

SEÇÃO II
(MS-4005-GER-RL-1000)

ANEXO F

**MEMÓRIA DE CÁLCULO PARA ESTIMATIVA DE TEMPO
DE EVACUAÇÃO**

Barragem Serra Azul

1. REFERENCIAL

Anexo E/Resolução GMG N°83, de 16 de abril de 2024

2. OBJETIVO

Este documento apresenta a memória de cálculo do tempo total de evacuação da ZAS situada em Itatiaiuçu/MG, referente à Barragem Serra Azul e Estrutura de Contenção a Jusante (ECJ), seguindo os padrões e definições estabelecidos pela Resolução GMG nº 83

3. CÁLCULO DO TEMPO MÁXIMO DE DESLOCAMENTO

As etapas a seguir definem as premissas e resultados obtidos para os cálculos dos tempos de deslocamentos pelas rotas de fuga, baseando-se nas distâncias até os pontos de encontro

3.1. Definição da Rota de Fuga

As rotas de fuga foram traçadas das edificações ou locais mais distante da área segura até os pontos de encontros.

- Os pontos de encontro estão minimamente a 10 (dez) metros após a envoltória da mancha de inundação, sendo os pontos de encontro posicionados no final das rotas de fuga.
- Foram priorizadas as vias que possuem melhor qualidade para locomoção em linha reta.

3.2. Cálculo da População de cada Rua a ser Evacuada

O estudo de ruptura hipotética da Barragem Serra Azul indica que não há população residente na Zona de Autossalvamento (ZAS), uma vez que a única família que ali residia foi preventivamente removida em 2019 e, desde então, não permanece no local. A área permanece bloqueada para acessos permanentes.

No entanto, equipes continuam atuando na região para a execução de rotinas de manutenção voltadas à preservação da estabilidade e integridade da barragem, bem como para a manutenção da Estrutura de Contenção a Jusante (ECJ). As intervenções na estrutura da barragem são realizadas com o uso de equipamentos não tripulados e, quando necessário, com o apoio de helicópteros, garantindo a segurança dos profissionais envolvidos. Já as atividades na ECJ, localizadas dentro da ZAS, são conduzidas por trabalhadores que seguem rigorosamente um Plano de Trabalho Seguro, elaborado em conjunto com o Ministério do Trabalho e acompanhado por auditoria externa permanente.

Considerando o novo cenário da ZAS, com a ECJ em funcionamento, foram definidos três pontos de encontro para evacuação: um destinado ao único imóvel localizado na ZAS e dois voltados às frentes de trabalho da ECJ situadas dentro da área da ZAS.

O acesso e a realização de atividades na ZAS ocorrem mediante um Plano de Trabalho Seguro, previamente aprovado pelas equipes internas da empresa e pela auditoria independente do Ministério Público de Minas Gerais. Todos os trabalhadores desempenham suas funções sob monitoramento contínuo, portando rastreadores de geoposicionamento, rádios de comunicação e atuando sob a supervisão de um Líder de Abandono, treinado e preparado para coordenar a evacuação imediata em caso de emergência.

Com relação à área de impacto a jusante da ECJ, também não há população residente, uma vez que essa região foi desocupada desde 2019 por medida preventiva. Assim, no dimensionamento da população exposta ao cenário de ruptura da ECJ, considerou-se apenas a população flutuante estimada em 50 pessoas, correspondente ao trânsito de veículos e pedestres na Rodovia BR-381, que cruza a área.

Os quantitativos considerados para o dimensionamento dos pontos de encontro seguem as recomendações do Ministério do Trabalho:

- Até 5 Colaboradores na Barragem, com o uso de helicóptero;
- Até 80 trabalhadores atuando simultaneamente na ECJ;
- Equipes de manutenção da barragem (5 pessoas)
- Até 14 trabalhadores em outras atividades;
- Público flutuante estimado em 50 pessoas, incluindo o trânsito na BR-381;
- e de reparação social (23 pessoas), sendo esta última atuante na área de impacto.

O acesso à estrutura da barragem é estritamente controlado e permitido apenas a uma equipe composta por cinco colaboradores, previamente autorizados e treinados. Esse acesso ocorre exclusivamente por meio de helicóptero, como medida preventiva para garantir a segurança dos profissionais e a integridade da estrutura. Todas as atividades realizadas por essa equipe seguem protocolos rigorosos de segurança, definidos no Plano de Trabalho Seguro, com monitoramento contínuo e supervisão técnica especializada

Os pontos de encontro localizados na área de impacto estão demonstrados no Plano de Contingência, Anexo H da Seção III.

A população estimada para cada ponto de encontro foi definida com base nesses limites e nos quantitativos informados, garantindo o atendimento aos critérios de segurança ocupacional.

Para o cálculo da densidade, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$D = \frac{P}{A}$$

Onde:

- D = densidade (pessoas/m²);
- P = População inserida dentro do setor de evacuação (pessoas);
- A = área do passeio total da rota de fuga inserida no setor de evacuação (m²).

A tabela a seguir apresenta a população total para cada setor de evacuação.

Tabela 1 – Densidade da População.

Ponto de Encontro	População estimada para o ponto de encontro	Tamanho em metros quadrados da área do ponto de encontro (m ²)	Número de pessoas por m ² (B/C)	Número pessoas por metro quadrado é menor que 3 pessoas/m ² (sim ou não)	Descrição de acesso	Longitude	Latitude
PE43	14	9	1,56	Sim	Estrada sem nome, próximo ao Pesque-pague do Mexerica, Itatiaiuçu/MG	-44,38732	-20,14181
PE49	20	100	0,20	Sim	Estrutura de Contenção a Jusante - ECJ - Ombreira Direita, Itatiaiuçu/MG	-44,38759	-20,15557
PE50	30	100	0,30	Sim	Estrutura de Contenção a Jusante - ECJ - Ombreira Esquerda, Itatiaiuçu/MG	-44,38057"	-20,16799

Setores de Evacuação

Conforme RESOLUÇÃO GMG N°83, o setor de evacuação é a área delimitada previamente onde as pessoas deverão evacuar pelo trecho da rota de fuga inserida no mesmo. A população contemplada dentro de um setor de evacuação deve ser orientada a se dirigir para o trecho da rota de fuga estabelecido, posteriormente deve seguir pela rota de fuga até chegar a Área Segura. Foi definida a área de abrangência de cada ponto de encontro como um setor de evacuação.

3.3. Determinar a Velocidade de Deslocamento da População

A velocidade de deslocamento da população será determinada consultando a Figura 1 baseada na densidade calculada no item 3.2 e sobre análise de declividade.

A declividade foi calculada sobre modelos digitais de elevação de alta precisão em grandezas percentuais sobre toda a área das rotas de fuga. Foi analisado então a declividade média sobre todas as rotas de fugas de cada ponto de encontro.

Figura 1 - Determinação das velocidades de evacuação.

Densidade (pessoas/m ²)	Tipo de terreno	Velocidade* (m/s)
D ≤ 0,54	Plano	1,20
	Inclinado ou escadas	1,05
0,54 < D ≤ 1,0	Plano	1,03
	Inclinado ou escadas	0,90
1,0 < D ≤ 1,5	Plano	0,84
	Inclinado ou escadas	0,74
1,5 < D ≤ 2,0	Plano	0,66
	Inclinado ou escadas	0,58
D > 2	Plano	$V = 1,4 - 0,372 \times D$
	Inclinado ou escadas	$V = 1,23 - 0,327 \times D$

De acordo com o estudo de ruptura hipotética (*dam break*), elaborado pela BVP em 2024 (número MS-3045-HID-RL-0001) (datado de 10/2024), a onda de inundação leva aproximadamente 1 minuto e 52 segundos para atingir a Estrutura de Contenção a Jusante (ECJ).

Diante do curto intervalo de tempo disponível para resposta, definiu-se que todas as equipes atuantes na ECJ deverão dispor de veículos prontos para deslocamento imediato em caso de emergência (PE49 e PE50). Para fins de simulação e planejamento das rotas de fuga, adotou-se uma velocidade média de deslocamento de 40 km/h para esses veículos, considerando as condições operacionais da área.

No caso do PE-43 (Pesque e Pague do Mexerica), atualmente desocupado, foi considerada uma velocidade de deslocamento a pé de 0,74 m/s em terreno inclinado, conforme representado na Figura 1.

Tabela 2 – Determinação das velocidades de evacuação.

Setor	Cenário	Tipo de Terreno	Número de pessoas por m²	Velocidade (km/h)
PE43	ZAS	Inclinado ou escadas	1,56	2,66
PE49	ZAS	Inclinado ou escadas	0,20	40
PE50	ZAS	Inclinado ou escadas	0,30	40

3.4. Determinar o Tempo de Evacuação do Setor (TES)

O tempo de evacuação do setor é dado pela fórmula abaixo:

$$T_{ES} = \frac{d}{V}$$

Onde:

- TES = Tempo de evacuação do setor (segundos);
- d = Distância máxima a percorrer no trecho da rota de fuga inserida no setor de evacuação (distância do ponto mais longo até sair do setor ou chegar à área segura);
- V = Velocidade de deslocamento do setor de evacuação, obtida na Tabela 2.

Tabela 3 – Tempo de Evacuação dos Setores.

Setor	Distância Máxima (m)	Velocidade (m/s)	TES (hh:mm:ss)
PE43	310	0,74	00:06:59
PE49	400	11,11	00:00:36
PE50	350	11,11	00:00:32

4. CALCULO DO TEMPO DE EVACUAÇÃO DE CADA ROTA DE FUGA (TERF) E O TEMPO MÁXIMO DE DESLOCAMENTO (TMD)

4.1. Tempo de Evacuação da Rota de Fuga (TERF)

Para calcular o tempo de evacuação de cada rota de fuga definida, somou-se o tempo de evacuação de cada setor (TES) por onde cada rota de fuga passou. Porém, como existe um setor para cada ponto de encontro, TERF é igual ao TES.

Tabela 4 – Tempo de Evacuação das Rotas de Fuga.

Setor o	Distância Máxima (m)	Velocidade (m/s)	TERF (hh:mm:ss)
PE43	310	11,11	00:06:59
PE49	400	11,11	00:00:36
PE50	350	11,11	00:00:32

4.2. Tempo máximo de deslocamento (TMD)

O tempo máximo de deslocamento (TMD) de toda área a ser evacuada será representado pela rota de fuga com maior tempo de evacuação (TERF). Desta forma, como $TES = TERF$, e como cada setor possui um TERF:

$$TES = TERF = TMD$$

Tabela 5 – Síntese dos tempos de deslocamento sobre a rota.

Setor	Distância Máxima (m)	Velocidade (m/s)	TMD (hh:mm:ss)
PE43	310	11,11	00:06:59
PE49	400	11,11	00:00:36
PE50	350	11,11	00:00:32

5. TEMPO DE ESTRANGULAMENTO PARA CHEGAR À ÁREA SEGURA NA ROTA DE FUGA

O tempo de estrangulamento deve considerar o pior cenário possível, onde todas as pessoas chegam ao mesmo tempo no acesso à área segura.

5.1. Cálculo do Número Total de Pessoas que Devem Acessar a Área Segura através da Rota de Fuga

Conforme metodologia do Anexo E da Resolução GMG 83/2024, para o cálculo da população, deverão ser contabilizadas quantas pessoas habitam todas as ruas da área a ser evacuada que utilizarão as rotas de fuga com o mesmo acesso para a área segura. Devem ser caracterizadas áreas comerciais e residenciais, e nas áreas caracterizadas como comerciais adiciona-se um total de 30% da população como definido no item 3.2.

5.2. Cálculo do Tempo de Estrangulamento (TE)

O tempo necessário para que todas as pessoas, quando aglomeradas, passem pelo ponto de maior estrangulamento do acesso a área segura é dado pelas fórmulas abaixo:

- Terreno rampado ou escada:

$$T_E = \frac{(1,20 \times N)}{(79 \times L)}$$

- Terreno plano:

$$T_E = \frac{(1,20 \times N)}{(100 \times L)}$$

Onde:

- T_E = Tempo de estrangulamento (minutos);
- N = Número total de pessoas da área de evacuação;
- L = largura do ponto de maior afunilamento do passeio que dá acesso a área segura.

Tabela 6 – Tempo de estrangulamento na região dos Pontos de Encontro.

Setor	Cenário	N	L (m)	T_E (hh:mm:ss)
PE43	ZAS	14	2,00	00:00:05
PE49	ZAS	20	2,00	00:00:07
PE50	ZAS	30	2,00	00:00:11

6. TEMPO NECESSÁRIO PARA EVACUAÇÃO DE TODA A ÁREA

6.1. Tempo Total de Evacuação (TTE)

O tempo necessário para evacuação a ser considerado, deverá ser o maior valor obtido entre o tempo máximo de deslocamento (TMD) e o tempo de estrangulamento (TE) para se chegar à área segura na Rota de fuga. O tempo total de evacuação do ponto de encontro é dado pela fórmula abaixo.

$$TTE = \text{Maior } (TMD; TE)$$

Onde:

- TTE = Tempo total de evacuação;
- TMD = Tempo máximo de deslocamento;
- T_E = Tempo de estrangulamento.

Tabela 7 – Tempo Total de Evacuação.

Setor	Cenário	TMD (hh:mm:ss)	T _E (hh:mm:ss)	TTE (hh:mm:ss)	Resultante
PE43	ZAS	00:06:59	00:00:05	00:00:05	Tempo máximo de deslocamento
PE49	ZAS	00:00:05	00:00:07	00:00:07	Tempo de estrangulamento
PE50	ZAS	00:00:05	00:00:11	00:00:11	Tempo de estrangulamento