hg.

o Substrato natural: Ba, Co, Cu e Hg.”

“As camadas com resultados acima dos níveis de classificação da Resolução CONAMA nº 454/2012 foram:

o Leito móvel: para valores maiores que o nível 1 – As, Cu, Cr, Hg e Ni. Para valores maiores que o nível 2 – Hg.

o Lag layer: para valores maiores que o nível 1 – As, Cr e Hg. Para valores maiores que o nível 2 – Hg.

o Rejeito: apenas Hg maior que os níveis 1 e 2.

o Substrato natural: para valores maiores que o nível 1 – As, Cu, Cr e Hg. Para valores maiores que o nível 2 – As e Hg.”

“Nota-se também que todos os valores de Hg acima dos valores referência se encontram no segmento do rio Gualaxo do Norte. Baseado no fato de que camadas mais superficiais de sedimentação natural do sistema fluvial (leito móvel e lag layer) apresentaram maior quantidade de valores acima dos limites usados como referência, incluindo no ponto branco T06T01 não afetado pelo rompimento da barragem de Fundão, é possível que as concentrações de Hg tenham sido sendo afetadas por processos antrópicos posteriores ao rompimento, como a atividade garimpeira de ouro. Este tipo de atividade ocorre historicamente na região investigada, com indícios de atividade vigente durante as últimas campanhas de monitoramento. Essa atividade também é uma provável causa de valores de baseline para Hg e As que podem exceder o nível 2 da Resolução CONAMA nº 454/2012 (Tabela 11, Seção 5.6.1). Para o Hg, os valores de baseline estão acima do nível 2 para o rio Gualaxo do Norte, enquanto para o As, os valores de baseline estão acima do nível 2 para os rios Carmo e Doce nas áreas investigadas”

A presença de valores de mercúrio mais elevados que os *baseline* (apesar das inconsistências que essa comparação pode trazer) pode indicar que os sedimentos atuais tem maior afinidade pelo metal, já que não há evidência de que a atividade garimpeira de ouro tenha aumentado desde a ruptura da barragem. Além disso, a maior concentração de alguns metais pesados no *lag layer* e no leito móvel em relação aos rejeitos deve ser investigada, já que essas camadas estão mais expostas e podem oferecer maior biodisponibilidade e, portanto, maiores riscos. Nota-se, ainda, concentração anormalmente baixa de manganês nos resultados do rejeito, bem inferior às camadas vizinhas, considerando que a geologia local e, em especial, os minérios extraídos (originado da rocha itabirito), apresentam concentrações elevadas desse metal, indesejado no beneficiamento e exploração econômica do minério (ganga), o que se esperaria refletir na composição do rejeito. Caso as camadas adjacentes ao rejeito inconsolidado sejam enriquecidas em relação aos metais avaliados por fontes geogênicas ou antropogênicas, era de se esperar maior similaridade na distribuição dos valores com os dos rejeitos, que provém da mesma matriz geológica e da mesma atividade, com exceções daqueles relacionados ao garimpo de ouro (como o mercúrio e o arsênio).

Ressalta-se que a comparação com a Resolução CONAMA 454/2012 é inoportuna, já que a caracterização química estabelecida por ela é para orientar a destinação ambientalmente correta do material dragado, além de auxiliar “os órgãos do SISNAMA na identificação e gestão ambiental das fontes, pontuais e difusas de poluição hídrica, para a redução e a prevenção da poluição dos sedimentos.” Além disso, a comparação com os *baselines* sofre com as incertezas descritas no próprio relatório e já destacados e, como os sedimentos são um efetivo testemunho de contaminação ambiental pretérita e a área sofre com significativa influência histórica de atividades de mineração, pode ser difícil distinguir as fontes que causam a anomalia. Como os efeitos ambientais podem ocorrer independente da fonte (à exceção de efeitos na biodisponibilidade na matriz), os valores encontrados

para os diferentes metais só podem ser avaliados mediante a definição de níveis seguros por meio de análises de risco ecotoxicológico, que fornecerá informações mais úteis ao gerenciamento ambiental dos sedimentos/rejeitos em cada trecho. Nesse sentido, é importante também conhecer a disponibilidade dos contaminantes detectados para os ecossistemas, que é diferente da disponibilidade após extração por digestão ácida da fase sólida. Caso se detecte a presença de risco em alguns trechos, é importante que o material presente nesses receba o devido tratamento (como remoção e disposição em local ambientalmente adequado), independente da fonte, da comparação com valores de *baseline* e da capacidade de capeamento do *lag layer* (a menos que esse reduza a biodisponibilidade, caso em que não haveria risco detectado). Ainda, é importante comparar o perfil químico dos resultados das análises do rejeito inconsolidado com aquele do material existente na barragem de Fundão, já que não se espera alterações significativas dessa “assinatura química”.

Em relação ao que se deseja verificar nesse relatório (eficácia do *lag layer* no isolamento dos rejeitos), é importante verificar como a assinatura química das camadas se altera com o tempo, nos trechos em que são estáveis, e como isso está relacionado aos níveis aceitáveis com base no risco máximo permitido. Isso é importante para prever processos de mistura interna, difusão ascendente de contaminantes ou recontaminação [como as apresentadas nos resultados de MERRITT et al. (2009)] que podem aumentar a disponibilidade dos contaminantes mesmo sem a exposição dos rejeitos. Ainda, pode-se realizar diretamente estudos de ecotoxicidade com cada camada de sedimento, e verificar como as comunidades bentônicas se desenvolvem ao longo do tempo, em comparação aos trechos não impactados (se existirem), já que são um importante indicativo da saúde desse ecossistema.

4.2.5. Monitoramento e cálculo de descargas líquidas e sólidas e análise de correlação entre descarga líquida, turbidez e sólidos suspensos totais

4.2.5.1. Metodologia

Quanto ao monitoramento para descargas líquidas e sólidas, foi informado que:

“O monitoramento da descarga líquida e sólida foi conduzido pela LABMAR Análises e Soluções Ambientais (LABMAR) entre setembro e novembro de 2020 em 8 dos 33 transectos selecionados entre os trechos 6 e 11. Estes pontos foram definidos como pontos representativos das condições nos trechos monitorados e apresentados junto à CT. Os transectos amostrados foram: T06T04, T07T01, T08T10, T09T37, T09T50, T09T53, T10T01 e T10T14. Para cada transecto foram planejadas amostragens semanais ao longo de seis semanas.

Os trabalhos incluíram medições de turbidez, vazão, velocidade média, velocidade máxima, profundidade, largura e nível d’água. A medição de turbidez foi realizada em campo com auxílio de um turbidímetro portátil. Devido aos danos observados nas réguas linimétricas a medição de nível d’água foi limitada aos pontos e campanhas nos quais as mesmas puderam ser utilizadas, quando as réguas estavam danificadas estes resultados não puderam ser coletados. As medições de descarga líquida foram realizadas com auxílio de um Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) modelo RiverSurveyor M9 juntamente com um Differential Global Positioning System (DGPS) e um tripé com uma base RTK para garantir a precisão.”

“Durante o monitoramento foram coletadas amostras de água para determinação da concentração de sólidos suspensos totais ao longo de toda a seção do rio utilizando garrafa amostradora. Sedimentos de fundo (ou leito)

foram amostrados utilizando draga tipo busca-fundo (e.g. Petersen ou Van Veen).”

É importante destacar que a coleta de amostra de água com garrafa coletora tem papel diferente dos processos de amostragens da descarga de sedimentos em suspensão na vertical de amostragem. Quando se deseja medir a descarga de sedimentos transportada em suspensão é importante o uso de amostradores apropriados, sobretudo porque esses amostradores normalmente apresentam formato hidrodinâmico que alinham a coleta da mistura água e sedimentos à dinâmica dos escoamentos. Os mais usuais são aqueles das séries US-DH e US-D; como por exemplo: US-DH-48; US-DH-59; US-D-43; US-D-49; US-P-46; US-P-61; USP-63; US-D-77 (CARVALHO, 1995). Todos esses amostradores têm particularidades como adaptação dos bicos intercambiáveis de amostragens à velocidade média do escoamento e a especificação do equipamento alinhada à profundidade do curso d'água onde serão feitas as medições, para que se tenha a opção de calcular a velocidade de movimentação do amostrador na vertical para a escolha do bico adequado. O procedimento de amostragem é bem diferente da coleta de amostra de água para análise de qualidade de água. Para a determinação da descarga de sedimentos em suspensão é recomendado a amostragem por integração em diferentes verticais na seção transversal. Isso vislumbra a possibilidade de se ter a média da concentração em cada vertical amostrada ou a concentração média da seção juntando a coleta das amostras isoladas em cada vertical em uma única amostra representativa da concentração média na seção. O primeiro método é mais apropriado para a definição da descarga de sedimentos em suspensão, pela técnica de igual incremento de largura, que consiste em subdividir a seção do curso d'água em verticais separadas por distâncias iguais e, para cada vertical, associa-se uma área de contribuição para o estabelecimento da vazão líquida que, após multiplicada pela concentração de sedimentos integrada na vertical, chega-se à descarga sólida em suspensão naquela área de contribuição. O somatório das descargas parciais em cada área de contribuição configura a descarga total em suspensão na seção transversal de interesse (CARVALHO, 1995). Não foram apresentadas evidências metodológicas que tragam transparência para se avaliar com segurança os procedimentos empregados para o estabelecimento da descarga por arraste.

O número de transectos monitorados foi baixo e com um espaçamento alto, o que torna difícil a realização de comparações entre o aporte e deposição de sedimentos entre os trechos, como foi realizado (por exemplo, a identificação de trechos de erosão e de deposição), além de ignorar outros fenômenos que podem contribuir para o resultado encontrado. Além disso, o período de monitoramento (seis semanas entre setembro e novembro) corresponde à transição do ano hidrológico (com início em outubro), mas apenas no início do período de chuvas, em que as vazões mais elevadas ainda não foram atingidas, com possibilidade de valores próximos às mínimas anuais nas primeiras semanas desse período (do final do ano hidrológico). Uma campanha mais representativa do período de cheia poderia ocorrer entre dezembro e março. Nesse sentido, nota-se que também não foi realizada avaliação meteorológica das condições de cada microbacia no período de monitoramento, que informariam como os meses monitorados se desviaram da normal, principalmente quanto ao regime de precipitação. Também seria importante conhecer a altura de precipitação nas 24h anteriores à cada campanha de monitoramento semanal. Em nenhum momento foram detalhados os procedimentos usados para as medições da velocidade e das descargas líquidas e sólidas, como o sensor usado para a medição da turbidez e os procedimentos de calibração com a descarga de sedimentos em suspensão (se houve), o que permitiria avaliar a qualidade dos dados gerados.

Quanto aos cálculos de estimativa de descarga sólida, nota-se que o método de cálculo foi aquele de Colby & Hembree (1955) que é uma forma modificada do método de Einstein (1942-1950). Também não foi descrito como foi realizada a separação entre a descarga sólida por arraste do leito e a descarga em suspensão, necessitando-se da complementação da metodologia para que se possa melhorar a avaliação dos resultados obtidos.

Sobre os métodos de cálculo da descarga de sedimento, citou-se no capítulo dois do presente parecer referências bibliográficas que levam a uma série de métodos de determinação de descarga de sedimentos, deixando o livre arbítrio para o interessado escolher aquele que melhor lhe convier alinhando a aplicabilidade do método escolhido à experiência do operador em harmonizar o resultado analítico com os propósitos práticos da necessidade da engenharia, sobretudo porque cada método carrega particularidades sublimar nas suas definições. Autores consagrados na literatura são sagazes no tocante a aplicação dos métodos disponíveis nos procedimentos envolvendo dinâmica do movimento de sedimentos. PEMBERTON & LARA (1984), ao obterem distintos valores para o diâmetro imóvel para se promover uma camada encouraçamento estimados por diferentes métodos (1. Meyer-Peter, Muller (*bedload transport equation*); 2. *Competent bottom velocity*; 3. *Lane's tractive force theory*; 4. *Shields diagram*; 5. *Yang incipient motion*) foram categóricos ao ponderarem que muitos dos processos descritos são empiricamente desenvolvidos em estudos de laboratório com número limitado de dados medidos em campo para a verificação dos resultados, e, devido à complexidade envolvida na definição dos parâmetros que são utilizados nas equações e a variabilidade nos resultados obtidos, sugeriram o procedimento de tentar diversos métodos e a partir de experiências baseadas em decisões de engenharia buscar selecionar a técnica mais apropriada e resultados mais aplicáveis ao problema. SIMONS & SENTURK (1992) ao se pronunciarem sobre as distintas equações para calcular a descarga de sedimentos nos escoamentos com superfície livre, ponderam que o transporte de sedimentos de bacias hidrográficas e em sistemas fluviais naturais depende de inúmeras variáveis inter-relacionadas. Conclui-se que não existe uma equação universalmente aplicável a todas as condições. Com base em extensa experiência de campo, os autores apresentam as seguintes recomendações para consideração em análises de transporte de sedimentos:

1. Estudar a geomorfologia do sistema para conhecer melhor os processos físicos e as mudanças que nele ocorreram e possam ocorrer ao longo do tempo. Da mesma forma, é importante avaliar impactos e mudanças futuras que possam afetar as condições geomorfológicas nas bacias e no interior dos cursos d'águas.
2. Investigar as características da bacia hidrográfica e do sistema de drenagem para obter uma avaliação realista da produção específica de sedimentos na bacia de contribuição do trecho de rio estudado.
3. Examinar as equações de transporte disponíveis e determinar quais são mais adequadas para cada caso específico.
4. Calcular as taxas de transporte usando as relações selecionadas e sempre comparar os resultados obtidos pelos métodos com dados medidos em campo.
5. Selecionar a relação que melhor concordar com as observações de campo e, se houver dados suficientes disponíveis, refinar essa relação para que seja específica do local.

Já os cálculos de correlação entre parâmetros de descarga sólida e líquida foi realizado pela Análise de Correlação de Pearson, com resultados significativos para p-valor < 0,05 (95% de confiança). Embora esse método seja amplamente utilizado em análises de correlação, pode não ser o mais adequado para as variáveis estudadas, já que exige, dentre outras suposições, que essas variáveis tenham distribuição normal, relação linear e independências de observações, além de ser fortemente afetada pela presença de *outliers*. Assim, é mais adequado para observações controladas, o que é difícil de se obter em campo, para evitar assumir conclusões espúrias. Como o número de observações foi pequeno, com erros amostrais nos parâmetros relacionados às descargas sólidas e fortes incertezas, a aplicação desse método de análise estatística tende a apresentar resultados também incertos, mesmo que matematicamente se obtenha um bom ajuste dos dados. Além disso, a relação entre as variáveis pode ser monotônica, e métodos não paramétricos de análise de correlação podem ser mais indicados. Ainda, as pequenas variações de descarga captadas nesse curto período de monitoramento e em dias com baixa precipitação tornam as análises de correlação pouco significativas das condições locais. Dessa forma,

a análise de correlação entre as variáveis se apresenta com grandes incertezas e pouco contribui para os objetivos práticos do estudo ou para calibração de modelos.

4.2.5.2. Resultados

Como destacado pela GOLDER (2021):

“Em T06T04 a média da vazão nas seis campanhas foi de 1,7 m³/s enquanto em T10T14 a vazão média foi de 20,5 m³/s. Destaca-se que a variabilidade entre a vazão mínima e a máxima observa para cada transecto foi muito pequena. Esta pequena variabilidade é explicada pela estabilidade nas condições meteorológicas na bacia do rio Doce durante o curto espaço de tempo em que foram realizadas as medições. As coletas foram realizadas ao fim da estação seca e o início da estação chuvosa, foram registradas chuvas mais volumosas a partir da segunda quinzena de outubro (FUNDAÇÃO RENOVA, 2020). De acordo com a Agência Nacional de Águas (ANA), para a região, o período seco se estende dos meses de junho a setembro, enquanto o chuvoso é de outubro a março, com pico em dezembro. Os meses de outubro e novembro são considerados meses de transição entre os períodos.”

Nota-se que as vazões medidas foram pontuais e em períodos de seca ou transição, que representam muito pouco o regime hidrológico local. O monitoramento de descargas líquidas deveria se dar por estações fluviométricas convencionais ou, de preferência, com telemetria, no ano todo, com frequências compatíveis a esses métodos. Ainda, busca-se estabelecer análises de correlação entre variáveis medidas nessas condições e com dados obtidos de diferentes trechos (a correlação mais cabível é aquela exclusiva para cada trecho, ao longo de diferentes campanhas de medição, como também foi feito). A turbidez, por exemplo, embora tenda a aumentar em períodos chuvosos, foi medida em período de condições meteorológicas estáveis no final da seca, com mínima variação de vazão, e evidentemente não sofreu o efeito significativo dessa variação. Isso também justifica os valores baixos e médios registrados para esse parâmetro. A série construída, por tanto, tem baixo valor analítico.

Os valores de velocidade (entre 0,48 m/s e 1,83 m/s) e profundidade indicam rios pouco profundos (entre 0,3 m e 1,4 m) e de corrente rápida em todos os trechos. Não foram fornecidos dados de geometria da calha do rio, como a largura média nos trechos ou seções monitoradas, nem informações a respeito do perfil vertical de velocidades (a erosão atua de acordo com a velocidade junto ao leito, não a velocidade média da coluna d'água, que é influenciada pelas formas de fundo). Nota-se que, em muitos trechos, a profundidade da coluna de sedimentos depositados desde o evento de ruptura é superior até mesmo à profundidade da água no período monitorado. O aumento dessas camadas pode estar associado ao grande aporte da bacia hidrográfica e a consolidação dos sedimentos nas camadas mais profundas.

As profundidades baixas também podem gerar menores pressões hidrostáticas e conseqüente menor tendência de compactação do sedimento de fundo, em suas camadas mais superficiais, e as altas velocidades tendem a favorecer o transporte de leito ou de lavagem. Apesar das velocidades serem altas, os valores indicam o predomínio das forças de gravidade (campo externo) sobre as forças de inércia, ou seja, indica que ocorre no baixo regime (subcrítico) durante o período de vazões regulares, o que favorece o transporte por arraste e a formação de rugas e dunas. Como as vazões extremas são de até duas ordens de magnitude superiores às medidas e a declividade é acentuada (da ordem de 0,001 m/m), espera-se que esse regime pode se alterar nos eventos de cheia extrema.

Em relação aos dados de descarga sólida, nota-se que não há clareza metodológica para se avaliar o modo como os resultados foram obtidos. O Método de Einstein modificado por Colby & Hembree

requer, além da concentração de sedimentos em suspensão, a informação da velocidade de cisalhamento, inerente a resistência de superfície devida ao grão de sedimento; e a apresentação da velocidade de queda, não fornecida no estudo. Além disso, requer o cálculo separado da descarga sólida por fracionamento da amostra, como foi realizado, mas há muitas lacunas em aberto com relação a metodologia que permita entender o detalhamento do cálculo da descarga de sedimentos do material do leito, separando-a em descarga por arraste e em suspensão. Uma vez que o método de Colby & Hembree (1955) requer o cálculo da concentração, é de se esperar que não tenha sido usado os dados de turbidez com essa finalidade em virtude das razões apresentadas no capítulo dois deste parecer.

Como se viu nas discussões trazidas numa série de trabalhos apresentados no capítulo dois deste parecer a eficácia da correlação entre concentração de sedimentos e a turbidez fica comprometida pelas seguintes condições:

- O levantamento de dados com turbidez é altamente impactado pela textura do material e sua eficácia não é bem avaliada especialmente quando predomina no transporte material com textura de areia
- A turbidez normalmente é medida num ponto específico do escoamento.
- Para a obtenção dos dados de turbidez é requerida a calibração criteriosa in situ do turbidímetro para se obter alguma correlação com a concentração.
- O monitoramento da turbidez não promove a varredura de toda a seção transversal do curso d'água
- A concentração de sedimentos varia sobremaneira com a turbulência e com a textura do material.

Por todas essas ponderações julga-se prematuro orientar as medições da concentração de sedimento em suspensão através de informações de turbidez, requerendo a necessidade de adaptações para os próximos monitoramentos nos trechos contemplados no relatório que está sendo analisado.

A grande variabilidade detectada entre os transectos indicam que há baixa definição espacial, ou seja, pequena representatividade (oito transectos em 100 km), necessitando monitorar um número maior de seções. Por esse mesmo motivo, as observações a respeito de intervalos entre os trechos monitorados em que houve deposição ou erosão de sedimentos de fundo é pouco coerente (*“Decréscimos na carga total de um transecto para outro à jusante indicam deposição de material, ao passo que acréscimos indicam entrada de material ao sistema, seja por processos erosivos ou aporte de afluentes.”*), pois podem existir outros fatores atuando que não foram devidamente identificados (diluição, aportes laterais etc.), não havendo dados suficientes para fazer essas afirmações.

Foi informado, também, que:

“Nos trechos 6, 7 e 8 houve larga contribuição de sedimentos de tamanho de grão superior à 2,0 mm. A partir do trecho 9 há maior mistura de diferentes classes e variabilidade ao longo das campanhas, o que sugere mobilidade e/ou heterogeneidade do material de fundo.”

“Foi documentada a presença de rejeitos, ainda que em pequenos volumes, em T08T06, localizado entre T07T01 e T08T10 e, também, em T09T01 (Seção 6.1.1), imediatamente à jusante de T08T10. Portanto, a presença de rejeitos sem cobertura pode ter influência neste processo e a redução na descarga sólida em suspensão entre T08T10 e T09T50 sugere a existência de deposição de uma mistura de sedimentos naturais e rejeitos (Tabela 26).”

Embora haja limitações nos dados para atestar essas afirmações, como já colocado, percebe-se que é mais uma linha de evidência a favor da mobilização e transporte de sedimentos do *lag layer* e rejeito *inconsolidado*.

Ainda, foi destacado que:

“A descarga sólida de leito de T09T53 foi a mais elevada dentre os transectos avaliados, com máximo de até 146,57 t/dia. Este resultado é explicado por dois fatores, primeiramente a presença de maiores velocidades médias em T09T53 e o predomínio de sedimentos na fração arenosa, sobretudo em comparação com T10T01 e T10T14 que apresentam, por vezes, predomínio de frações mais grosseiras. Devido à utilização do DCom frequência os resultados de descarga sólida de leito foram zerados ou muito baixos, especialmente em amostras com elevado teor de sedimentos grosseiros (i.e. >2 mm), seja em áreas mais à montante ou à jusante. Para os trechos do rio Gualaxo do Norte (i.e. T6, T7, T8 e T9) isso indica a baixa mobilidade dos sedimentos de leito depositados acima dos rejeitos oriundos da barragem de Fundão.”

Essa afirmação é de pouca sustentação, já que a descarga foi medida no baixo regime, em período de estiagem leve; não houve medição adequada da descarga de leito; os trechos foram pouco representativos; e não está de acordo com os resultados da evolução da estratigrafia e dos modelos analíticos.

Nota-se que em muitos transectos houve predomínio da descarga por arraste do leito, na média, o que é esperado pelas condições de baixa energia específica (regime subcrítico), e é sugestivo pensar na necessidade de maior ênfase também no monitoramento da descarga de sedimentos por arraste do leito empregando-se metodologias claras e procedimentos específicos.

Aumentando a frequência do monitoramento da descarga líquida (por meio de estações fluviométricas, de preferência) e comparando-as com a série sintética, é possível se avaliar melhor a descarga de sedimentos transportada e seus impactos nos volumes armazenados. Em virtude dos resultados das comparações de vazões, ter-se-á mais elementos para avaliar melhor a eficiência do lag layer e das demais variáveis relacionadas a vazão de escoamento.

4.2.6. Estimativa de volume de rejeito

A estimativa do volume de rejeitos foi realizada por três métodos distintos, conforme GOLDER (2021):

“Nos métodos 1 e 2 os volumes foram calculados multiplicando as espessuras médias de rejeitos e lag layer em um transecto pela sua área de influência. No método 1, utilizado em Worley (2020), as espessuras das camadas do leito foram definidas através de dados de monitoramento das campanhas de 2019 e 2020 (total de 34 transectos) e extrapolação das espessuras para os demais transectos que foram monitorados durante a elaboração dos Planos de Manejo de Rejeitos dos trechos 6 a 11 mas que não foram incluídos nos monitoramentos de 2019 e 2020 (dos 103 transectos monitorados no PMR menos 34 transectos do monitoramento de 2019 e 2020, resultando em 69 transectos). Para a extrapolação foram utilizados como referência dados de espessura levantados durante a elaboração dos Planos de Manejo de Rejeitos (campanha zero) e as variações de espessuras verificadas nos transectos monitorados em 2019 e 2020 em comparação com a campanha zero. A principal diferença do método 2 em relação ao método 1 é que as espessuras das camadas do leito foram baseadas apenas em dados de monitoramento das campanhas de 2019 e 2020 e as espessuras para os transectos não monitorados foram obtidas através de extrapolação de dados dos transectos

imediatamente a montante e a jusante que foram monitorados na campanha em questão. Ou seja, não foram feitas extrapolações entre campanhas.”

“No método 3 o volume de rejeitos foi calculado utilizando abordagem similar à apresentada nos métodos 1 e 2, porém adicionando um ajuste baseado em critérios granulométricos, conforme apresentado em Worley (2020). Para esse ajuste considerou-se que sedimentos com tamanho de partícula <0,2 mm presentes nas camadas de rejeito e nas camadas superiores consistiriam em rejeitos, independente da camada na qual está presente (e.g. lag layer). Sendo assim, trata-se de um método mais conservador em relação à estimativa do volume rejeitos, à medida que sedimentos naturais do rio certamente apresentam alguma fração <0,2 mm.”

O cálculo do volume por intervalos é legítimo e aparenta ser a alternativa que se teve frente à ausência de uma base de dados mais consistente, mas revela apenas cenários que carregam consigo incertezas intrínsecas ao processo.

Em relação aos resultados, GOLDER (2021) apresentou que:

“Pelo Método 1, entre as campanhas A-D (2019) e a Campanha E (2020) observa-se diminuição geral do volume de lag layer em todos os trechos, com redução total de aproximadamente 1,3 milhões de m³, passando de 2,7 milhões de m³ para 1,4 milhões de m³. Entretanto, ressalta-se que uma parcela da redução desse volume (cerca de 58%, ou 0,8 milhões de m³) é atribuída à nova definição de leito móvel, não atribuída nas campanhas A à D, que foi contabilizada como lag layer nas mesmas. Para o rejeito, entre as campanhas de 2019 e 2020 verificou-se uma diminuição total para os trechos 6 ao 12 de aproximadamente 70 mil m³, passando de 406 mil m³ para 336 mil m³.

Pelo Método 2, entre as campanhas de 2019 e 2020 foi estimada uma redução de 1,5 milhões de m³ no volume de lag layer, passando de um total de 2,4 milhões de m³ para 900 mil m³. Para essa redução é válida a mesma observação acerca da nova discriminação da camada de leito móvel, anteriormente atribuída ao volume do lag layer. Para o volume de rejeito, foi estimada uma redução de aproximadamente 132 mil m³, passando de 757 mil para 625 mil m³. Este método resultou em maiores volumes de rejeito por atribuir aos transectos não monitorados a média da espessura de camada entre os transectos monitorados que o limitam à montante e jusante.”

Novamente, não se deve atribuir a variação no lag layer exclusivamente à mudança no modelo conceitual, como a inclusão da camada de leito móvel, já que a granulometria que define essas duas definições é completamente diferente; se esse for o caso, demonstra-se uma limitação de utilizar a granulometria para a definição das camadas. Ainda assim, os 42% de redução que não podem ser atribuídos a essa mudança indicam uma significativa remobilização do lag layer, ainda mais ao se considerar que no intervalo entre as quatro campanhas anteriores e a atual houve uma série de desenvolvimentos (chuvas intensas, possível nova deposição de sedimentos grosseiros após a remoção dos antigos etc.).

Para os rejeitos, também se observou uma redução no total estimado no sistema, mesmo com as correções de ajuste de testemunho (motivo pelo qual foi atribuído o aumento nos trechos 08 e 09), com grande redução principalmente nos trechos 10 e 11. A redução no volume de rejeitos pelo método 3 também foi próxima à calculada pelos demais, no valor de 110 mil m³, embora o volume de rejeitos remanescentes estimado por esse método seja muito maior para todas as campanhas. Seria interessante apresentar os resultados também em relação às estimativas iniciais e ao volume total de rejeitos

lançados no sistema após o evento de ruptura, que forneceria uma ideia da importância desses trechos na retenção dos rejeitos lançados.

Nota-se, novamente, que foram perdidas as informações do período mais chuvoso (jan/2020), e então rompida a série histórica com novo modelo conceitual e métodos amostrais, o que dificultou ainda mais a comparação temporal, que já era prejudicada pelo baixo período de avaliação (dois a três anos). Deve-se considerar, assim, o princípio da precaução: se há incerteza científica no que aconteceu, adota-se a hipótese mais a favor da natureza / segurança. Nesse caso, de que a redução do *lag layer* e do rejeito consolidado não é pelo método amostral, mas pela remobilização.

4.2.7. Estudos hidráulicos e hidrológicos

Estes estudos foram realizados para definir os parâmetros de entradas dos modelos analíticos de transporte de sedimentos, sendo de importância fundamental para tanto. Foram utilizados os dados disponíveis, isto é, levantamento topográfico por meio de sensoriamento remoto com sensor ativo a laser (LIDAR), levantamentos topobatimétricos das 33 seções monitoradas, bases hidrográficas otocodificadas da Bacia do Rio Doce e registro de quatro estações fluviométricas da ANA:

- Uma no Rio Gualaxo do Norte, entre os transectos T09T37 e T09T45: 563370000 (Fazenda Ocidente);
- Duas no Rio do Carmo: 56535000 (Acaiaca) e 56335001 (Acaiaca Jusante), a montante da foz do Rio Gualaxo do Norte;
- Uma no Rio Piranga, a montante da foz no Rio do Carmo / Doce: 56110005 (Ponte Nova Jusante).

As vazões de referências e os hidrogramas dessas estações foram regionalizados para os pontos de referência pelo método das áreas. Foram construídas duas séries sintéticas, na confluência do Rio Gualaxo do Norte com o Rio do Carmo (Série Sintética 1) e do Rio do Carmo com o Rio Piranga (Série Sintética 2), pela soma dos hidrogramas regionalizados para cada rio, nos pontos logo a jusante da confluência. Os métodos utilizados são de referência e amplamente utilizados em estudos hidrológicos, sendo suficientes para preencher a lacuna de dados primários.

Avaliou-se a distribuição de probabilidades que melhor se ajusta à série de vazões máximas anuais para cada estação e série sintética, conforme recomendação do SEAF (Sistema Especialista em Análise de Frequência de Eventos Hidrológicos Máximos Anuais), com valores altos de confiança (89% a 98,8%), e se obteve as vazões máximas para cada tempo de recorrência simulado (2, 5, 10, 25, 50 e 100 anos). Os métodos também são validados pela experiência e os resultados gerados podem ser considerados de boa qualidade. Entretanto, deve-se considerar que tanto o evento de ruptura da barragem do Fundão, que alterou as características geomorfológicas e de superfície dos trechos afetados, e um provável cenário de mudanças climáticas afeta desfavoravelmente a confiabilidade da série histórica para estimar eventos futuros, já que se altera as condições hidrológicas e hidrodinâmicas. Contudo, não há outro método disponível mais recomendável para avaliar esse cenário de altas incertezas. Deve-se questionar, assim, não só os métodos utilizados para determinação das vazões máximas, mas a relevância dos tempos de recorrência simulados frente à magnitude dos impactos esperados, de modo que, para o gerenciamento de rejeitos nos trechos de interesse, sugere-se utilizar as vazões máximas para tempos de recorrência mais elevados (> 100 anos), de forma a avaliar também a persistência desses impactos.

Para a regionalização das vazões das séries de referência (estações fluviométricas e séries sintéticas) para cada transecto avaliado, utilizou-se os métodos *Index Flood* no Rio Gualaxo do Norte, que é mais indicado para grandes áreas de drenagem, com distribuições heterogêneas de precipitação e cobertura do solo, e o métodos das áreas para os rios do Carmo e Doce, onde foi notada distribuição homogênea

de precipitações anuais médias. As vazões médias diárias foram convertidas em vazões máximas instantâneas pela aplicação do coeficiente de Fuller. Novamente, os métodos foram aplicados adequadamente, nas condições recomendadas para seu uso.

Os parâmetros hidráulicos e de geometria (velocidade da água, largura no NA máximo, profundidade máxima e média) foram obtidos para as vazões máximas em cada tempo de recorrência avaliado por meio de simulação hidrodinâmica no HEC-RAS, no regime permanente e gradualmente variado com essas vazões máximas.

Embora os parâmetros de rugosidade (coeficiente de Manning) tenham sido extrapolados da bibliografia específica, como é usual, pela impraticabilidade e não acurácia das medições diretas, os valores utilizados para cada classe de cobertura do solo (leito do rio, áreas urbanas, pastagens, área de vegetação densa e muito densa) estão insatisfatórios. Isso ocorre porque os valores selecionados para vegetação densa e muito densa estão muito menores que aqueles de áreas urbanas (um quinto e um quarto, respectivamente), enquanto, no geral, aproximam-se dele ou mesmo o superam [como pode ser conferido em CHOW (1988) e USACE (2016)]. Além disso, os valores definidos para o leito do rio não consideram a distribuição de grande quantidade de sedimentos e rejeitos (que alteram a rugosidade aparente), o regime de escoamento, o próprio transporte de sedimentos, as variações de direção, curvatura e declividade e a presença de vegetação, dentre outros fatores de influência, como apresentado em CHOW (1988), não devendo ser adotado valor único para toda a extensão dos rios modelados. Nos estudos futuros, sugere-se a segregação em trechos homogêneos e a aplicação de métodos como o proposto por COWAN (1956) para a estimativa desse parâmetro para o leito do rio, no qual apresenta grande sensibilidade a esse parâmetro. Na planície de inundação, pode-se considerar valores homogêneos para cada classe de cobertura do solo, já que há menor sensibilidade. Contudo, como os modelos analíticos para os quais esses parâmetros foram definidos são bastantes simples, o estudo hidráulico realizado pode ser considerado satisfatório, já que os erros esperados desse são menores do que aqueles dos modelos de transporte de sedimentos (início do movimento e profundidade de remoção).

4.2.8. Métodos analíticos para a definição da mobilidade do grão

4.2.8.1. Metodologia

Para avaliar a efetividade da *lag layer*, foram aplicados métodos analíticos para determinar o estado de mobilidade do grão (início do movimento, ou o maior diâmetro mobilizável por vazão igual a de cada tempo de retorno considerado) e a profundidade de remoção de sedimentos do leito do rio, em cada transecto monitorado.

No primeiro caso, utilizou-se método baseado no diagrama de mobilidade de Yalin & Karahan (1979), que é uma modificação do diagrama de Shields (1936) e faz uso da relação entre o número de Reynolds do grão e o parâmetro de mobilidade de Shields, associado à curva de suspensão de BOSE & DEY (2013). O primeiro método permite verificar se determinado diâmetro de sedimento se encontra imóvel (abaixo de uma curva de imobilidade) ou móvel (acima da mesma), enquanto o segundo permite distinguir entre a carga de leito (entre as curvas de imobilidade e de suspensão) e a carga em suspensão (acima dessa). O tempo de retorno impactou, principalmente, no parâmetro raio hidráulico do canal “h”, aproximado por sua profundidade média, já que cada vazão considerada impactaria em um valor diferente para esse parâmetro. Os estudos foram realizados com os diâmetros D50 e D90, mas, como referido no subtópico sobre o levantamento granulométrico (4.2.3) esse último pode não ser representativo dos sedimentos locais, já que a curva granulométrica não é uniformemente distribuída, podendo levar a superestimativas em desfavor da segurança pelo impacto de diâmetros extremos, ainda mais ao se considerar os métodos amostrais utilizados na sondagem. Um parâmetro mais representativo pode ser o diâmetro geométrico.

Em desacordo com o que foi afirmado na Nota Técnica CT-GRSA n.º 21/2020, os autores utilizaram os parâmetros de entrada do parâmetro de mobilidade de Shields corretamente, já que o peso específico “ γ_s ” corresponde, de fato, ao peso específico do grão (seco), com valor próximo a 25.500 N/m³, como pode ser conferido em Shields (1936), e não ao peso específico do sedimento submerso (~15.700 N/m³), conforme destacado na Nota Técnica (embora esse seja de fato o parâmetro utilizado na interpretação física da equação, já que o termo presente no denominador, isto é, “ $\gamma_s - \gamma$ ”, corresponde ao peso específico do sedimento submerso na forma explícita, mas não o valor de “ γ_s ”).

Os autores ainda afirmam que:

“Diversos estudos demonstram que esta linha possui um contínuo de transição e, portanto, não deve ser vista como um limiar universal de movimento e repouso das partículas (e.g., Zhang et al., 2017). Ambas as curvas foram obtidas empiricamente pelos autores (Yalin e Karahan, 1979 e Bose e Dey, 2013) e não possuem uma equação que as regem.”

Como destacado, ressalta-se que as curvas foram obtidas empiricamente, para rios em certos regimes e com determinadas características de morfologia e cobertura, bem como em condições de escoamento uniforme e permanente, que são distintas daquelas encontradas nos trechos do rio de estudo. Entretanto, são amplamente difundidas e empregadas na literatura e, apesar das altas incertezas, podem ser empregadas como uma primeira estimativa do início de movimento. Também desconsideraram diversos elementos importantes que atuam na estabilidade ou movimento daquela camada de sedimentos, como a sua estrutura e coesão, bem como a descarga sólida aportada de montante. Assim, está, no geral, a favor da segurança, mas pode não representar bem a condição real encontrada naqueles trechos. Também se nota que os métodos não são sensíveis à duração do evento, apenas a sua intensidade, embora aquela seja de maior relevância na estimativa da profundidade de remoção do que ao início do movimento.

A teoria de Yalin & Karahan (1979) difere daqueles de Shields de 1936 por promover a redução dos valores do parâmetro adimensional relativos à tensão crítica (Θ_c) para os mesmos valores do número de Reynolds do grão (R^*), especialmente nas regiões do escoamento turbulento hidraulicamente rugoso. Na região de transição do turbulento hidraulicamente liso para o rugoso os valores da tensão crítica (Θ_c) tendem a se aproximar em um e em outro método para o mesmo valor do número de Reynolds do grão. Assim, de acordo com a teoria de Yalin & Karahan (1979), o critério das condições de escoamento turbulento hidraulicamente rugoso muda. Segundo a teoria de Shields (1936) o valor é de 0,06 para o parâmetro de tensão crítica Θ_c quando é o R^* superior a 400. Já para a teoria de Yalin & Karahan (1979) o limite da tensão crítica se estabiliza em 0,045 que se caracteriza o escoamento turbulento hidraulicamente rugoso devido ao Reynolds relativo ao grão (R^*) correspondente aos valores acima de 70. Por tudo isso, os valores do diâmetro estável (DI) tendem a ser mais elevado mantendo-se as condições de escoamento quando calculados pelo diagrama de Shields modificado por Yalin & Karahan (1979). Desse modo, espera-se que para as mesmas condições de escoamento e material do leito, o diagrama de Shields na transição do escoamento turbulento hidraulicamente liso e no escoamento turbulento hidraulicamente rugoso vai se sobrepor ao diagrama de Yalin & Karahan (1979).

Para exemplificar nota-se, que na condição de escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, o diâmetro estável (DE) calculado pelo diagrama modificado de Yalin & Karahan (1979) ficaria pelo menos 30% maior do que aquele calculado pelo tradicional diagrama de Shields de 1936, mantendo os parâmetros de entrada no modelo que calcula a tensão crítica por um ou por outro ábaco.

Os estudos de BOSE & DAY (2013) suplementam estudos anteriores e atualiza a teoria de início do movimento baseada na teoria de probabilidade e remoção, complementando os estudos desenvolvidos por Cheng & Chiew em 1999, os quais, se apoderando das teorias já propagadas por Einstein em 1942,

trouxeram o conceito de probabilidade assumindo que uma partícula é colocado em suspensão quando as flutuações na velocidade turbulenta excedem a velocidade de queda terminal da partícula de sedimentos no decorrer das oscilações turbulentas no topo da camada do leito. Assim, usando a distribuição gaussiana para as flutuações de velocidade turbulenta na vertical, eles determinaram a probabilidade total (P_s) de uma partícula entrar em suspensão. Pesquisando valores adequados da probabilidade total, eles obtiveram curvas dos parâmetros adimensionais de Shields para acoplar a esta teoria os conceitos de probabilidade aos critérios de início de transportes tradicionalmente utilizado. Portanto, os autores (Cheng & Chiew) desenvolveram uma função de probabilidade baseada numa lei normal de distribuição, de simples aplicação, mas que carregam uma carga de dependência expressiva das características do material transportado, sobretudo porque, apesar de fácil apresentação e simples reprodução, os resultados analíticos para a probabilidade global [denominada de “ P_s ” na publicação de BOSE & DAY, (2013)] são altamente dependentes da velocidade de sedimentação e do desvio padrão da amostra e do coeficiente de sustentação da partícula. O estudo de BOSE & DAY (2013) ajustou a probabilidade global de remoção do método de Cheng & Chiew e incluiu a modificação na teoria de Yalin & Karahan (1979), promovendo as seguintes principais mudanças: alterou o termo da função adimensional para a tensão crítica de Shields, substituindo o diâmetro do material do leito no cálculo da tensão crítica por um diâmetro adimensional, calculado em função da velocidade de sedimentação do material. O passo subsequente foi traçar a curva de Yalin & Karahan (1979) incluindo as modificações com a inclusão da teoria de probabilidade.

Destarte, é importante destacar o seguinte: a teoria é interessante e o modo de reproduzi-la no relatório ora em discussão não permite uma avaliação das condições de contorno que intrinsecamente está associada a definição da probabilidade de remoção, porque é necessário ter clareza para quais condições de turbulência de escoamento os valores da probabilidade global foram aplicados. Por ser emanada de estudos baseados naquele de Shields, é possível que não se tenha tanta diferença entre os valores do diâmetro estável calculado com o método de BOSE & DAY (2013) e com o método de Shields de 1936. Essas dúvidas persistem porque durante a metodologia não se tem clareza dos procedimentos operacionais que permitem uma melhor visualização das condições para quais limites a metodologia foi empregada. Por exemplo, no artigo de BOSE & DAY (2013), algumas observações merecem destaque: na primeira delas a curva foi estabelecida com a condição de que o valor de probabilidade 0,05 representa o limiar da passagem do transporte por arraste para o transporte em suspensão. Outro detalhe a se observar é que o método também revela as condições que sinalizam o domínio do transporte por arraste em relação àquele em suspensão a partir de valores padrão do coeficiente de sustentação. Segundo os autores, a faixa de coeficiente de sustentação de 0,12-0,2 abrangeram a maior faixa de comprovação de que o transporte por arraste de sedimentos ocorre dentro desse intervalo. Assim, os pesquisadores alegam que este é também um critério para se estabelecer a separação do transporte de sedimentos por arraste daquele em suspensão. Uma outra constatação rápida visualizável na figura onde se apresenta a curva de BOSE & DAY (2013) e a de Yalin & Karahan (1979) é a de que a curva dos primeiros autores fica acima da curva do segundo autor, sinalizando portanto que os diâmetros calculados usando o diagrama BOSE & DAY (2013) irão se aproximar daqueles calculados pelo critério de Shields, uma vez que a curva de Shields também fica acima da curva de Yalin & Karahan (1979) e ainda estarão mais susceptíveis ao deslocamento do que aqueles estimados pela teoria de Yalin & Karahan (1979).

A reflexão que se faz é a de que a alternância na metodologia mais confunde do que contribui para a ratificação da camada *lag layer* e sua efetividade para estabilizar o rejeito. Outra reflexão necessária é a de que o rejeito, especialmente, tal como se definiu pelos vieses da análise da estratigrafia e textura do solo, possa também, pelo menos em parte, está susceptível ao transporte por arraste. Portanto, é importante considerar não apenas a ocorrência do transporte em suspensão, mas também o transporte por arraste do leito. No relatório não se tem nenhuma evidência de se ter sido considerado o transporte do rejeito na camada do leito, mas essa é uma hipótese que não se deve desprezar em virtude da

variabilidade da dinâmica do escoamento e do princípio do auto ajustamento das condições naturais de escoamento dos rios, ora em análise, e das variações morfológicas inevitáveis pela exposição das variações de precipitações no decurso dos subsequentes ciclos hidrológicos que ainda estarão expostos os mais de 100 km particulares ao trecho dos estudos.

4.2.8.2. Resultados

Em relação aos resultados, GOLDER (2021) apresentou:

“De forma geral, para cada TR observa-se uma tendência de migração dos valores na direção sudeste do diagrama, ou seja, para condições de maior estabilidade desde a Campanha 0 até a presente Campanha E. Partículas do lag layer antes concentradas completamente na região de carga em suspensão, estão tendendo a migrar para condições de carga de leito ou imobilidade. Esta evolução pode tanto representar: (i) um reflexo das melhorias aplicadas nos métodos de amostragem do lag layer, com maior eficiência de amostragem de frações mais grossas pela combinação dos métodos de testemunho de 75 mm e pá ou draga e, consequentemente, maiores valores de D90 e D50 para o lag layer (como visto na Tabela 34 apresentada anteriormente), aumentando sua estabilidade frente às vazões calculadas; e (ii) aumento real da estabilidade do lag layer formado após o rompimento da barragem de Fundão ao longo dos anos, com transporte de finos e granulometria predominantemente mais grossa e estável frente às vazões calculadas.”

As mudanças na amostragem do *lag layer* implicaram em curvas menos uniformes, que tornaram os diâmetros D90 (principalmente) e D50 menos representativos e, por haver comprometimento da série histórica, deve-se tomar muito cuidado ao se comparar com as campanhas anteriores, já que os dados não foram levantados nas mesmas condições. Dessa forma, não há elementos para afirmar que há tendência de migração dos valores na direção da carga de leito e da imobilidade, ainda mais sem tratamento estatístico no nível adequado de significância.

Ainda nesse sentido, nota-se que, para o D50 (mais representativo), os resultados das campanhas anteriores (2017, 2018 e 2019) apresentavam 100% das amostras do *lag layer* em movimento e em suspensão. Na campanha do estudo avaliado (2020), foi observado 88% das partículas em suspensão para um tempo de recorrência de apenas 2 anos, e 96% para tempos superiores, com o restante como carga de leito. Os valores de D50 obtidos nas campanhas anteriores foram, no geral, de até uma ordem de grandeza menores, por impacto das modificações nos métodos de amostragem. Nesse sentido, não é possível afirmar que houve de fato redução significativa na mobilidade dos sedimentos do *lag layer* ao longo do tempo, nem que esse atua como encouraçamento, já que esse efeito requer resistência à erosão para tempos de retorno tão pequenos (<10 anos), pela definição apresentada pela própria GOLDER (2021).

Para o D90, que pode ser excessivo pelo método de amostragem adotado (com amostras menos uniformes), observa-se que 8% das 200 amostras recaíram na faixa de transporte em suspensão, 80% em carga de leito e 12% como sedimento imóvel, enquanto nas campanhas anteriores observou-se transição de 86% a 23% no transporte em suspensão e 14% para 71% no transporte por arraste. Não se observou padrão de mudança entre os diâmetros D90 das campanhas anteriores com a atual, mesmo com a metodologia de amostragem por pá ou draga, que captura partículas de dimensões superiores àquelas capturadas nas campanhas anteriores, o que indica que a mudança metodológica apenas resultou em curvas granulométricas menos uniformes, mais distribuídas para o *lag layer*, mas não necessariamente capturou partículas de maior diâmetro. Não há diferenças significativas com o

aumento do tempo de recorrência do evento considerado, de modo que a energia necessária para mobilizar o *lag layer* pode estar sendo atingida mesmo com eventos de menor intensidade

Em desacordo com as alegações de GOLDER (2021), os resultados não permitem atestar que há aumento na estabilidade do *lag layer*, pelos motivos já apresentados. Além disso, indicam forte tendência de mobilidade do *lag layer*, o que, mesmo para transportes em curtas distâncias, pode influenciar na exposição dos rejeitos sotopostos à ressuspensão. Não se espera que haja tendência de maior estabilidade do *lag layer* ao longo de um intervalo tão curto de tempo, ao se considerar apenas a textura, no tangente ao início do movimento, já que essa não tende a se alterar porque a origem dos sedimentos é a mesma; outros processos de consolidação que influenciariam positivamente nesse sentido não estão sendo contemplados no modelo. Deve-se ressaltar, no entanto, que os métodos adotados são conservadores, pouco acurados, calibrados em condições específicas de escoamento e desconsideram outros fatores que podem atuar na resistência à erosão, como a estrutura e coesividade das camadas estratigráficas.

Ainda nesse sentido, foi afirmado por GOLDER (2021):

“[...] À medida que os tempos de recorrência de vazão aumentam, o percentual de transectos em estado imóvel e como carga de leito tende a diminuir, enquanto o percentual em estado de mobilidade como carga em suspensão tende a aumentar ligeiramente [...] Este comportamento sugere que o estado de mobilidade do lag layer varia predominantemente entre a condição de mobilidade como carga do leito e a inabilidade, com maiores vazões implicando em mobilidade predominante como carga de leito, i.e., com menor potencial de remobilização a longas distâncias. Este é um comportamento compatível com uma camada predominantemente formada por pedregulhos (> 2 mm), dificilmente transportada como sedimento em suspensão e afetada por eventos mais extremos.”

Em relação à primeira afirmação, observa-se que este é um comportamento esperado: à medida em que a dinâmica do escoamento aumenta, vão se alterando as configurações de fundo, em função de que a cada regime de escoamento se tem um caso particular de descargas de sedimento, impactada também pela interação entre as resistências ao escoamento devido a superfície (rugosidade do sedimento) e pela resistência de forma (devidas as distintas configurações de fundo que se formam com a evolução da dinâmica do escoamento). No baixo regime predomina a descargas por arraste e a resistência de forma é mais incisiva. No regime superior o transporte em suspensão é majoritário e a resistência de superfície é a que predomina [SIMONS & RICHARDSON, 1961]. No modelo de transporte de sedimentos de VAN RIJN (1984) o parâmetro de transporte é bem elucidativo desta perspectiva. Pela ausência de métodos que minimamente apresentem a previsão das formas de fundo no relatório a se desenvolver nos cursos d'água em debate, assimila-se uma dificuldade a mais para avaliar a eficiência do *Lag layer*, sobretudo porque o aumento do transporte em suspensão reduz a altura das configurações de fundo com impactos diretos na avaliação da altura na camada erodida do leito.

Muitas vezes as condições de sedimento estático para uma determinada vazão em um regime hidrológico pode ser alterada para uma nova condição em um outra situação de dinâmica mais elevadas, podendo arrastar o sedimento e transportá-lo para outra seção mais adiante. EINSTEIN (1950) definiu em seu modelo de transporte de sedimentos o conceito de probabilidade de remoção: “sendo a fração do tempo durante a qual, em qualquer lugar, a força de sustentação instantânea excede o peso da partícula”. Ademais, não se identifica no texto passagens que remetem a estimativas da propagação da nuvem de transporte de sedimentos entre as distâncias, colocando em vulnerabilidade técnica a certeza da afirmação. Assim, sugere-se para o avanço das investigações a realização de mais medidas *in situ*, especialmente nos trechos de maior vulnerabilidade no tocante ao deslocamento de

rejeitos, inclusive levantamento batimétricos e de sondagem em transectos longitudinais, que permitem acompanhar a evolução temporal do leito dentro de um trecho homogêneo e bem interligado.

4.2.9. Métodos analíticos para a definição da profundidade de remoção do leito

4.2.9.1. Metodologia

Reiterando o que foi descrito no tópico 4.1, para o cálculo da profundidade de remoção dos sedimentos do leito, foram utilizadas diferentes equações para os casos em que há ou não efeito protetivo à erosão (encouraçamento), com critério estabelecido por GOLDBERG (2021) como:

“De acordo com Pemberton e Lara (1984), caso o leito do rio tenha uma massa de grãos imóveis igual ou superior a 10% (i.e, igual ou superior a D90), o leito desenvolverá uma camada protetiva à erosão. Caso haja este material, a profundidade de remoção do leito é suavizada. Em caso negativo, o leito remove-se sem o efeito de proteção e, portanto, a uma profundidade maior.

Para considerar este efeito, primeiramente deve-se calcular o tamanho do grão estável para cada TR com o intuito de compará-lo com o D90 das amostras de lag layer de cada seção. Caso o D90 seja maior ou igual ao tamanho do grão estável, este efeito de proteção à erosão pode ser considerado nos cálculos de profundidade de remoção.”

O diâmetro imóvel mínimo (tamanho do grão estável) foi calculado considerando o diâmetro que resulta em um parâmetro de mobilidade de Shields igual a 0,045 (limiar de imobilidade para números de Reynolds do grão superiores à 100). Há dúvidas sobre porque antes se utilizou os critérios de Yalin & Karahan (1979) e BOSE & DAY (2013) para estabelecer a mobilidade do *lag layer* e agora retornou-se para o critério de uso do diagrama de Shields modificado por Yalin & Karahan (1979), que estabelece o valor de 0,045 para o parâmetro de tensão adimensional (Θ_c) de Shields (1936). Lembrando que esta condição é para o escoamento turbulento hidraulicamente rugoso, que leva aos valores constantes para o parâmetro (Θ_c) estabelecendo que o número de Froude do escoamento é predominante na definição do início do transporte e o número de Reynolds do grão de sedimentos não impacta na dinâmica do início do transporte de sedimentos (exclusivamente na condição do escoamento turbulento hidraulicamente rugoso). A mesma condição do escoamento turbulento hidraulicamente rugoso implica no valor de (Θ_c) igual a 0,06 pelo diagrama de Shields (1936). A questão é a seguinte: quais os critérios adotados para usar Yalin & Karahan (1979) na estimativa de Θ_c e não USAR BOSE & DAY (2013) ou mesmo o próprio Shields (1936) para a estimativa da camada de erosão. Essa pergunta é relevante porque é de se esperar menos estabilidade do diâmetro calculado pelas equações de Shields (1936) ou BOSE & DAY (2013) em relação àquele calculado pela equação de Yalin & Karahan (1979). O quadro 4 ilustra o caso hipotético no qual os três métodos são empregados na estimativa do diâmetro imóvel (DI) mantendo as condições de escoamento para o mesmo material do leito. Fazendo $A = \gamma_w h S / (\gamma_s - \gamma_w)$ pode-se então concluir que $DI = A / \Theta_c$. O valor de Reynolds do grão igual a 400 foi incluído para mostrar que enquanto se identifica o critério da condição escoamento turbulento hidraulicamente rugoso pelo método de Yalin & Karahan (1979,) correspondendo no quadro igual a 100 (superior a 75), estabilizando o Θ_c em 0,045, a condição de escoamento turbulento hidraulicamente rugoso se verifica no método de Shields (1936) somente quando Reynolds do grão atinge o valor de 400 com mesmo Θ_c . O quadro também mostra a necessidade de se uniformizar a metodologia para o cálculo do diâmetro imóvel com a metodologia aplicada para definição camada de *lag layer*.

Autor	R*	Θ_c	Cálculo de (DI)
Yalin & Karahan (1979)	100	0,045	22,22A
Shields (1936)	100	0,045	22,22A
Bose & Day (2013)	100	0,18	5,56A
Shields (1936)	400	0,06	16,67A

Quadro 4. Diferentes critérios para a definição do diâmetro imóvel (DI).

As equações indicadas na respectiva seção tópico 4.1 estão respeitando a faixa de aplicabilidade para os métodos indicados e compõe parte das equações empregadas no módulo de sedimentos do consolidado aplicativo HEC-RAS. Ressalta-se, contudo, que essas equações são passíveis de subjetividades, conforme descrito no próprio manual desse programa, cabendo ao usuário verificar se são apropriadas ao local.

A operacionalização da metodologia apresentada e a seleção dos métodos estão de acordo com o que se conhece para a estimativa dos processos de degradação do leito. Todavia, a metodologia apresentada é usual na fase de anteprojeto, com o intuito de definir as dimensões dos condutos para diferentes alternativas de geometria em função das características hidráulicas e das características do sedimento do leito do canal (PEMBERTON & LARA, 1984). Entretanto, todos os métodos apresentados têm vieses de subjetividade e empirismo nas definições de vários coeficientes que atendem às pesquisas realizadas para as condições estudadas. Dessa forma, é salutar a realização de pesquisas nos trechos dos cursos d'água ora em pauta para verificar se as respostas obtidas com os métodos empregados irão se confirmar com o passar dos anos.

No decorrer do documento avaliado foram utilizados coeficientes em alguns dos métodos que divergem de alguns valores para a mesma variável citadas por outros autores. PEMBERTON & LARA (1984) no documento denominado "Computing Degradation and Local Scour", são enfáticos no tocante a importância da comprovação experimental das estimativas dos métodos analíticos. Seguindo paráfrase do texto desses autores:

"A maioria dos procedimentos descritos são desenvolvidos empiricamente em estudos de laboratório com uma quantidade limitada de dados de campo sobre medição de processos de degradação de leitos de cursos d'água, o que torna difícil verificar os resultados obtidos pelos métodos analíticos. Destarte, através das suas experiências, os investigadores enfatizam a importância de coletar dados de campo, que governam o alinhamento entre os dados medidos e a metodologia empregada nos estudos analítico."

Tem-se um componente de subjetividade na equação $f = 1,76 \times (D50)^{1/2}$ para a estimativa do fator de Silte no método de Lacey de 1930. CHAG (1988), ao apresentar as equações para projetos de estabilidade de canais atribuídas a Lacey de 1930, estabelece equação muito semelhantes, ou seja: $f = 1,60 \times (D50)^{1/2}$, definindo também que o diâmetro mediano da amostra é apresentado em milímetros. Na perspectiva de que se tenha alterações nas formas de fundo em decorrência da dinâmica de escoamento no curso d'água no rio Gualaxo e de seus tributários, a aplicação da equação DE VAN RIJN (1984) apresenta-se como uma boa alternativa, sobretudo para calcular a altura da camada ativa do leito com base em um parâmetro de transporte que leva em consideração relações entre tensões tangenciais de cisalhamento com parcelas inerente ao escoamento e parcela devida a contribuição da resistência atribuída ao grão de sedimento na dinâmica de escoamento. Ademais, a metodologia de VAN RIJN (1984) possibilita estabelecer critérios para se distinguir o transporte de sedimentos na

camada do leito daquele em suspensão e para quais valores do parâmetro de transporte são iniciados os processos de erosão do leito.

Além disso, na definição dos fatores de correção para as equações de Blench de 1969, Lacey de 1930 e Neill de 1973, tratar os trechos dos rios analisados como moderado quando se tem entre os transectos distâncias de até 9 km entre seções é passível de muita subjetividade. Assim, reduz-se a segurança na classificação dos diâmetros avaliados como estáveis ao deslocamento, assim como para o cálculo da altura de degradação do leito, fragilizando a perspectiva do grau de estabilidade do *lag layer*.

Para o professor Ryszard Blazejewski⁴, quanto ao método proposto por Borah de 1989: “o procedimento proposto pelo autor para calcular a profundidade de lavagem em um leito aluvial com materiais graduados é realmente muito simples, mas existem alguns pontos fracos e / ou controversos. Em primeiro lugar, a expressão para a espessura da camada ativa é válida para a porosidade da camada de armadura igual a zero”. É provável que no leito dos cursos dos cursos d’água objeto da análise em discussão, os efeitos de variação ou aumento da porosidade se acentuem, em virtude dos processos inerentes a floculação pela estrutura e textura do sedimento. Ademais, os processos de sedimentação podem também impactar na porosidade do depósito em virtude dos processos de consolidação dos depósitos⁵.

4.2.9.2. Resultados

Pelo cálculo do diâmetro imóvel, observou-se que esse superou o D90 para três transectos (de um total de 32) para tempos de retorno de até 100 anos, e em um para tempo de retorno de até dois anos, sendo essa a condição estabelecida para definir a presença de encouraçamento. De forma resumida, foi informado por GOLDER (2021) que:

“Dos treze transectos com presença de rejeito identificada:

✓ Três (T07T01, T09T03 e T09T50) não teriam a camada de rejeito exposta em nenhum cenário simulado devido à presença das camadas de lag layer e/ou leito móvel superiores a ele;

✓ Dois (T08T06 e T08T10) teriam o rejeito exposto somente com vazões iguais ou superiores a uma recorrência de 5 anos (mesmo nestes casos, a camada de rejeito não seria completamente removida, teriam de 9 a 23% de remoção);

✓ Quatro (T07T02, T08T02, T09T01 e T09T08) teriam o rejeito exposto quando submetidos a vazões máximas iguais ou superiores a uma recorrência de 2 anos, entretanto, também não teriam a camada completamente removida, variando de 30 a 72%;

✓ Um (T06T08) teria o rejeito exposto quando submetido a vazões iguais ou superiores a uma vazão com recorrência de 2 anos, sendo a camada completamente removida após vazões de TR 5;

✓ Três (T06T03, T09T37 e T09T45) teriam o rejeito exposto e completamente removido quando submetidos a vazões iguais ou superiores a uma recorrência

⁴ <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9429%281991%29117%3A8%281084.2%29>

⁵ Segundo Peixoto (2015), “a consolidação pode ser entendida como uma continuação do processo de sedimentação, no qual uma vez depositadas as partículas, elas passam a se acomodar no fundo, expulsando a água dos seus interstícios o que diminui o índice de vazios no decorrer do tempo”, e tem impactos diretos na porosidade e em outras propriedades do volume de sedimento depositado.

de 2 anos. A presença de leito móvel, mesmo este possuindo características granulométricas”

“As espessuras de remoção variam de 0,15 m no transecto T07T01 para vazão de 2 anos de recorrência até 2,04 m no transecto T11T05, para vazões de 100 anos de recorrência.”

Percebe-se que há a movimentação do *lag layer* a jusante para a maior parte dos transectos monitorados, conforme a tabela 42 (GOLDER, 2021), pelos métodos conservadores utilizados e que consideram apenas a textura do material (além das energias específicas do evento de cheia). Também se nota a remoção esperada de significativa profundidade das camadas de rejeitos, mesmo quando não completamente, não corroborando a hipótese do *lag layer* existente nos trechos como camada de encouraçamento capaz de reter os rejeitos intracalha em profundidade.

Não ficou claro se esses resultados foram calculados utilizando o D90, menos representativo da textura do material, ou o D50, que é o parâmetro sugerido pelos autores dos modelos utilizados.

Na Figura 41 (GOLDER, 2021), que apresenta dados de estratigrafia de transectos, identifica-se a presença de rejeitos em alguns transectos no trecho 11, como em T11T02 centro (coluna de rejeito de 1,30) e nas margens T11T02 (coluna de cerca de 40 cm a direita e 70 cm a esquerda). No entanto, quando avaliamos as figuras 83 e 84 (GOLDER, 2021), que apresenta esses mesmos dados sobrepostos à barra indicando a profundidade de remoção, não se identifica o registro da presença de rejeitos nos trechos 10 em diante. Ademais, é observado também que há remoção da camada de Lag Layer entre os trechos 06 e 11.

Nota-se, ainda, que os modelos não são sensíveis à duração do evento, fator preponderante para permitir tempo de contato com as energias necessárias e com grande impacto na magnitude da erosão. A depender da faixa de intensidade considerada (acima da energia necessária para movimentar a maior parte das partículas grosseiras do leito), esse pode ser o fator preponderante, e não essa intensidade. Da mesma forma, eventos de menor intensidade, mas de maior frequência e duração podem produzir efeitos cumulativos mais intensos na lavagem do leito, em determinadas situações.

Considerando o período de monitoramento reduzido para a avaliação da dinâmica do deslocamento do leito móvel intrinsecamente associado à textura do material, é prematura avaliar a estabilidade do *lag layer* para vazões com período de retorno inferiores a 50 anos, sobretudo porque a composição granulométrica dos leitos naturais é altamente dinâmica, dependendo tanto dos regimes de escoamento, quanto das características geomorfológicas da bacia hidrográfica de contribuição do escoamento superficial. Requer, assim, prazo maior para que se tenha maior segurança para se atestar a estabilidade do *Lag Layer* e a formação da camada de encouraçamento que contribuirá no encapsulamento do rejeito decorrente do acidente. Assim, como medida de ordem prática, sugere-se a realização de batimetrias longitudinais por um período de pelo menos 5 anos, naqueles trechos nos quais houve a exposição do rejeito, iniciando-se imediatamente após os períodos de cheias e no começo do período considerado de baixas vazões, para se avaliar melhor a evolução da morfologia dos leitos dos cursos d'água e a ocorrência ou não de mobilidade dos rejeitos naqueles trechos de rios afetados pelo acidente.

4.3. Análise do Cumprimento das Requisições da Nota Técnica CT-GRSA n.º 21.2020

Em relação à “Requisição 1” da NT CT-GRSA n.º 21.2020, que exigiu a revisão do estudo “Aplicação do Método Analítico para Avaliação do Lag Layer” e deu origem ao estudo que se avalia em tela, sugeriu-se que se deveria contemplar as seguintes questões:

- a) Incluir a análise dos dados do último período chuvoso 2019-2020, conforme estabelecido pela Nota Técnica 08/2019 e Deliberação CIF 304, levando em consideração, portanto, os meses em que foram observados períodos prolongados de anomalias positivas de água precipitável na bacia do rio Doce, que poderão acarretar um cenário bastante diferente do que o que foi apresentado.

Essa análise não foi detectada no estudo em questão, e seria importante para avaliar o cenário estabelecido tanto quanto o aporte de sedimentos para os rios locais, repercutindo em aumento da descarga sólida e da deposição de sedimentos em trechos morfologicamente favoráveis, quanto para o aumento das forças erosivas, pela maior energia de escoamento superficial intracalha.

- b) Desconsiderar o fator de ajuste de correção dos resultados de granulometria, na Tabela 7 (pág. 79). Adotar uma combinação somente nos transectos com curva granulométrica bimodal (não uniforme), amostrando sedimentos com liner e draga (ou outro amostrador de cascalho). A combinação deve seguir a metodologia descrita na seção “4.4 Combination of two particle-size distributions” (Bunte and Abt, 2001).

Em geral, observou-se que os sedimentos dos trechos amostrados não são uniformes nem em toda a coluna, nem em cada camada do modelo conceitual, tendendo para curva granulométrica bimodal ao se considerar toda a coluna estratigráfica. Dessa forma, os procedimentos de amostragem adotados estão de acordo com a recomendação, assim como o processo de combinação da curva granulométrica. Não foi relatada a aplicação de fatores de ajuste de correção dos resultados de granulometria dos estudos anteriores.

- c) Apresentar a equação adotada para as curvas de início de movimento e de suspensão dos grãos no diagrama da Figura 38 [página 107, GOLDER (2021)]

Essa requisição foi devidamente cumprida.

- d) Elaboração de um perfil vertical do ponto acompanhado, com documentação fotográfica, de forma a caracterizar as camadas.

Esse perfil foi apresentado no anexo 3, para cada transecto monitorado e acompanhado por fotografia e os dados da sondagem.

- e) Realizar análises granulométricas das camadas com classificação entre os tamanhos das partículas de argila, silte, areia muito fina, areia fina, areia média, areia grossa, areia muito grossa e cascalho.

As análises granulométricas seguiram a classificação descrita, segmentando também a fração cascalho. Entretanto, ficou limitada a apresentar os resultados apenas em termos da classificação, tornando necessário recorrer aos dados brutos para verificar os aspectos da distribuição granulométrica completa, como os valores dos diâmetros predominantes, dos diâmetros representativos e dos coeficientes que indicam a uniformidade e distribuição da curva. Sugere-se conferir maior tratamento estatístico aos dados granulométricos.

- f) No parâmetro de mobilidade do grão Y^* , corrigir a forma de cálculo do γ_w (peso específico da água) e do γ_s (peso específico dos grãos no fluido), conforme apresentado na seção 4.2.1. Considerações metodológicas sobre os modelos analíticos” desta nota técnica;

Não foi constatado erro na utilização desses parâmetros no estudo avaliado.

- g) Quanto a análise química das camadas, sugere-se a utilização dos mesmos métodos de extração e detecção utilizados pela Worley na entrega do item 7, ou seja, USEPA 3050 B, USEPA 7471B (para mercúrio) e USEPA 6010C (para a detecção). Adicionalmente, de forma a comparar com as análises

ao PMQOS sugere-se a inclusão de alguns parâmetros, conforme tabela abaixo, que inclui sugestão de limite de quantificação:

Aplicou-se os métodos de extração por digestão ácida conforme a referência dos métodos da série USEPA3050, e os métodos de detecção do protocolo USEPA 6010C, mas para o mercúrio se utilizou aqueles da referência USEPA 3051A. Alguns dos parâmetros sugeridos não foram analisados, como berílio, carbono orgânico total, estrôncio total, fenóis totais, nitrogênio total Kjeldahl e teor de sólidos secos. Sugere-se avaliar a fração orgânica dos sedimentos não apenas em relação à caracterização química, mas também à sua contribuição gravimétrica e granulométrica, já que é um parâmetro de grande importância para avaliar a estrutura da camada superficial de sedimentos e processos de coesão, sorção e aeração, que poderiam contribuir significativamente para a resistência à erosão e isolamento químico

5. RESPOSTA AOS QUESITOS PROPOSTOS PELA CT-GRSA

Durante a elaboração deste relatório, a CT-GRSA elaborou quesitos que abordam questões cujo esclarecimento seria de grande relevância para a definição de suas ações futuras. Desse modo, neste tópico são apresentadas as respostas a esses quesitos, iniciando-se com uma posição objetiva e seguindo com o embasamento técnico e considerações adicionais.

1 – Considerando a referência “*Case Study Review: Demonstration and Validation of Enhanced Monitored Natural Recovery at DoD Sites, ESTCP Project ER-0827. Authors: MERRITT, K.A.; Conder, J.M.; Magar, V.S.; Kirtay, V.J.; Chadwick, D.B.*), a qual foi base inicial para a construção da proposta do LAG LAYER (VOLUME 1. APLICAÇÃO DO PLANO DE MANEJO DE REJEITO NO TRECHO 8 REVISÃO 0). Tem-se que os três estudos de caso desta referência se tratam de duas enseadas e uma área portuária, ou seja, amplas áreas marinhas, áreas estas cuja dinâmica hidráulica se diferencia de um rio, questiona-se se seria aplicável a extrapolação de tal técnica de recuperação de áreas marinhas para um ambiente de rio dadas as diferentes dinâmicas dos ambientes?

Sim, não existem limitações para a extrapolação das técnicas de recuperação apresentadas no estudo de MERRITT ET AL. (2009) para ambientes fluviais, desde que elas sejam dimensionadas considerando as condições hidrodinâmicas desses ambientes.

Nesse sentido, observa-se que as condições hidrodinâmicas de um ambiente marinho de fato se diferem significativamente daquelas de águas interiores. Neles, estão presentes efeitos como os movimentos harmônicos de marés e energias de ondas e perfis de velocidade complexos, que tem influência sobre a dinâmica da sedimentação e consolidação dos sedimentos em águas rasas. Além disso, há a presença de alto teor de sais, em especial o cloreto de sódio, que gera o cátion sódio, que por sua vez reduz os efeitos de floculação e, portanto, as forças coesivas entre as partículas. Entretanto, observa-se que as águas marinhas, em porções mais afastadas do litoral imediato, desenvolvem grandes profundidades, muito superior à de um rio, em que mesmo na plataforma continental próxima podem ser observadas camadas d’água de até 200 m. Isso repercute no desenvolvimento de pressões hidrodinâmicas maiores, que favorecem a consolidação dos sedimentos.

O transporte de sedimentos nesses ambientes é muito complexo e varia com a região do assoalho oceânico. De forma generalista, observa-se que, nas águas rasas próximas do litoral, os sedimentos são constantemente ressuspensos, com transporte até a costa e retorno, predominando areias sem nenhuma consolidação. Nesses ambientes, não é razoável pensar em efeitos de capeamento de sedimentos finos contaminados, uma vez que não há imobilidade em nenhuma camada e esses nem mesmo se depositam. Já nos pontos mais profundos da plataforma continental, onde foram desenvolvidos os estudos em destaque, há relevos planos e enormes profundidades, com menos influência da energia de ondas e marés, e a formação de espessas camadas de sedimento, com consolidação. Na sua superfície, predominam sedimentos de granulometria média a grossa, em especial areias diversas, que foram utilizados pelos autores como camada de capeamento (portanto, considerou-se sedimentos mais finos para o efeito de encouraçamento do sedimento contaminado do que aqueles do *lag layer* do Rio Doce). Já nos pontos mais íngremes do talude continental, o campo gravitacional produz escoamentos descendentes de grande energia que tendem a carrear sedimentos de diferentes diâmetros, em direção às planícies abissais ou às bacias oceânicas de elevações continentais, onde há novamente o desenvolvimento de complexas camadas de sedimentos e ainda maior consolidação, pelas grandes pressões atuantes. Há, ainda, diversos outros fenômenos que atuam sobre a formação do assoalho oceânico.

Em rios de regiões montanhosas ou onduladas, como o caso do Rio Doce, há, no geral, a formação de menores profundidades e grande variação de vazões nos regimes de cheia e vazante, podendo atingir velocidades muito mais elevadas do que aquelas observadas em profundidade na plataforma

continental. Em condições de escoamento regular em trechos planos, os sedimentos tendem a se depositar e consolidar e, nesses trechos, é cabível analisar efeitos de consolidação e encouraçamento, como aqueles desenvolvidos nos estudos em destaque e no objeto desta análise. Já em trechos mais íngremes, onde as forças gravitacionais são mais intensas, há maiores tensões cisalhantes que tendem a erodir as camadas superficiais do leito constantemente, as formas de fundo são mais dinâmicas e a consolidação dos sedimentos tende a ser prejudicada; além disso, projetos que visam ao capeamento devem ser avaliados com cautela, pois podem ter altos custos e/ou baixa eficácia. Além disso, eventos extremos tem grande influência no fundo dos rios (diferente do fundo da plataforma continental oceânica), e pode repercutir na ressuspensão de sedimentos das camadas superiores ou de todo o leito, e os projetos devem ser desenvolvidos para essas condições extremas. Assim, embora efeitos naturais ou projetos artificiais de capeamento/encouraçamento possam ocorrer, como aqueles descritos em relação ao *lag layer*, isso está atrelado às condições hidrodinâmicas específicas de cada rio, de cada trecho e de cada ano hidrológico. Também existem outros efeitos de magnitude considerável na estabilidade do leito (resistência a erosão), como o grau de consolidação e de coesividade do material depositado, que pode oferecer resistências superiores à de uma camada de capeamento natural dotada apenas de granulometria mais grossa.

Ou seja, técnicas como as aplicadas nos estudos de MERRITT ET AL. (2009), que contemplam a recuperação natural ou o isolamento/imobilização das camadas contaminadas, podem ser extrapoladas para ambientes de rios, mas se deve considerar as especificidades desses ambientes, inclusive para cada rio distinto. Nota-se que um dos estudos de caso relatados nessa referência foi desenvolvido em ambiente fluvial (rio Grasse, em Nova Iorque, impactado com PCB's), e, de forma pouco promissora, foi um dos que apresentou os piores resultados (erosão da camada de capeamento artificial projetada, embora por efeitos que não ocorrem no Brasil (congelamento em ponto de montante).

Ao se buscar a atenuação natural monitorada em ambientes fluviais, sugere-se, também, não limitar a análise apenas ao efeito de capeamento, mas considerar outros processos de consolidação, transformação ou atenuação natural, e buscar diferentes linhas de evidência para comprovar que essa tem ocorrido (monitoramento da evolução estratigráfica por transectos; modelagem analítica e numérica; estudos de laboratório e microcosmos, como testes de bancada com a reconstrução da situação de campo em diferentes regimes hidrodinâmicos etc.). No caso em questão, há poucas linhas de evidência e todas elas indicam que há mobilização dos rejeitos inconsolidados e das camadas superiores (*lag layer*) mesmo para baixo tempo de retorno; aquelas relacionadas ao monitoramento já não favorecem qualquer hipótese de atenuação natural, mesmo os outros casos descritos no início do parágrafo.

Cabe ressaltar, também, que as técnicas apresentadas por MERRITT ET AL. (2009) são caracterizadas como atenuação natural aumentada (ou enriquecida), já que há intervenção direta para ganhar eficiência nos processos. Nelas, há a adição de materiais reativos para aumentar a coesão da camada de capeamento, a sorção e a transformação dos contaminantes presentes (desde materiais mais complexos, como resinas, até matéria orgânica comum; essa última tem propriedades positivas ao alterar a estrutura do solo ou sedimento, favorecendo processos de coesão, aeração, sorção [aumento do coeficiente de partição (K_d e K_{oc}) etc]. Também busca recuperar as comunidades bentônicas, além de sugerir materiais com propriedades físicas de contenção, como geotêxteis. Dessa forma, as camadas de capeamento avaliadas nesse estudo foram projetadas e adicionadas, embora os autores não tenham detalhado as especificidades do projeto. Entretanto, também indicou a possibilidade de se utilizar o encouraçamento de sedimento (*sediment armouring*), técnica que melhor se relaciona à hipótese adotada até então nos trechos 6 a 11 do Rio Doce, embora não tenham sido suficientes nos casos acompanhados. Utiliza, ainda, outros indicadores de qualidade, além do transporte de sedimentos, como o reestabelecimento, diversidade e biomassa das comunidades bentônicas. Nota-se que o objetivo principal é isolar os contaminantes, física ou quimicamente, e favorecer a recolonização bentônica, e não necessariamente impedir o transporte de sedimentos. Além disso, embora se tenha

obtido redução do risco, em geral, nem todos os casos avaliados atingiram os objetivos propostos, e nota-se que em muitos campos foram adotadas outras técnicas em conjunto ou em série com a atenuação natural aumentada, inclusive dragagem (em momento anterior). Em alguns casos, foi observado que, mesmo com a adoção de camada de capeamento devidamente projetada e sem evidências de erosão, pode ter se iniciado processo de mistura interna que aumentou as concentrações de contaminantes nas camadas superiores, com o tempo.

2 – O lag layer é estável pensando em um cenário de longo prazo e chuvas de diversos tempos de recorrência? Em outros termos, em uma chuva de grandes proporções, e grande vazão de água nos rios afetados pelo rejeito, o “lag layer” seria capaz de resistir a essa vazão de água e não expor os rejeitos à coluna d’água?

Os modelos analíticos indicam que **não**, já que ele seria remobilizado em sua totalidade mesmo para eventos de baixo tempo de recorrência (< 10 anos). Além disso, os dados de monitoramento indicam redução das camadas de *lag layer* e rejeitos que, mesmo com as incertezas inerentes ao processo, trazem a necessidade de precaução. Evidências nesse sentido foram obtidos ao longo de todo o trabalho (monitoramento estratigráfico, análises granulométricas da descarga sólida, estimativa do volume de *lag layer* e rejeitos remanescentes nos trechos de estudo e modelos analíticos de início de movimento e profundidade de remoção). Informações de grande valor foram perdidos com a não realização do monitoramento no evento mais extremo observado desde a ruptura da barragem e com a mudança dos métodos de amostragem e interpretação dos resultados nas campanhas subsequentes.

Caso se deseje aferir a possibilidade de atenuação natural, deve-se considerar outros processos além do capeamento por *lag layer*, como aqueles de consolidação dos sedimentos no leito dos rios e planícies aluvionares, de coesividade e de transformação. Seria importante, também, a aplicação de outros métodos de monitoramento (monitoramento batimétrico longitudinal, estudos de bancada e microcosmos, monitoramento contínuo das descargas líquidas e sólidas em trechos representativos etc.) ou de modelagem computacional para fornecer outras linhas de evidência que poderiam subsidiar esse procedimento. Os resultados do monitoramento, porém, não fornecem evidências favoráveis à eficácia de nenhum desses processos na contenção dos rejeitos, então não se sugere utilizar a atenuação natural monitorada pelo encouraçamento do *lag layer* como opção de manejo.

3 - É factível afirmar que a proposta de Fundação Renova, de uso do denominado "Lag Layer" naturalmente formado, para contenção de rejeitos, é cabível para o cenário do rio Doce ou trata-se de hipótese?

Com os dados apresentados até o momento, o uso do *lag layer* formado nos trechos estudados para contenção de rejeitos, por capeamento, é apenas uma hipótese, não corroborada pelos resultados.

Observa-se que, tanto no monitoramento estratigráfico e estimativa de volumes remanescentes, quanto na aplicação dos modelos analíticos de início de movimento e profundidade de remoção, realizados no âmbito do estudo de objeto deste relatório, tem-se obtido sugestões de que o *lag layer* se mobiliza mesmo com vazões de baixo tempo de recorrência (inferior a 10 anos) e que há a exposição e mesmo ressuspensão de rejeitos. Embora os modelos analíticos sejam conservadores e ignorem uma série de outros processos que atuam na formação das camadas de sedimentos e no transporte, tem-se observado a redução no rejeito intracalha e sua presença no material móvel. Dessa forma, pelas evidências técnicas obtidas até então e pelo princípio da precaução (em face das incertezas existentes), é sensato concluir que a atenuação natural desses compostos por capeamento natural não está ocorrendo conforme a hipótese elaborada para o Rio Doce. Cabe, assim, avaliar os impactos que as condições observadas podem trazer ao uso das águas e aos ecossistemas.

A escolha entre técnicas de remediação *in situ* (como atenuação natural monitorada ou capeamento) ou *ex situ* (a partir da dragagem do material depositado) deve levar em consideração a possibilidade de erosão do material; os riscos ecológicos e toxicológicos oferecidos antes, durante e após a aplicação das técnicas; os danos físicos e ecológicos que cada uma pode causar; e os custos envolvidos. Nesse sentido, além da estabilidade do *lag layer* e sua eficácia na contenção / isolamento físico do rejeito, deve-se observar se ele também é suficiente para evitar a recontaminação, a degradação da qualidade da água e os riscos ecotoxicológicos (promover o isolamento químico e a redução da biodisponibilidade), quando esses existem; se permite o reestabelecimento das comunidades bentônicas, fundamentais para o funcionamento adequado do ecossistema; e se não altera a hidrodinâmica do corpo d'água de forma negativa (como ocorrem em casos de grande assoreamento, com aumento da severidade de inundações, elevação dos níveis de turbidez e alterações na produção primária etc.).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Considerando que não houve monitoramento no período de maiores vazões observadas desde a ruptura da barragem de Fundão (janeiro de 2020), e que o modelo conceitual e os métodos amostrais e de interpretação dos resultados se alteraram na campanha do relatório avaliado, em relação ao que era praticado nas campanhas anteriores a esse evento, há comprometimento da consistência da série histórica tanto para a interpretação comparativa dos dados, como para o estabelecimento de análises de tendência. Assim, os dados devem ser interpretados com parcimônia, quando comparados aos resultados de relatórios anteriores, porque surgem incertezas em relação ao que pode ter acontecido nesse intervalo.

Considerando que o monitoramento do estudo em questão ocorreu na transição do ano hidrológico, marcada pelo final do período de estiagem e início do período chuvoso, tendendo principalmente ao primeiro, a campanha não pode ser entendida como um monitoramento durante ou após o período chuvoso ou de cheias, tendo ocorrido, de fato, após os efeitos da estiagem. Ainda, **considerando** o exposto em Xu (2002 apud BICALHO, 2006)⁶, há necessidade de se intensificar a atenção na caracterização granulométrica dos sedimentos intracalha nessa fase do ano hidrológico, e avaliar também o transporte de sedimentos por arraste, para melhorar a quantificação da descarga total de sedimentos transportada, uma vez que esta é composta pela soma do sedimento transportado por arraste e aquele transportado em suspensão. **Considerando** ainda que o local dos fatos se situa em trechos da formação do Rio Doce, onde podem ocorrer maiores declividades e velocidades de corrente, há susceptibilidade a maior poder erosivo e a tendência da deposição de sedimentos de granulometria mais elevada. Dessa forma, já é de se esperar que nos transectos avaliados predominem sedimentos naturais de maior granulometria, como os observados no *lag layer* e no substrato natural, tanto pela sua posição na bacia hidrográfica, quanto pelo momento em que a campanha ocorreu no ano hidrológico. Também ocorrem maiores forças erosivas que podem favorecer a mobilização desses sedimentos em eventos de maior intensidade. Uma campanha mais representativa para análise da estabilidade do *lag layer* deveria ocorrer após o período chuvoso, no início da estiagem, e não o contrário. **Considerando** que no decurso do documento avaliado não se observou a importância necessária na definição do regime de escoamento e suas interrelações na estabilidade do *lag layer*, tampouco esse detalhe foi considerado na escolha dos métodos analíticos.

Considerando ainda que há dúvidas no modelo conceitual com relação à separação das camadas de *lag layer*, leito móvel, rejeito inconsolidado e substrato natural, e que os resultados de granulometria indicam que essas camadas são desuniformes (curva granulométrica bem distribuída, com contribuição de diferentes diâmetros de partícula) e em alguns casos, estatisticamente similares (como entre o rejeito inconsolidado e o leito móvel), há limitações na definição das camadas apenas por critérios granulométricos, devendo-se considerar também a estrutura ou consolidação, bem como outros aspectos que podem ser verificados. Isso também limita a utilização de diâmetros representativos como o D90. Além disso, há grande heterogeneidade na camada de *lag layer* entre os diferentes pontos de amostragem ao longo dos 34 transectos, que pode indicar comportamento hidrodinâmico distinto, e não uma camada homogênea. Para proceder com a análise em monitoramentos futuros, pode ser interessante fracionar a curva granulométrica na aplicação dos métodos analíticos, ou mesmo dividir cada camada do modelo conceitual em subgrupos mais uniformes e homogêneos.

Considerando que as análises estratigráficas indicam redução das camadas de *lag layer* e de rejeito inconsolidado em diversos transectos nos quais esses têm sido observados, e que nas amostras de sólidos suspensos totais para cálculo da descarga sólida se constatou material com características granulométricas de rejeito, há uma linha de evidência em favor da mobilização dessas duas camadas,

⁶ “...durante a estação seca, a maior parte do sedimento em suspensão no rio provém da erosão no canal, gerando sedimentos com maior granulometria. Na estação chuvosa, a erosão do solo das encostas causadas pelo escoamento superficial gera um sedimento relativamente mais fino que é transportado até as calhas dos rios”

comprometendo a hipótese do *lag layer* observado como camada de encouraçamento. **Considerando**, ainda, que nos modelos analíticos de início do movimento e profundidade de remoção houve tendência de mobilidade do material do *lag layer* e da camada de rejeitos inconsolidados, mesmo que de forma parcial, até para tempos de retorno pequenos (2 a 5 anos), há outra linha de evidência que indica a não estabilidade do *lag layer* e sua baixa eficácia na contenção dos rejeitos, atingindo percentuais de mobilidade de até 96% para o D50 em cinco anos de recorrência. Certamente, os modelos empregados são bastante conservadores, de modo que a situação real pode resultar em valores de profundidade de remoção menores do que aqueles obtidos no modelo, mas a tendência geral dos resultados está em concordância com o que tem sido observado nas campanhas de monitoramento, que é a movimentação da camada *lag layer*.

Considerando que não foram analisados outros processos que podem contribuir para a resistência das camadas de sedimentos à erosão e, por consequência, ao isolamento dos rejeitos (como compactação/consolidação, coesão etc.), pode haver superestimativa da profundidade de remoção também por esse motivo. Entretanto, deve-se ter em conta que os resultados de monitoramento indicam erosão das camadas de interesse nos eventos recentes e transporte ativo de sedimentos, em alguns transectos, inclusive de rejeitos. **Considerando** que para estimativa da mobilidade do grão se utilizou metodologias distintas para a mobilidade do *lag layer* e para o cálculo do diâmetro imóvel torna-se difícil atestar a camada de encouraçamento na proteção dos rejeitos inconsolidados.

Com o embasamento técnico exposto e pelo princípio da precaução, não é possível ter confiança nos efeitos de encouraçamento promovidos pelo *lag layer* observado para a imobilização física e química do rejeito inconsolidado intracalha. Caso se opte pela continuidade das técnicas de atenuação natural monitorada ou remediação *in situ* para o manejo desses rejeitos, além de ser importante continuar o monitoramento estratigráfico, de descargas líquidas e sólidas e de análises químicas, deve-se investigar outros processos que contribuiriam para a estabilidade e consolidação da camada de rejeitos. Mas, prioritariamente, é importante desenvolver estudos de avaliação de impactos e de risco, bem como medidas preventivas, corretivas e mitigadoras, com base nos resultados já observados até então e esperados por essas técnicas, de modo a evitar a produção de mais danos irreversíveis futuros e reparar integralmente aqueles que, porventura, se encontram em curso. Como os resultados não tem sido promissores para essa opção de manejo, técnicas de extração dos rejeitos e remediação *ex situ* devem ser consideradas, também com estudos de impactos e adoção de medidas mitigadoras.

7. SUGESTÕES DE ENCAMINHAMENTOS

Em relação às observações apresentadas ao longo deste parecer, em especial em relação à avaliação da eficácia do *lag layer* como camada de encouraçamento ou isolamento físico dos rejeitos, foram desenvolvidas, para apreciação, sugestões de encaminhamentos para estudos futuros e suporte à decisão, sem prejuízo às demais ponderações e sugestões elencadas ao longo deste parecer ou apresentadas pelos demais agentes envolvidos.

Em relação às interpretações de resultado e manejo dos rejeitos intracalha, apresenta-se:

- Não se fiar exclusivamente na hipótese do *lag layer* como camada de encouraçamento como opção de manejo dos rejeitos intracalha.
- Verificar como a assinatura química das camadas se altera com o tempo, nos trechos em que são estáveis, e como isso está relacionado aos níveis aceitáveis com base no risco máximo permitido. Isso é importante para prever processos de mistura interna, difusão ascendente de contaminantes ou recontaminação [como as apresentadas nos resultados de MERRITT et al. (2009)] que podem aumentar a disponibilidade dos contaminantes mesmo sem a exposição dos rejeitos.
- Buscar outras linhas de evidência para os processos em curso quanto ao transporte de sedimentos. Nesse sentido, além do monitoramento estratigráfico e granulométrico e da aplicação de métodos analíticos, pode-se destacar o monitoramento batimétrico e a realização de estudos de bancada em escala piloto.
- Além das análises químicas que estão sendo realizadas para verificar a contaminação dos sedimentos, promover estudos de ecotoxicidade com os sedimentos de camada de interesse. Além disso, é importante verificar como as comunidades bentônicas se desenvolvem ao longo do tempo, em comparação aos trechos não impactados, já que são um importante indicativo da qualidade ambiental desse ecossistema.
- Tendo em vista a ineficácia constatada com os dados disponíveis da camada de *lag layer* na contenção dos rejeitos inconsolidados, verificar a possibilidade de intervenções para incremento dos processos de atenuação natural ou remediação *in situ*, como adição de camada de espessura fina de sedimentos com elementos ligantes mais resistente à erosão (capeamento) ou outro método de interesse; caso ainda não seja possível, buscar alternativas de extração dos rejeitos intracalha e remediação *ex situ*.
- Realizar estudos de impacto e risco quanto às alternativas de manejo a serem adotadas, com proposta de medidas mitigadoras e compensatórias, no menor tempo possível, de modo a evitar a produção de mais danos irreversíveis futuros e reparar integralmente aqueles que, porventura, se encontram em curso.

Já para a melhoria no monitoramento, obtenção e interpretações de dados, sugere-se:

- Priorizar o aumento das frequências de monitoramento, em especial das descargas líquida e sólida, com período maior possível de abrangência do ciclo hidrológico, se possível com a instalação de estações fluviométricas nos trechos mais representativos, para que sejam observados os períodos de vazões baixas e altas.
- Buscar sofisticar a precisão do monitoramento do movimento dos sedimentos, priorizando a instrumentalização com medidores digitais e de maior varredura das seções monitoradas, em substituição aos analógicos, para incrementar a precisão dos dados obtidos
- Realizar levantamentos batimétricos e sondagens em transectos no sentido longitudinal nos trechos em que se nota maior vulnerabilidade dos sedimentos à erosão, após cada período de maior intensidade de precipitação e escoamento, que permitem acompanhar a evolução temporal do leito dentro de um trecho homogêneo e bem interligado, inclusive das formas de fundo e do transporte de sedimentos intracalha.

- Avaliar, em cada campanha de monitoramento, as características climatológicas nos dias anteriores, em especial no tocante à precipitação, e, em cada relatório, os padrões que ocorreram ao longo do ano hidrológico que se deseja representar, bem como os regimes de escoamento atuantes, uma vez que esses dados são de fundamental importância para a dinâmica de sedimento intracalha e na bacia e para a interpretação dos dados quanto às informações que se deseja obter.
- Realizar análises geotécnicas para investigar a consistência e consolidação de camada de sedimentos, como o grau de coesão, a resistência à penetração (compacidade) e a resistência ao cisalhamento, de modo a avaliar outros processos que podem ter influência na resistência das diferentes camadas do leito à erosão, para além da textura.
- Analisar a contribuição da fração orgânica dos sedimentos, tendo em vista que a matéria orgânica apresenta propriedades positivas ao alterar a estrutura do solo ou sedimento, favorecendo processos de coesão, aeração, sorção (aumento do coeficiente de partição (K_d e K_{oc}) etc., podendo contribuir tanto para o isolamento físico, quanto para o isolamento químico da camada de rejeitos.
- Melhorar os procedimentos de amostragem para cálculo das descargas sólidas, em especial no tocante à descarga por arraste. Para medir a descarga de sedimentos transportada em suspensão e, caso opte-se por continuar provendo os levantamentos por procedimento analógicos, é minimamente importante atentar para o uso de amostradores apropriados com formato hidrodinâmico, que alinham a coleta da mistura água e sedimentos à dinâmica dos escoamentos, dos quais se destacam aqueles das séries US-DH e US-D. Todos esses amostradores têm particularidades como a adaptação dos bicos intercambiáveis de amostragem à velocidade média do escoamento e a especificação do equipamento alinhada à profundidade do curso d'água onde serão feitas as medições, para que se tenha a opção de calcular a velocidade de movimentação do amostrador na vertical para a escolha do bico adequado. Para a determinação da descarga de sedimentos em suspensão é recomendável também a amostragem por integração em diferentes verticais na seção transversal e o uso da técnica de igual incremento de largura, conforme descrito no parecer. Os amostradores para descarga por arraste também devem ter formato hidrodinâmico apropriado, como os da série US-BM e US-BMH, fazendo uso de métodos como os descritos pela USGS, inclusive o de Igual Incremento de Largura.
- Buscar métodos analíticos ou numéricos de maior nível de detalhamento quanto aos processos de erosão, início de movimento e remoção da coluna de sedimentos, inclusive que contemplem outros parâmetros além do regime de escoamento e da textura do material. Como sugestão inicial, destaca-se a equação de VAN RIJN (1984).

8. EQUIPE RESPONSÁVEL

Este relatório foi elaborado pelos seguintes profissionais:

Luiz Evaristo Dias de Paiva: Graduação em Engenharia Civil pela Universidade Federal da Paraíba (1991), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (1995) e doutorado em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (2007). Atualmente é professor titular da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), lotado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Tem experiência na área de Engenharia Civil e Engenharia Ambiental e Sanitária, com ênfase em recursos hídricos especialmente em transportes de sedimentos; mecânica dos fluidos; hidráulica; hidrologia e aproveitamento de água de chuva. É professor da disciplina ESA052 (Engenharia de Sedimentos) do curso de graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária da UFJF.

Vinicius Bignoto da Rocha Cândido: Graduado em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2017) e mestrando em Saneamento e Meio Ambiente (em curso). Consultor ambiental pela Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda., na qual exerce também a função de sócio administrador. Atua em perícia ambiental, avaliação de impactos ambientais, valoração ambiental, modelagem ambiental, análises geoespaciais, elaboração de projetos e estudos ambientais e hidrológicos gerais.

9. FECHAMENTO

Entende-se cumprida a solicitação da CT-GRSA, por meio do Edital Flacso n.º 09/2021, para a análise do estudo apresentado pela Fundação Renova intitulado “Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020”, em especial quanto a efetividade do *lag layer* na retenção do rejeito depositado no leito dos rios para diferentes tempos de recorrências de chuvas intensas (2, 5, 10 e 100 anos), ou seja, como e com que intensidade aquele contribui para evitar a ressuspensão dos rejeitos originados do rompimento da barragem. Com base nos dados apresentados, foi observado por diferentes linhas de evidência que os efeitos de encouraçamento do *lag layer* não tem sido ou não serão eficazes na contenção dos rejeitos intracalha.

No mais, os autores deste parecer se colocam à disposição para esclarecimentos, complementações e apresentação de seu parecer aos agentes envolvidos.

Juiz de Fora, 18 de março de 2022.

LUIZ.E.D.de.PAIVA
Assinado de forma digital por
LUIZ.E.D.de.PAIVA
Dados: 2022.03.18 14:27:44 -03'00'

Dr. Luiz Evaristo Dias Paiva

VINICIUS BIGNOTO DA ROCHA
Assinado de forma digital por VINICIUS
BIGNOTO DA ROCHA
CANDIDO:09939560680
Dados: 2022.03.18 14:21:58 -03'00'

Vinicius Bignoto da Rocha Cândido

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERS.P; WHITE. W, R., 1973. *Sediment Transport: New Approach and Analises*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 99, No. HY11, Proc. Paper 2041-2060.

ALFREDINI. P., 1983. *Análise de Métodos de Modelação Física da Ação de Correntes Sobre Leito Móvel*. Tese apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia, 221p, EPUSP, São Paulo, SP.

BICALHO.C.C., 2006. *Estudo do transporte de sedimentos em suspensão na bacia do rio Descoberto*. Dissertação de mestrado. Universidade de Brasília. Distrito Federal. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. 145P. Brasília (DF).

BARTELS, G.K; TERRA. V.S.S.; COLLARES.G.L., 2014. *Estimativa da concentração de sedimentos em suspensão com o uso de sensor ótico de turbidez na bacia do arroio do ouro no rio grande do sul*. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH. João Pessoa-PB.

BOSE.S; DEY.S (2013). *Sediment Entrainment Probability and Threshold of Sediment Suspension: Exponential-Based Approach*. J. Hydraul. Eng., 2013, 139(10): 1099-1106

BRASIL.J. B; SANTOS, J. C. N; PALÁCIO, H. A. Q; FILHO, J. C. R; ANTONIO GEBSON. 2014. *Calibração de turbidímetro para estimativa da concentração de sedimento em suspensão na bacia experimental de Iguatu-ce*. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH. João Pessoa-PB.

CARVALHO, N.O.,1995. *Hidrossedimentologia Prática*. 1º edição. CPRM, 372p.

CARVALHO.K.S.de; PARANHOS.R.M; PAIVA.J.B.D.de.,2004 Limitações ao uso da relação entre turbidez e concentração de sedimento em suspensão em duas pequenas bacias em Santa Maria, RS. In: XXI Congresso Latino-americano de Hidráulica São Pedro, Estado de São Paulo, Brasil.

CARDOSO. A.T; KOBİYAMA. M; GRISON. F., 2012. *Problemas na estimativa de sólidos em suspensão associados à elaboração da curva-chave para sensor de turbidez*. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH. Foz do Iguaçu (PR).

CHAGAS.D.S., 2015. *Relação Entre Concentração De Sólidos Suspensos E Turbidez Da Água Medida Com Sensor De Retroespalhamento Óptico*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal Do Recôncavo da Bahia. Mestrado Em Engenharia Agrícola. 78p. Cruz Das Almas - Bahia.

CHANG, H. H. (1988) *Fluvial Processes in River Engineering*. John Willey & Sons. 430P.

CHENG, N.S.; CHIEW, Y.M. *Incipient Sediment Motion with Upward Seepage*. Journal of Hydraulic Research, 37, 665-681, 1999. <http://dx.doi.org/10.1080/00221689909498522>

CHOW VT, MAIDMENT DR AND MAYLS LW., 1988. *Applied hydrology*. New York: McGraw-Hill.

COIADO, E. M., 2002-2003. *Forma de Transporte de Sedimentos – Métodos Para Cuantificar el Caudal Sólido - Capítulo 4. In: Seminário Transporte de Sedimentos – Sedimentación- Muestras y Aparatos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de Madrid. Madrid-Espanha, 2002/2003.*

COIADO, E. M.; PAIVA, L.E.D.de., 2005. *Análises Sobre Algumas Fórmulas Para o Cálculo do Transporte de Sedimentos na Camada do Leito. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. João Pessoa, Estado da Paraíba, Brasil, novembro de 2005.*

COSTA.R.V.F., 2015. Mapeamento Geoquímico e Estabelecimentos de Valores de Referência (BACKGROUND) de Sedimentos Fluviais do Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Ouro Preto. UFOP. Ouro Preto (MG). 228P.

COWAN, W.L. *Estimating hydraulic roughness coefficients. Agricultural Engineering*, v. 37, no. 7, p. 473- 475. 1956.

ECKHARDT, M., 1998. Estimativa do Transporte de Sedimentos em Escoamentos Com Superfície Livre Pelo Método de Toffaleti. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE-UFRJ, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Civil. COPPE-UFRJ, 144p. Rio de Janeiro - RJ.

EINSTEIN.H.A.,1950. The bed load function for sediment transportation in open channel flows. Techn. Bulletin, n.1026, U.S.Dept. of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, D.C.

ESTIGONI, M. V; RENATO BILLIA DE MIRANDA, R.B.DE; VERONEZ, O; LEITE, C.B; BOTELHO, D.A; DOTTON, F.R.L; BRAMORSKI, J; VILLELA, S.M.; MAUAD, F.F., 2012. *FUNDAMENTOS TEÓRICOS SOBRE MODELAGEM DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS COESIVOS*. X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH. Foz do Iguaçu (PR).

GARDE, R. J.; RANGA RAJU, K. G.,1985. *Mechanics of Sediment Transportation and Alluvial Stream Problems*. 2nd Edition New York. John Wiley & Sons. 618p.

GOLDER. Complementação Da Aplicação Do Método Analítico Considerando O Monitoramento Intracalha De Sedimento – Setembro E Outubro De 2020. RT-002_209-535-7742_02, Revisão 00, São Paulo, 2021.

GRAF, W.H.,1971. *Hydraulics of Sediment Transport*. New York. McGraw-Hill. 513p.

HABERSACK, H. M; LARONNE, J.B., 2002. Evaluation and Improvement of Bed Load Discharge Formulas based on Helley-Smith Sampling in an Alpine Gravel Bed River. Journal of the Hydraulics Engineering, ASCE, Vol. 128, No.5, Proc. Paper 484-498.

HSU, S.M; HOLLY-Jr, F.M.,1992. *Conceptual Bed-Load Transport Model and Verification for Sediment Mixtures*. Journal of the Hydraulics Engineering, ASCE, Vol. 118, No.8, Proc. Paper 1135-1152.

JULIEN, P.Y., KLASSEN, G.J., 1995. *Sand-Dune Geometry of Large Rivers During Floods*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 121, No.9, pp. 657-663.

- KLAR, A.E., 1991. Irrigação/Frequência e Aplicação. Nobel, 156p.
- KOLLER, D, K., 2016. Estudo Experimental de Formas de Fundo Geradas por Correntes de Densidade Salina em Canal de Fundo Móvel. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul com requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas, IPH, 133p., Porto Alegre, RS.
- LIMA, J.E.F.W; LOPES, W.T.A; FILHO, E.C.O; MUNIZ, D.H.F., 2011. *Relação entre turbidez e concentração de sedimentos em suspensão em rios de uma bacia agrícola típica do cerrado: O caso da Bacia Experimental do Alto Rio Jardim, DF.* In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Maceió (AL).
- MANZ, R.E; SANTOS, I; PAULA, E.V., 2011. *Avaliação do Comportamento do transporte de sedimentos em suspensão por meio de monitoramento automático da turbidez.* In: Engenharia de Sedimentos/na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento. ABRH. Brasília (DF). 448p.
- MANTOVANELLI.G.B., 2016. *UMA ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA A OBTENÇÃO DA TAXA DE EROSIÃO DE SOLOS ATRAVÉS DE UM APARATO DO TIPO PISTÃO.* Dissertação apresentada como requisito para obtenção do grau de Mestre em Estruturas pelo programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Espírito Santo. UFES. 112p. Vitória (ES).
- MERRITT, K. A.; CONDER, J. M.; MAGAR, V. S.; KIRTAY, V. J.; CHADWICK, B., 2009. CASE STUDY REVIEW: *Demonstration and Validation of Enhanced Monitored Natural recovery at DoD Sites.* In.: ESTCP Project ER-0827 - TR1983. ESTCP, San Diego.
- MOLINAS, A.; WU, B.,1998. *Effect of Size Gradation on Transport of Sediment Mixtures.* Journal of the Hydraulics Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 8, Proc. Paper 786-793.
- PAIVA, L. E. D. de., 1995. *Aplicação de Métodos Macroscópicos na Determinação da Carga Sólida Total Transportada em Rios.* Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil na área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento. UNICAMP, 76p. Campinas-SP.
- PAIVA, J.B.D.de.; PAIVA, E.M.C.D. (Organizadores). **Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas.** Porto Alegre: ABRH (2001).
- PAIVA.J.B.D., 1988. *Avaliação dos modelos matemáticos de cálculo do transporte de sedimentos em rios. Tese apresentada para à Escola de Engenharia de São Paulo para obtenção do grau de Doutor em Engenharia, área de concentração: Hidráulica e Saneamento.* USP, 240p. São Carlos-SP.
- PAIVA, L.E.D.de. (2007). “A influência do Diâmetro Representativo do Material do Leito nas Fórmulas de Cálculo do Transporte de Sedimentos em Escoamentos com Superfície Livre”. Tese apresentada à Universidade Estadual de Campinas, para obtenção do grau de doutor em Engenharia Civil na área de concentração em Recursos Hídricos. UNICAMP, 340p. Campinas, Estado de São Paulo, Brasil.
- PAIVA, L.E.D.de. (2012). “*Engenharia de Sedimentos*”. Apostila da disciplina ESA052: Engenharia de

Sedimentos. Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Juiz de Fora, Estado de Minas Gerais, Brasil.

PEMBERTON, E. L., & LARA, J. M., 1984. Computing degradation and local scour. Bureau of Reclamation. Engineering and Research Center. Denver, Colorado 80225.

PEIXOTO, R. SANTOS., 2015. Desenvolvimento de um modelo 2DH de transporte de sedimentos coesivos. Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.

PONCE, R.J.,1990.:*Análise da Aplicabilidade e Modificações de Modelos de Cálculo do Transporte de Sedimento por Arrasto de Fundo em Rios de Médio Porte*. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Paulo para obtenção do grau de Doutor em Engenharia, área de concentração: Hidráulica e Saneamento. USP, 373p. São Carlos-SP.

PINHEIRO.E.A.R.; ARAÚJO.J.C.DE; FONTENELE.S.B.; LOPES.J.W.,2013. Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida. Water Resources and Irrigation Management. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, PB. v.2, n.2, p.103-110, May-Aug.

PINHEIRO.A.G., 2014. *Calibração de turbidímetro para estimativa da concentração de sedimento em suspensão na bacia experimental de iguatu-ce*. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. ABRH. João Pessoa-PB.

PINHEIRO.E.A.R.; , JOSÉ CARLOS DE ARAÚJO.J.C.DE; FONTENELE.S.B.DE; LOPES.J.W.B., 2013. *Calibração de turbidímetro e análise de confiabilidade das estimativas de sedimento suspenso em bacia semiárida*. In: Water Resources and Irrigation Management. Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA. Instituto Nacional do Semiárido, Campina Grande, PB. v.2, n.2, p.103-110.

RAUDKIVI, A.J.,1976. *Losse Boundary Hydraulics*. 2st Editinon. New Zealand.397p.

RANGA RAJU, K, G., SONI, J.P., 1976. *Geometry of Ripples and Dunes in alluvial Channels*, Journal of The Hydraulics Reserch, Vol. 14, No. 3, Proc. Paper 241 – 249.

SAMAGA, B.R.; RAJU, K.G.; GARDE. R.J., 1986. *Bed Load Transport of Sediment Mixtures*. Journal of the Hydraulics Engineering, ASCE, Vol. 112, No.11, Proc. Paper 1003-1019.

SCAPIN, J. (2005) *Título: Caracterização do Transporte de Sedimentos em um pequeno rio urbano na cidade de Santa Maria – RS*. 116f. Dissertação apresentada à Universidade Federal de Santa Maria para obtenção de mestrado em engenharia Civil. Rio Grande do Sul.

SCAPIN, J.; PAIVA, J. B. D.; BELING, F. A. (2007) *Avaliação de Métodos de Cálculo do Transporte de Sedimentos*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, p. 11-20.

SARI.V; CASTRO. N. M. R. dos; EIS E MASATO; KOBİYAMA.M (2015). Estimativa da concentração de sedimentos suspensos com sensores ópticos: revisão. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Versão On-line ISSN 2318-0331. RBRH vol. 20 no.4 Porto Alegre out. /Dez. 2015 p. 816 - 836.

- SILVA.R.C. V; WILSON-JR.G., (2005). Hidráulica Fluvial. COPPE.FRJ.Vol.II.254p.
- SIMONS, D.B & SENTÜRK, F., 1992. *Sediment Transport Technology and Water Resources publications*. Fort Collins. Colorado. USA.897p.
- SIMONS, D. E., RICHARDSON, E. V., 1961. *Forms of Bed Roughness in Alluvial Channels*. Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 87, No HY3, Proc. Paper 87-106.
- SIMONS, D. E., RICHARDSON, E. V., NORDIN, C. F., 1965. *Bed-Load Equation for Ripples and Dunes*. Geological Survey Professional Paper 462.H, United States Government Printing Office, Washington.
- STRASSER, M.A., 2002. *Estudo da Geometria das Formas de Fundo no Curso Médio do Rio Amazonas*. Tese apresentada para obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil. COPPE/UFRJ, 100 p., Rio de Janeiro, RJ.
- SUJIT K. BOSE, S.K; DEY.S.,2013. Sediment Entrainment Probability and Threshold of Sediment Suspension: Exponential-Based Approach.J. Hydraul. Eng., 2013, 139(10): 1099-1106
- TAMURA.M.M.,2017. O processo de sedimentação no canal de acesso aos portos do complexo estuarino de Paranaguá.Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre em Engenharia Ambiental, no Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná. UFPR, 95p. Curitiba (PR)
- U. S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (UASCE). HEC-RAS RIVER ANALYSIS SYSTEM: 2D Modeling User's Manual. Versão 5.0. Washington D. C., 2016.
- U.S. DEPARTMENT OF THE INTERIOR., (2006). *Erosion and Sedimentation Manual*. Bureau of Reclamation.Technical Service Center. Sedimentation and River Hydraulics Group. Denver, Colorado.
- VANONI, V.A.,1975. *Sedimentation Engineering*. New York. ASCE. 744p.
- VAN RIJAN, L.C., 1984a. *Sediment Transport, Part I: Bed Load Transport*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 10, Proc Paper. 1431-1553.
- VAN RIJAN, L.C., 1984b. *Sediment transport, Part II: Suspended Load Transport*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 11, Proc Paper. 1431-1553.
- VAN RIJAN, L.C., 1984c. *Sediment Transport, Part III: Bed Forms and Alluvial Roughness*. Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No. 12, Proc Paper. 1733-1754.
- VESTENA, L. R; LUCINI. H. KOBIYAMA, Masato; LUCINI, Henrique2; KOBIYAMA, Masato3; 2007. *Monitoramento automático da concentração de sedimentos em suspensão na bacia hidrográfica do caeté, alfredo wagner/sc*. In: i Workshop Regional de Geografia e Mudanças Ambientais. Guarapueva (PR) Ed.Unicentro.P.61-70.
- YALIN, M.S., 1964. *Geometrical Properties of Sand Waves*, Journal of the Hydraulics Division, V.90, n.HY5, Proc. Paper 105-119.

YALIN, M.S., 1977. *Mechanics of Sediment Transport*. 2nd Edition. Pergamon Press. New York, U.S.A. 298p.

WILSON-Jr. G; PAIVA.L.E.D.de.,2003. *Estimativa da descarga sólida por arraste a partir do registro das configurações de fundo: aplicação ao córrego Horácio, noroeste do Estado do Paraná*. In: IX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. ABRH. Curitiba, Paraná.

Anexo 2: Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2020

08/04/2022 12:08

SEI/GOVMG - 14591773 - Nota Técnica



GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Gerência de Monitoramento da Qualidade das Águas

Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2020

PROCESSO Nº 2090.01.0002251/2020-22

1) INTRODUÇÃO

Em resposta ao despacho nº 145/2020/FEAM/GERAI ([13792592](#)), onde foi solicitada análise do Relatório Técnico – Volume 14 – Monitoramento dos Sedimentos Intracalha nos Trechos 6 ao 12 ([13275364](#)), referente ao monitoramento do comportamento/dinâmica do rejeito intracalha nos rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, até UHE Risoleta Neves, do período seco de 2019, o Igam vem apresentar suas considerações acerca dos tópicos relativos a qualidade de água e de sedimentos apresentados no documento em tela.

2) OBJETIVOS E METODOLOGIA DO ESTUDO

No documento “Volume 1 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 8 – Revisão 0 (CH2M, 2017b)”, os depósitos de rejeitos intracalha foram diferenciados para a tomada de decisão entre instáveis e estáveis. Os depósitos de rejeito estáveis foram classificados como aqueles que apresentam espessuras de *lag layer* superior a 40 cm e rejeito inconsolidado inferior a 50 cm. No documento Volume 1 (CH2M, 2017b), encaminhado anteriormente à CT-GRSA (Câmara Técnica de Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental) do Comitê Interfederativo (CIF), foi selecionada a remoção mecânica do rejeito intracalha potencialmente instável e destinação para fora da área impactada.

Para os depósitos no leito fluvial (calha) potencialmente estáveis, o processo simplificado de tomada de decisão não foi conclusivo para este contexto. Nesse caso, conforme previsto no Plano de Manejo de Rejeito, a CT-GRSA recomendou realizar estudos complementares. Optou-se por utilizar o período de cheias do ciclo hidrológico 2017/2018 como um observatório do comportamento do ambiente, com monitoramento do perfil estratigráfico e sua estabilidade, a fim de obter informações mais concretas e representativas do ambiente, dentre outras questões a serem avaliadas.

Desta maneira, a fim de atender aos diversos questionamentos da CT-GRSA, relacionados com os contextos de depósitos no leito fluvial, foram definidas atividades complementares de monitoramento, de modo a gerar novos dados para aprofundar tecnicamente a caracterização ambiental e, caso necessário, um novo processo de tomada de decisão seria aplicado, especificamente para o contexto dos depósitos intracalha.

Com base nos resultados apresentados no Relatório Técnico Volume 6, também encaminhado anteriormente à CT-GRSA, a alternativa selecionada para o contexto intracalha do Plano de Manejo de Rejeitos para o Trecho 8, assim como para todos os outros Trechos, foi o “capeamento natural e monitoramento”, que consiste no modelo conceitual em que a camada de *lag layer* que se formou após o evento. Conforme o estudo apresentado a camada de *lag layer* funciona como uma camada confinante do rejeito inconsolidado, o qual se encontra subjacente, prevenindo a suspensão do material fino para a coluna de água. O monitoramento da evolução do *lag layer* é fundamental para o acompanhamento da alternativa selecionada. Para tal tomada de decisão, levou-se em consideração os dados de monitoramento do Trecho 8 - Trecho piloto, que expressam o comportamento do *lag layer* diante das condições de vazão verificadas até então.

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_visualizar&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=16863406&infra_sist... 1/6

08/04/2022 12:08

SEI/GOVMG - 14591773 - Nota Técnica

Sendo assim, foi solicitado pelos membros da CT-GRSA, na Nota Técnica CT-GRSA nº 08/2019 da Deliberação CIF nº 304/2019, o monitoramento do sedimento intracalha para melhor entendimento da dinâmica do *lag layer* e a sua função na prevenção da ressuspensão de sólidos finos e consequente alteração da qualidade das águas, especialmente nos parâmetros de turbidez e cor. Isto posto, o objetivo do relatório avaliado no presente estudo (Relatório Técnico – Volume 14 – Monitoramento dos Sedimentos Intracalha nos Trechos 6 ao 12), é apresentar os resultados do monitoramento do sedimento intracalha para melhor entendimento da dinâmica do *lag layer*.

A fim de determinar a variação de espessura e de comportamento do *lag layer* e rejeito inconsolidado durante o período seco e de transição seco-chuvoso 2019, foram realizados monitoramentos mensais da estratigrafia de 25 transectos selecionados a partir dos Planos de Manejo de Rejeito, com coleta de amostras de sedimentos de cada camada estratigráfica encontrada para análise de metais e granulometria. O monitoramento do estudo em questão foi realizado em 4 campanhas de amostragem: Campanha A, entre 22/07 e 11/09; Campanha B, entre 09/09 e 25/10, Campanha C, entre 21/10 e 22/11, e Campanha D, entre 20/11 e 18/12, incluindo as áreas dos Trecho 6 a 12, compreendendo os rios Gualaxo do Norte, Carmo e Doce até o início do reservatório da UHE Risoleta Neves.

Além disso, durante esse mesmo período, foi realizada uma rotina de monitoramento em oito dos 25 transectos selecionados para a coleta das variáveis velocidade, cor aparente, níveis das réguas limimétricas e turbidez.

3) RESULTADOS APRESENTADOS NO ESTUDO

3.1) Resultado das Medições Estratigráficas

Os principais resultados registrados pelo relatório do monitoramento dos sedimentos intracalha nos trechos 6 ao 12, serão apresentados a seguir:

Os Trechos 7 e 8 apresentaram as maiores camadas de rejeito de todo o projeto, alcançando 3,0 m de espessura média no transecto T08T06, 2,3 m no T08T10 e 2,2 m no transecto T07T01. Salvo esses dois trechos, o restante apresentou espessuras reduzidas de camadas de rejeito, com o máximo de 32 cm no transecto T06T08.

O Trecho 12 (rio Doce) não apresentou rejeito em nenhuma das campanhas realizadas. No Trecho 10 (rio do Carmo), apenas em 2 dos 9 transectos realizados foram encontradas camadas de rejeito, sendo que o maior valor da camada de rejeito encontrado foi de 10 cm no transecto T10T14.

3.2) Resultados de Análises Laboratoriais

No que se refere às análises de metais nos sedimentos, percebe-se que os maiores números de resultados de análise de metais acima dos limiares apontados pela Resolução CONAMA 454/2012 foram para arsênio e mercúrio no *lag layer* A e no substrato natural.

Com relação a reprodutibilidade e precisão dos resultados analíticos de metais nos sedimentos, verificou-se que mais de 83% das análises individuais (por analito) foram satisfatórias. Cerca de 14% foram parcialmente satisfatórias: RPDs entre 50% e 100% ou com um analito (original ou duplicata) abaixo do Limite de Detecção da Metodologia/Equipamento (LD) e outro detectado em mesma ordem de grandeza e 4,5% foi insatisfatória. Em termos gerais, os resultados de reprodutibilidade foram adequados, conforme apresentado pelo estudo.

3.3) Resultados do Monitoramento de Velocidade, Cota e Turbidez

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_visualizar&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=16863406&infra_sist... 2/6

Para os resultados do Monitoramento de velocidade do rio, cota de nível de fundo e turbidez, verificou-se uma correlação positiva entre a velocidade e turbidez, a qual indica que com o aumento da velocidade do rio há um aumento da turbidez correlacionado. Entretanto, a correlação verificada foi considerada média (0,39), o que sugere a influência de outras variáveis na variação de turbidez, que não somente a velocidade do rio. Já a correlação entre a velocidade do escoamento e o nível do leito é negativa (-0,45) e média, sugerindo que o aumento de velocidade do rio está ligado à diminuição da cota do leito, bem como outras variáveis devem influenciar o processo de variação do nível do leito.

A seguir é apresentado o resumo das principais considerações relacionadas ao monitoramento de velocidade, cota de nível de fundo e turbidez:

- Existe uma correlação positiva, isto é, de proporção direta, entre velocidade e turbidez;
- No período de estiagem, os valores de turbidez se mantêm abaixo de 100 NTU;
- Os níveis de turbidez aumentam consideravelmente nos eventos de chuva, chegando a atingir valores várias vezes maiores que o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, mas restabelecem equilíbrio após eventos pontuais;
- Existe uma clara tendência ao equilíbrio do nível do leito de fundo entre períodos de chuva e estiagem, existindo variações do mesmo diretamente relacionadas com o aumento de velocidade dos rios;
- O maior nível de turbidez (723 NTU) registrado neste monitoramento foi no transecto localizado fora da área impactada, no Trecho 9, T09T53, na medição realizada em dezembro de 2019.

Foi feita a estimativa de volume de *Lag Layer* e rejeito depositados na calha com base nos transectos obtidos, para calcular o volume estimado da camada de *lag layer* e de rejeito inconsolidado. Para tanto, fez-se o produto das áreas e das espessuras obtidas. Os resultados de volume estimado de *lag layer* e rejeito inconsolidado, obtidos através dos dados do presente monitoramento e geoprocessamento, foram comparados com os resultados dos estudos referentes ao Plano de Manejo de Rejeitos (Volumes 2, 4, 5, 6 e 8), chamados de *Baseline*, cuja etapa de campo foi realizada entre novembro de 2017 e fevereiro de 2018.

O volume estimado por trecho da camada de *lag layer* apresentou aumento até o Trecho 10. Na totalidade, o volume de *lag layer* estimado no atual estudo é cerca 33% maior do que no *Baseline* (3,2 e 2,4 Mm³, respectivamente). Já o volume da camada que contém rejeito inconsolidado diminuiu em todos os trechos, totalizando aproximadamente 66% de redução, variando de 726 mil m³ para 244 mil m³.

Foram buscados na literatura estudos que respaldassem as variações de volume depositado verificadas. Os autores Hirano (1971, p. 21, apud Costa, 2018) e Bui et al. (2019) apontam a existência de uma camada ativa com relação ao transporte de sedimentos no leito de um rio pelo fluxo de água, a qual ocorre acima de um substrato inativo. A camada ativa, que está presente no topo do leito e disponível para transporte, pode passar por eventos de remoção de sedimentos e redução de espessura. Tais eventos de remoção de sedimentos são inerentes aos rios devido aos processos de transporte de sólidos, principalmente de partículas finas em suspensão, pela corrente fluvial em condições de maiores velocidades e vazão, variáveis as quais são diretamente proporcionais à capacidade de transporte com relação aos tamanhos de grãos movimentados. Após eventos de remoção parcial, que decerto ocorreram entre o *Baseline* e o monitoramento do presente estudo, os autores supramencionados sugerem que a camada ativa se recompõe até recuperar sua espessura com contribuições tanto do material da camada inativa, quanto com material advindo do transporte em suspensão que se sedimenta, retornando a distribuições granulométricas similares às anteriores em ambas camadas ativa e inativa.

Esses autores concluem ainda que em eventos de deposição, nos quais a velocidade de sedimentação é mais significativa do que a velocidade de cisalhamento, parte do material excedente depositado é transferido para a camada inativa. Essa mudança de condição (de ativa para inativa) forma

08/04/2022 12:08

SEI/GOVMG - 14591773 - Nota Técnica

novas faixas de substratos que não estão sujeitos ao transporte pelo fluxo fluvial. Este substrato inativo tem composição misturada entre os materiais mais grosseiros originários da camada ativa e materiais mais finos que infiltraram em um possível processo de colmatção.

4) CONSIDERAÇÃO DO IGAM

4.1) Resultado das Medições Estratigráficas

Nos gráficos de visualização do Transecto, as campanhas C e D possuem o mesmo código de localização dos transectos no rio: centro e direita do rio. Para os próximos relatórios sugere-se, para melhor entendimento dos gráficos, ao invés de colocar nomes das campanhas usar o mês ou o período (seca, chuva ou transição), e evitar mesmos códigos para designar elementos diferentes na representação gráfica.

Os gráficos de um mesmo trecho possuem escalas muito diferentes, o que dificulta a comparação entre os pontos. Sugere-se que ao menos para um mesmo trecho sejam utilizadas as mesmas escalas nos gráficos.

Os textos sobre os gráficos não apresentam uma sequência, hora aparece antes do gráfico, hora depois. Sugere-se seguir uma padronização da disposição entre os gráficos e seus respectivos textos.

Os trechos 7 e 8 foram os que apresentaram as maiores espessuras de rejeito inconsolidado e o trecho 12 não apresentou camadas de rejeito em nenhuma das campanhas. Sugere-se apresentar justificar as causas que puderam influenciar nesses resultados.

4.2) Resultados de Análises Laboratoriais

No que se refere as análises de metais nos sedimentos, os dados dos metais foram apresentados como média e uma tabela complementar com os percentuais de violação dos limites 1 e 2 da Resolução Conama 454/2012. Porém, para os metais ferro e manganês, por não apresentarem limites na referida norma, foram apresentados somente os gráficos das médias das campanhas por transecto. Assim, em termos de média, as concentrações de ferro e manganês nos rejeitos foram inferiores das que foram obtidas nas outras camadas. Esses resultados deveriam ser melhor investigados, uma vez que esse comportamento não era esperado, tendo em vista que os maiores constituintes do rejeitos são exatamente os elementos ferro e manganês. Portanto, as análises químicas não serviram para complementar e corroborar com a análise tátil-visual realizada em campo. Recomenda-se que esse fato seja melhor explorado e sugere-se a inserção de campanhas exploratórias de análises mineralógicas das camadas estratigráficas para poder confirmar ou não a análise tátil-visual.

4.3) Resultados do Monitoramento de Velocidade, Cota e Turbidez

Na página 109 foi feita a seguinte afirmação: "Os níveis de turbidez aumentam consideravelmente nos eventos de chuva, chegando a atingir valores várias vezes maiores que o limite estabelecido pela Resolução CONAMA 357/2005, mas restabelecem equilíbrio após eventos pontuais." Solicita-se esclarecer porque se chegou à conclusão de que os níveis de turbidez restabelecem equilíbrio após eventos pontuais e que tipos de eventos pontuais se tratam?

Foi afirmado que ao longo do período de dez/17 a dez/19 observou-se: "A tendência de redução verificada do começo para o fim do período analisado está possivelmente associada ao reequilíbrio natural dos rios, seja pela manutenção das cotas após o assoreamento ocorrido pelo volume de material depositado no leito dos rios, seja pela constituição e incremento da camada lag layer...".

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_visualizar&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=16863406&infra_sist... 4/6

08/04/2022 12:08

SEI/GOVMG - 14591773 - Nota Técnica

Porém, na comparação entre os dois últimos períodos chuvosos 2018 e 2019, não se registrou redução da turbidez, mas sim um leve aumento. Isso vai contra a afirmação acima. Esses resultados tendem a indicar que em eventos críticos de elevada pluviometria é esperada a elevação proporcional dos níveis de turbidez. Conclui-se que ainda não há elementos suficientes para afirmar que a elevação da turbidez é controlada pela camada *lag layer*. Assim solicita-se rever os argumentos apresentados.

Quanto a Estimativa do Volume de Rejeito Conforme Critério de Granulometria (NHC), dentre as premissas adotadas para esse cálculo, tem-se: a) Considerou-se que partículas presentes nos materiais obtidos das sondagens que tenham diâmetro superior a 0,200 mm não seriam de rejeitos da Barragem de Fundão; e b) que todas as partículas presentes nos materiais de sondagem que tivessem diâmetro igual ou inferior a 0,200 mm seriam de rejeitos da Barragem de Fundão.

Há que se considerar que essas premissas são muito simplistas, o pode levar a interpretações equivocadas, tendo em vista que:

1) o rejeito da barragem ao se misturar com os sedimentos da bacia de contribuição no momento do rompimento acarretou em um volume bastante superior ao original, que é denominado rejeito inconsolidado, e

2) como apontado no próprio relatório em questão, parte do material com diâmetro de partícula inferior a 0,200 mm, depositado na calha, é proveniente de sedimentos naturais.

Esses fatos levam a considerar que a Estimativa do Volume de Rejeito Conforme Critério de Granulometria (NHC) foi uma forma bastante simplista de extrapolação. Porém, o relatório conclui que o volume obtido por esse método é extremamente superior ao do encontrado pelo método baseado nos dados estratigráficos. Tendo em vista essa divergência dos resultados pelos diferentes métodos, solicita-se que seja apresentada uma alternativa para os próximos estudos, com base no refinamento dos métodos utilizados, ou que seja adotada uma metodologia mais precisa.

Por fim, solicita-se que, na revisão do documento, seja apresentado um cronograma de continuidade do monitoramento do sedimento intracalha para melhor entendimento da dinâmica do *lag layer*.

5) CONCLUSÕES

De maneira geral, com base nas considerações elencadas acima, o Igam considera que faltam evidências para confirmarem o argumento apresentado no Relatório Técnico – Volume 14 – Monitoramento dos Sedimentos Intracalha nos Trechos 6 ao 12, de que a elevação da turbidez é controlada pela camada *lag layer*.

Além disto, recomenda-se que o documento seja revisado, levando em consideração os apontamentos elencados pelo Igam na presente nota técnica, e que nesta revisão seja incluída a análise dos dados do último período chuvoso 2019-2020 (dezembro, janeiro e fevereiro), quando foram observados períodos prolongados de anomalias positivas de água precipitável na bacia do rio Doce, que poderão acarretar em um cenário bastante diferente do que foi apresentado.



Documento assinado eletronicamente por **Katiane Cristina de Brito Almeida, Gerente**, em 26/05/2020, às 16:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Kelly Saraiva, Analista**, em 26/05/2020, às 16:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).

Documento assinado eletronicamente por **Ana Carolina Miranda Lopes de Almeida, Diretor(a)**, em

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_visualizar&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=16863406&infra_sist... 5/6

08/04/2022 12:08

SEI/GOVMG - 14591773 - Nota Técnica



26/05/2020, às 18:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.mg.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **14591773** e o código CRC **6297FA32**.

Referência: Processo nº 2090.01.0002251/2020-22

SEI nº 14591773

Criado por 71162526149, versão 49 por 04022462680 em 26/05/2020 16:43:31.

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_visualizar&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=16863406&infra_sist... 6/6

Anexo 3 :Nota Técnica do IGAM

NOTA TÉCNICA
Instituto Mineiro de Gestão das Águas

CONTEXTUALIZAÇÃO

Em 22 de julho de 2021 foi realizado via e-mail solicitação de apoio técnico ao Igam, para análise de relatórios e dados de monitoramento e caracterização dos sedimentos intracalha do rio Doce, com avaliação da efetividade do *Lag Layer* (rejeito consolidado).

O apoio solicitado é focado nas seguintes atividades:

- apoiar na consolidação do Termo de Referência;
- participar da mesa de seleção para avaliação técnica dos candidatos;
- prestar orientação técnica ao especialista selecionado, caso necessário;
- receber, homologar, analisar e aprovar o documento (Parecer Técnico) do especialista, em conjunto com o supervisor titular e a CT-GRSA.

A presente Nota Técnica se atém a homologação, análise e aprovação do Parecer Técnico “**Análise do documento - Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento - setembro e outubro de 2020**” e da eficácia do *lag layer* na contenção dos rejeitos intracalha, elaborado pela Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda. e o Prof. Dr. Luiz Evaristo Dias de Paiva, cumprimento dos requisitos do Edital Flacso 009/2021 que trata sobre a contratação de consultoria especializada.

Na data de 14 de janeiro de 2022 foi solicitado dilação de prazo, em 5 dias, para entrega do relatório. No dia 21 de janeiro de 2022 foram apresentados via e-mail as versões .docx e .pdf do relatório preliminar do edital 009/2021.

Não obstante, o apoio a construção do Termo de Referência, mesa de seleção, prestação de orientações ao especialista contratado foram realizados todas as vezes que o Igam foi demandado.

OBJETO DO PARECER TÉCNICO

Parecer técnico sobre os documentos entregues pela Fundação Renova referentes à caracterização e monitoramento dos sedimentos/rejeitos, para os períodos seco e chuvoso, realizados na intracalha dos rios impactados pelo rompimento da Barragem de Fundão, para a avaliação da efetividade do *lag layer*, referente ao Eixo prioritário 1 – Recuperação Ambiental Extra e Intracalha, itens 7 e 8, mais especificamente do Item 8 da Ação Civil Pública nº 69758- 61.2015.4.01.3400, fornecendo subsídios técnicos para a tomada de decisão quanto ao assunto no âmbito do CIF.

AVALIAÇÃO

A presente Nota Técnica constata que o relatório preliminar, elaborado pela Minerva Soluções Ambientais e de Saneamento Ltda. e o Prof. Dr. Luiz Evaristo Dias de Paiva, cumpre na íntegra o que foi estabelecido no edital 009/2021. A Tabela 1. apresenta os produtos e conteúdo a serem entregues, assim, como seu *status* no momento da confecção dessa Nota Técnica.

Tabela 1: Status dos Produtos ou Resultados Previstos

Produtos/Resultados	Sub itens	Status
(a) Entrega de um Parecer Técnico preliminar, apresentando a análise dos documentos entregues pela Fundação Renova quanto ao alcance dos objetivos, já buscando atender a estrutura proposta no item abaixo (b).	Estrutura proposta no item abaixo (b)	Entregue em 21/01/2022
(b) Entregar a versão final do Parecer Técnico após a revisão da minuta pela CT- GRSA, acompanhada da Anotação de Responsabilidade Técnica (ART), Seguindo, no mínimo, a estrutura abaixo:	i) Título do parecer técnico;	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	ii) Introdução (Abordagem do tema do parecer/estudo e o objetivo do parecer);	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	iii) Documentos Analisados (Listar os documentos analisados);	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	iv) Análise do(s) documento(s) e estudo(s);	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	v) Considerações Finais e Conclusões;	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	vi) Encaminhamentos (Sugestões de Encaminhamentos, Requisições ou, se pertinente, de estudos complementares).	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	vii) Assinatura com dados técnicos (Nome completo sob assinatura, formação e número de registro profissional (CREA).	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	viii) Referências Bibliográficas (Bibliografias utilizadas no parecer)	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
	a) Contextualização dos estudos e documentos (descrever os objetivos dos estudos analisados e os métodos utilizados, sem adentrar em uma análise dos dados e resultados);	Aguardando aprovação/considerações do item (a)

	b) Análise e posicionamento do especialista (Posicionamento técnico sobre os dados e resultado(s) do(s) estudo(s).	Aguardando aprovação/considerações do item (a)
c) Apresentação e discussão da análise e do Parecer Técnico em 2 (duas) reuniões por videoconferência junto com o(s) Supervisor (es) deste edital e aquele(s) a quem ele(s) convidar(em) em uma reunião da CT-GRSA e, caso necessário, em reunião do Comitê Interfederativo (CIF), sendo até 4 (quatro) dias, em datas a serem definidas entre o(s) supervisor(es) e o(a) especialista contratado(a).		Em andamento.

Importante salientar que a análise técnica realizada e que consta no Parecer Técnico Preliminar, está dentro do que preconiza as melhores técnicas e conceitos em hidrossedimentologia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando o Parecer Técnico Preliminar apresentado, estamos em de acordo com a versão entregue, considerando que foi cumprido todos os quesitos do Edital Flacso 009/2021. Ademais, considero pertinentes e oportunas as considerações realizadas pelos autores e posiciono favoravelmente ao acatamento dos encaminhamentos e sugestões apresentadas.

Heitor Soares Moreira
Analista Ambiental – IGAM
MASP: 1147109-1

Anexo 4: Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2021

07/04/2022 13:56

SEI/GOVMG - 33199895 - Nota Técnica



GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS

Instituto Mineiro de Gestão das Águas

Gerência de Monitoramento da Qualidade das Águas

Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2021

PROCESSO Nº 2090.01.0002251/2020-22

INTRODUÇÃO

Em resposta ao Memorando.FEAM/GERAI.nº 42/2021 (13792592), onde foi solicitada análise técnica dos seguintes documentos: Memorando Técnico MT-001_209-535-7742_07 de 20/04/2021 (29492200) e o Relatório Técnico – Monitoramento dos Sedimentos Intracalha (Trechos 6 a 11) – Campanhas A, B, C e D (setembro e outubro de 2020), disponível no link: [Google Drive](#), o Igam vem apresentar suas considerações acerca dos tópicos relativos a qualidade de água e de sedimentos apresentados no documento em tela, conforme suas competências, no que diz respeito aos dados de monitoramento intracalha referente ao item 7 do Eixo Prioritário 1.

O Memorando Técnico MT-001_209-535-7742_07 de 20/04/2021 foi peticionado pela Fundação Renova em resposta às Notas Técnicas da CT-GRSA 15/2020, 20/2020 e 21/2020, as quais contemplaram as solicitações da Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2020. As considerações feitas pelos órgãos de acompanhamento foram respondidas no Relatório Técnico – Monitoramento dos Sedimentos Intracalha (Trechos 6 a 11) – Campanhas A, B, C e D (setembro e outubro de 2020). Assim o objetivo do presente memorando é avaliar se as considerações apontadas como atendidas pela Fundação Renova foram contempladas na Revisão 01 do Relatório Técnico – Monitoramento dos Sedimentos Intracalha (Trechos 6 a 11) – Campanhas A, B, C e D.

ANÁLISE DOS DOCUMENTOS

Solicitações consideradas - Parcialmente Apropriadas e Não Apropriadas pela Fundação

Renova

A seguir serão apresentadas as considerações do IGAM sobre as solicitações que foram consideradas "Parcialmente Apropriadas e Não Apropriadas" pela Fundação Renova e portanto, não foram atendidas em sua totalidade nos documentos apresentados. São elas:

1. Com relação à estimativa de volume segundo critério da granulometria (NHC) o Igam solicita a adoção de uma metodologia mais precisa para os próximos estudos, com base no refinamento dos métodos previamente utilizados.

Resposta da Fundação Renova: considera a recomendação não apropriada e apresenta algumas ponderações.

Comentário Igam: O IGAM acata as ponderações apresentadas pela Fundação Renova, tendo em vista a metodologia também foi utilizada nos Planos de Manejo de Rejeito, e os mesmos foram aprovados pelo Sistema CIF e que, conforme apresentado o método utilizado produz resultados conservadores do ponto de vista de estimativa de volume de rejeitos.

2. Sugestão da realização de análises mineralógicas das camadas estratigráficas para complementação da análise tátil-visual efetuada em campo, no intuito de ratificar a presença dos

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=38468018&infra... 1/3

07/04/2022 13:56

SEI/GOVMG - 33199895 - Nota Técnica

rejeitos.

Resposta da Fundação Renova: *“Considerando que os sedimentos naturais podem ter concentrações mais elevadas de ferro e manganês em comparação com o rejeito, concentrações desses parâmetros mais elevadas nas camadas mais grosseiras da estratigrafia do leito são compatíveis com a geoquímica local e os processos hidrossedimentológicos que levam a formação do lag layer. Dessa forma, entende-se que não é necessária a realização de análises mineralógicas para investigar esses resultados.”*

Comentário Igam: O IGAM considera que apenas a análise tátil-visual dos testemunhos de sedimentos/rejeitos não é suficiente para a classificação de camadas como substrato natural, lag layer e rejeito inconsolidado. Contudo, tendo em vista que está sendo conduzido pela Fundação Renova o projeto de *“finger print”*, no intuito de buscar métodos para identificação do rejeito, o IGAM entende que os resultados do projeto *“finger print”* subsidiará a avaliação ora apresentada para a identificação das camadas dos rejeitos intracalha.

3. Inclusão da análise dos dados do período chuvoso 2019-2020 (dezembro, janeiro e fevereiro).

Resposta da Fundação Renova: Os dados do último período chuvoso de 2019-2020 foram incluídos na Seção 6.4 da Revisão 01 do relatório.

Comentário Igam: Considerando a não realização das coletas durante os meses de períodos prolongados de anomalias positivas de precipitação que ocorreram em janeiro e fevereiro de 2020, que poderão acarretar em um cenário bastante diferente do que o que foi apresentado, entende-se que este item não foi atendido. Contudo, o Igam reforça a importância da realização de campanhas de monitoramento dos testemunhos de sedimentos para avaliar o comportamento desse compartimento, especialmente durante os períodos chuvosos. Para tanto, ressalta-se a importância da realização de coletas em datas logo antes e logo após eventos de cheia, o que implicaria em uma maior frequência das coletas durante os períodos chuvosos.

Nesse sentido, faz-se necessária a continuidade do monitoramento do sedimento intracalha para melhor entendimento da dinâmica do lag layer e, portanto, deve ser apresentada uma proposta de cronograma para a continuidade do monitoramento da camada lag layer.

Solicitações consideradas - Apropriadas pela Fundação Renova

A seguir serão apontadas as considerações, que apesar de terem sido indicadas pela Fundação Renova como *“Apropriadas”*, na avaliação do IGAM não foram atendidas nos documentos apresentados, e não foi apresentada nenhuma justificativa para o não atendimento. São elas:

1. Para os próximos relatórios sugere-se, para melhor entendimento dos gráficos, ao invés de colocar nomes das campanhas usar o mês ou o período (seca, chuva ou transição).
2. O trecho 12 não apresentou camadas de rejeito em nenhuma das campanhas. Solicita-se apresentar as causas que puderam influenciar nesses resultados.
3. Solicita-se que, na revisão do documento, seja apresentado um cronograma de continuidade do monitoramento do sedimento intracalha para melhor entendimento da dinâmica do lag layer.

As demais considerações feitas pelo IGAM foram atendidas pelos documentos enviados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pela análise realizada pela equipe técnica do IGAM entende-se importante a finalização do projeto *“finger print”* para subsidiar na identificação das camadas dos rejeitos intracalha, bem como a

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=documento_imprimir_web&acao_origem=arvore_visualizar&id_documento=38468018&infra... 2/3

07/04/2022 13:56

SEI/GOVMG - 33199895 - Nota Técnica

continuidade do monitoramento do sedimento intracalha para melhor entendimento da dinâmica do lag layer . Para esse último, deve ser apresentado um cronograma de continuidade do monitoramento da camada lag layer bem como um retorno da Fundação Renova quanto aos itens elencados acima como não atendidos e sem justificativa para o não atendimento.



Documento assinado eletronicamente por **Katiane Cristina de Brito Almeida, Gerente**, em 11/08/2021, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Kelly Saraiva, Analista**, em 11/08/2021, às 16:09, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wanderlene Ferreira Nacif, Diretor(a)**, em 19/08/2021, às 18:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.mg.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **33199895** e o código CRC **BFF720E6**.

Referência: Processo nº 2090.01.0002251/2020-22

SEI nº 33199895

Anexo 5: Nota Técnica nº 16/IGAM/GEMOQ/2021

08/04/2022 09:22

SEI - Nota Técnica 16 (33181721) - Nota Técnica 16 (33181721)



GOVERNO DO ESTADO DE MINAS GERAIS
Instituto Mineiro de Gestão das Águas
Gerência de Monitoramento da Qualidade das Águas

Nota Técnica nº 16/IGAM/GEMOQ/2021

PROCESSO Nº 2090.01.0003275/2020-19

INTRODUÇÃO

O Memorando.FEAM/GERAI.nº 43/2021 solicita que a área técnica do Igam avalie às informações prestadas nos seguintes documentos: Memorando Técnico MT-001_209-535-7742_07 de 20/04/2021 ([29492200](#)) e Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento – Setembro e Outubro de 2020 ([29490689](#)), conforme suas competências, no que diz respeito aos dados de monitoramento intracalha referente aos meses de setembro e outubro de 2020 e, correspondentes ao item 8 do Eixo Prioritário 1. Nesse sentido o Igam, por meio da Gemoq/DMEC, vem apresentar seus apontamentos.

ANÁLISE DOS DOCUMENTOS

Memorando Técnico MT-001_209-535-7742_07 de 20/04/2021

Esse documento foi peticionado pela Fundação Renova em resposta às Notas Técnicas da CT-GRSA 15/2020, 20/2020 e 21/2020 e conseqüentemente, também da Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2020.

Quanto aos itens solicitados na Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2020 pelo Igam, foi informado que os itens foram atendidos na Revisão 01 do relatório. No entanto, a revisão 01 foi protocolada junto ao processo SEI nº 2090.01.0002251/2020-22, assim a resposta com relação aos itens apontados como atendidos na Revisão 01 do Relatório será apresentada na Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2021 ([33199895](#)) para verificar o atendimento aos itens solicitados.

Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento – Setembro e Outubro de 2020

Item - 6.1.3.2. Comparação Entre Campanhas

Sugere-se a utilização de referências bibliográficas que corroborem com as indicações apontadas para justificar as diferenças observadas entre as campanhas.

Na seguinte frase: *“no período relativamente curto avaliado entre as campanhas O e E é muito pouco provável que tenham ocorrido alterações da mobilidade química (e.g., afetando o potencial de lixiviação) desses parâmetros em dois sentidos nessa camada.”*

Sugere-se esclarecer os seguintes pontos:

1. Com base em quais argumentos foi considerado um período relativamente curto entre as campanhas O e E. Existem referências que confirmam que o período foi relativamente curto?
2. Essas diferenças nas concentrações não poderiam indicar que essas camadas estão em constante movimentação e interação com a coluna d'água? Além disto, é necessária a apresentação de mais evidências para tal afirmação.

Sobre o teste de correlação de Pearson feito entre o percentual de frações finas e a as concentrações dos parâmetros, para testar a hipótese de que a redução das concentrações teria relação com a redução da concentração de frações finas, chegou-se a seguinte conclusão: “Verifica-se que em geral os coeficientes de correlação foram baixos, de forma que esta hipótese foi descartada.”

Com base nos dados apresentados faz-se necessário esclarecer quais os dados foram utilizados para os testes, quais as comparações foram realizadas e se o N amostral foi suficiente para chegar à conclusão de descartar a hipótese testada.

Consideração do Igam quanto a eficiência do lag layer

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=procedimento_trabalhar&acao_origem=protocolo_pesquisa_rapida&id_protocolo=38447389... 1/4

08/04/2022 09:22

SEI - Nota Técnica 16 (33181721) - Nota Técnica 16 (33181721)

Ademais, cabe salientar que pelo monitoramento realizado pelo Igam, no âmbito do Programa Águas de Minas, na comparação entre a série histórica de monitoramento no período pré-rompimento e o ano de 2020, período pós-rompimento (Gráficos de 1 a 3), observa-se uma piora nos resultados de turbidez, manganês total e ferro dissolvido. Para esses parâmetros foram registrados em 2020 valores superiores aos da série histórica e aos 3 últimos anos após o rompimento da barragem (anos de 2017, 2018 e 2019). Esses resultados demonstram que cinco anos após o rompimento ainda se observa alterações na qualidade das águas do Trecho 1 (rios Gualaxo do Norte, do Carmo e Doce, a montante da UHE Risoleta Neves), mais próximo ao rompimento. Portanto, deve ser avaliada com cautela a efetividade da camada *lag layer* como barreira física para a eventual ressuspensão do rejeito inconsolidado.

Gráfico 1 – Análise estatística dos resultados de turbidez no período pré-rompimento e nos cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão, no trecho 1.

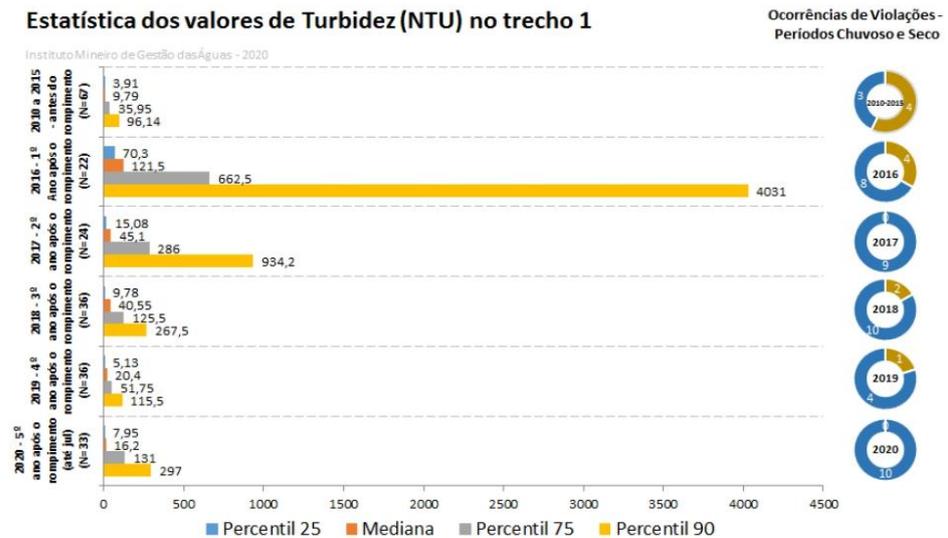
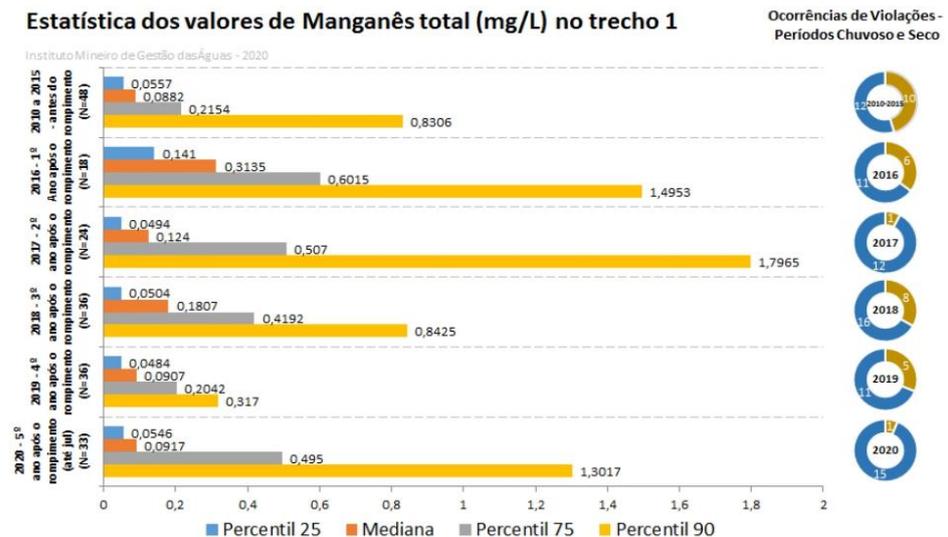


Gráfico 2 – Análise estatística dos resultados de manganês total no período pré-rompimento e nos cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão, no trecho 1.

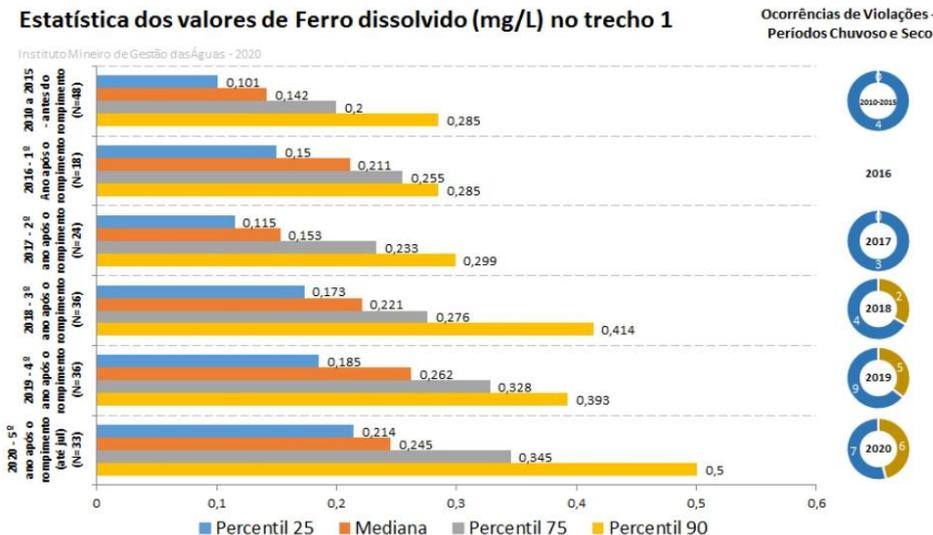


https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=procedimento_trabalhar&acao_origem=protocolo_pesquisa_rapida&id_protocolo=38447389... 2/4

08/04/2022 09:22

SEI - Nota Técnica 16 (33181721) - Nota Técnica 16 (33181721)

Gráfico 3 – Análise estatística dos resultados de ferro dissolvido no período pré-rompimento e nos cinco anos após o rompimento da barragem de Fundão, no trecho 1.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao documento "Complementação da Aplicação do Método Analítico Considerando o Monitoramento Intracalha de Sedimento – Setembro e Outubro de 2020", a Gemoq/DMEC possui poucas considerações, que foram feitas apenas para o Item - 6.1.3.2. Comparação Entre Campanhas. Contudo, demandam uma revisão do documento referente aos dados de monitoramento intracalha dos meses de setembro e outubro de 2020.

Além disto, com base no monitoramento realizado pelo Igam, entende-se que ainda faltam evidências para confirmarem o argumento de que a elevação da turbidez é controlada pela camada *lag layer*. Assim, reforça-se a indicação para a realização de campanhas de monitoramento dos testemunhos de sedimentos visando avaliar o comportamento desse compartimento, especialmente durante os períodos chuvosos. Para tanto, a importância da realização de coletas em datas logo antes e logo após eventos de cheia, o que implicaria em uma maior frequência das coletas durante os períodos chuvosos.

A resposta sobre a análise do Memorando Técnico MT-001_209-535-7742_07 de 20/04/2021 será apresentada junto ao processo SEI nº 2090.01.0002251/2020-22, pela Nota Técnica nº 17/IGAM/GEMOQ/2021 (33199895), uma vez que a Revisão 01 do relatório foi protocolada nesse processo.



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa Kelly Saraiva, Analista**, em 11/08/2021, às 16:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Katiane Cristina de Brito Almeida, Gerente**, em 12/08/2021, às 10:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Wanderlene Ferreira Nacif, Diretor(a)**, em 19/08/2021, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.mg.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **33181721** e o código CRC **3A0EDBC7**.

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=procedimento_trabalhar&acao_origem=protocolo_pesquisa_rapida&id_protocolo=38447389... 3/4

08/04/2022 09:22

SEI - Nota Técnica 16 (33181721) - Nota Técnica 16 (33181721)

Referência: Processo nº 2090.01.0003275/2020-19

SEI nº 33181721

Criado por 71162526149, versão 11 por 71162526149 em 11/08/2021 16:23:43.

https://www.sei.mg.gov.br/sei/controlador.php?acao=procedimento_trabalhar&acao_origem=protocolo_pesquisa_rapida&id_protocolo=38447389... 4/4