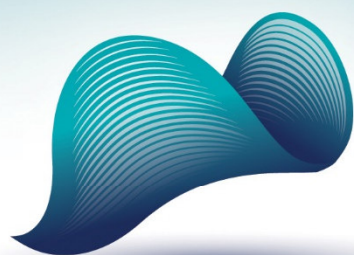


## ANEXO 3



**APLYSIA**  
SOLUÇÕES AMBIENTAIS  
**FUNDAÇÃO RENOVA**

## **RELATÓRIO TÉCNICO**

# **RENATURALIZAÇÃO DO RIO GUALAXO DO NORTE** **Estabilidade das Estruturas do Projeto de Expansão** **Definitiva de Renaturalização**

**Relatório Técnico nº 004/2024**

**Revisão 03**



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>3</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
2.1 OBJETIVO GERAL DO PROJETO.....	4
2.2 OBJETIVO GERAL DO RELATÓRIO .....	4
<b>3. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>5</b>
<b>4. DOCUMENTOS E DADOS UTILIZADOS.....</b>	<b>11</b>
<b>5. ESTRUTURAS DE MADEIRA .....</b>	<b>12</b>
5.1 ESTRUTURAS PARA O RIO GUALAXO DO NORTE .....	12
5.2 ESTRUTURAS PARA OS TRIBUTÁRIOS .....	14
<b>6. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS.....</b>	<b>16</b>
6.1 CRITÉRIOS E PREMISSAS UTILIZADOS .....	26
6.2 CISALHAMENTO.....	28
6.3 FLEXÃO .....	32
6.4 FLUTUAÇÃO .....	34
6.5 DESLIZAMENTO .....	38
6.6 DESCALÇAMENTO DAS ESTACAS DE FIXAÇÃO.....	40
<b>7. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>41</b>
<b>8. DADOS DA CONTRATANTE E CONTRATADA .....</b>	<b>44</b>
8.1 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATANTE.....	44
8.2 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATADA.....	44
<b>9. EQUIPE TÉCNICA.....</b>	<b>45</b>
<b>10. REFERÊNCIAS .....</b>	<b>46</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Em consequência das alterações decorrentes da passagem da lama nos ecossistemas atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão, foram aplicadas medidas mitigadoras pela Fundação Renova, como a renaturalização de trechos do rio Gualaxo do Norte. A renaturalização é um método de restauração de rios que visa recuperar as condições naturais do ecossistema impactado, através da inserção de material lenhoso e outras intervenções que visam promover a criação de habitats e favorecer o reestabelecimento da biota aquática. O Projeto Piloto de Renaturalização engloba as ações compreendidas pelo Programa de Manejo de Rejeitos, que considera o atendimento ao Termo de Transação e de Ajustamento de Conduta (TTAC) assinado em 02/03/2016. E como documento norteador destas ações de manejo da Fundação Renova, cita-se o Plano de Manejo de Rejeito – Revisão 01 (JACOBS; CH2M, 2017), aprovado pela Deliberação do Comitê Interfederativo (CIF) nº 86/2017. Ressalta-se ainda que em agosto de 2017, tal projeto foi apresentado ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis).

Em julho de 2018, foi realizado nos Trechos T6 e T7 o Projeto Piloto de Renaturalização – PPR dos cursos d’água atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão, que teve como objetivo principal acelerar o restabelecimento das condições ambientais do rio Gualaxo do Norte - RGN através do aumento da retenção de sedimento, controle da erosão, melhoria da heterogeneidade do fundo e, conseqüentemente, aumento da abundância e biodiversidade de bentos e ictiofauna.

A restauração fluvial realizada através da introdução de troncos de madeira no leito do rio, gera benefícios ecossistêmicos reconhecidos como observado em trabalhos descritos por Gippel (1995); Culp et al. (1996); Benke e Wallace (2003); Correll (2005); Bennett e Gilchrist (2010) e Extence et al. (2013).

A partir da decisão judicial emitida até então pelo juízo da 12ª Vara Federal Cível e Agrária de MG, no âmbito dos itens 5 e 5.1 do Eixo Prioritário 1 da Ação Civil Pública nº 69758-61.2015.4.01.3400, foi determinada a expansão do projeto de Renaturalização do rio Gualaxo do Norte e seus tributários. Atualmente o processo é tratado pela 4ª Vara Federal Cível e Agrária de Belo Horizonte. Em julho de 2021, foi implementado no Trecho 09 mais dois quilômetros de projeto no Rio Gualaxo do Norte. Após avaliação e obtenção de resultados positivos (FURLEY et. al. 2022) referente ao projeto ReNaturalize, a Câmara Técnica de

Gestão de Rejeitos e Segurança Ambiental (CT-GRSA) através da NT 19/2022, requisitou a elaboração de um projeto executivo para uma nova expansão do projeto. Para tanto, a Fundação Renova elaborou o estudo “Avaliação inicial de áreas prioritárias a receberem intervenções para recuperação de habitats – Revisão 06” (NHC, 2022), a fim de selecionar áreas passíveis para aplicação do projeto no que tange a diversidade de habitats.

Como parte dos processos para desenvolvimento do projeto de renaturalização é necessária a realização de uma avaliação da influência da implementação das técnicas de renaturalização na dinâmica hidráulica do rio, referente aos padrões de velocidade do fluxo de água. Desta forma, estabeleceu-se como requisito a execução de simulações hidráulicas das condições de escoamento do rio para os cenários com e sem estruturas de renaturalização instaladas (NHC, 2020a; WALM, 2019a).

Portanto, juntamente com os estudos de modelagem hidráulica (APLYSIA, 2024), para desenvolvimento do projeto de renaturalização é necessária a realização de uma avaliação da estabilidade das estruturas instaladas, referente à capacidade de fixação dessas na fundação com estacas de madeira e cordas de sisal (WALM, 2019a) e o estabelecimento das forças necessárias para a manutenção dessas estruturas no local em que serão instaladas.

Vale ressaltar que o presente relatório é concomitante ao Relatório de Modelagem Hidráulica (APLYSIA, 2024b), sendo fundamental para complementar e enriquecer as conclusões discutidas nesse relatório, fornecendo uma visão mais abrangente e aprofundada das questões abordadas sobre os locais com potencial de instabilidade.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL DO PROJETO**

O objetivo geral do projeto é acelerar o restabelecimento das condições ambientais do rio Gualaxo do Norte por meio da implementação da técnica de renaturalização.

### **2.2 OBJETIVO GERAL DO RELATÓRIO**

O objetivo geral deste relatório é dimensionar o sistema de fixação dos troncos do Projeto de Expansão de Renaturalização - PER aos esforços solicitantes provenientes do escoamento do rio Gualaxo do Norte, sendo os objetivos específicos:

- Calcular os esforços solicitantes;
- Calcular os esforços resistentes;
- Determinar a quantidade de estacas de fixação por tronco.

### 3. ÁREA DE ESTUDO

O Projeto de Renaturalização está sendo implementado no rio Gualaxo do Norte e em seus tributários, que pertencem à bacia hidrográfica do rio Doce. Sua cabeceira se encontra na serra do Espinhaço a nordeste do município de Ouro Preto e a noroeste do município de Mariana-MG. Esse rio segue na direção leste com sua confluência com o rio do Carmo, nas proximidades do município de Barra Longa-MG. A área de estudo foi pré-selecionada de acordo com estudos realizados pela NHC e apresentados no Memorando Técnico 2 (NHC, 2023). Os trechos pré-selecionados consistem em quatro trechos no rio Gualaxo do Norte (RGN-A, RGN-B, RGN-C e RGN-D) e três tributários (TG-11, TG-16 e TG-29) (Figuras 4 a 10).

A localização do início e final de cada trecho, assim como a representação esquemática dos trechos estão apresentadas na Tabela 1 e Figuras 1, 2 e 3, respectivamente.

**Tabela 1** - Localização do início e final de cada trecho no rio Gualaxo do Norte-MG (Datum SIRGAS 2000 UTM Zona 23).

Trecho	Início		Final		Extensão Proposta (m)	Extensão Validada (m)	Declividade / Energia Final (m/m)
	Latitude	Longitude	Latitude	Longitude			
RGN-A	7754930	688577	7755618	688511	730	430	0,001
RGN-B	7759792	674743	7759352	674467	790	790	0,0025
RGN-C	7761126	673106	7761152	673858	850	850	0,0029
RGN-D	7759245	670778	7759130	671237	750	750	0,0022
TG-11	7759558	669433	7759821	669728	470	470	0,082
TG-16	7760357	674707	7760238	674668	150	150	0,0027
TG-29	7753643	682692	7753893	682897	370	370	0,0014

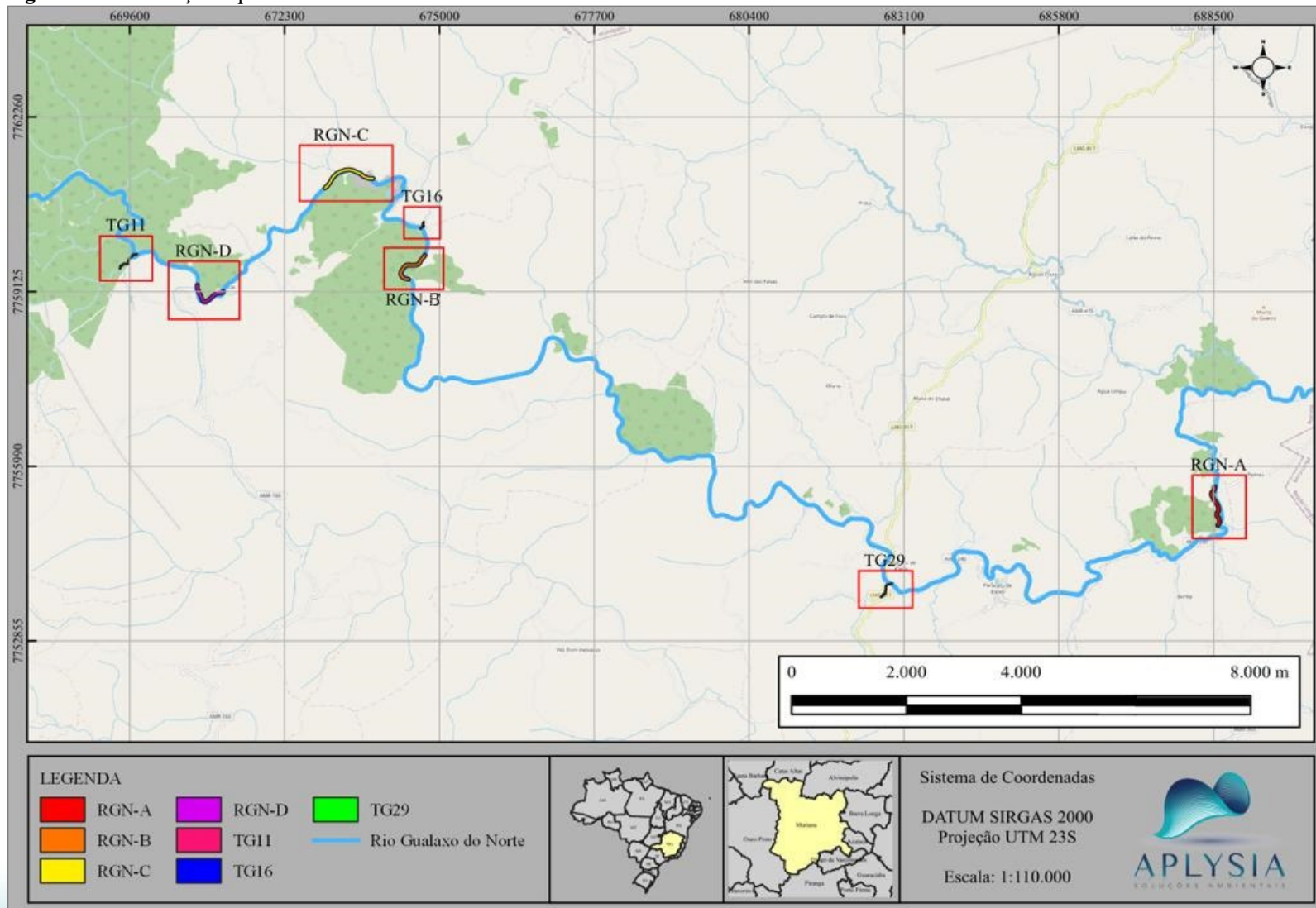
As declividades encontradas variam de 0,001 m/m (RGN-A, mais suave) a 0,082 m/m (TG-11, mais acentuada) na porção final dos trechos, em jusante, indicando a grande variabilidade de condições de energia disponível aos escoamentos estudados nos diferentes trechos.

Ressalta-se que a fase de validação das extensões a serem renaturalizadas é realizada em duas etapas de análises de viabilidade de implementação do projeto. A primeira etapa foi através do estudo intitulado "Avaliação Inicial de Áreas Prioritárias para Intervenções na Recuperação de Habitats" (NHC, 2022a). Este estudo teve como objetivo selecionar áreas passíveis para a execução de iniciativas de renaturalização. Para isso foram consideradas a presença de habitats físicos no ano de 2021, utilizando critérios que incluíram a escolha de segmentos com diversidade de habitats físicos inferior à média de referência (NHC, 2022b). Posteriormente, foram realizadas atividades de avaliação e validação os trechos pré-selecionados, além de formular preliminarmente o design de instalação e aplicar o protocolo de avaliação de habitats. Do total planejado de 4,1 km para a renaturalização do rio Gualaxo do Norte e seus tributários, aproximadamente 540 metros foram identificados como inicialmente inviáveis para a aplicação das técnicas de renaturalização (APLYSIA, 2023). Portanto, considera-se favorável para o processo cerca de 3,57 km de renaturalização. As circunstâncias que tornam inviável a aplicação das técnicas de renaturalização nos trechos identificados estão associadas a diferentes áreas. Os detalhes referentes a etapa de validação são apresentados no relatório de campo desses estudos (APLYSIA, 2023). As extensões propostas e validadas para cada trecho são apresentadas na Tabela 1.

A segunda etapa de validação é determinada após a avaliação dos resultados da modelagem hidráulica apresentados neste relatório.

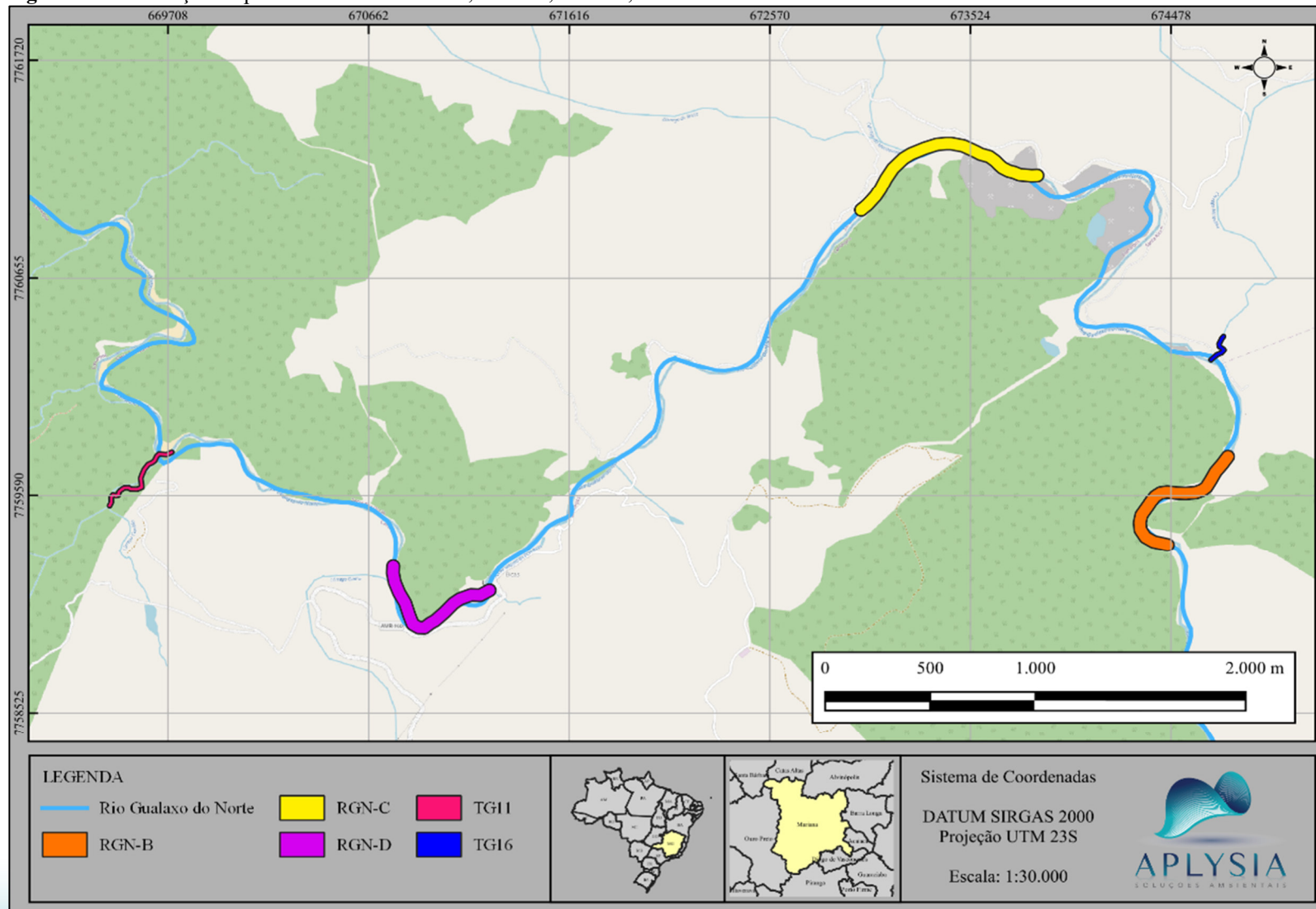
As atividades de campo realizadas dias 25 e 30 de outubro de 2023, tiveram como objetivo a verificação dos trechos selecionados. Assim foi possível observar as características dos locais e obter dados de velocidade dos trechos, como registros fotográficos para compreensão das condições de calha dos trechos. As velocidades medidas do rio Gualaxo do Norte estavam em torno de 0,8 a 1,3 m/s em diferentes locais (RGN-A, RGN-B, RGN-C e RGN-D) assim como de 0,95 a 1,4 m/s para os tributários (TG-11, TG-16 e TG-29). As medições foram realizadas por meio do método do flutuador.

**Figura 1** – Localização espacial dos trechos de estudo no rio Gualaxo do Norte-MG e seus tributários.



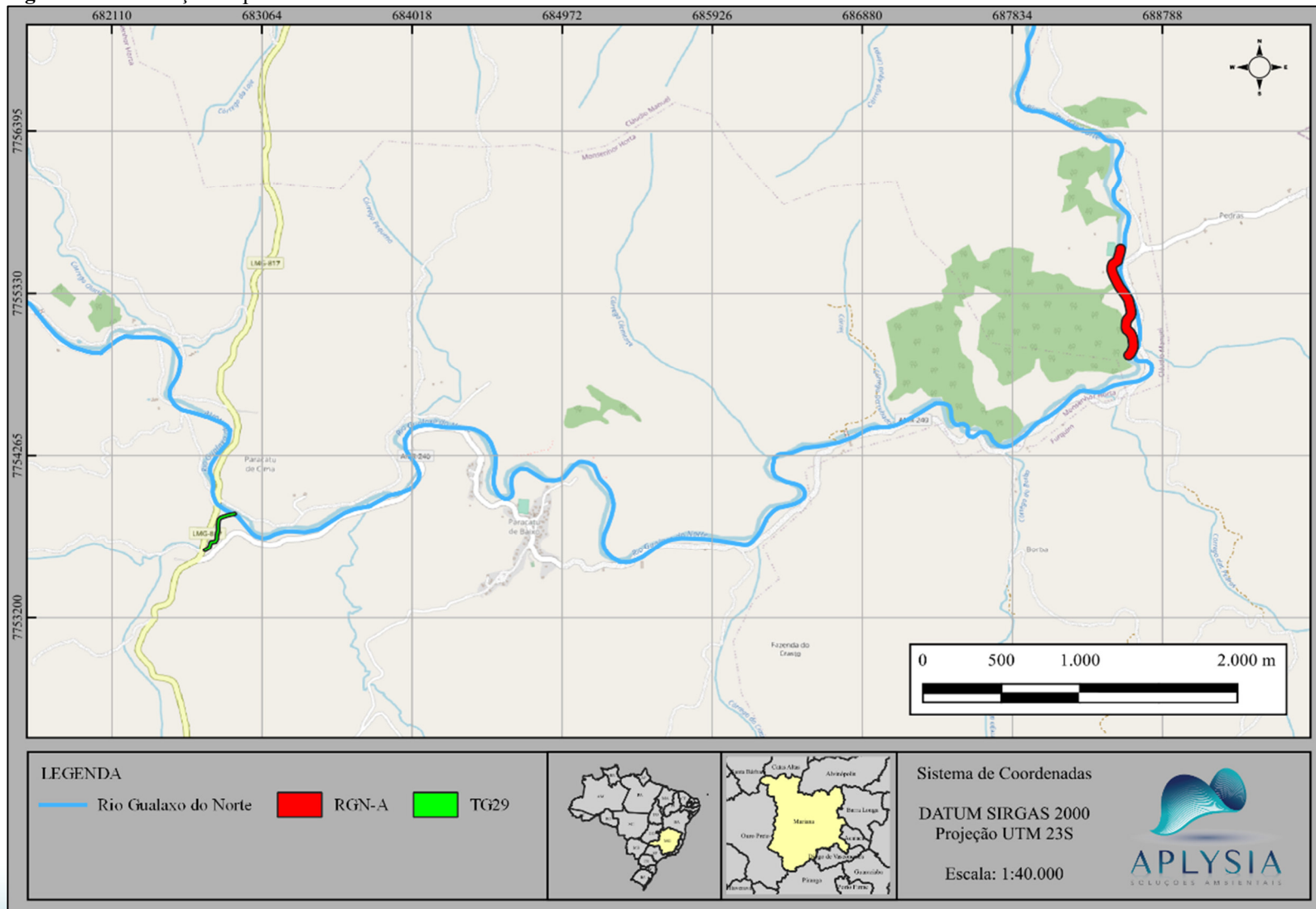
Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 2 - Localização ampliada dos trechos TG-11, RGN-D, RGN-C, TG-16 e RGN-B.**



Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 3 - Localização ampliada dos trechos TG-29 e RGN-A.**



Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 4** – Imagem do trecho RGN-A no rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais.



**Figura 5** – Imagem do trecho RGN-B no rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais.



**Figura 6** – Imagem do trecho RGN-C no rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais.



**Figura 7** – Imagem do trecho RGN-D no rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais.



**Figura 8** – Imagem do tributário TG-11 do rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais.



**Figura 9** – Imagem do tributário TG-16 do rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais.



Fonte: Aplysia, 2023.

**Figura 10** – Imagem do tributário TG-29 do rio Gualaxo do Norte, Minas Gerais.



**Fonte:** Aplysia, 2023.

#### **4. DOCUMENTOS E DADOS UTILIZADOS**

A fim de subsidiar a construção deste relatório foram utilizados dados levantados em campo (topografia, batimetria e imageamento aéreo), assim como documentos anteriores ou que complementam os dados necessários à sua elaboração.

A seguir são listados os documentos e dados utilizados:

- Avaliação da Renaturalização Do Rio Gualaxo Do Norte - Relatório Técnico – Civil (Drenagem) (WALM, 2019a);
- Regionalização de Vazões da Bacia dos Rios Gualaxo do Norte e do Carmo (WALM, 2019b);
- Avaliação do Projeto Piloto de Renaturalização do Rio Gualaxo do Norte (NHC, 2020a);
- Peer Review do Estudo Hidrológico de Regionalização de Vazão Para o Projeto Piloto de Renaturalização (Trecho 6 e Trecho 7) e da Estação de Tratamento Natural (ETN) (NHC, 2020b);
- Definição do Trecho Para Expansão do Projeto ReNaturalize (APLYSIA, 2020a);
- 8ª Avaliação da Manutenção das Instalações das Estruturas de Madeira (APLYSIA, 2020b);
- Modelagem Hidráulica do Trecho do Projeto de Expansão de Renaturalização (APLYSIA, 2020c);
- Estabilidade das Estruturas do Projeto de Expansão de Renaturalização (APLYSIA, 2020d).

## 5. ESTRUTURAS DE MADEIRA

A escolha dos tipos de estrutura foi baseada em um levantamento abrangente e detalhado de estudos e diretrizes internacionais de restauração fluvial, que incluem tanto rios de grande porte quanto riachos. As principais referências utilizadas foram: Brooks et al. (2006); Cramer et al. (2012); Speed et al. (2016); Stream (2009); Reclamation and U.S. Army Corps of Engineers (2012); The RRC (2013); Neuhaus; Mende (2021).

Na formulação das estratégias para o projeto em questão, também foi fundamental uma avaliação dos estudos realizados por Jacobs; CH2M (2017), permitindo melhor compreensão das características e desafios específicos dos locais selecionados para definição da renaturalização. Além disso, a experiência adquirida com o Projeto Piloto de Renaturalização nos trechos T6 e T7 ofereceu valiosas lições e indicadores sobre práticas eficazes de restauração ambiental nos trechos do rio Gualaxo do Norte. Da mesma forma, o Projeto de Expansão realizado no trecho T9 contribuiu para o desenvolvimento de abordagens mais abrangentes e integradas.

Por fim, as atividades de campo permitiram uma definição do modelo conceitual das estruturas a serem instaladas. Essas observações *in loco* proporcionaram uma avaliação mais precisa das condições existentes e das necessidades específicas do ambiente, orientando assim o planejamento e a implementação do projeto de forma mais eficaz e adaptada à realidade local.

Com base nos resultados obtidos no Relatório de Modelagem Hidráulica (APLYSIA, 2024a) e respectivas avaliações de velocidade no entorno das estruturas, foi verificada a adequação de cada uma das estruturas para a expansão definitiva da renaturalização nos trechos 08 e 09 do Plano de Manejo de Rejeitos. Assim, foram verificadas cinco tipos de estruturas, sendo dois tipos para o rio Gualaxo do Norte e três para os tributários. Os tipos de estruturas são apresentados a seguir.

### 5.1 ESTRUTURAS PARA O RIO GUALAXO DO NORTE

As estruturas propostas para o rio Gualaxo do Norte são denominadas como árvores do tipo LWD (*Large Wood Debris*). São estruturas definidas como pedaços de madeira, como troncos, galhos e tora presentes no canal do rio. Essas estruturas de madeira podem variar em

tamanho e forma, e são importantes para a morfologia do rio, criando *pools*, abrigos para peixes, e influenciando o fluxo da água e a dinâmica do canal. São estrategicamente posicionadas e projetadas para influenciar os processos fluviais de maneira positiva, promovendo a recuperação ecológica e geomorfológica dos rios (BROOKS et al. 2006). A presença deste tipo de material no leito do rio é essencial para a saúde do ecossistema fluvial, a diversidade de habitats e para a resiliência do rio frente a eventos extremos (COLLINS; MONTGOMERY, 2002). Dentro deste contexto foram selecionados dois tipos de estruturas (TMM e ET).

(1) TMM – Tronco Marginal (Figura 11) – Tronco posicionado na margem do rio com o objetivo de criação de meandros, retenção de sólidos e criação de habitat. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,3 m, comprimento de 25% a 35% da largura do rio no local a ser instalada a estrutura e ângulo de aproximadamente 45° com a direção da margem.

**Figura 11** - TMM com as estruturas alocadas em campo.



**Fonte:** Aplysia, 2021.

(2) ET – Estrutura em Triângulo (Figura 12) – Estrutura submersa composta por três (3) troncos formando um triângulo isósceles com o objetivo de criação de habitat. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,3 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 1,5 m e comprimento dos outros dois elementos de aproximadamente 2,0 m. Essa estrutura deverá ser posicionada na direção do escoamento.

**Figura 12** - ET com as estruturas alocadas em definitivo no campo.



**Fonte:** Aplysia, 2021.

## 5.2 ESTRUTURAS PARA OS TRIBUTÁRIOS

As estruturas LDW para os tributários envolvem elementos complexos de madeira, como troncos e galhos, ancorados para estabilizar e estruturar as margens dos riachos. Essas estruturas são projetadas para melhorar a diversidade morfológica do substrato, promovendo uma maior diversidade da biota aquática. As estruturas selecionadas foram baseadas no modelo conceitual, com adaptações dos projetos de Neuhaus e Mende (2021), Harmon et al. (2023), Dixon e Sear (2014), e Keech et al. (2023). Para os tributários foram selecionados três tipos de estruturas de renaturalização (FG, TTX e TTV).

(1) FG – Feixes de Galhos (Figura 13) - Destinada aos tributários, se trata de uma estrutura submersa composta por pequenos feixes de galhos com ângulo de 30° à margem do tributário com o objetivo de criação de habitat. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,1 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 30% da largura média da calha. Essa estrutura deverá ser posicionada 30° na direção do escoamento.

**Figura 13** - FG com as estruturas alocadas no campo (exemplo).



**Fonte:** Aplysia, 2023.

(2) TTX – Estrutura Cruzada (Figura 14) – Destinada aos tributários, se trata de uma estrutura parcialmente submersa composta por pequenas árvores e feixes de galhos formando um X visto de cima, entretanto com o primeiro tronco  $90^\circ$  em relação ao escoamento e o segundo enviesado em  $45^\circ$  em relação ao escoamento, permitindo que o fluxo escoe rapidamente por ambas as direções, sendo ambos inseridos apenas em partes no perfil da calha do rio, ao ficarem apoiados nas margens, com o objetivo de criação de habitat e indução do fluxo. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,1 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 30% da largura média da calha. Essa estrutura foi prevista para ser posicionada  $30^\circ$  na direção do escoamento.

**Figura 14** - TTX com as estruturas alocadas no campo (exemplo).



**Fonte:** Neuhaus; Mende, 2011.

(3) TTV – Estrutura Transversal (Figura 15) - Destinada aos tributários, estrutura parcialmente submersa composta por dois troncos de árvores, com ângulo de 90°, sendo transversal ao escoamento e barrando 50% da largura da calha em seu centro ocasionando a divisão de 25% do escoamento para ambas as margens do tributário. Essa estrutura deverá ter diâmetro médio de 0,1 m, comprimento do tronco da base de aproximadamente 50% da largura média da calha.

**Figura 15** - TTV com as estruturas alocadas no campo (exemplo) e no HEC-RAS.



**Fonte:** Neuhaus; Mende, 2011.

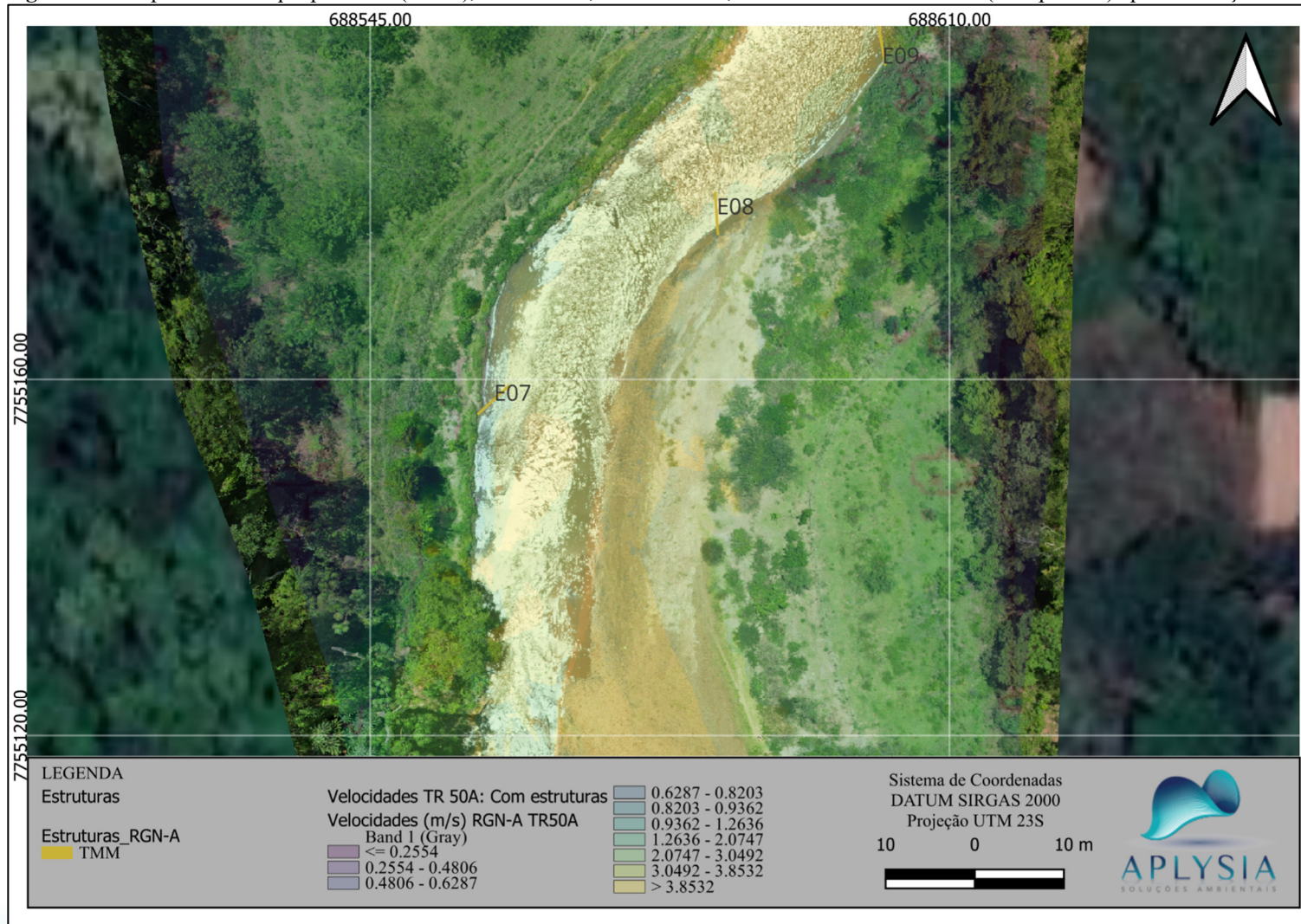
## 6. AVALIAÇÃO DA ESTABILIDADE DAS ESTRUTURAS

Conforme resultados apresentados no estudo de modelagem hidráulica (APLYSIA, 2024), foi definido para os diferentes tipos de estruturas simuladas na expansão definitiva da renaturalização, tendo em vista avaliar, especialmente, aquelas encontradas em duas situações:

- Pontos de atenção: Locais com velocidade crítica, isto é, cenários de calha natural com velocidade superior a 3m/s para tributários ou superior a 4m/s para o RGN;
- Pontos de alerta: Locais com potencial erosivo, isto é, cenários pós instalação de estruturas, com velocidade superior a 10% (considerada significativa para todas as estruturas).

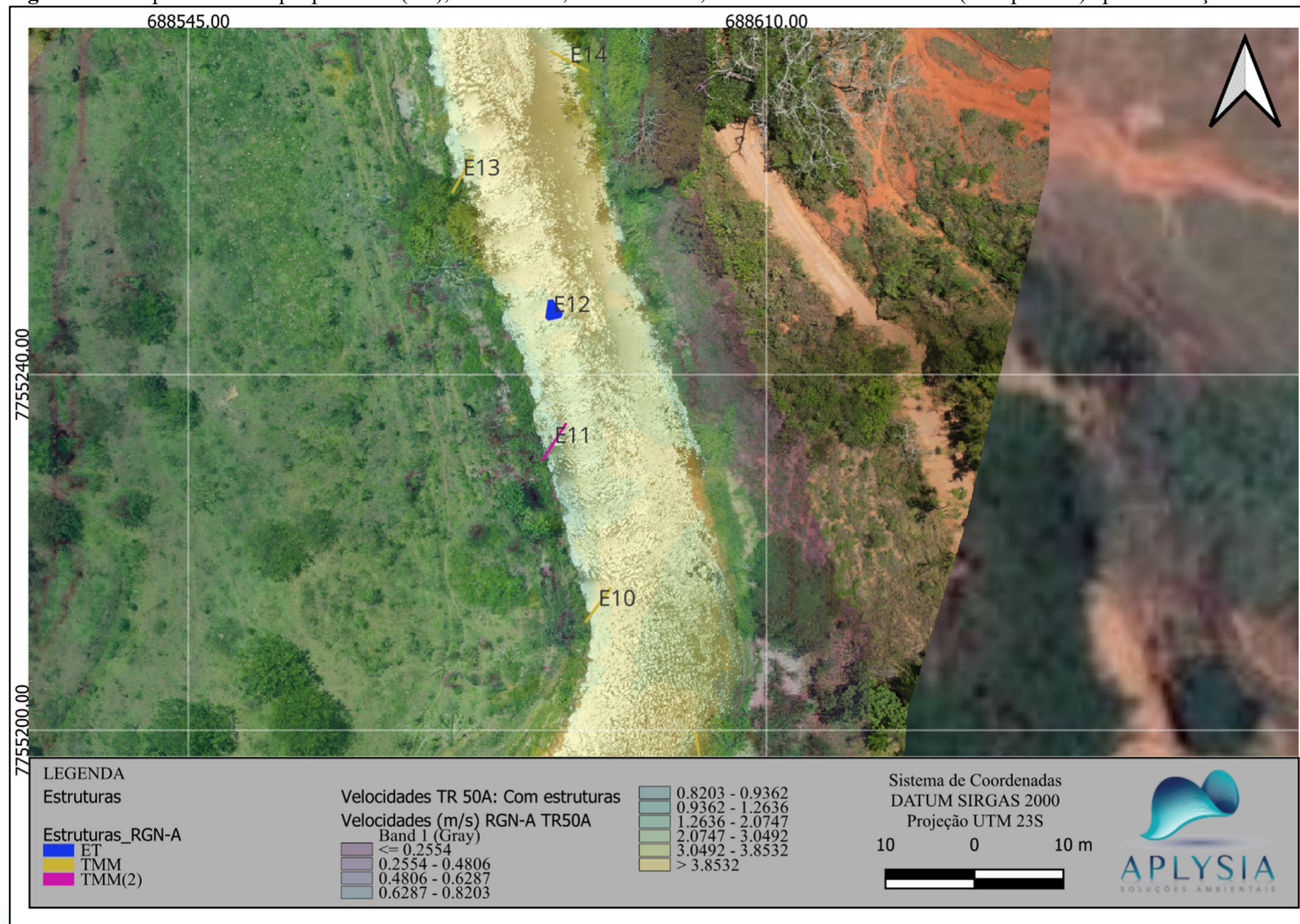
Abaixo se encontram apresentados os destaques para as condições em que cada estrutura se encontra, dentre aquelas com condições de maior risco de instabilidade, considerando ambas as condições cumulativamente (Figuras 16 a 24). Poderão ser utilizadas no presente relatório de forma a atestar segurança para todas as estruturas do projeto (que podem ser verificadas detalhadamente em anexo).

**Figura 16** - Mapa com destaque para E07 (TMM), em RGN-A; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



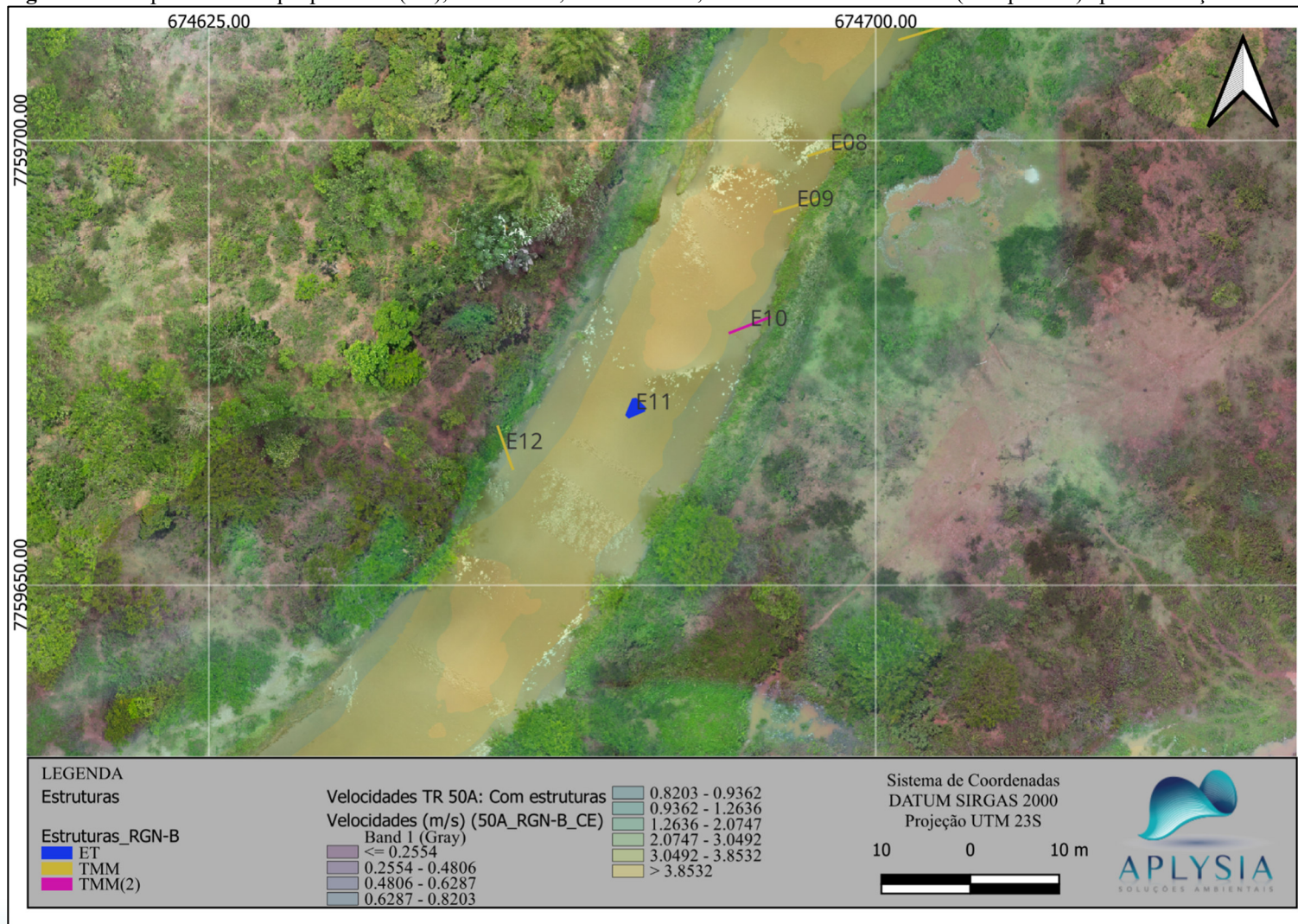
Fonte: Aplysia, 2024.

Figura 17 - Mapa com destaque para E12 (ET), em RGN-A; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



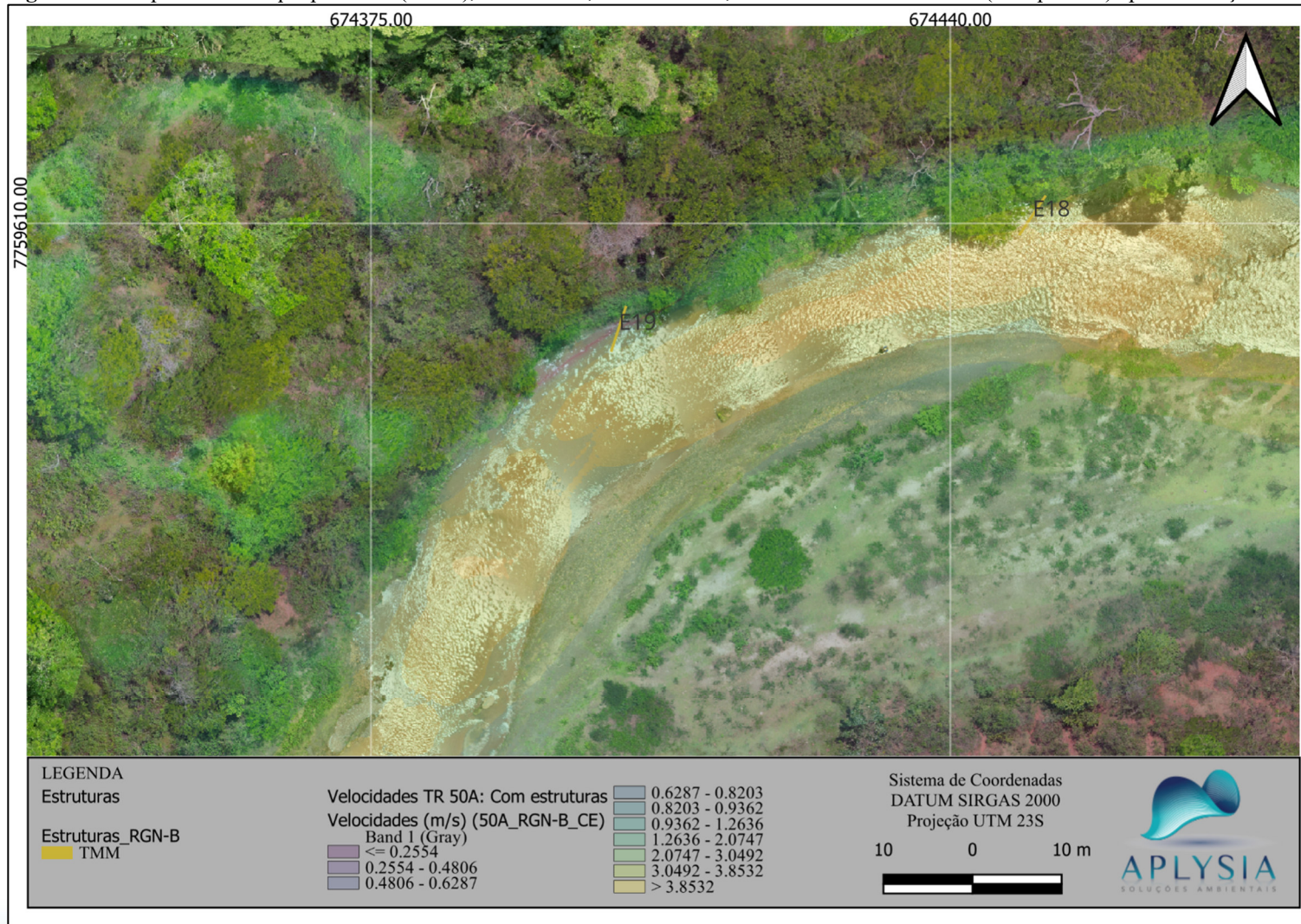
Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 18** - Mapa com destaque para E11 (ET), em RGN-B; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



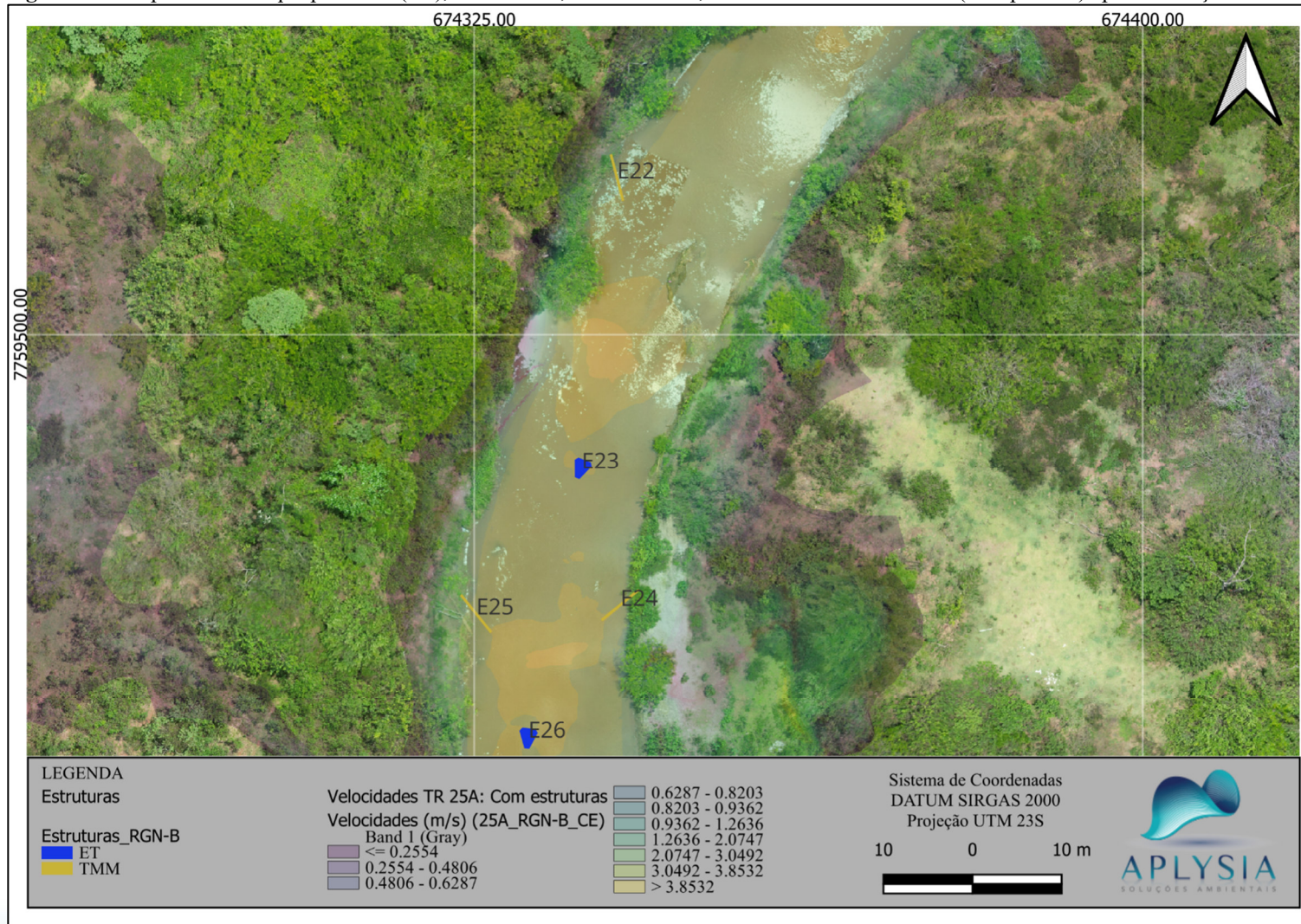
Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 19** - Mapa com destaque para E19 (TMM), em RGN-B; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



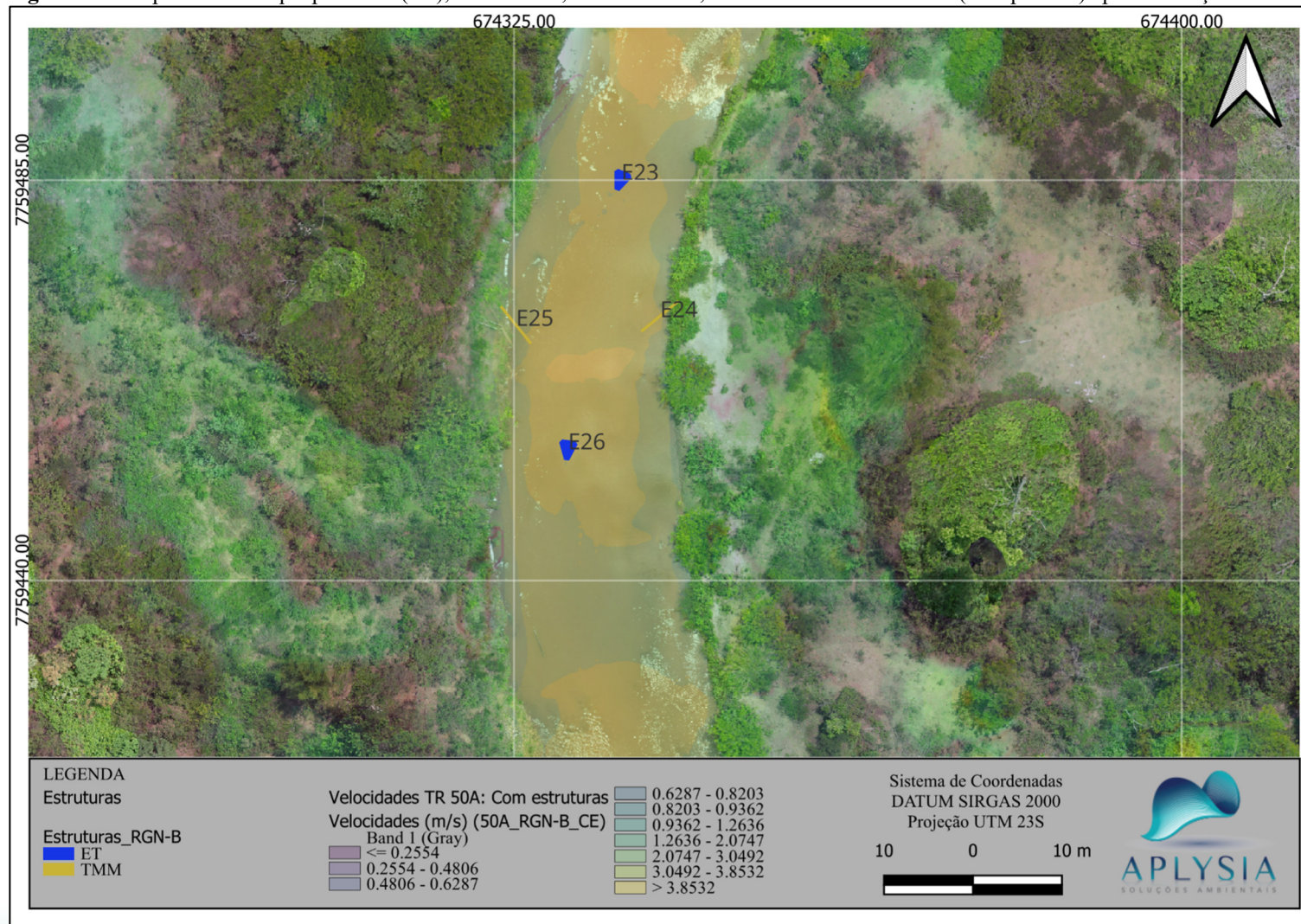
Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 20** - Mapa com destaque para E23 (ET), em RGN-B; TR = 25 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



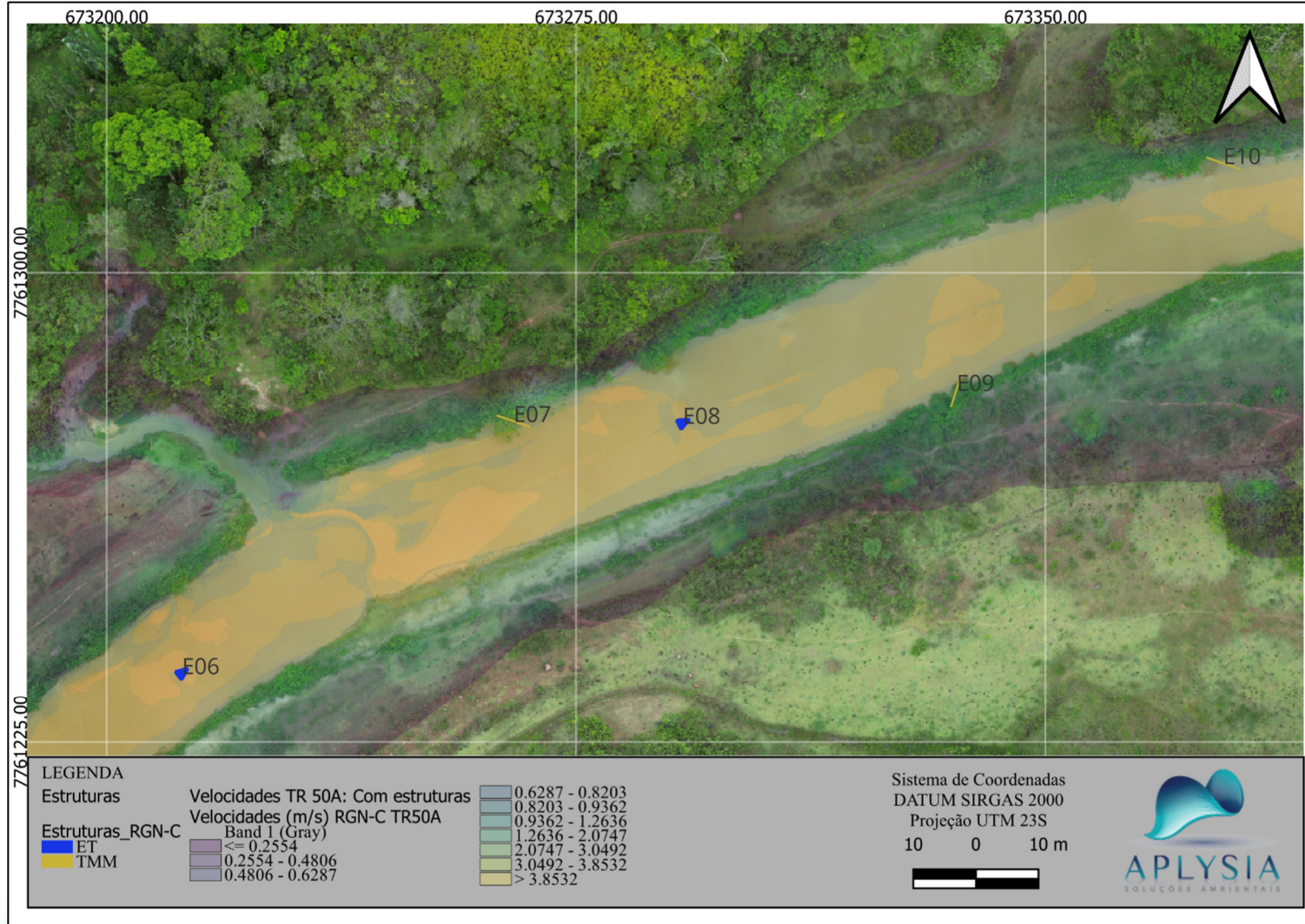
Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 21** - Mapa com destaque para E26 (ET), em RGN-B; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



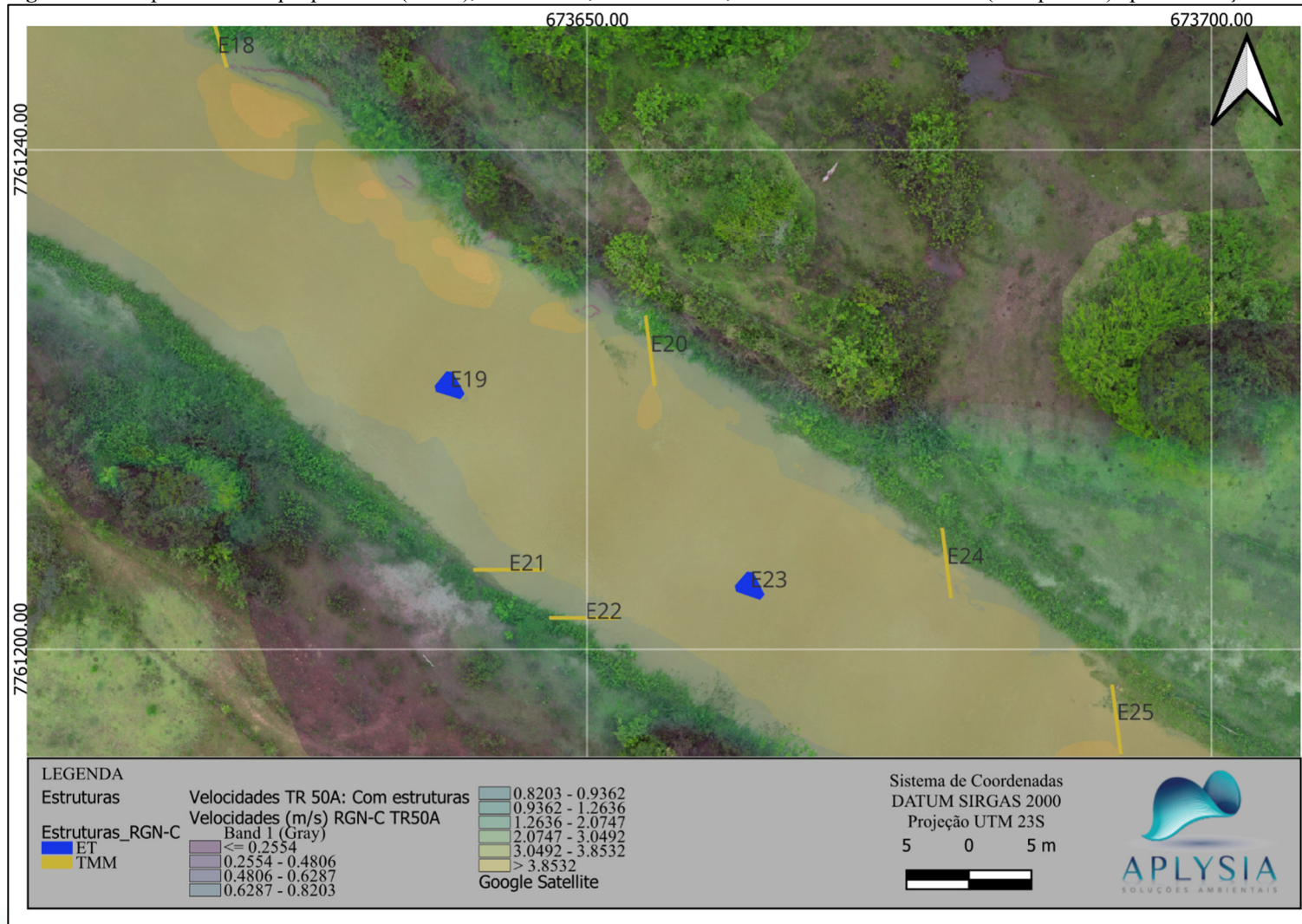
Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 22** - Mapa com destaque para E08 (ET), em RGN-C; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



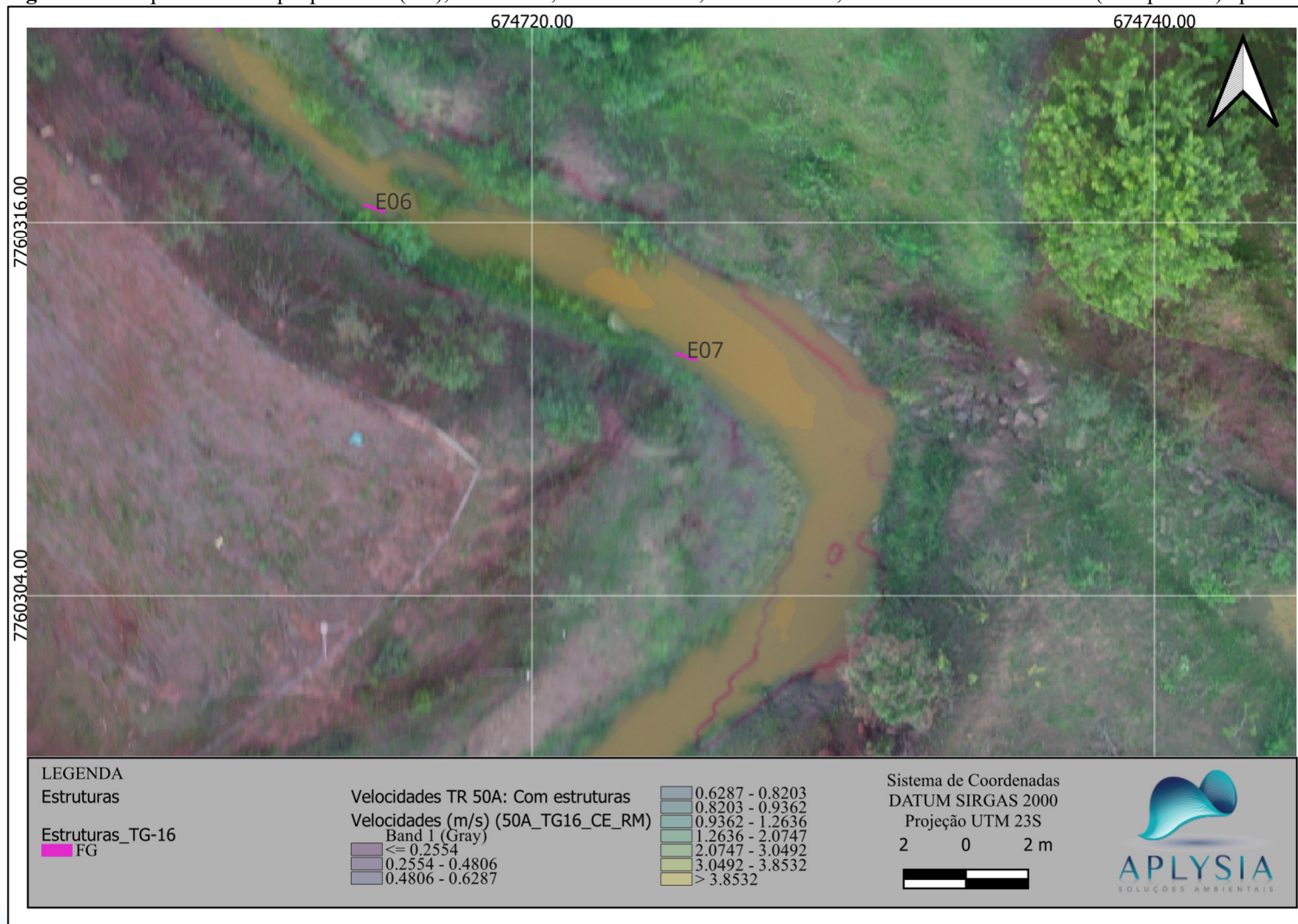
Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 23** - Mapa com destaque para E20 (TMM), em RGN-C; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



Fonte: Aplysia, 2024.

**Figura 24** - Mapa com destaque para E07 (FG), em TG-16; Com Remanso; TR = 50 anos; Com velocidades da calha (transparente) após instalação das estruturas.



Fonte: Aplysia, 2024.

As componentes estruturais destinadas à execução da renaturalização dos trechos pré-selecionados, em razão da velocidade do fluxo e da força do empuxo da água, estão sujeitas à desestabilização e podem ser transportadas pelo curso do rio. Nesse cenário, a avaliação da estabilidade das estruturas consiste na avaliação das forças que asseguram a estabilidade em relação àquelas que tendem a desestabilizá-las.

Deste modo, é importante destacar que os troncos irão resistir em função da resistência ao arrancamento, variável estimada por parâmetros geotécnicos, somada ao peso do sistema composto por estacas cravadas e amarradas com cordas de sisal aos troncos, a fim de evitar que sejam levados pelo fluxo.

Visto que as estruturas serão fixadas por estacas de madeira cravadas no fundo do rio, a dependência se encontra essencialmente no material da fundação e dos seus parâmetros de resistência.

Dentre variados tipos de ruptura e/ou mecanismos de falha, os principais mecanismos de falha possíveis são:

- Cisalhamento (ruptura transversal);
- Deslizamento (deslocamento horizontal);
- Flexão;
- Flutuação;
- Descalçamento das estacas de fixação.

Esses mecanismos foram detalhados no Relatório de Estabilidade das Estruturas destinado a outro trecho (APLYSIA, 2020d). O objetivo atual consiste em emular esses processos nos trechos apresentados no Item 3 desse relatório, para esclarecer o comportamento das estruturas críticas destacadas e atestar a segurança das mesmas diante dos eventos simulados na modelagem hidráulica apresentada em anexo.

## 6.1 CRITÉRIOS E PREMISSAS UTILIZADOS

Os critérios e premissas utilizados no desenvolvimento deste estudo são:

- Entende-se por *estrutura* o sistema composto por tronco(s), estacas e cordas de sisal;

- O diâmetro dos troncos de madeira apoiados no fundo do rio foi considerado igual a 30cm ou 0,3 m para o RGN (D, C, B e A) e de 10cm ou 0,1m para os tributários TG-11, TG-16 e TG-29;
- O diâmetro das estacas de madeira utilizadas na fixação dos troncos apoiados foi considerado igual a 0,1m tanto para o RGN como para seus tributários.
- O procedimento de amarração das estacas nas estruturas é executado utilizando 4m de corda de sisal, que é entrelaçada ao redor do par de estacas em movimentos em forma de "oito" para aprimorar a sustentação da amarração. Em seguida, a corda de sisal é fixada ao tronco com grampos de cerca galvanizados de 19x11 polegadas;
- Nas avaliações não foi considerado o acúmulo de sedimento como um processo que pudesse auxiliar na estabilidade da estrutura, tendo em vista o propósito do presente relatório ser a avaliação de estabilidade com maiores fatores de segurança, assim como a postura conservadora no planejamento da fixação das estruturas;
- A espécie da madeira utilizada nos troncos principais das estruturas pré-definidas: *Eucalyptus cloeziana*, devido a sua maior densidade em relação as demais espécies de *Eucalyptus*. Espécie da madeira das estacas pré-definida: *Eucalyptus grandis* (detalhamentos referentes a escolha de tal madeira podem ser encontrados em APLYSIA (2021);
- O comprimento dos troncos apoiados é variável e depende do tipo de estrutura e, principalmente, largura da calha, no local específico, para sua definição. A tabela contendo o comprimento de cada estrutura é apresentada em anexo, assim como os resultados para as forças de arraste e os fatores de segurança calculados;
- O comprimento total de cada estaca foi considerado igual a 1,5 m, enquanto a profundidade cravada foi adotada igual a 1,0 m, conforme adotado e validado nos relatórios de modelagem e estabilidade em APLYSIA (2020c e 2020d). O presente relatório visou revisar tais dimensões e sugerir ajustes, caso necessário, tendo em vista que foram consideradas as mesmas dimensões de estacas para as condições hidrodinâmicas diferenciadas dos tributários, assim como trechos novos do RGN. Dificuldades na implantação dos tributários, como menos espaço disponível para implantação de número maior de estacas em estruturas que possam exigir tal condição, deverão ser avaliadas in loco quando ocorrer e seguir as recomendações deste relatório;

- As velocidades utilizadas nas estimativas das forças de arraste foram retiradas da modelagem hidráulica bidimensional (APLYSIA, 2024);
- Os valores utilizados na elaboração deste relatório foram obtidos dos dados de velocidade gerados para uma cheia com tempo de recorrência de 50 anos, apresentado em anexo, tendo em vista ser a partir dele que se identificou a ocorrência de velocidades críticas para todos os trechos objetos de estudo. A coleta de dados de velocidade para cada estrutura consiste na identificação das mesmas no mapa de velocidades e posteriormente dos valores apresentados nas imediações logo à montante de cada estrutura. Onde não existia certa homogeneidade nos padrões de velocidade à montante da estrutura, foi utilizado o maior valor observado (APLYSIA, 2024).

## 6.2 CISALHAMENTO

Conforme anteriormente elucidado em relatórios precedentes (APLYSIA, 2020d), este mecanismo de falha não figura entre os prioritários, uma vez que as velocidades de escoamento do rio não geram uma força horizontal nos troncos principais que seja suficiente para a falha da estrutura, e a tensão é transmitida às estacas. Sendo as estacas elementos essenciais para suportar essas forças, o número de estacas para cada estrutura foi determinado de forma que o conjunto tenha um bom fator de segurança quanto a este mecanismo de falha. Não havendo uma normativa específica para as estruturas e condições colocadas no presente projeto, levou-se em consideração a NBR 7190:1997 – Projeto de Estruturas de Madeira, que cita que os coeficientes de segurança relativos à resistência da madeira tomam valores compatíveis com os adotados para outros materiais estruturais, assim como a NBR 11682:2009 – Estabilidade de Encostas, que indica níveis de segurança para diferentes condições, obras e forças consideradas. Deste modo, adota-se o Fator de Segurança (FS) superior a 1,3, como tendo uma segurança satisfatória para o projeto em questão, pois trata-se de uma obra com nível baixo de potenciais danos diretos a vidas humanas e nível médio para potenciais danos materiais e ambientais.

De forma complementar, a decisão por avaliar apenas a falha das estacas está no fato desse elemento possuir resistência média ao cisalhamento e área da seção transversal inferiores ao tronco principal, ou seja, se houver rompimento de algum elemento, este acontecerá sempre na estaca anterior ao elemento principal.

Sendo assim, os esforços que tendem a romper as estacas (esforços solicitantes) são provenientes das velocidades do escoamento do rio e os esforços que resistem a essas solicitações (esforços resistentes) são provenientes da resistência ao cisalhamento da madeira a ser utilizada e do diâmetro desses elementos. Visto que é esperado que as estacas resistam aos esforços provenientes do escoamento do rio, levando-se em conta uma quantidade relevante de estacas a serem instaladas, como ocorrido em estudos anteriores (APLYSIA, 2020d), busca-se aqui apresentar a estabilidade contra o cisalhamento de forma mais direta ao invés de cálculos individuais para cada estaca, sendo que tais resultados podem ser verificados na íntegra em anexo deste relatório.

Destaca-se que, em sua maioria, os tributários exigiram uma quantidade menor de estacas em comparação ao Rio Grande do Norte (RGN). Em locais onde serão inseridas estruturas com velocidades de fluxo demasiadamente altas (acima de 3m/s), foi considerada uma quantidade maior de estacas, tanto para as estruturas TMM quanto ET. Essa abordagem também se aplica aos tributários, entretanto, diferentemente do RGN, a proporção de estacas para mitigação é menor. Isso se deve ao fato de que uma quantidade excessiva de estacas para manter a estabilidade da estrutura pode prejudicar o escoamento, além de poderem ser maiores que a própria estrutura de renaturalização.

Segundo WALM (2019a) a estimativa da força horizontal exercida nos troncos apoiados pode ser mensurada utilizando-se a formulação da força de arraste, apresentada na Equação 1.

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot c_d \cdot A \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$F_a$  = força de arraste total (kN);

$\rho$  = densidade do fluido (1.000 kg/m<sup>3</sup> para a água);

$v$  = velocidade média do escoamento (m/s);

$c_d$  = coeficiente de arraste;

$A$  = área normal do elemento à direção do escoamento (m<sup>2</sup>).

O coeficiente de arraste  $c_d$  é função do formato do objeto perpendicular à direção do fluido. Visando consistência metodológica, foi mantido o valor do coeficiente de arraste adotado na avaliação de fixação das estruturas. Portanto, foi considerado coeficiente de arraste ( $c_d$ ) igual a 2,0 para todas as estruturas (WALM, 2019a). A decisão por este coeficiente traz

uma abordagem mais conservadora ao problema, dada a quantidade de incertezas e simplificações utilizadas ao longo da análise.

Foi então encontrado o maior valor do produto entre a velocidade do escoamento e a área normal à estrutura, determinando assim a maior força de arraste dentre todas as estruturas para cada um dos 7 trechos, em especial o trecho RGN-A, com a velocidade associada ao tempo de recorrência de 50 anos para a verificação final.

Para o presente estudo, a maior força de arraste ( $F_a$ ) dentre as estruturas selecionadas para avaliação de estabilidade (possuem pontos de atenção e/ou alerta e coerência metodológica na modelagem), está aplicada no tronco de estrutura ET E26 do trecho RGN-B, posicionado no centro da calha (Figura 14). O elemento possui diâmetro igual a 0,3 m, comprimento de 6,00 m, e velocidade logo à montante do tronco de aproximadamente 3,80 m/s.

A área normal considerada se restringe apenas a área do elemento apoiado, ou seja, do tronco principal. A área incremental das estacas acima do elemento principal não foi considerada, dado seu valor absoluto de baixa relevância e todas as considerações a favor da segurança. A força resultante ( $F_a$ ) calculada foi de 13,01 kN.

Com a estimativa da resistência ao cisalhamento das estacas de fixação, finalmente, os valores podem ser comparados para verificar se as estruturas serão estáveis considerando o mecanismo de falha em questão ao verificar os esforços solicitantes ou força resistente ao cisalhamento de uma ou mais estacas.

Visando consistência metodológica, adotou-se a mesma metodologia apresentada nos estudos de estabilidade das estruturas do PPR (WALM, 2019a) para o cálculo do esforço resistente ao cisalhamento. Portanto, utilizou-se o mesmo procedimento descrito na NBR 7190 (ABNT, 1997).

O valor de cálculo da resistência ao cisalhamento da madeira ( $f_{vd}$ ) é determinada segundo a Equação 2 e 3:

$$f_{vd} = k_{mod} \cdot \frac{f_{vk}}{\gamma_{wv}} \quad \text{Equação 2}$$

Em que:

$f_{vd}$  = valor de cálculo da resistência ao cisalhamento;

$k_{mod}$  = coeficiente de modificação;

$f_{vk}$  = valor característico da resistência ao cisalhamento;

$\gamma_{wv}$  = coeficiente de ponderação.

$$F_r = A_e \cdot f_{vd} \quad \text{Equação 3}$$

Em que:

$F_r$  = força resistente ao cisalhamento de uma estaca;

$A_e$  = área da seção transversal da estaca.

Dessa forma, dado que a espécie utilizada na fabricação das estacas é *Eucalyptus grandis*, e aplicando-se os valores de  $f_{vk} = 3,78 \text{ MPa}$ ,  $k_{mod} = 0,312$  e  $\gamma_{wv} = 1,8$  na Equação 2, de acordo com a NBR 7190 (ABNT, 1997), foi possível determinar o valor de cálculo da resistência ao cisalhamento das estacas de madeira  $f_{vd} = 0,655 \text{ MPa}$ . Finalmente, aplicando  $f_{vd}$  na Equação 3, é possível determinar a força resistente ao cisalhamento de uma estaca com diâmetro igual a 0,1m igual a 5,15kN.

Considerando que os troncos apoiados são fixados ao substrato com pares de estacas cravadas e amarradas com cordas de sisal, a força de arraste para cada estrutura deverá ser dividida pelo número total de pares de estacas para comparação com a força resistente ao cisalhamento calculada para uma estaca individual. Portanto, sabe-se que, pelo menos dois pares de estaca ou mais, dependendo da estrutura, devem ser utilizados.

Portanto, ao considerar o caso específico da estrutura ET-E26 no trecho RGN-B, que se destacou como um dos mais severos em termos de velocidade de acordo com os estudos de modelagem hidráulica (APLYSIA, 2024), assim gerando maior ponto de alerta. Nesse contexto, para manter a consistência dos valores, ao considerar apenas quatro pares de estacas e dividir a força de arrasto ( $F_a = 13,01 \text{ kN}$ ) por 2 (quantidade mínima determinada, ainda que substancialmente inferior às instalações anteriores), obteríamos um valor máximo aproximado de 6,50 kN para cada estaca.

Visto que a força resistente ao cisalhamento de uma estaca é igual a  $F_r = 5,15 \text{ kN}$ , nesse caso para garantir a segurança das estruturas, é importante utilizar pelo menos 2 pares (4 estacas). Dessa forma cada estaca poderá receber uma força de arraste  $F_a = 3,25 \text{ kN}$ , o que é inferior a força resistente ao cisalhamento. Mesmo considerando que a distribuição de forças nas estacas pode não ser linear e o cálculo anterior é uma simplificação, como a força de arraste está abaixo da força resistente, considera-se que dessa forma garante-se que todas as estruturas resistem aos esforços de cisalhamento, visto que estão dentro do fator de segurança determinado

para as estruturas, no caso citado, com o valor de 1,58. É importante salientar a necessidade de uma quantidade superior de estacas para estruturas com maior força de arraste, visando maior fator de segurança para eventos superiores ao TR de 50 anos, por exemplo.

Por fim, percebe-se que para as estruturas submetidas à força de arraste superiores, conforme apresentado em anexo, em especial àquelas destacadas anteriormente contempladas nos trechos RGN-A, RGN-B, RGN-C e TG-16, serão previstos até 12 pares de estacas, garantindo a estabilidade contra o cisalhamento. Essa medida de mitigação serão atribuídas a todas as estruturas ET, dada sua presença recorrente em pontos de atenção e pontos de alerta no relatório de modelagem (APLYSIA, 2024), assim como experiências com as instalações anteriores onde houve maiores instabilidades em tais tipos.

### 6.3 FLEXÃO

Seguindo a mesma linha apresentada nas verificações dos esforços cisalhantes, a metodologia aqui empregada para as verificações quanto à flexão é a mesma apresentada em Walm (2019a) e detalhada em Aplysia (2020d).

Sabe-se que o diâmetro das estruturas apoiadas é de 0,3 m (0,1m para os tributários), assim como apresentado nos critérios e premissas. Considerando a transferência da força de arraste do tronco apoiado para as estacas, pode-se afirmar que essa força está aplicada à meia altura ( $d$ ), ou seja, 0,15 m do fundo (0,05m para os tributários). Portanto, o momento de cálculo máximo ( $Md$ ) aplicado à estaca para TR = 50 anos, para a mesma estrutura ET E26 do trecho RGN-B, é dado pela multiplicação da Força de Arraste com a meia altura das estacas, obtendo-se para este caso específico, por estaca,  $Md$  igual a 487,5  $N.m$ .

Segundo a NBR 7190, para verificação quanto à flexão simples, as seguintes condições devem ser atendidas:

$$\sigma_{cd} \leq f_{cd} \quad \text{Equação 4}$$

$$\sigma_{td} \leq f_{td} \quad \text{Equação 5}$$

Em que:

$\sigma_{cd}$  = tensão atuante na borda mais comprimida;

$\sigma_{td}$  = tensão atuante na borda mais tracionada;

$f_{cd}$  = resistência de cálculo à compressão;

$f_{td}$  = resistência de cálculo à tração.

$$\sigma_{cd} = \frac{M_d}{W_c} \quad \text{Equação 6}$$

$$\sigma_{td} = \frac{M_d}{W_t} \quad \text{Equação 7}$$

$$W_c = \frac{I}{y_c} \quad \text{Equação 8}$$

$$W_t = \frac{I}{y_t} \quad \text{Equação 9}$$

Em que:

$W_c$  = módulo de resistência à compressão da madeira

$W_t$  = módulo de resistência à tração da madeira;

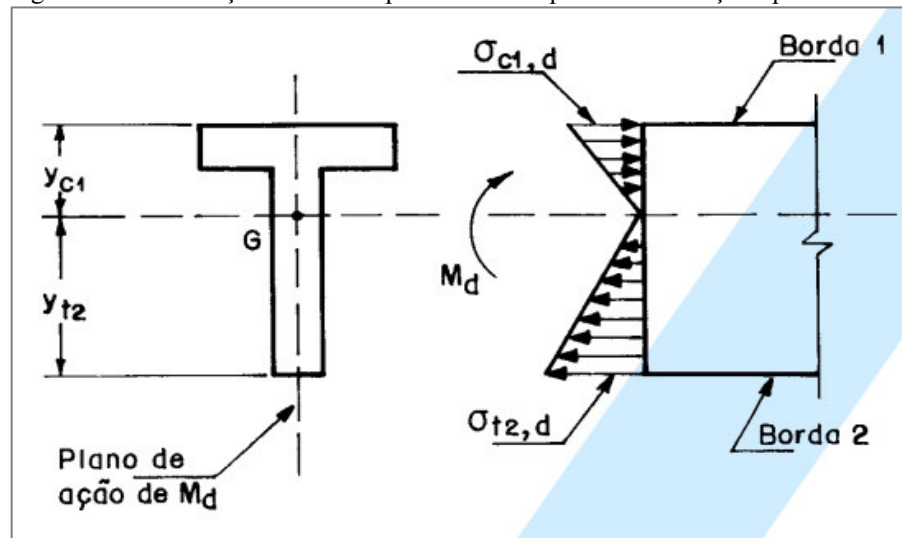
$y_c$  = distância entre a linha neutra e as fibras mais comprimidas;

$y_t$  = distância entre a linha neutra e as fibras mais tracionadas;

$I$  = momento de inércia da seção

Considerando o *Eucalyptus grandis* como o material das estacas, as resistências médias desse material à compressão ( $f_{cm}$ ) e à tração ( $f_{tm}$ ) são iguais a 40,3 MPa e 70,2 MPa, respectivamente, segundo a NBR 7190 (ABNT, 1997). Aplicando os coeficientes de ponderação para compressão ( $\gamma_{wc}$ ) igual a 1,4 e à tração ( $\gamma_{wt}$ ) igual a 1,8, temos as resistências de cálculo à tração ( $f_{td}$ ) e à compressão ( $f_{cd}$ ) do material:  $f_{td} = 8,98$  MPa e  $f_{cd} = 12,17$  MPa. A Figura 25 apresenta o diagrama de distribuição de tensões para flexão simples apresentado na NBR 7190 para uma seção tipo “T”, onde G é o centro de massa da seção. No caso de uma seção circular, como nas estacas de fixação, o centro de massa está localizado exatamente no seu centro geométrico, definindo, portanto, valores de  $y_c$  e  $y_t$  iguais a 0,05 m, dado o diâmetro da estaca igual a 0,1 m.

**Figura 25** - Diagrama de distribuição de tensões para flexão simples em uma seção tipo T



Fonte: ABNT, 1997.

Ademais, sabe-se que o momento de inércia de área ( $I$ ) de uma seção circular é igual a  $0,015625 \cdot \pi \cdot D^4$ , onde  $D$  é o diâmetro da estaca. Aplicando-se os valores obtidos nas equações, temos ambos  $\sigma_{td} = 4,93 \text{ MPa}$  e  $\sigma_{cd} = 4,93 \text{ MPa}$ . Uma vez que os esforços resistentes são superiores aos esforços solicitantes, pode-se considerar que as estruturas resistem aos esforços de flexão.

#### 6.4 FLUTUAÇÃO

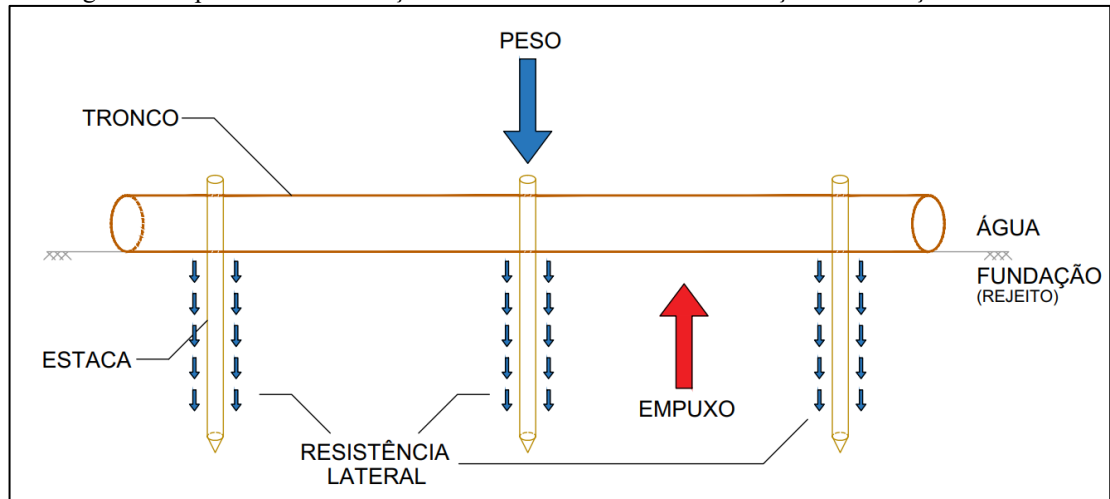
As únicas forças que resistem ao empuxo da água são a resistência de contato lateral entre a estaca e o material do leito do rio e o peso próprio do sistema. Se a resistência lateral for desconsiderada as estruturas não seriam estáveis, já que a densidade da água é superior à densidade das madeiras.

Diferentemente do apresentado para os demais mecanismos de falha, a metodologia adotada para estudar a estabilidade à flutuação das estruturas advém da consideração da resistência ao arrancamento das estacas nos cálculos deste relatório. As estruturas a serem instaladas nos novos trechos estarão submetidas ao esforço solicitante de empuxo quando totalmente ou parcialmente submersas.

No sentido oposto à força de empuxo tem-se o peso próprio do conjunto formado pelos troncos e estacas e alguma resistência lateral mobilizada entre as estacas e a fundação. A Figura

26 apresenta o diagrama simplificado dos esforços resistentes e solicitantes atuantes no sistema quanto à flutuação.

**Figura 26** - Diagrama simplificado dos esforços solicitantes e resistentes à condição de flutuação.



Fonte: Aplysia, 2020d.

Para atender à condição de estabilidade à flutuação, a força de empuxo ( $E$ ) deve ser inferior à soma da força peso das estruturas ( $P$ ) com a força de arrancamento máxima mobilizada entre as estacas e o material da fundação ( $P_u$ ). Dessa forma, convencionando a direção da força peso como positiva, temos que a Equação 10 deve ser satisfeita para condição de equilíbrio:

$$P + P_u - E > 0 \quad \text{Equação 10}$$

$$P = \sum \rho_i \cdot g \cdot V_i \quad \text{Equação 11}$$

Em que  $\rho_i$  e  $V_i$  são a massa específica e o volume de cada elemento de madeira do sistema tronco-estacas e  $g$  a aceleração da gravidade.

$$E = \rho_f \cdot V \cdot g \quad \text{Equação 12}$$

Em que  $\rho_f$  é a massa específica do fluido onde a estrutura está inserida,  $V$  o volume total do sistema tronco-estacas abaixo da lâmina d'água e  $g$  a aceleração da gravidade.

Por fim, a parcela correspondente à resistência de arrancamento entre o material da fundação e as estacas não têm uma formulação única, sendo dependente de fatores tais como os parâmetros geotécnicos das camadas da fundação, cuja estimativa foi realizada em estudos anteriores (APLYSIA, 2020d), a geometria das estacas, a rugosidade da superfície das estacas e o método de instalação.

Dado que não é viável avaliar a resistência do material no local de cada estrutura a ser implantada, já que o próprio regime de deposição é cíclico, foram considerados na estimativa dos parâmetros de resistência, as estimativas para este relatório, no que tange aos parâmetros geotécnicos, sendo os mesmos em que os relatórios anteriores se basearam. Sabe-se que o material depositado nas margens e leito do rio é bastante heterogêneo e apresenta comportamento bastante variado tanto horizontal quanto verticalmente. Isto é, visto que a caracterização do material componente do Trecho 8 apresentada no documento N010600-D-1RT001 (TRACTEBEL, 2018) está mais completa, contendo levantamento e espessura total de rejeitos e análise granulométrica do material encontrado, foram considerados esses dados como adequados para estimativas da fundação das estruturas a serem implantadas em outros trechos da bacia e verificada a compatibilidade entre as sondagens do Trecho 8 e 9 contidas no documento RT\_AMB\_034-19 Rev.01 (AMBILEV, 2019), assim como, decidiu-se pela adoção de fator de redução igual a 2 para os parâmetros adotados, reduzindo pela metade a resistência do material depositado do leito do rio e aumentando o fator de segurança de resistência da estrutura (APLYSIA, 2020d).

Para cálculo da resistência lateral foi escolhido o método, desenvolvido por Biarez e Barraud (1968), por se tratar de um método bastante abrangente, podendo ser utilizado para solos com granulometrias variadas (AZEVEDO, 2011). No caso do projeto em questão, essa é uma questão fundamental dada a heterogeneidade do material depositado. O procedimento de cálculo e a formulação para estimativa da resistência lateral a partir dos parâmetros de resistência do solo estimados são apresentados na Equação 13 com a expressão geral para o cálculo da capacidade de carga à tração de estacas em fundações homogêneas.

$$P_u = p \cdot L \cdot [c \cdot M_c + \gamma \cdot D \cdot (M_\phi + M_\gamma) + q_0 \cdot M_q] + P_f$$

Equação 13

Onde:

$p$  = perímetro da estaca;

$L$  = profundidade cravada da estaca;

$c$  = intercepto de coesão do solo da fundação;

$M_c$  = coeficiente de capacidade de carga à tração relacionado à coesão da fundação;

$M_\phi$  = coeficiente de capacidade de carga à tração relacionado ao ângulo de atrito da fundação;

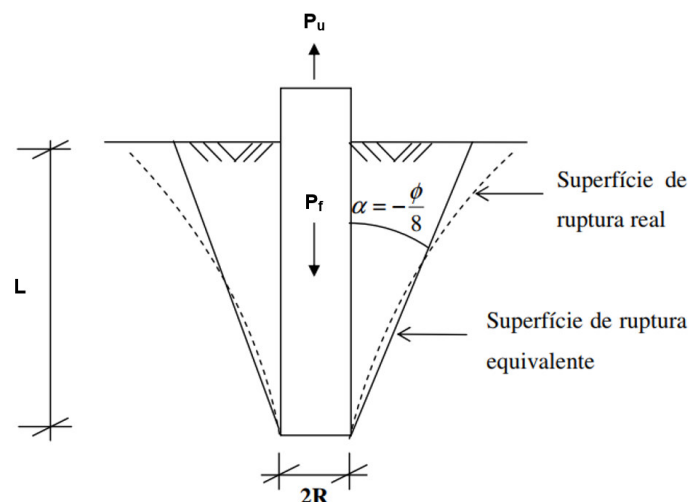
$M_\gamma$  = coeficiente de capacidade de carga à tração relacionado ao peso específico efetivo do solo da fundação;

$M_q$  = coeficiente de capacidade de carga à tração relacionado à sobrecarga;

$P_f$  = peso da fundação.

Conforme investigado nos relatórios anteriores (WALM, 2019a e APLYSIA, 2020d), alguns casos de estabilidade à flutuação foram analisados, especialmente para as situações mais críticas, resultando no levantamento da geometria dos conjuntos para a determinação do volume submerso nos sistemas de estacas. No contexto dos cálculos, foi adotado um comprimento mínimo cravado de 1,0 m, de maneira análoga para os novos trechos, conforme ilustrado na Figura 27.

**Figura 27** - Superfície de ruptura de estacas cilíndricas.



**Fonte:** Adaptado de Azevedo, 2011.

Em seguida, em posse dos pesos de cada tipo de estrutura e o empuxo exercido sobre elas, assim como utilizando a densidade de cada uma das espécies em acordo com o Anexo E da NBR 7190 (ABNT, 1997), e Biarez e Barraud, (1968), foram calculados os parâmetros intermediários do método para finalmente obter a resistência ao arrancamento das estruturas.

Contudo, mesmo que o material da fundação seja bastante heterogêneo e pouco resistente, a caracterização deste material encontrou valores de resistência significativos para a estabilidade das estruturas, sendo que a maioria das estruturas instaladas nos trechos anteriores se encontram nos locais originais. Por fim, com os valores de resistência ao arrancamento calculados, pode-se verificar a estabilidade das estruturas contra a flutuação. O fator de segurança, que é representado pela razão entre os esforços resistentes (peso próprio e resistência ao arrancamento) e os esforços solicitantes (empuxo), sendo que estes podem ser verificados em anexo.

Logo, é fundamental o entendimento de que os resultados foram obtidos a partir de estimativas de parâmetros médios e de hipóteses simplificadas, como comprimento de estaca cravado de 1m e nível d'água mínimo para submersão completa das mesmas. Caso não seja possível atingir a profundidade mínima de cravação das estacas em algumas das estruturas, deverão ser cravados pares de estacas adicionais até que se atinja a mesma condição de estabilidade dimensionada. Finalmente, sabe-se que nas condições do projeto e logística atual as estruturas poderão e deverão ser inspecionadas frequentemente, realizando os reparos necessários onde for identificado mau funcionamento. Os fatores de segurança em cada estrutura são apresentados em anexo.

## 6.5 DESLIZAMENTO

Assim como nas verificações ao cisalhamento e à flexão, foi adotada aqui a mesma metodologia apresentada em estudos anteriores (WALM, 2019b e APLYSIA, 2020d). Dado que a Teoria de Rankine (1857) se baseia no equilíbrio de forças de empuxo de terra e eventualmente água (lençol freático), a aplicação dessa teoria ao problema em questão pode ser considerada uma adaptação aceitável para estudo do empuxo passivo das estruturas, observada a natureza similar das forças provenientes do fluxo.

Para as estacas de madeira que auxiliam na estabilização do tronco principal, tem-se o estado passivo de Rankine, uma vez que a força de arraste tende a empurrar estes elementos para dentro da massa de solo. Segundo a teoria, a pressão lateral de terra ( $\sigma'_{hp}$ ), que é a pressão passiva de Rankine, é dada pela Equação 14.

$$\sigma'_{hp} = \sigma'_v \cdot K_p + 2 \cdot c' \cdot K_{pc} \quad \text{Equação 14}$$

Em que:

$\sigma'_{hp}$  = pressão passiva horizontal;

$\sigma'_v$  = pressão vertical;

$K_p$  = coeficiente de empuxo passivo de Rankine;

$K_{pc} = \sqrt{K_p}$ ;

$c'$  = intercepto de coesão do solo.

O coeficiente de empuxo passivo de Rankine é dado pela Equação 15.

$$K_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad \text{Equação 15}$$

Em que:

$\phi'$  = ângulo de atrito efetivo do solo

Para o cálculo do empuxo passivo de Rankine foram utilizados parâmetros de resistência provenientes da NBR 7190 para as espécies das madeiras adotadas ( $\phi' = 10^\circ$  e  $c' = 0$  kPa) e peso específico do solo igual a  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>, de acordo com WALM (2019), adotado para o cálculo da pressão vertical, sendo assim adotado para todas as estruturas. Realizando os cálculos obtemos  $\sigma'_{hp} = 28,41$  kN/m<sup>2</sup>. Por fim, aplicando a pressão passiva horizontal de Rankine na área que contribui ao esforço resistente, temos um empuxo passivo de terra igual a 0,71 kN por estaca.

Assim, para cada estrutura deverá ser determinado uma quantidade mínima de estacas para que seja atendido o critério de deslizamento para um fator de segurança maior do que 1,

ou seja, quando as forças resistentes são superiores às forças solicitantes, sendo apresentados em anexo.

## 6.6 DESCALÇAMENTO DAS ESTACAS DE FIXAÇÃO

Um dos possíveis mecanismos de falha das estruturas dos novos trechos é o descalçamento das estacas de fixação devido ao risco potencial de erosão do solo que circunda as estruturas. Esse potencial erosivo depende diretamente do regime fluvial e da distribuição das velocidades as quais as estruturas estão submetidas. Além disso, os parâmetros de resistência do material depositado também influenciam diretamente no risco de erosão e descalçamento das estacas de fixação.

Contudo, é importante ressaltar que um dos objetivos das estruturas a serem instaladas é favorecer a sedimentação na região circundante às estruturas, favorecendo também a estabilidade global destas. Adicionalmente, verifica-se para todas as estruturas a condição de descalçamento total do par de estacas de fixação das extremidades mais afastadas da margem do rio (maior recorrência de ET nos destaques do relatório de modelagem hidráulica), já que nessas regiões são encontradas as maiores velocidades de escoamento e, conseqüentemente, o maior potencial erosivo (*scour*).

Nesta situação, em todas as análises anteriores, os fatores de segurança obtidos são também superiores à unidade. Ou seja, mesmo que as estruturas percam um par de estacas, o fator de segurança deve ser se manter superior a 1,0 (tendo em vista FS superior a 1,3 originalmente, conforme explanado ao longo do relatório). Conforme relatórios anteriores, também foi considerada a hipótese que no dimensionamento de todas as estruturas possa ocorrer erosão de 15% do material no qual estão cravadas as estacas, ou seja, mesmo que a profundidade cravada das estacas seja reduzida de 1m para 85 cm, e, ainda assim, os fatores de segurança devem ser superiores a 1,0.

Dentre o grupo de relatos e observações ao longo do período do projeto, é possível constatar que foram reportadas algumas falhas, depois da passagem de períodos de cheias como de 2021/2022. Entretanto, vale ressaltar que a perda de algumas estruturas pode ocorrer em decorrência de obras civis ou eventos de TRs superiores a 50 anos, como relatadas em campanhas de monitoramento anteriores.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Referente aos aspectos de estabilidade, no que diz respeito a validação das hipóteses e premissas levantadas:

- O Fator de Segurança calculado com as metodologias já consagradas e utilizadas nos relatórios anteriores (WALM, 2019b e APLYSIA, 2020d), se mostrou dentro das condições esperadas para que as estruturas tenham estabilidade, mesmo em eventos extremos, mitigando a possibilidade de falha para cada um dos mecanismos previstos. Entretanto, embora tenha-se esse entendimento, bem como as constatações encontradas, as ressalvas adicionadas em função das velocidades maiores encontradas, maiores pontos de potencial instabilidade nos trechos estudados aqui em relação aos trechos anteriores e as ocorrências de falhas das estruturas citadas devido a evento de maior magnitude (TR>50 anos) ou interferência externa, como obras civis próximas, seguem algumas recomendações:
  - Monitoramento Trimestral (preventivo): Executar cronograma estabelecido para inspeções regulares das estruturas de madeira, especialmente antes e depois da temporada de cheias, quando necessário;
  - Comunicação integrada com os programas (preventivo): Manter contato regular com os demais programas, especialmente aqueles responsáveis pelas obras civis próximas, e compartilhar informações sobre a localização e a natureza das estruturas para evitar colisões acidentais;
  - Sinalização Adequada (preventivo): Instalar sinalizações visíveis do projeto identificando os trechos para assim alertar os trabalhadores das obras civis sobre a existência do projeto e incentivar a adoção de precauções adicionais;
  - Reforço Estrutural (corretivo): Considerar reforçar as áreas mais suscetíveis a danos durante eventos extremos, com a fixação de estacas adicionais, por exemplo.
  - De forma geral, permanece a recomendação do programa de inspeção e manutenção, que possuirá a função de garantir a resistência das estruturas à velocidade e o empuxo da água, devendo passar sempre que possível por campanhas com tais focos, a fim de maximizar o desempenho e a vida útil do projeto de renaturalização.
- Referente a falha por flutuação, deslizamento e descalçamento das estacas de fixação, as estruturas permanecem protegidas e com estabilidade no sistema, principalmente quanto

aos eventos de período de recorrência estudados, ao obedecer ao número mínimo de estacas;

- Comparado aos outros trechos já em processo de renaturalização e com estudos já definitivos, o presente estudo preliminar traz implicações diferentes, tendo como destaque a necessidade de as estruturas localizadas na foz dos tributários serem reforçadas para ocorrência de vazões negativas, provenientes de fenômenos de Remanso, sendo apresentados os resultados para cenários com e sem tal fenômeno;
- Foi determinado uma quantidade mínima de pares de estacas para cada uma das estruturas, apresentada nas Tabelas A, B, C, D, E, F e G em anexo, de forma que todas as condições de estabilidade sejam atendidas com Fator de Segurança maior do que os critérios adotados das NBR's ou, ainda, em caso de descalçamento de estacas, a unidade ( $FS > 1,0$ ) tanto para o RGN como para os tributários;
- A condição que estimou este fator de segurança leva em consideração estacas com profundidade cravada de 1,0 m. Qualquer profundidade cravada superior a este valor atribuirá mais segurança para a estabilidade do sistema e conseqüentemente maior Fator de Segurança;
- Por fim, sobre potenciais diferenças entre os tributários e o RGN, de forma diferenciada quanto aos tributários, nestes seria recomendado observar as técnicas de amarração que minimizem a interferência no fluxo de água e na dinâmica fluvial, além de verificar se ocorre quantidade de excessiva de estacas para poder manter a estabilidade da estrutura e, portanto, avaliar se estrutura com estacas excessivas devem permanecer.

Em relação aos tipos de estruturas previamente selecionadas para a renaturalização:

- TMM: recomenda-se a instalação com base no cumprimento da quantidade mínima recomendada de estacas necessárias para sustentá-lo, especialmente considerando que em determinadas situações encontra-se em margens suscetíveis ao processo de solapamento natural;
- ET: recomenda-se a instalação condicionada ao atendimento da quantidade prescrita de estacas necessárias para sua sustentação, considerando sua localização em regiões caracterizadas pelos vetores de velocidade mais elevados na seção transversal, devendo-se aplicar as recomendações indicadas neste capítulo para evitar suas falhas recorrentes;

- FG: recomenda-se a instalação condicionada à máxima fixação nas margens, considerando a possibilidade de ocorrência de eventos de cheias torrenciais nos tributários, que podem resultar na deposição de sedimentos e materiais de dimensões superiores à largura natural dos canais;
- TTX: recomenda-se a instalação condicionada a máxima fixação na calha e nas margens, pois, além de poder sofrer com os mesmos impactos citados acima, pode gerar fluxo preferencial na seção instalada tendo em vista o posicionamento dos 2 troncos fixados. Adicionalmente, as mesmas recomendações do ET devem ser aplicadas, tendo em vista estar localizado na região central dos tributários e com maiores vetores de velocidade;
- TTV: recomenda-se a instalação condicionada a máxima fixação nas margens, pois, além de poder sofrer com os mesmos impactos citados acima, pode perder a sustentação em eventos de cheias superiores às avaliadas. Adicionalmente, as mesmas recomendações do ET devem ser aplicadas, tendo em vista estar localizado na região central dos tributários e com maiores vetores de velocidade.

## 8. DADOS DA CONTRATANTE E CONTRATADA

### 8.1 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATANTE

**Razão Social:** Fundação Renova

**Número do CNPJ:** 25.135.507/0001-83

**Endereço:** Av. Getúlio Vargas, 671 - Belo Horizonte- MG/CEP: 30112-021

**E-mail:** hana.fernandes@fundacaorenova.org

**Telefone:** (31) 3289-9836

### 8.2 IDENTIFICAÇÃO DA CONTRATADA

**Razão Social:** APLYSIA ASSESSORIA E CONSULTORIA LTDA

**Número do CNPJ:** 02.290.210/0001-97

**Endereço:** Rua: Júlia Lacourt Penna, 335 - Jardim Camburi - Vitória - ES/CEP: 29090-210

**E-mail:** noelle@aplysia.com.br

**Telefone:** (27) 3024-8303

## 9. EQUIPE TÉCNICA

<b>Equipe Técnica</b>			
<b>Responsabilidade / Cargo</b>	<b>Nome</b>	<b>Formação</b>	<b>Conselho Regional</b>
Diretora Técnica	Dr. Tatiana Heid Furley Libardi da Penha	Bióloga	15.386/02
Diretora de Projetos	Noelle Arruda	Oceanógrafa	-
Gerente de Projetos	Joselaine Lombardi Siqueira	Bióloga	60791/02
Elaboração do Relatório	Dr. Víctor Luís Padilha	Engenheiro Ambiental, Hidrólogo	132.160-0 SC
Apoio técnico na Elaboração do Relatório	Franciel Borges de Oliveira	Engenheiro Civil	130.324-0 SC
Revisão do Relatório	Dr. Douglas de Pádua Andrade	Biólogo	104.366/04D
Coordenadora de Campo	MSc. Kátia Regina Chagas	Bióloga	65.888/02

**Legenda:** - = profissionais que não possuem Conselho Profissional

## 10. REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Projeto de estruturas de madeira. NBR 7190. 1997.

AÇÃO CIVIL PÚBLICA - nº 69758-61.2015.4.01.3400. Minas Gerais, 2015.

AÇÃO CIVIL PÚBLICA - nº 1000242-22.2020.4.01.380. Minas Gerais, 2020.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. Relatório de campo. Definição de Trecho para Expansão do Projeto Renaturalize. Relatório de Campo nº 436/2020, revisão 02. 2020a.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. 8ª Avaliação da Manutenção das Instalações das Estruturas de Madeira – Relatório.374/2020, revisão 02. 2020b.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. Modelagem Hidráulica do Trecho do Projeto de Expansão de Renaturalização – Relatório.466/2020, Revisão 03. 2020c.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. Estabilidade das Estruturas do Projeto de Expansão de Renaturalização. Relatório Técnico nº 473/2020, Revisão 05. 2020d.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. Etapa 2 - Instalação das Estruturas do Projeto Expansão. Relatório de Campo nº 119/2021. Revisão 04. 2021.

APLYSIA. Renaturalização do Rio Gualaxo do Norte. Etapa 1: Validação dos Trechos, Pré-Design de Instalação, Topobatimetria e Protocolo de Avaliação de Habitats. Relatório de Campo 237/2023. Revisão 01. 2023a.

APLYSIA. Renaturalização do rio Gualaxo do Norte. Modelagem Hidráulica dos trechos RGN-A, RGN-B, RGN-C, RGN-D, TG-11, TG-16 e TG-29. Relatório Técnico nº 003/2024, Revisão 01. 2024

BENKE, A.C.; WALLACE, J. B. Influence of wood on invertebrate communities in streams and rivers. *Ecology and Management of Wood in World Rivers*, v. 37, p. 149-177, 2003.

BENNETT, C.; GILCHRIST, W. Riverflies. In *Silent Summer*. New York: Cambridge University Press, 2010.

BROOKS, A.; HOWELL, T.; ABBE, T.B.; ARTHINGTON, A.H. Design guideline for the reintroduction of wood into Australian streams. *Land & Water Australia*, Canberra. 2006.

COLLINS, B.D.; MONTGOMERY, D.R. Forest Development, Wood Jams, and Restoration of Floodplain Rivers in the Puget Lowland, Washington. *Restoration Ecology* Vol. 10 No. 2, pp. 237–247, 2002.

CORRELL, D. L. Principles of planning and establishment of buffer zones. *Ecological Engineering*, v. 24, n. 5, p.433-439, 2005.

CRAMER, M. *Stream Habitat Restoration Guidelines*. Copublished by the Washington Departments of Fish and Wildlife, Natural Resources, Transportation and Ecology, Washington State Recreation and Conservation Office, Puget Sound Partnership, and the U.S. Fish and Wildlife Service. Olympia, Washington, 2012

CULP, J. M.; SCRIMGEOUR, G. J.; TOWNSEND, G. D. Simulated fine woody debris accumulations in a stream increase rainbow trout fry abundance. *Transactions of the American Fisheries Society*, v.125, n. 3, p.472-479, 1996.

DIXON, S.J.; SEAR, D.A. The influence of geomorphology on large wood dynamics in a low gradient headwater stream. *Water Resources Research*. 2014

EXTENCE, C.A.; CHADD, R.P.; ENGLAND, J.; DUNBAR, M.J.; WOOD, P.J.; TAYLOR, E.D. The Assessment of Fine Sediment Accumulation in Rivers Using Macro-Invertebrate Community Response. *River Research and Applications*, v. 29, n. 1, p.17-55, 2013.

FURLEY, T.H.; CALADO, S.L.M.; MENDES, L.B.; CHAGAS, K.R.; ANDRADE, D.P.; ALVES, C.B.M.; BELO, P.I.D.; RIBEIRO-FILHO, P.S.M.; NIENCHESKI, L.F.H. Short-term hydromorphological and ecological responses of using woody structures for river restoration in a tailing-impacted tropical river. *Integrated Environmental Assessment and Management, Special Series*, 2022.

GIPPEL, C. J. Environmental hydraulics of large woody debris in streams and rivers. *Journal of Environmental Engineering*, v.121, n.5, p.388-395, 1995.

HARMAN, W.A.; VARNER, M.S.; LAMB, E.K.; MCLEOD, D.B. *Stream Design and Reclamation Guide for Interior Alaska*. BLM-Alaska Public Information Center, 2023.

JACOBS; CH2M. *Plano de Manejo de Rejeito*. Revisão 1. 2017.

KEECH, D.; CLARKE, L.; SHORT, C. Nature-based solutions in flood risk management: Unlocking spatial, functional and policy perceptions amongst practitioners in South-West England. *Nature-Based Solutions*, 2023

NEUHAUS, V.; MENDE, M. Engineered Large Wood Structures in Stream Restoration Projects in Switzerland: Practice-Based Experiences. **Water**, 2021.

NHC. *Avaliação do Projeto Piloto de Renaturalização do Rio Gualaxo do Norte*. Relatório Técnico Preparado para a Fundação Renova. Fevereiro de 2020a.

NHC. *Peer Review do Estudo Hidrológico de Regionalização de Vazão Para o Projeto Piloto de Renaturalização (Trecho 6 e Trecho 7) e da Estação de Tratamento Natural (ETN) – 7005470-OS09-id01*. Agosto de 2020b.

NHC. *Avaliação inicial de áreas prioritárias a receberem intervenções para recuperação de habitats*. Revisão 06. São Paulo, 2022a.

NHC. Mapeamento de Habitats Físicos nos Trechos T06 À T11 e Definição Da Condição de Referência. Relatório Final. Revisão 3. São Paulo, agosto de 2022b.

NHC. Memorando Técnico 2. Comentários sobre as observações de campo. São Paulo. Revisão 2, 2023.

RECLAMATION AND U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS. Large Wood Research Workshop Summary Report, workshop held February 14 to 16, Seattle, Washington, 2012.

RRC - The River Restoration Centre. 2013. Manual of River Restoration Techniques.66 pp.

SPEED, R., LI, Y., TICKNER, D., HUANG H., NAIMAN, R., CAO, J., LEI G., YU, L., SAYERS, P., ZHAO, Z. & YU, W., 2016. River Restoration: A Strategic Approach to Planning and Management. Paris, UNESCO.

STREAM - Strategic Restoration and Management Of The River Avon. River restoration. 2009.

WALM. Avaliação da Renaturalização Do Rio Gualaxo Do Norte – SE23146 – Relatório Técnico – Civil (Drenagem) – N010600-D-1RT014\_R-02. 2019a.

WALM. Avaliação da Renaturalização Do Rio Gualaxo Do Norte – SE23146 – Relatório Técnico – Civil (Drenagem) – Regionalização de Vazões da Bacia dos Rios Gualaxo do Norte e do Carmo - N010600-D-1RT011\_R-2. 2019b.

# ANEXOS

Tabela A - Cálculo de Volumes, Peso e Empuxo do sistema, trecho: TG-11

ID	Estrutura	Área Estacas (m <sup>2</sup> )	Volume de todas as Estacas (m <sup>3</sup> )	Peso Estacas (kN)	Empuxo Estacas (kN)	Área cada Tronco (m <sup>2</sup> )	Volume cada Tronco (m <sup>3</sup> )	Peso Tronco (kN)	Empuxo Tronco (kN)	Peso Total (kN)	Empuxo Total (kN)	Quantidade de Estacas
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[unidade]
E01	TTX01	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	12
E02	FG01	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E03	FG02	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E04	TTV01	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	12
E05	FG03	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E06	FG04	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E07	FG05	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E08	FG06	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E09	FG07	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E10	FG08	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E11	TTV02	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	12
E12	FG09	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E13	FG10	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E14	FG11	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E15	FG12	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E16	TTX02	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	12
E17	FG13	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E18	FG14	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E19	FG15	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E20	FG16	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E21	FG17	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6
E22	FG18	0.0079	0.0471	0.2958	0.4621	0.0079	0.0042	0.0336	0.0409	0.3294	0.5030	6

**Tabela B: Cálculo de Volumes, Peso e Empuxo do sistema, trecho: RGN-D**

ID	Estrutura	Área Estacas (m <sup>2</sup> )	Volume de todas as Estacas (m <sup>3</sup> )	Peso Estacas (kN)	Empuxo Estacas (kN)	Área cada Tronco (m <sup>2</sup> )	Volume cada Tronco (m <sup>3</sup> )	Peso Tronco (kN)	Empuxo Tronco (kN)	Peso Total (kN)	Empuxo Total (kN)	Quantidade de Estacas
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[unidade]
E01	ET01	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.2545	2.0513	2.4955	2.6428	3.4197	24
E02	ET02	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3393	2.7351	3.3273	3.3266	4.2516	24
E03	TMM01	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3923	3.1624	3.8472	3.7539	4.7715	24
E04	TMM02	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3902	3.1453	3.8264	3.7368	4.7507	24
E05	TMM03	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3923	3.1624	3.8472	3.7539	4.7715	12
E06	TMM04	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4029	3.2479	3.9512	3.8394	4.8754	24
E08	TMM05	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4559	3.6752	4.4711	4.2668	5.3953	12
E07	TMM06	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4453	3.5898	4.3671	4.1813	5.2914	12
E09	TMM07	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4271	3.4428	4.1883	4.1822	5.3436	12
E10	TMM08	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3457	2.7863	3.3897	3.3779	4.3140	12
E11	TMM09	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3467	2.7949	3.4001	3.3864	4.3244	12
E12	TMM10	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0707	0.2333	1.8804	2.2875	2.3240	2.9807	12
E14	TMM11	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4262	3.4359	4.1799	4.0274	5.1042	12
E13	TMM12	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4453	3.5898	4.3671	4.3292	5.5224	12
E15	TMM13	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4241	3.4188	4.1591	4.0103	5.0834	12
E16	ET03	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4284	3.4530	4.2007	4.0445	5.1250	12
E17	TMM14	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4305	3.4701	4.2215	4.0616	5.1458	12
E18	TMM15	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4284	3.4530	4.2007	4.0445	5.1250	12
E19	TMM16	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4305	3.4701	4.2215	4.0616	5.1458	12
E20	TMM17	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4262	3.4359	4.1799	4.0274	5.1042	12
E21	TMM18	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4241	3.4188	4.1591	4.0103	5.0834	12
E22	TMM19	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4262	3.4359	4.1799	4.0274	5.1042	12
E23	TMM20	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4252	3.4274	4.1695	4.0189	5.0938	12
E24	ET04	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3499	2.8205	3.4313	3.4120	4.3556	12
E25	TMM21	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4135	3.3333	4.0552	3.9249	4.9794	12
E26	TMM22	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.2608	2.1026	2.5579	2.6941	3.4821	12
E27	TMM23	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3923	3.1624	3.8472	3.7539	4.7715	12
E28	TMM24	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3711	2.9915	3.6393	3.5830	4.5635	12
E29	TMM25	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0707	0.3096	2.4957	3.0362	2.9394	3.7294	12
E30	TMM26	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3308	2.6667	3.2441	3.2582	4.1684	12
E31	TMM27	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3393	2.7351	3.3273	3.3266	4.2516	12
E32	TMM28	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3478	2.8034	3.4105	3.3950	4.3348	12
E33	ET05	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	3.6685	4.6675	12

**Tabela C: Cálculo de Volumes, Peso e Empuxo do sistema, trecho: RGN-C**

ID	Estrutura	Área Estacas (m <sup>2</sup> )	Volume de todas as Estacas (m <sup>3</sup> )	Peso Estacas (kN)	Empuxo Estacas (kN)	Área cada Tronco (m <sup>2</sup> )	Volume cada Tronco (m <sup>3</sup> )	Peso Tronco (kN)	Empuxo Tronco (kN)	Peso Total (kN)	Empuxo Total (kN)	Quantidade de Estacas
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[unidade]
E01	ET01	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.4962	4.0000	4.8662	4.8873	6.2526	24
E02	TMM01	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.3859	3.1111	3.7848	4.1463	5.4023	24
E03	TMM02	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.3334	2.6872	3.2691	3.7224	4.8865	12
E04	TMM03	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3690	2.9744	3.6185	3.7138	4.7738	12
E05	TMM04	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.7933	4.9217	24
E06	ET02	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3849	3.1026	3.7744	3.8420	4.9297	24
E07	TMM05	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4029	3.2479	3.9512	3.8394	4.8754	24
E08	ET03	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4665	3.7607	4.5751	4.5001	5.7304	24
E09	TMM06	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.4665	3.7607	4.5751	4.7959	6.1925	12
E10	TMM07	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.4975	4.4595	12
E11	TMM08	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3401	2.7419	3.3356	3.4813	4.4910	12
E12	TMM09	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3789	3.0547	3.7162	3.6462	4.6405	12
E13	TMM10	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	3.8163	4.8986	12
E14	TMM11	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4447	3.5846	4.3609	4.1762	5.2851	12
E15	TMM12	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3732	3.0086	3.6600	3.7480	4.8154	12
E16	TMM13	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4029	3.2479	3.9512	3.9873	5.1065	12
E17	TMM14	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.4214	3.3966	4.1321	4.4318	5.7496	12
E26	TMM15	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.4135	3.3333	4.0552	4.2206	5.4416	24
E18	ET04	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.4358	3.5128	4.2735	4.5480	5.8910	24
E19	TMM16	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.4411	3.5556	4.3255	4.5907	5.9430	24
E20	TMM17	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.4729	3.8120	4.6374	5.1429	6.7170	12
E21	TMM18	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4426	3.5675	4.3401	4.3069	5.4954	12
E22	ET05	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4814	3.8804	4.7206	4.6198	5.8760	12
E23	TMM19	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.4394	3.5419	4.3089	4.5771	5.9263	12
E24	TMM20	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.4076	3.2855	3.9969	4.6164	6.0765	12
E25	TMM21	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4156	3.3504	4.0760	4.0898	5.2313	12
E27	TMM22	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.6454	4.6906	12
E28	TMM23	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4188	3.3761	4.1072	4.1155	5.2625	12
E29	TMM24	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4899	3.9487	4.8038	4.6881	5.9591	12
E30	ET06	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4209	3.3932	4.1280	4.1326	5.2833	12
E31	TMM25	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4063	3.2752	3.9845	4.0146	5.1398	12
E32	TMM26	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3319	2.6752	3.2545	3.2667	4.1788	12
E33	TMM27	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3085	2.4872	3.0258	3.0787	3.9500	12
E34	ET07	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4199	3.3846	4.1176	4.1240	5.2729	12

**Tabela D: Cálculo de Volumes, Peso e Empuxo do sistema, trecho TG-16**

ID	Estrutura	Área Estacas (m <sup>2</sup> )	Volume de todas as Estacas (m <sup>3</sup> )	Peso Estacas (kN)	Empuxo Estacas (kN)	Área cada Tronco (m <sup>2</sup> )	Volume cada Tronco (m <sup>3</sup> )	Peso Tronco (kN)	Empuxo Tronco (kN)	Peso Total (kN)	Empuxo Total (kN)	Quantidade de Estacas
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[unidade]
E01	FG01	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	6
E02	FG02	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	6
E03	FG03	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	6
E04	FG04	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.4907	0.7505	6
E05	FG05	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	6
E06	FG06	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.6386	0.9816	6
E07	FG07	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.4907	0.7505	6
E08	FG08	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.4907	0.7505	6
E09	TTX01	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	12
E10	FG09	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.4907	0.7505	6
E11	FG10	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	6
E12	FG11	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	6
E13	TTV01	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.9344	1.4437	12
E14	FG12	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0058	0.0471	0.0573	0.4907	0.7505	6

**Tabela E: Cálculo de Volumes, Peso e Empuxo do sistema, trecho: RGN-B**

ID	Estrutura	Área Estacas (m <sup>2</sup> )	Volume de todas as Estacas (m <sup>3</sup> )	Peso Estacas (kN)	Empuxo Estacas (kN)	Área cada Tronco (m <sup>2</sup> )	Volume cada Tronco (m <sup>3</sup> )	Peso Tronco (kN)	Empuxo Tronco (kN)	Peso Total (kN)	Empuxo Total (kN)	Quantidade de Estacas
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[unidade]
E01	TMM01	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.3393	2.7351	3.3273	3.6223	4.7137	12
E02	TMM02	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.9412	5.1527	12
E03	TMM03	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3499	2.8205	3.4313	3.4120	4.3556	12
E04	TMM04	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.7933	4.9217	12
E05	ET01	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3393	2.7351	3.3273	3.4745	4.4826	24
E07	TMM05	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4029	3.2479	3.9512	3.9873	5.1065	24
E06	TMM06	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	4.4079	5.8228	12
E08	TMM07	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	4.2369	5.6148	12
E09	TMM08	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.2969	2.3932	2.9114	3.1326	4.0667	12
E10	TMM09	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.6454	4.6906	24
E11	ET02	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.7933	4.9217	24
E12	TMM10	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4241	3.4188	4.1591	4.1582	5.3145	12
E13	ET03	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.4135	3.3333	4.0552	4.6643	6.1347	24
E14	TMM11	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.3393	2.7351	3.3273	3.6223	4.7137	12
E15	ET04	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.4029	3.2479	3.9512	4.2830	5.5686	24
E16	TMM12	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4877	3.9316	4.7830	4.6710	5.9383	12
E17	TMM13	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.5938	4.7863	5.8228	5.5258	6.9781	12
E18	TMM14	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3181	2.5641	3.1194	3.1556	4.0436	24
E19	TMM15	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.2545	2.0513	2.4955	2.6428	3.4197	12
E20	TMM16	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3075	2.4786	3.0154	3.2180	4.1707	12
E21	TMM17	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3266	2.6325	3.2025	3.3719	4.3579	12
E22	TMM18	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.4241	3.4188	4.1591	4.7497	6.2387	12
E23	ET05	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3488	2.8120	3.4209	3.5514	4.5762	24
E24	TMM19	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	3.9642	5.1296	12
E25	TMM20	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.3711	2.9915	3.6393	3.5830	4.5635	12
E26	ET06	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0707	0.4241	3.4188	4.1591	4.0103	5.0834	24
E27	TMM21	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.5301	4.2735	5.1989	5.0129	6.3543	12
E28	TMM22	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3488	2.8120	3.4209	3.5514	4.5762	12
E29	TMM23	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	3.8163	4.8986	12
E30	TMM24	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3711	2.9915	3.6393	3.7309	4.7946	12
E31	TMM25	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.4241	3.4188	4.1591	4.1582	5.3145	12

Tabela F: Cálculo de Volumes, Peso e Empuxo do sistema, trecho: TG-29

ID	Estrutura	Área Estacas (m <sup>2</sup> )	Volume de todas as Estacas (m <sup>3</sup> )	Peso Estacas (kN)	Empuxo Estacas (kN)	Área cada Tronco (m <sup>2</sup> )	Volume cada Tronco (m <sup>3</sup> )	Peso Tronco (kN)	Empuxo Tronco (kN)	Peso Total (kN)	Empuxo Total (kN)	Quantidade de Estacas
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[unidade]
E01	FG01	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.4767	0.7334	6
E02	FG02	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.6246	0.9645	6
E03	TTX01	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.9203	1.4266	12
E04	FG03	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.6246	0.9645	6
E05	TTV01	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.6246	0.9645	12
E06	FG04	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.4767	0.7334	6
E07	FG05	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.4767	0.7334	6
E08	TTV02	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.4767	0.7334	12
E09	FG06	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.4767	0.7334	6
E10	FG07	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.4767	0.7334	6
E11	FG08	0.0079	0.0942	0.5915	0.9243	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.6246	0.9645	6
E12	FG09	0.0079	0.0707	0.4436	0.6932	0.0079	0.0041	0.0330	0.0402	0.4767	0.7334	6

Tabela G: Cálculo de Volumes, Peso e Empuxo do sistema, trecho: RGN-A

ID	Estrutura	Área Estacas (m <sup>2</sup> )	Volume de todas as Estacas (m <sup>3</sup> )	Peso Estacas (kN)	Empuxo Estacas (kN)	Área cada Tronco (m <sup>2</sup> )	Volume cada Tronco (m <sup>3</sup> )	Peso Tronco (kN)	Empuxo Tronco (kN)	Peso Total (kN)	Empuxo Total (kN)	Quantidade de Estacas
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[unidades]
E01	TMM01	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3567	2.8752	3.4978	4.6498	6.2706	24
E02	TMM02	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3826	3.0838	3.7516	4.8583	6.5243	24
E03	TMM03	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	4.8515	6.5160	24
E04	TMM04	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	4.6806	6.3080	12
E05	TMM05	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	4.6806	6.3080	12
E06	TMM06	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	4.6806	6.3080	12
E07	TMM07	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.3035	2.4462	2.9759	3.3334	4.3623	12
E08	TMM08	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.2750	2.2171	2.6972	3.9917	5.4700	12
E09	TMM09	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.3228	2.6017	3.1651	3.9326	5.2447	12
E10	TMM10	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.3372	2.7180	3.3065	4.0489	5.3861	12
E11	TMM11	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3573	2.8804	3.5041	4.6549	6.2768	12
E12	TMM12	0.0079	0.2827	1.7746	2.7728	0.0707	0.3319	2.6752	3.2545	4.4498	6.0273	24
E13	TMM13	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	4.4079	5.8228	12
E14	TMM14	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	4.4079	5.8228	24
E15	TMM15	0.0079	0.1178	0.7394	1.1553	0.0707	0.3817	3.0769	3.7432	3.8163	4.8986	12
E16	TMM16	0.0079	0.1649	1.0352	1.6174	0.0707	0.3605	2.9060	3.5353	3.9412	5.1527	12
E18	TMM17	0.0079	0.1414	0.8873	1.3864	0.0707	0.2757	2.2222	2.7034	3.1095	4.0898	12
E17	TMM18	0.0079	0.2121	1.3309	2.0796	0.0707	0.3514	2.8325	3.4459	4.1634	5.5254	24

Tabela H - Características das estruturas, forças atuantes e fatores de segurança, TR = 50 anos, trecho: TG-11

ID	Estrutura	Ângulo com relação à margem	Comprimento do tronco	Área normal ao escoamento	Diâmetro do tronco	Quantidade de estacas	Diâmetro das estacas	Comprimento médio de cada estaca	Profundidade cravada da estaca	Velocidade do escoamento para TR = 50 anos	Força de arraste total	Força de arraste por par de estacas	Fator de Segurança
[-]	[-]	(°)	[m]	[m²]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[kN]	[kN]
E01	TTX	45	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.89	0.09	0.047	108.61
E02	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.25	0.04	0.021	247.95
E03	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.00	0.03	0.013	385.98
E04	TTV	90	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.95	0.10	0.051	101.95
E05	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.35	0.05	0.024	214.23
E06	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	0.96	0.02	0.012	421.26
E07	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.50	0.06	0.030	171.40
E08	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.16	0.04	0.018	286.25
E09	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.42	0.05	0.027	192.27
E10	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.11	0.03	0.016	313.58
E11	TTV	90	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.45	0.06	0.028	184.01
E12	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.01	0.03	0.013	382.49
E13	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.12	0.03	0.017	311.97
E14	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.95	0.10	0.050	102.54
E15	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.54	0.06	0.031	163.76
E16	TTX	45	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	2.16	0.12	0.062	83.27
E17	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	0.90	0.02	0.011	482.24
E18	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	0.90	0.02	0.011	482.04
E19	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.23	0.04	0.020	255.64
E20	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.32	0.05	0.023	222.39
E21	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.27	0.04	0.022	238.82
E22	FG	30	0.53	0.027	0.10	4	0.10	1.50	1.00	1.08	0.03	0.015	334.60

**Tabela I: Características das estruturas, forças atuantes e fatores de segurança, TR = 50 anos, trecho: RGN-D**

ID	Estrutura	Ângulo com relação à margem	Comprimento do tronco	Área normal ao escoamento	Diâmetro do tronco	Quantidade de estacas	Diâmetro das estacas	Comprimento médio de cada estaca	Profundidade cravada da estaca	Velocidade do escoamento para TR = 50 anos	Força de arraste total	Força de arraste por par de estacas	Fator de Segurança
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[kN]	[-]
E01	ET	45	3.60	0.540	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.34	0.96	0.241	21.40
E02	ET	45	4.80	0.720	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.59	1.83	0.457	11.26
E03	TMM	45	5.55	0.833	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.22	1.23	0.308	16.70
E04	TMM	45	5.52	0.828	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.86	0.61	0.153	33.72
E05	TMM	45	5.55	0.833	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.74	0.46	0.114	45.20
E06	TMM	45	5.70	0.855	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.96	0.79	0.198	26.04
E08	TMM	45	6.45	0.968	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.21	1.41	0.352	14.63
E07	TMM	45	6.30	0.945	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.93	0.82	0.204	25.23
E09	TMM	45	6.04	0.906	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.47	1.97	0.393	13.10
E10	TMM	45	4.89	0.734	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.28	1.20	0.300	17.16
E11	TMM	45	4.91	0.736	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.83	0.51	0.126	40.73
E12	TMM	45	3.30	0.495	0.30	6	0.10	1.50	1.00	0.69	0.23	0.078	66.06
E14	TMM	45	6.03	0.905	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.41	1.79	0.447	11.53
E13	TMM	45	6.30	0.945	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.45	1.98	0.395	13.03
E15	TMM	45	6.00	0.900	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.20	1.30	0.326	15.81
E16	ET	90	6.06	0.909	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.29	1.51	0.378	13.63
E17	TMM	45	6.09	0.914	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.01	0.93	0.233	22.07
E18	TMM	45	6.06	0.909	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.04	0.97	0.244	21.14
E19	TMM	45	6.09	0.914	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.08	1.06	0.265	19.45
E20	TMM	45	6.03	0.905	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.12	1.13	0.283	18.20
E21	TMM	45	6.00	0.900	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.16	1.20	0.301	17.10
E22	TMM	45	6.03	0.905	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.19	1.28	0.320	16.11
E23	TMM	45	6.02	0.902	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.36	1.66	0.414	12.43
E24	ET	90	4.95	0.743	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.09	0.89	0.222	23.19
E25	TMM	45	5.85	0.878	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.23	1.32	0.329	15.64
E26	TMM	45	3.69	0.554	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.82	0.37	0.093	55.28
E27	TMM	45	5.55	0.833	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.90	0.68	0.169	30.49
E28	TMM	45	5.25	0.788	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.87	0.59	0.148	34.88
E29	TMM	45	4.38	0.657	0.30	6	0.10	1.50	1.00	0.73	0.35	0.118	43.82
E30	TMM	45	4.68	0.702	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.76	0.41	0.102	50.43
E31	TMM	45	4.80	0.720	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.90	0.58	0.145	35.40
E32	TMM	45	4.92	0.738	0.30	8	0.10	1.50	1.00	0.94	0.66	0.165	31.27
E33	ET	90	5.40	0.810	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.08	0.94	0.236	21.85

**Tabela J: Características das estruturas, forças atuantes e fatores de segurança, TR = 50 anos, trecho: RGN-C**

ID	Estrutura	Ângulo com relação à margem	Comprimento do tronco	Área normal ao escoamento	Diâmetro do tronco	Quantidade de estacas	Diâmetro das estacas	Comprimento médio de cada estaca	Profundidade cravada da estaca	Velocidade do escoamento para TR = 50 anos	Força de arraste total	Força de arraste por par de estacas	Fator de Segurança
[-]	[-]	(°)	[m]	[m²]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[kN]	[-]
E01	ET	90	7.02	1.053	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.07	4.52	0.754	6.83
E02	TMM	45	5.46	0.819	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.62	5.64	0.806	6.39
E03	TMM	45	4.72	0.707	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.65	4.95	0.707	7.28
E04	TMM	45	5.22	0.783	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.91	2.87	0.574	8.98
E05	TMM	45	5.10	0.765	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.37	4.29	0.715	7.21
E06	ET	90	5.45	0.817	0.30	10	0.10	1.50	1.00	2.07	3.51	0.702	7.34
E07	TMM	45	5.70	0.855	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.29	1.41	0.353	14.59
E08	ET	90	6.60	0.990	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.95	3.76	0.752	6.85
E09	TMM	45	6.60	0.990	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.41	5.76	0.823	6.26
E10	TMM	45	5.10	0.765	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.47	1.64	0.411	12.54
E11	TMM	45	4.81	0.722	0.30	10	0.10	1.50	1.00	2.18	3.44	0.688	7.49
E12	TMM	45	5.36	0.804	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.21	1.18	0.295	17.45
E13	TMM	45	5.40	0.810	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.89	2.90	0.579	8.89
E14	TMM	45	6.29	0.944	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.29	1.56	0.391	13.17
E15	TMM	45	5.28	0.792	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.59	2.00	0.400	12.88
E16	TMM	45	5.70	0.855	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.74	2.59	0.518	9.95
E17	TMM	45	5.96	0.894	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.38	5.06	0.723	7.12
E26	TMM	45	5.85	0.878	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.31	4.69	0.781	6.59
E18	TMM	45	6.17	0.925	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.31	4.94	0.705	7.30
E19	ET	0	6.24	0.936	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.38	5.30	0.757	6.80
E20	TMM	45	6.69	1.004	0.30	18	0.10	1.50	1.00	2.70	7.32	0.814	6.33
E21	TMM	45	6.26	0.939	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.62	2.46	0.492	10.47
E22	TMM	45	6.81	1.022	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.50	2.30	0.459	11.22
E23	ET	90	6.22	0.932	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.51	5.87	0.838	6.14
E24	TMM	45	5.77	0.865	0.30	18	0.10	1.50	1.00	2.81	6.85	0.761	6.76
E25	TMM	45	5.88	0.882	0.30	10	0.10	1.50	1.00	2.09	3.85	0.770	6.69
E27	TMM	45	5.10	0.765	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.79	2.45	0.490	10.52
E28	TMM	45	5.93	0.889	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.66	2.44	0.489	10.54
E29	TMM	45	6.93	1.040	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.59	2.64	0.528	9.76
E30	ET	90	5.96	0.893	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.90	3.23	0.646	7.98
E31	TMM	45	5.75	0.862	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.91	3.15	0.630	8.18
E32	TMM	45	4.70	0.704	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.22	1.04	0.260	19.80
E33	TMM	45	4.37	0.655	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.31	1.13	0.282	18.25
E34	ET	90	5.94	0.891	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.71	2.62	0.524	9.83

**Tabela K: Características das estruturas, forças atuantes e fatores de segurança, TR = 50 anos, trecho TG-16**

ID	Estrutura	Ângulo com relação à margem	Comprimento do tronco	Área normal ao escoamento	Diâmetro do tronco	Quantidade de estacas	Diâmetro das estacas	Comprimento médio de cada estaca	Profundidade cravada da estaca	Velocidade do escoamento para TR = 50 anos	Força de arraste total	Força de arraste por par de estacas	Fator de Segurança
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[kN]	[-]
E01	FG	30	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	5.47	1.11	0.186	27.76
E02	FG	30	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.86	0.30	0.051	101.66
E03	FG	30	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.00	0.15	0.025	207.29
E04	FG	30	0.74	0.037	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.17	0.05	0.017	305.89
E05	FG	30	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.63	0.26	0.043	119.65
E06	FG	30	0.74	0.037	0.10	8	0.10	1.50	1.00	1.90	0.13	0.034	152.65
E07	FG	30	0.74	0.037	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.58	0.09	0.031	165.41
E08	FG	30	0.74	0.037	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.18	0.05	0.017	300.78
E09	TTX	90	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.04	0.15	0.026	199.47
E10	FG	30	0.74	0.037	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.24	0.06	0.019	272.27
E11	FG	30	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.50	0.23	0.039	133.34
E12	FG	30	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.22	0.18	0.031	168.85
E13	TTV	90	0.74	0.037	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.65	0.26	0.044	118.18
E14	FG	30	0.74	0.037	0.10	6	0.10	1.50	1.00	0.87	0.03	0.009	552.89

**Tabela L: Características das estruturas, forças atuantes e fatores de segurança, TR = 50 anos, trecho: RGN-B**

ID	Estrutura	Ângulo com relação à margem	Comprimento do tronco	Área normal ao escoamento	Diâmetro do tronco	Quantidade de estacas	Diâmetro das estacas	Comprimento médio de cada estaca	Profundidade cravada da estaca	Velocidade do escoamento para TR = 50 anos	Força de arraste total	Força de arraste por par de estacas	Fator de Segurança
[-]	[-]	(°)	[m]	[m²]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[kN]	[-]
E01	TMM	45	4.80	0.720	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.45	4.33	0.721	7.14
E02	TMM	45	5.10	0.765	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.58	5.08	0.726	7.09
E03	TMM	45	4.95	0.743	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.56	1.81	0.452	11.40
E04	TMM	45	5.10	0.765	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.28	3.98	0.664	7.76
E05	ET	90	4.80	0.720	0.30	10	0.10	1.50	1.00	2.26	3.68	0.737	6.99
E07	TMM	45	5.70	0.855	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.95	3.26	0.651	7.91
E06	TMM	45	5.40	0.810	0.30	18	0.10	1.50	1.00	2.95	7.07	0.786	6.55
E08	TMM	45	5.10	0.765	0.30	18	0.10	1.50	1.00	2.98	6.78	0.753	6.84
E09	TMM	45	4.20	0.630	0.30	10	0.10	1.50	1.00	2.37	3.53	0.706	7.29
E10	TMM(2)	45	5.10	0.765	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.62	2.02	0.403	12.78
E11	ET	90	5.10	0.765	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.48	4.70	0.784	6.57
E12	TMM	45	6.00	0.900	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.94	3.40	0.680	7.57
E13	ET	90	5.85	0.878	0.30	18	0.10	1.50	1.00	3.01	7.95	0.884	5.83
E14	TMM	45	4.80	0.720	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.38	4.08	0.679	7.58
E15	ET	90	5.70	0.855	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.60	5.79	0.827	6.23
E16	TMM	45	6.90	1.035	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.60	2.64	0.528	9.76
E17	TMM	45	8.40	1.260	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.53	2.96	0.592	8.71
E18	TMM	45	4.50	0.675	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.40	1.33	0.331	15.55
E19	TMM	45	3.60	0.540	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.44	1.12	0.281	18.34
E20	TMM	45	4.35	0.653	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.70	1.88	0.375	13.72
E21	TMM	45	4.62	0.693	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.67	1.93	0.385	13.36
E22	TMM	45	6.00	0.900	0.30	18	0.10	1.50	1.00	2.57	5.93	0.659	7.82
E23	ET	90	4.94	0.740	0.30	10	0.10	1.50	1.00	2.18	3.53	0.706	7.29
E24	TMM	45	5.40	0.810	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.21	3.96	0.659	7.81
E25	TMM	45	5.25	0.788	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.30	1.33	0.332	15.53
E26	ET	90	6.00	0.900	0.30	8	0.10	1.50	1.00	1.96	3.47	0.868	5.93
E27	TMM	45	7.50	1.125	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.52	2.59	0.518	9.94
E28	TMM	45	4.94	0.740	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.91	2.71	0.541	9.51
E29	TMM(2)	45	5.40	0.810	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.68	2.30	0.460	11.20
E30	TMM	45	5.25	0.788	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.80	2.55	0.511	10.08
E31	TMM	45	6.00	0.900	0.30	10	0.10	1.50	1.00	1.84	3.06	0.612	8.41

**Tabela M: Características das estruturas, forças atuantes e fatores de segurança, TR = 50 anos, trecho: TG-29**

ID	Estrutura	Ângulo com relação à margem	Comprimento do tronco	Área normal ao escoamento	Diâmetro do tronco	Quantidade de estacas	Diâmetro das estacas	Comprimento médio de cada estaca	Profundidade cravada da estaca	Velocidade do escoamento para TR = 50 anos	Força de arraste total	Força de arraste por par de estacas	Fator de Segurança
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[kN]	[-]
E01	FG	30	0.52	0.026	0.10	6	0.10	1.50	1.00	0.44	0.01	0.002	3001.15
E02	FG	30	0.52	0.026	0.10	8	0.10	1.50	1.00	1.89	0.09	0.023	221.78
E03	TTX	90	0.52	0.026	0.10	12	0.10	1.50	1.00	2.24	0.13	0.022	235.58
E04	FG	30	0.52	0.026	0.10	8	0.10	1.50	1.00	1.81	0.09	0.021	241.75
E05	TTV	90	0.52	0.026	0.10	8	0.10	1.50	1.00	1.83	0.09	0.022	235.74
E06	FG	30	0.52	0.026	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.45	0.05	0.018	283.40
E07	FG	30	0.52	0.026	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.72	0.08	0.026	200.21
E08	TTV	90	0.522	0.026	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.59	0.07	0.022	234.95
E09	FG	30	0.522	0.026	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.72	0.08	0.026	199.51
E10	FG	30	0.522	0.026	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.47	0.06	0.019	273.74
E11	FG	30	0.522	0.026	0.10	8	0.10	1.50	1.00	1.89	0.09	0.023	221.59
E12	FG	30	0.522	0.026	0.10	6	0.10	1.50	1.00	1.23	0.04	0.013	391.40

**Tabela N: Características das estruturas, forças atuantes e fatores de segurança, TR = 50 anos, trecho: RGN-A**

ID	Estrutura	Ângulo com relação à margem	Comprimento do tronco	Área normal ao escoamento	Diâmetro do tronco	Quantidade de estacas	Diâmetro das estacas	Comprimento médio de cada estaca	Profundidade cravada da estaca	Velocidade do escoamento para TR = 50 anos	Força de arraste total	Força de arraste por par de estacas	Fator de Segurança
[-]	[-]	(°)	[m]	[m <sup>2</sup> ]	[m]	[unid]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[kN]	[kN]	[-]
E01	ET	90	5.046	0.757	0.30	24	0.10	1.50	1.00	8.86	59.45	4.954	1.04
E02	TMM	45	5.412	0.812	0.30	24	0.10	1.50	1.00	4.54	16.70	1.392	3.70
E03	ET	90	5.4	0.810	0.30	24	0.10	1.50	1.00	4.92	19.61	1.634	3.15
E04	TMM	45	5.1	0.765	0.30	24	0.10	1.50	1.00	3.94	11.87	0.989	5.21
E05	TMM	45	5.1	0.765	0.30	24	0.10	1.50	1.00	6.44	31.69	2.641	1.95
E06	ET	90	5.1	0.765	0.30	24	0.10	1.50	1.00	6.44	31.69	2.641	1.95
E07	TMM	45	4.293	0.644	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.69	4.67	0.778	6.62
E08	TMM	45	3.891	0.584	0.30	24	0.10	1.50	1.00	4.55	12.08	1.007	5.12
E09	TMM	45	4.566	0.685	0.30	18	0.10	1.50	1.00	3.26	7.27	0.808	6.37
E10	TMM	45	4.77	0.716	0.30	18	0.10	1.50	1.00	3.31	7.84	0.871	5.91
E11	TMM(2)	45	5.055	0.758	0.30	24	0.10	1.50	1.00	4.75	17.11	1.426	3.61
E12	ET	90	4.695	0.704	0.30	24	0.10	1.50	1.00	3.85	10.45	0.870	5.92
E13	TMM	45	5.4	0.810	0.30	18	0.10	1.50	1.00	3.04	7.51	0.834	6.17
E14	TMM	45	5.4	0.810	0.30	18	0.10	1.50	1.00	3.10	7.80	0.867	5.94
E15	TMM	45	5.4	0.810	0.30	10	0.10	1.50	1.00	2.15	3.76	0.752	6.85
E16	TMM	45	5.1	0.765	0.30	14	0.10	1.50	1.00	2.70	5.59	0.798	6.45
E18	TMM	45	3.9	0.585	0.30	12	0.10	1.50	1.00	2.68	4.20	0.700	7.36
E17	TMM	45	4.971	0.746	0.30	18	0.10	1.50	1.00	3.36	8.43	0.937	5.50