

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

AVALIAÇÃO DO TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NO RIO DOCE UTILIZANDO MODELAGEM COMPUTACIONAL

*Marcus V. Estigoni¹; Thaís N. Rezende¹; Isabela B. Freire¹; Rafael B. Rossi¹; Melina M. Alencar²
& Fabio Z. Pereira²*

Abstract: The Fundão dam collapse mobilized a large quantity of fine-grained iron ore tailings (silt and clay), leading to the replacement of bed material in the initial stretch upstream of the Candonga dam, and consequently increasing the amount of transported material. This study evaluates the evolution of fluvial processes and sediment transport in the affected rivers using a 1D computational sediment transport model (SRH-1D). This model incorporates a series of complex routines capable of explicitly representing important physical processes for this case study, such as bed stratigraphy representation and the armoring process. The results show a decreasing trend in suspended sediment concentration over time. Recovery is faster downstream due to dilution by unaffected tributaries. The comparison between the variation in the volume of deposits from the collapse and the total sediment transport indicates that the proportion of transport potentially associated with material from the collapse-formed deposits quickly becomes small. In 2021-2022, this proportion was less than 5.0% at the Candonga dam and less than 1.0% at the Baguari reservoir and downstream areas. It is noteworthy that the further downstream, the smaller the estimated proportion.

Resumo: O rompimento da barragem de Fundão mobilizou uma grande quantidade de rejeitos de minério de ferro com granulometria fina (silte e argila), acarretando na substituição do material do leito no trecho inicial, a montante da barragem de Candonga, causando o aumento da quantidade de material transportada. Este estudo avalia a evolução dos processos fluviais e o transporte de sedimentos nos rios afetado pelo rompimento utilizando para tal um modelo computacional de transporte de sedimentos 1D (SRH-1D), o qual possui uma série de rotinas complexas capazes de representar explicitamente processos físicos importantes para o estudo de caso, como a representação da estratigráfica do leito e do processo de *armouring*. Os resultados mostram uma tendência de diminuição da concentração de sedimentos em suspensão ao longo do tempo. A recuperação é mais rápida a jusante devido à diluição por afluentes não afetados. A comparação entre a variação dos volumes dos depósitos de material oriundo do rompimento com o transporte total de sedimentos indica que em pouco tempo a proporção do transporte que pode potencialmente ser associada a material oriundo dos depósitos formados pelo rompimento se torna pequena, sendo que em 2021-2022 a proporção corresponde a menos de 5,0% na barragem de Candonga e menores que 1,0% no reservatório de Baguari e áreas a jusante. Ressalta-se que quanto mais para jusante, menor é a proporção estimada.

Palavras-Chave – Transporte de sedimentos; Modelagem Computacional; Recuperação Fluvial.

1) NHC Brasil Consultores: Av. Dr. Cardoso de Melo 1450 – 2º. Andar – conj. 201. Vila Olímpia, São Paulo – SP - Brasil. CEP: 04548-005 | e-mail: mestigoni@nhcwater.com; trezende@nhcwater.com; ifreire@nhcwater.com; rossi@nhcwater.com.

2) Reparação bacia do rio Doce: Av. Getúlio Vargas, 671 - 4º andar. Funcionários - Belo Horizonte - 30112-021 | <https://www.reparacaobaciariodoce.com/>

INTRODUÇÃO

O rompimento da barragem de Fundão mobilizou aproximadamente $43,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ de rejeitos de minério de ferro cuja granulometria predominante variava entre silte e argila. Nos trechos relativos à parte superior da bacia do rio Doce (em específico no córrego Santarém, rio Gualaxo do Norte, as porções atingidas do rio Carmo e do rio Doce a montante do reservatório da UHE Risoleta Neves – popularmente conhecida como Candonga) a onda de detritos oriunda do rompimento da barragem gerou uma vazão muito superior à capacidade do leito menor do rio. Neste trecho houve erosão do leito e margens dos rios, seguida de deposição do material transportado (uma mistura de rejeitos e sedimentos naturais provenientes dos processos erosivos causados pela onda), alterando o padrão da morfologia fluvial.

O reservatório de Candonga foi capaz de atenuar significativamente o pico da vazão do rompimento, sendo a vazão observada a jusante do barramento equivalente à uma cheia típica (menor que uma cheia de tempo de recorrência de 2 anos, segundo WSP-Golder (2021)). Na porção a jusante da barragem de Candonga, em quase todos os 550 km de rio, o escoamento não extravasou da calha fluvial (com exceção do trecho correspondente aos primeiros 500 metros imediatamente a jusante do barramento da UHE Risoleta Neves, onde o escoamento atingiu a planície de inundação – o que configura uma área irrigada em comparação com as dimensões do trecho afetado). Isto caracteriza uma evidente mudança na magnitude dos impactos geomorfológicos nos rios diretamente afetados pelo rompimento, sendo observada uma tendência de montante para jusante de redução de impactos.

A alteração da composição do leito e margens dos rios, bem como de parte da área da planície de inundação, para um material mais fino, que é mais facilmente erodido e transportado pela força das águas, gerou um aumento no transporte de material, incluindo a fração transportada em suspensão. Com o passar do tempo, e com a ocorrência de processos de transporte de material pelas águas dos rios, o canal fluvial passou por transformações buscando recompor suas características do momento anterior ao rompimento. Neste processo, destaca-se o papel da erosão seletiva (do inglês *sorting*), que pode ser explicado da seguinte forma: para uma mesma vazão as partículas de maior diâmetro tendem a permanecer estáveis (ou com mobilidade reduzida), enquanto aquelas de menor diâmetro tendem a ser transportadas. Após determinado período, a erosão seletiva resultará na presença predominante de sedimentos mais grosseiros na camada superior do leito – *armour layer*, que se encontra em contato com o fluxo e, consequentemente, atenua a erosão e o transporte do material que se encontra na camada inferior. Esse fenômeno é amplamente documentado em manuais técnicos de instituições nacionais e internacionais, e literatura técnica especializada (USBR, 1987, USACE, 2016; ICOLD, 1989; Carvalho, 2008; VANONI, 1977; dentre outros).

Com a presença do *armour layer*, em teoria, as concentrações de sedimentos transportadas pelos rios impactados tendem a voltar a níveis similares aos observados antes do rompimento mesmo que o sistema ainda tenha material oriundo da barragem de Fundão, justamente pelo fato deste material não estar em contato direto com o meio líquido. Possivelmente, parte dos depósitos se localizam em profundidades que só seriam remobilizadas em vazões da mesma ordem de magnitude da vazão do rompimento. Desta forma, é possível concluir que as taxas de transporte de sedimentos (carga anual e permanência da concentração) são mais relevantes para avaliação do comportamento hidrossedimentológico dos rios estudados, do que o volume dos depósitos de material oriundos da onda de detritos gerada pelo rompimento da barragem de Fundão.

Os conceitos teóricos do processo de transporte de sedimentos, em específico o processo de erosão seletiva e encouraçamento do leito do rio, suportam a hipótese de que: A elevada taxa de transporte de sedimentos, causada majoritariamente pela erosão do leito fluvial, bem como as elevadas concentrações observadas após o rompimento, decairão com o tempo conforme a camada

superior do leito do rio (em contato com a água) passe a ser formada por material mais grosseiro, eventualmente atingindo o equilíbrio dinâmico do transporte de sedimentos.

Dados de monitoramento de transporte de sedimentos (ANA, 2023a, FEST-RRDM, 2022; WSP-Golder, 2022; Rhama, 2023, Benatti et. al, 2024), e avaliações de características físicas do trecho de montante (Estigoni et. al, 2023), suportam essa hipótese. No entanto, se tratam de avaliações baseadas em dados observados, que não avaliaram projeções futuras, e devido a limitações intrínsecas ao método, não avaliaram comparativamente, ou avaliaram de maneira simplificada a diferença entre o padrão de transporte de sedimentos observada antes e após o rompimento.

Neste contexto, o presente trabalho utilizou um modelo computacional morfodinâmico e de transporte de sedimentos acoplado a modelo hidráulico 1D (modelo SRH-1D) para avaliação do período observado após o rompimento e período futuro (o trabalho utilizou dados até maio de 2022, de modo que o período “futuro” foi iniciado no ano hidrológico 2022-2023), avaliando o cenário observado após o rompimento e um cenário hipotético configurado para representar o transporte de sedimentos caso o rompimento não tivesse ocorrido. Desta maneira, a comparação entre os resultados de ambos cenário fornece o acréscimo no transporte de sedimentos causado pelo rompimento.

OBJETIVO

Analisar a evolução dos processos fluviais e do padrão do transporte de sedimentos que estão ocorrendo nos rios impactados pelo rompimento da barragem de Fundão, incluindo analisar como mudou/mudará com o tempo a distribuição espacial dos volumes depositados de sedimentos/rejeitos, suas características granulométricas e sua implicação no transporte de sedimentos.

Especificamente, os objetivos deste trabalho são:

- ✓ Estimar a ordem de grandeza do transporte de sedimentos e da variação do volume dos depósitos (período de dados observados e cenários hipotéticos futuros);
- ✓ Estimar o tempo para que o transporte de sedimentos retorne (ou verificar se já retornou) às condições similares ao momento anterior ao rompimento;

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Conceitualmente, modelos são uma representação simplificada da realidade tipicamente desenvolvidos para um propósito específico. Os modelos computacionais de transporte de sedimentos, especialmente os modelos que também são morfodinâmicos e são acoplados à modelos hidráulicos, se baseiam no princípio da conservação de massa. Neste caso, o balanço de massa de sedimentos é intrínseco ao processo de cálculo do modelo em sua unidade de análise (no caso de modelos unidimensionais – 1D – o trecho entre seções transversais).

O modelo utilizado foi o SRH-1D (*Sedimentation and River Hydraulics - One Dimension*), desenvolvido pelo *U.S. Bureau of Reclamation* em parceria com a *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos. Sua escolha foi devido ao fato de ser capaz de representar as principais características e processos físicos que afetam o transporte de sedimentos no estudo de caso, como a representação do leito em camadas de espessura e granulometria variável, representação do processo de erosão seletiva (do inglês *sorting*) e formação do *armour layer*, representação de controles hidráulicos não erodíveis (formações rochosas), entre outros. Adicionalmente, a escolha por um modelo 1D se deu em função da disponibilidade de dados batimétricos e recomendações de boas práticas de modelagem (USACE, 2020), e ao relativo menor tempo de processamento quando comparado a modelos 2D ou 3D, permitindo a avaliação de múltiplos cenários futuros, em abordagem similar a aplicação de método de Monte Carlo para minimizar incertezas da previsão de vazão das séries futuras (conforme Estigoni, 2016; Gibson et. al, 2019; Cimorelli et. al, 2021). No presente

trabalho foram utilizadas 50 séries de vazões para representar o período futuro, geradas a partir de análises estocásticas, o que assume que o comportamento de vazões será equivalente ao do período observado, só que ocorrendo em uma outra ordem (séries “embaralhadas”).

BASE DE DADOS E CONFIGURAÇÃO DO MODELO

A geometria do modelo toma como base as melhores informações topobatimétricas disponíveis. Foi utilizado o levantamento LiDAR realizado pela empresa Fototerra (2019) entre novembro de 2018 e junho de 2019, e levantamentos batimétricos de múltiplas fontes, incluindo seções topobatimétricas ao longo do rio Doce e rio do Carmo, e levantamentos completos dos reservatórios das UHEs. Os casos de necessidade de compatibilização de levantamentos devido a data de coleta, a compatibilização se embasou em conceitos de geomorfologia fluvial e nas melhores informações disponíveis (i.e., imagens aéreas, avaliações geomorfológicas, dados do transporte de sedimentos, entre outros). Foram incluídas seções interpoladas em locais onde o espaçamento entre as seções topobatimétricas era muito extenso e não representava adequadamente as variações da lâmina d’água do rio (foram utilizados o perfil do LiDAR e da mancha de inundação de 2022). Imagens aéreas e o levantamento LiDAR também foram utilizados para a caracterização dos controles hidráulicos, onde tipicamente não se tem dados de batimetria, pois as rochas e fluxos mais rápidos representam risco a navegação no local. Estas seções foram configuradas no modelo como leito rochoso e definidas no modelo como não erodíveis. O modelo desenvolvido se estende por 660km ao longo do rio Gualaxo do Norte, Carmo e Doce, e tem mais de 1.100 seções, em que 40% são de dados medidos em campo e 60% interpoladas para representar controles hidráulicos ou conferir melhor estabilidade no modelo.

Dados de monitoramento da estratigrafia do leito medidos ao longo do trecho de montante após o rompimento mostram tipicamente 3 camadas distintas de material: a camada superficial com material mais grosso originado do processo de *armouring* do leito; a camada intermediária com material fino oriundo do rompimento; e uma camada profunda de material do leito fluvial antes do rompimento. O modelo foi configurado para representar essas três camadas utilizando os valores médios da espessura da camada intermediária em cada seção do modelo, e valores médios de granulometria por trecho geomorfologicamente homogêneo (CH2M, 2017; JACOBS/CH2M, 2018a,b,c,d). Em seções de controle hidráulico rochoso a espessura da camada de rejeitos foi assumida como nula. No trecho a jusante de Candonga não se observa a mesma estrutura estratigráfica, sendo tipicamente observada uma única camada arenosa. Neste trecho os dados de granulometria foram agrupados conforme a classificação geomorfológica apresentada em WSP-Golder (2022).

Imagens aéreas foram utilizadas como informação suporte para a definição de uso e ocupação do solo nas planícies de inundação, e de características relevantes no leito fluvial, que são utilizadas para a definição do valor da rugosidade hidráulica. A representação do sistema do baixo rio Doce no modelo 1D, caracterizado por relevo bem plano e presença de canais e lagoas, possui limitações, especialmente no caso em que ocorre extravasamento do escoamento, pois o fluxo sobre as planícies de inundação passa a ter um comportamento independente do rio principal (fluxo bidimensional).

As séries de vazões de cada estação selecionada ao longo dos rios afetados e seus principais afluentes foram avaliadas e consistidas, comparando o comportamento das vazões calculadas em estações próximas e de estações que possuem a mesma localização. Foram selecionadas 15 estações fluviométricas ao longo dos rios principais e 17 em tributários. Estas estações tiveram suas falhas preenchidas utilizando dados de estações próximas e ou do mesmo local (i.e., uso de dados de estações com registro contínuo para preenchimento de falhas em séries de dados diários). A contribuição de vazão direta da planície de inundação e de afluentes não monitorados foi estimada utilizando os dados de vazão observados na estação a jusante e a montante, e os princípios da conservação de massa. A contribuição de cargas de sedimentos foi definida com base na vazão estimada dos afluentes e em

dados regionais de produção de sedimentos. Considerando as incertezas inerentes ao uso de dados regionais de produção de sedimentos, esse parâmetro foi variado e ajustado no processo de calibração. Ressalta-se que a contribuição dos afluentes aplicadas aos cenários pós-rompimento e hipotético são idênticas, de modo que as diferenças obtidas no transporte de sedimentos ao longo dos rios principais possam ser correlacionadas à erosão do leito ou deposição do material transportado de montante.

Considerando o fato que o transporte de sedimentos pode ser subestimado quando o tempo de concentração da bacia é menor que o intervalo de tempo da série de vazão, uma análise de sensibilidade ao intervalo de tempo da série de vazão foi realizada, e optou-se por se utilizar séries com intervalos horários a montante de Candonga (áreas drenagem menores que aprox.. de 11 mil km²), e intervalos diários a jusante.

CALIBRAÇÃO E CENÁRIOS

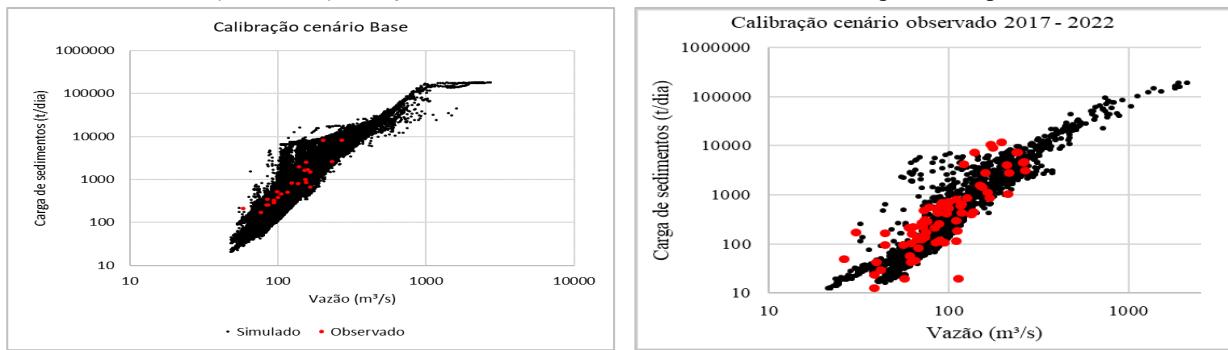
A calibração do modulo hidráulico foi realizada utilizando informações das 2 cheias recentes de maior magnitude, sendo utilizado dados de marcas de cheia de 2020 (Lactec, 2020) e níveis d'água medidos nas estações fluviométricas, e um perfil longitudinal completo da cheia de 2022 baseado em registros fotográficos (NHC, 2023), além de um perfil longitudinal para condições de vazões relativamente baixas baseado no levantamento LiDAR (Fototerra, 2019). Das quase 200 seções com dados de batimetria não localizadas em reservatórios, o erro médio absoluto foi da ordem de 21~25cm para o cenário da cheia de 2022, 40cm para a cheia de 2020 e 2cm para o cenário de vazões baixas.

O rejeito liberado pela barragem de Fundão é um material composto majoritariamente de silte e argila (Morgenstern et al., 2016), que é transportado em sua maioria como suspensão. Portanto, a calibração do transporte de sedimentos focou nos dados de transporte de sedimentos em suspensão. A calibração para a condição pós-rompimento incluiu dados de 2017 a 2022, abrangendo dados de uma grande enchente ocorrida em janeiro de 2022 (próxima a um período de retorno de 50 anos em algumas áreas da bacia). Os dados de estratigrafia e granulometria do leito do rio de 2017 e 2018 (CH2M, 2017; JACOBS/CH2M, 2018a,b,c,d) e o monitoramento estratigráfico contínuo (WSP-Golder, 2022c) apoiaram as configurações das condições iniciais da configuração do leito do rio e dos depósitos de rejeitos nos modelos. O volume de depósitos de rejeitos (representado no modelo pela camada intermediária do leito do rio) também foi considerado no processo de calibração.

Para o cenário hipotético (como se o rompimento não tivesse ocorrido) o modelo foi calibrado usando dados de 1980 a outubro de 2015, e a contribuição lateral de sedimentos direta e de tributários não medidos foi considerado como parâmetro de calibração. É importante ressaltar que não há dados de transporte de sedimentos, nem informações sobre o material do leito do rio, anteriores ao rompimento da barragem ao longo dos 120 km iniciais dos rios afetados, apenas nos principais afluentes (dados históricos para os rios Carmo e Piranga, e dados recentes no rio Gualaxo do Norte a montante da área afetada). Para esta área específica, o material do leito do rio foi incluído entre os parâmetros de calibração, e o período de calibração foi de 1993 (de acordo com a disponibilidade de dados na estação mais a montante do rio Doce) a 2001 (construção da barragem de Candonga).

Em geral, os resultados da calibração para ambos os cenários e para todas as estações avaliadas foram considerados bons, sendo o modelo capaz de reproduzir as taxas de transporte de sedimentos, bem como o comportamento geral da variação do volume dos depósitos de rejeitos ao longo do tempo.

Figura 1 – Exemplo do resultado da calibração da carga de sedimentos em suspensão na estação Faz. Cach. D'Antas (56425000), estação mais a montante com dados anteriores e após o rompimento.

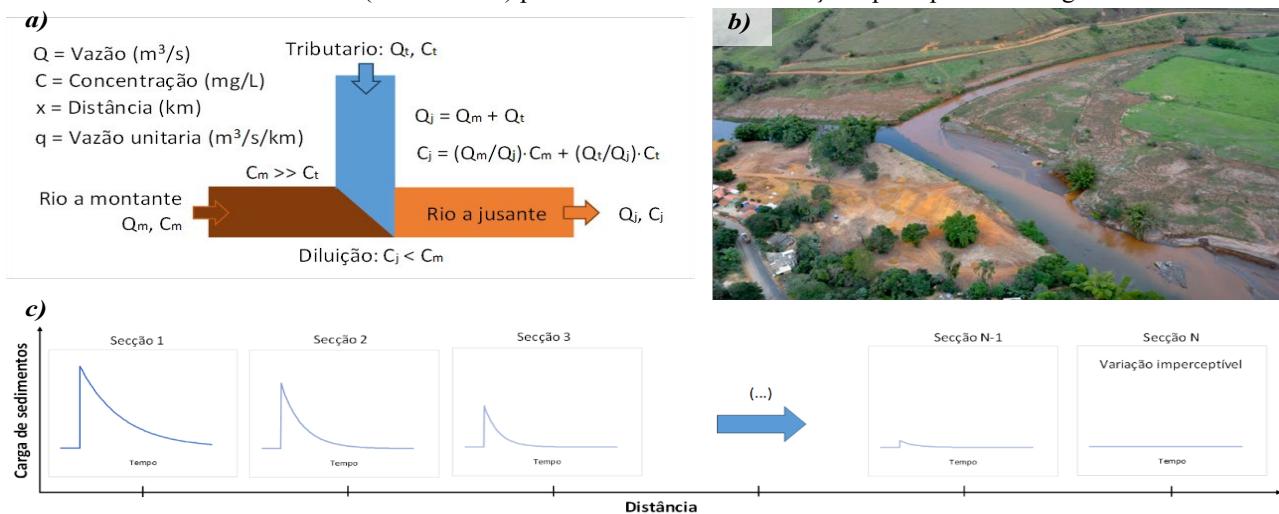


RESULTADOS E DISCUSSÕES

Todos os resultados gerados apresentam tendência de diminuição em função do tempo da concentração para uma mesma vazão. Em outras palavras, com o passar do tempo os rios afetados pelo rompimento apresentam menores concentrações de material em suspensão e menor transporte de sedimentos do que foi observado logo após o rompimento.

O ano em que se observa o retorno a essas condições varia de estação para estação, mas no geral apresenta uma tendência de recuperação mais rápida nas estações mais a jusante. Isso é atribuído ao efeito da mistura com as águas de afluentes não afetados pelo rompimento, pois a contribuição percentual do trecho afetado passa a ser menor após a mistura (independentemente se o tributário não afetado possui menor ou maior concentração de sedimentos), até o ponto que se torna indistinguível da carga natural de sedimentos devido a sensibilidade/precisão das técnicas de medição/amostragem (exemplo conceitual apresentado na Figura 2, especificamente no quando “c”). Segundo Sequoia (2023), Gitto et. al (2017) e Snazelle (2017) erros na medição de concentração de sedimentos são da ordem de +/- 30%, o que torna muito difícil identificar diferenças menores que esse valor.

Figura 2 – Esquema representativo do efeito da mistura que um tributário não afetado pelo rompimento causa na concentração de sedimentos resultante, reduzindo a participação percentual do trecho afetado na quantidade total transportada; b) Confluência do rio Gualaxo do Norte com o rio do Carmo em abril de 2016; e c) Esquema conceitual de como a o efeito da mistura (se suficiente) poderia levar a uma diferença imperceptível na carga de sedimentos.



Quando comparados às análises dos dados do monitoramento, o modelo prevê retorno a condições similares ao momento anterior ao rompimento com até quatro anos de defasagem, podendo ser considerados como conservador. Nesse processo, considerou-se como similar diferenças menores que 5% - esse valor foi definido com base nas incertezas das técnicas de amostragem e cálculo e transporte de sedimentos (erros de +/- 30% na amostragem e uso de curvas chave de sedimentos com R^2 de até 0,40), os quais tornam muito difícil ser notada qualquer diferença menor que 5%. A Tabela 1 apresenta essas estimativas. Em todas as estações se observada uma redução mais acelerada da diferença entre o cenário observado e o hipotético no início até atingir um padrão assintótico (condição de equilíbrio), com variação de montante para jusante quanto ao tempo demandado para atingir o equilíbrio (Figura 3). Destaca-se que o comportamento das 2 estações apresentadas na Figura 3 seguem o exemplo conceitual apresentado na Figura 2. Os resultados apontam grande influência do reservatório de Candonga no processo de transporte de sedimentos, o qual após seu enchimento em dezembro de 2022, passa a reter sedimentos com maior eficiência e a diferença no transporte de sedimentos calculada para o cenário pós-rompimento e o hipotético passa a ser praticamente nula (retorno a condição de transporte de sedimentos equivalente ao histórico). Deve ser ressaltado que o modelo não é capaz de fazer distinção entre o material oriundo do rompimento e material oriundo da bacia hidrográfica. Considerando as características do rejeito (Morgenstern et al., 2016), os resultados de transporte de material calculado pelo modelo foram analisados para frações silte e argila (< 0,063 mm), e para frações areia fina, muito fina, silte e argila (< 0,250 mm), e transporte total de sedimentos (todas as classes granulométricas simuladas).

Condições relativamente estáveis são encontradas no rio Gualaxo do Norte (T06 ao T09) a partir do ano 2023, com uma contribuição potencial dos depósitos no transporte total de sedimentos na ordem de 6~7%. No rio do Carmo o mesmo comportamento é observado a partir do ano de 2023, porém com estabilização em valores na ordem de 2% e no rio Doce a partir do ano de 2021 com valores inferiores a 5% e a partir de 2023 inferiores a 1%. O momento em que a estabilidade é atingida é equivalente ao momento em que as taxas de erosão do leito se estabilizam. Para todo o trecho a jusante de Candonga (T13 à T16), dentro do período analisado foi previsto que a participação percentual do material oriundo dos depósitos formados pelo rompimento no transporte total de sedimentos foi sempre inferior a 1%. Isso se deve a contribuição lateral associada a deposição de material fino (incluindo aqueles que podem ser potencialmente associados ao material remobilizado dos depósitos formados pelo rompimento) nos reservatórios de Candonga, Baguari e Aimorés promovem uma grande redução no percentual estimado que o volume dos depósitos tem em relação ao transporte total.

Figura 3 – Exemplo do resultado da diferença do transporte de sedimentos entre o cenário observado e o hipotético na estação RGN08 (Gualaxo do Norte) e estação UHE Risóleta Neves Mont. (rio Doce a montante da UHE Candonga).

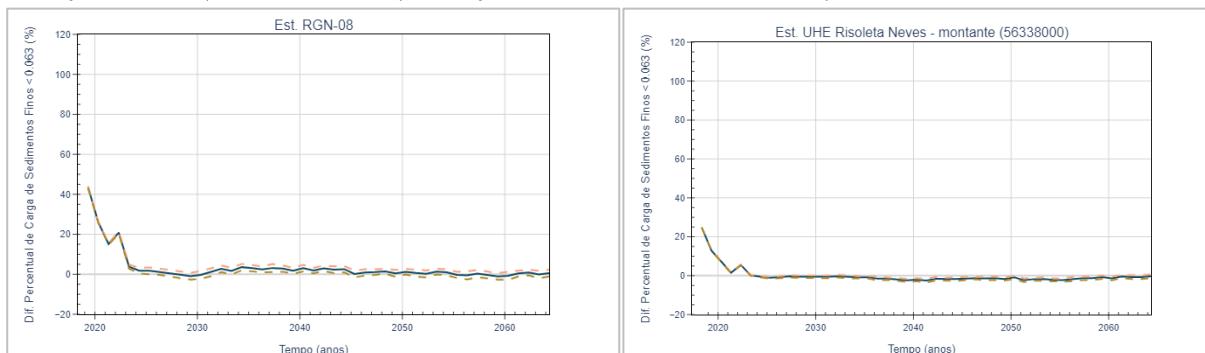


Tabela 1 – Estimativa de quando o transporte de sedimentos retornou a condições similares ao esperado caso não tivesse ocorrido o rompimento.

Estação	Trecho do PMR	Carga Total Sedimentos		Carga de Sedimentos <0,063		Carga de Sedimentos <0,250	
		10%	5%	10%	5%	10%	5%
Est. RGN-06	T08		2022 a 2023	2022 a 2023	2032 a 2033	2022 a 2023	2022 a 2023
Est. Fazenda Ocidente (56337000) – RGN-08	T09	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023
Est. RCA-02	T10	2019 a 2020	2021 a 2022	2020 a 2021	2022 a 2023	2019 a 2020	2021 a 2022
Est. UHE Risóleta Neves – montante (56338000) – RDO-01	T11	-	2019 a 2020	2019 a 2020	2022 a 2023	-	2022 a 2023
Reservatório da UHE Risóleta Neves							
Est. UHE Risóleta Neves – jusante (56338500) – RDO-03	T13	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023
Est. Fazenda Cachoeira D'Antas (56425000)	T13	2022 a 2023	2023 a 2024	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023	2022 a 2023
Est. Cachoeira dos Óculos – montante (56539000)	T13	2021 a 2022	2022 a 2023	2021 a 2022	2022 a 2023	2021 a 2022	2022 a 2023
Est. RDO-04	T13	2021 a 2022	2022 a 2023	2021 a 2022	2022 a 2023	2021 a 2022	2022 a 2023
Est. UHE Baguari – montante (56830800)	T13	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2022 a 2023	2021 a 2022	2021 a 2022
Est. Belo Oriente (56719998) – RDO-05	T13	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2022 a 2023	2021 a 2022	2022 a 2023
Est. UHE Baguari Naque Balsa (56831000)	T13	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022
Est. RDO-06	T13	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022
Reservatório da UHE Baguari							
Est. UHE Baguari Jusante (56846200) – RDO-07	T14	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022
Est. Governador Valadares (56850000) – RDO-08	T14	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2021 a 2022	2021 a 2022
Est. Tumiritinga (56920000) – RDO-09	T14	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022
Est. Conselheiro Pena (56941200)	T14	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022
Est. Resplendor (56948000 e 56948005)	T14	-	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	-	2021 a 2022
Est. UHE Aimorés – barramento (56990850)	T14	-	2021 a 2022	-	2021 a 2022	-	2021 a 2022
Reservatório da UHE Aimorés							
Est. UHE Mascarenhas – barramento (56992400)	T14	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022
Reservatório da UHE Mascarenhas							
Est. UHE Mascarenhas – jusante (56992480)	T15	2020 a 2021	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022
Est. RDO-12	T15	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022
Est. Colatina (56994500 e 56994510)	T15	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022
Est. RDO-14	T15	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022
Est. Linhares Cais do Porto (56998200) – RDO-15	T16	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022	2019 a 2020	2021 a 2022

O modelo prevê que o rio Doce tem capacidade para transportar em suspensão partículas do tamanho dos rejeitos (<0,250mm), sendo previsto deposição de material deste tamanho somente nos reservatórios de Candonga, Baguari e Aimorés. Destaca-se que esses resultados representam o comportamento geral do transporte e de deposição de sedimentos finos, porém condições locais específicas podem levar a ocorrência de depósitos pontuais de material fino em áreas onde o escoamento é muito lento (pequenos remansos na área de influência direta de estruturas hidráulicas, pequenas baías, áreas alagadiças de canais secundários ou abandonados, entre outros). Essas especificações podem não estar adequadamente representadas no modelo devido a escala da análise.

CONCLUSÕES

Com o auxílio de um modelo de transporte de sedimentos, o presente trabalho apresentou uma abrangente avaliação do comportamento dos rios Gualaxo do Norte, rio do Carmo e rio Doce quanto a seus processos hidrossedimentológicos e de transporte de sedimentos, buscando entender como o rompimento da barragem de Fundão alterou seu comportamento, e como tem se dado o processo de recuperação e retorno a condições de transporte de sedimentos similares ao período anterior ao rompimento.

É válido ressaltar que apesar de ser previsto que as cargas anuais transportadas tenham retornado à valores muito similares aos esperados para o caso que o rompimento não tivesse ocorrido, as avaliações realizadas indicam que em alguns eventos de curta duração e de pequena permanência no tempo as concentrações podem ser perceptivelmente maiores que as esperadas. No geral, a partir dos anos de 2021-2022 e no rio Doce como um todo (do T11 ao T16), espera-se que a diferença na concentração seja somente notada em menos de 1% do tempo.

A comparação entre a variação dos volumes dos depósitos de material oriundo do rompimento com o transporte total de sedimentos indica que em pouco tempo a proporção do transporte que pode

potencialmente ser associada a material oriundo dos depósitos formados pelo rompimento se torna pequena, sendo que em 2021-2022 a proporção corresponde a menos de 5,0% na barragem de Candonga e menores que 1,0% no reservatório de Baguari e áreas a jusante. Ressalta-se que quanto mais para jusante, menor é a proporção estimada. Em relação ao trecho a montante de Candonga, no rio Gualaxo do Norte (T06 ao T09), condições relativamente estáveis são encontradas a partir do ano 2023.

Ainda que as limitações das análises realizadas, bem como o nível de detalhe representado no modelo, não permitam concluir que em pequena escala ou em locais específicos, o comportamento hidrossedimentológico ainda esteja alterado pelo rompimento, é razoável concluir que: no geral, eventuais alterações do transporte de sedimentos que ainda ocorram seriam de uma magnitude tão pequena que seriam indetectáveis por técnicas convencionais de amostragem de sedimentos. Também é esperado que eventuais alterações induzidas pela presença de rejeitos em outros parâmetros de qualidade também sejam reduzidas, conforme a taxa de transporte de sedimentos tenha se normalizado ou se normalize ao longo dos próximos anos, com presença pouco significativa de material oriundo do rompimento sendo transportado.

REFERÊNCIAS

- ANA - Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2023a). Portal Hidroweb. Base de dados disponibilizada em <https://www.snh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas> acesso em Janeiro de 2023.
- BENATTI, R.; REZENDE, T.N.; FREIRE, I.B.; PEREIRA, F.Z.; ESTIGONI, M.V. (2024). Avaliação do transporte de sedimentos no rio Doce utilizando dados obtidos por sensoriamento remoto (Portal HidroSat - ANA). Artigo publicado nos anais do XVI ENES – Encontro Nacional de Engenharia de Sedimento, Curitiba – PR.
- CARVALHO, N. O. (2008), *Hidrossedimentologia Prática*, 2^a Edição. Editora Interciência. Rio de Janeiro-RJ, 2008.
- CH2M (2017). Volume 1 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito – Trecho 8 – Revisão 00. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP
- CIMORELLI, L.; COVELLI, C.; VINCENZO, A.; PIANESE, D. (2021). Sedimentation in Reservoirs: Evaluation of Return Periods Related to Operational Failures of Water Supply Reservoirs with Monte Carlo Simulation. *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 147, Issue 1 (January 2021). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0001307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001307)
- ESTIGONI, M.V (2016). Uso de modelagem de transporte de sedimentos e técnicas de hidrologia estatística para redução de incertezas nos estudos de assoreamento de reservatórios: estudo de caso do reservatório da PCH Mogi-Guaçu – SP. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo – EESC/USP, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental. São Carlos, 2016.
- ESTIGONI, M.V., REZENDE, T.N., FREIRE, I.B., ALENCAR, M.M., PEREIRA, F.Z. (2023). Avaliação da presença de habitats físicos no rio Gualaxo do Norte após o rompimento da barragem de Fundão – MG. 32º Congresso da ABES. Belo Horizonte, 2023.
- FEST-RRDM – Fundação Espírito-Santense de Tecnologia - Rede Rio Doce Mar (2022). Relatório anual 2021 do PMBA/festa-RRDM. RT39B - Evolução espaço temporal na qualidade ambiental e na biodiversidade no ambiente dulcícola. Relatório Técnico. Fevereiro de 2022.
- FOTOTERRA (2019). Relatório Técnico Final - RC.1.17.19 (30/07/2019).
- GIBSON, S.; LEHMAN, W.; KOOHAFKAN, M.; PRIDAL, D. (2019). Using HEC-WAT and HEC-RAS-Sediment to Evaluate the Effect of Hydrologic Uncertainty on Bed Evolution. Proceedings of the SEDHYD 2019 Conference on Sedimentation and Hydrologic Modeling, 24-28 June 2019, Reno, Nevada, USA. Junho de 2019.

- GITTO, A. B., VENDITTI, J. G., KOSTASCHUK, R., & CHURCH, M. (2017). Representative point-integrated suspended sediment sampling in rivers. *Water Res. Research*, 53(4), 2956-2971.
- ICOLD – International Commission on Large Dams (1989). *Sedimentation control of reservoirs/Maîtrise de l'alluvionnement des retenues*. Committee on Sedimentation of Reservoirs. Paris, 1989.
- JACOBS/CH2M (2018a). Volume 2 - Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito - Trechos 6 e 7 - Rev 00 [Relatório]. - São Paulo/ SP: Relatório Técnico preparado para a Fundação Renova, 2018.
- JACOBS/CH2M (2018b). Volume 4 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 9 – Revisão 00. [Relatório]. Relatório Técnico preparado para a Fundação Renova, 2018.
- JACOBS/CH2M (2018c). Volume 5 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trechos 10 e 11– Revisão 01. [Relatório]. Relatório Técnico preparado para a Fundação Renova, 2018.
- JACOBS/CH2M (2018d). Volume 6 – Complementação da Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito no Trecho 8. Relatório Técnico preparado para a Fundação Renova, 2018.
- LACTEC (2020). Diagnóstico socioambiental dos danos decorrentes do rompimento da barragem de Fundão na bacia do rio Doce e região costeira adjacente 3º Relatório Parcial de Resultados: Cheia de 2020. Relatório preparado para o Ministério Público Federal, Procuradoria da República em Minas Gerais. Setembro de 2020
- MORGENSTERN N. R., VICK, S. G., VIOTTI, C. B., AND WATTS, B. D. (2016). Fundão Tailings Dam Review Panel: Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. - 2016.
- NHC (2023). Mapeamento da Mancha de Inundação do Rio Doce para o Evento de Cheia de Janeiro de 2022: Relatório Final – Revisão 01. Relatório preparado para Fundação Renova. São Paulo, 2023.
- RHAMA (2023). Monitoramento de Parâmetros Hidrossedimentológicos na Bacia do Rio Doce. Relatório técnico preparado para a Fundação Renova. Janeiro de 2023.
- Sequoia – Tools and Research for Particle Intelligence (2023) – <https://www.sequoiasci.com/product/lisst-abs/> Acesso em: 01/07/2023
- SNAZELLE, T. T. (2017). Laboratory evaluation of the Sequoia Scientific LISST-ABS acoustic backscatter sediment sensor (No. 2017-1154). US Geological Survey.
- USACE – United States Army Corps of Engineer (2016). HEC-RAS Hydraulic Reference Manual. Version 5.0. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center. Report number CPD-69. February 2016.
- USACE – United States Army Corps of Engineer (2020). Modeler Application Guidance for Steady versus Unsteady and 1D versus 2D versus 3D Hydraulic Modeling. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center and Coastal and Hydraulic Laboratory. Report number TD-41, 2020.
- USBR – United States Bureau of Reclamation (1987). Design of Small Dams. Third Edition. 1987.
- VANONI, V.A. (1977). *Sedimentation Engineering*. ASCE, American Society of Civil Engineers. New York, NY. 1977.
- WSP-GOLDER (2021). Atualização do Volume 10 – Aplicação do Plano de Manejo de Rejeito nos Trechos 13 e 14 – Revisão 00. Relatório técnico preparado para Fundação Renova. São Paulo/SP.
- WSP-GOLDER (2022). Monitoramento de Transporte de Sedimento - Período chuvoso 2017/2018 ao Período Chuvoso 2021/2022. Relatório técnico número RT-010_209-535-7742_02 preparado para a Fundação Renova. Dezembro de 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao financiamento do estudo e suporte realizado pela Fundação Renova (em liquidação), o apoio dos demais membros da equipe técnica da NHC Brasil Consultores, e aos técnicos de agências ambientais integrantes da CT-GRSA e seus consultores que acompanharam o desenvolvimento do trabalho original pelas sugestões.