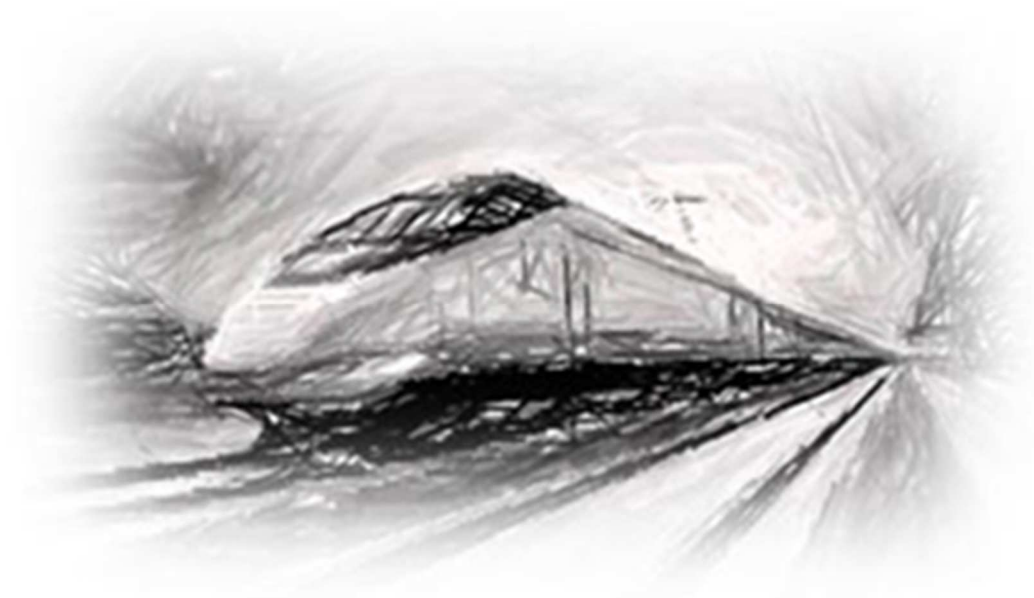


LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE ENTRE PORTO (CAMPANHÃ) E LISBOA

TROÇO PORTO (CAMPANHÃ) A OIÃ

SUBTROÇO A4 – KM 49+900 AO KM 69+563



PROJETO DE EXECUÇÃO

V02 – INFRA-ESTRUTURA DE OBRAS DE ARTE (VIA FÉRREA)

Tomo 02.01.00.681 – P 68.1 - PONTE SOBRE O RIO DOURO

Memória Descritiva e Justificativa

Anexo A01 – Estudo Hidráulico

Controlo de Assinaturas

Realizado	Revisto	Aprovado Coordenador Projeto
Francisco Taveira Pinto Paulo Rosa Santos José Victor Ramos Castro	Susana Bispo Tiago Vieira	Pedro Cabral Tiago Vieira
14-08-2025	14-08-2025	14-08-2025
Data e Assinatura	Data e Assinatura	Data e Assinatura

Não necessita de assinatura se aprovado eletronicamente

Informação Adicional	Informação do Documento	
O Gestor de Projeto -	Código Documento PF102A4.PR.02.01.00.681.MDJ.A01.01	
O Responsável Unidade -	Revisão 01	Data 30-04-2026
O Responsável Departamento -	Código Projetista P433.DLAV	
O Diretor -	Nome do Ficheiro PF102A4.PR.02.01.00.681.MDJ.A01.01.docx	

Registo de Alterações

Rev	Data	Autor	Secção Afetada	Alterações
00	14-08-2025	Vários	Edição inicial	-----
01	30-04-2026	Vários	Revisão Geral	Revisão Geral

LINHA FERROVIÁRIA DE ALTA VELOCIDADE ENTRE PORTO (CAMPANHÃ) E LISBOA**TROÇO PORTO (CAMPANHÃ) A OIÃ****SUBTROÇO A4 – KM 49+900 AO KM 69+563****PROJETO DE EXECUÇÃO****V02 – INFRA-ESTRUTURA DE OBRAS DE ARTE (VIA FÉRREA)****TOMO 02.01.00.681 – P 68.1 - PONTE SOBRE O RIO DOURO****MEMÓRIA DESCRITIVA E JUSTIFICATIVA****ANEXO A01 - ESTUDO HIDRÁULICO****ÍNDICE**

1	INTRODUÇÃO	1
2	MODELO NUMÉRICO DELFT3D	3
3	MODELO HIDRODINÂMICO	5
3.1	Introdução.....	5
3.2	Delft3D: implementação do modelo.....	5
3.2.1	Domínio do modelo.....	5
3.2.2	Batimetria	6
3.2.3	Fatores forçadores do modelo e condições fronteira	8
3.3	Resultados.....	9
3.3.1	Cenário EIA.....	9
3.3.2	Cenário Solução de Projeto	21
4	CONCLUSÕES.....	32
	REFERÊNCIAS.....	34

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Malha computacional do Delft3D-FLOW.	5
Figura 2 - Resolução da malha computacional na área de interesse.....	6
Figura 3 - Dados batimétricos para todo o domínio computacional (em cima) e para a área de interesse (em baixo).	7
Figura 4 - Localização dos pilares da ponte rodoferroviária para o cenário do EIA.	10
Figura 5 - Velocidade do escoamento para o cenário de referência (sem pontes) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.	10

Figura 6 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.....	11
Figura 7 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%).....	12
Figura 8 - Nível da água para o cenário de referência (sem pontes) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.....	13
Figura 9 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.	13
Figura 10 - Diferenças de nível de água: cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) <i>versus</i> cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%.....	14
Figura 11 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte rodoferroviária para um período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares (EIA).	15
Figura 12 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 100 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (EIA).....	15
Figura 13 - Velocidade do escoamento para o cenário de referência (sem ponte) e para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%. ...	16
Figura 14 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.....	16
Figura 15 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%).....	17
Figura 16 - Nível da água para o cenário de referência (sem pontes) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.....	18
Figura 17 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.	18
Figura 18 - Diferenças de nível de água: o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) <i>versus</i> cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%.....	19
Figura 19 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte para um período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares (EIA).....	20
Figura 20 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 1000 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (EIA).....	20
Figura 21 - Localização dos pilares da ponte rodoferroviária para o cenário de Projeto de Execução.	21
Figura 22 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.	22
Figura 23 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%).....	22
Figura 24 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.....	23

Figura 25 - Diferenças de nível de água: cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução <i>versus</i> cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%.	24
Figura 26 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte rodoferroviária para um período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares (Solução de Projeto de Execução).	25
Figura 27 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 100 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (Solução de Projeto).	26
Figura 28 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.	27
Figura 29 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%).	28
Figura 30 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.	28
Figura 31 - Diferenças de nível de água: o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução <i>versus</i> cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%.	29
Figura 32 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte para um período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares de Projeto de Execução.	30
Figura 33 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 1000 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (Sol. de Projeto de Execução).	31
Figura A-1: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	36
Figura A-2: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	36
Figura A-3: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%).	37
Figura A-4: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	38
Figura A-5: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	38
Figura A-6: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) <i>versus</i> cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%.	39
Figura A-7: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	40
Figura A-8: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	40
Figura B-9: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%).	41

Figura A-10: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	42
Figura A-11: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	42
Figura A-12: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%.	43
Figura A-13: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	44
Figura A-14: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	44
Figura A-15: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%).	45
Figura A-16: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	46
Figura A-17: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	46
Figura A-18: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%.	47
Figura A-19: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	48
Figura A-20: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	48
Figura A-21: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%).	49
Figura A-22: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	50
Figura A-23: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	50
Figura A-24: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%.	51
Figura B-25: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	52
Figura B-26: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	52
Figura B-27: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%).	53
Figura B-28: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	54
Figura B-29: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	54
Figura B-30: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%.	55

Figura B-31: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	56
Figura B-32: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	56
Figura B-33: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%).	57
Figura B-34: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	58
Figura B-35: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	58
Figura B-36: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%.	59
Figura B-37: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	60
Figura B-38: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	60
Figura B-39: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%).	61
Figura B-40: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	62
Figura B-41: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.	62
Figura B-42: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%.	63
Figura B-43: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	64
Figura B-44: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	64
Figura B-45: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%).	65
Figura B-46: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	66
Figura B-47: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.	66
Figura B-48: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%.	67

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Valores extremos de caudal no rio Douro para os períodos de retorno de 100 e 1000 anos (IHRH, 2017).....	8
--	---

ANEXOS

ANEXO A: RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO – CENÁRIO EIA

- A.1 Caudal com período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 5%)
- A.2 Caudal com período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 95%)
- A.3 Caudal com período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 5%)
- A.4 Caudal com período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 95%)

ANEXO B: RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO – CENÁRIO DE PROJETO DE EXECUÇÃO

- B.1 Caudal com período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 5%)
- B.2 Caudal com período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 95%)
- B.3 Caudal com período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 5%)
- B.4 Caudal com período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 95%)

1 INTRODUÇÃO

A construção de pontes suportadas por pilares colocados no leito de um rio poderá originar perturbações locais no escoamento que é importante avaliar e caracterizar. O projeto da LAV Porto-Lisboa está dividido em várias fases, sendo a primeira fase a ligação entre o Porto e Oiã, que contempla uma nova ponte sobre o rio Douro. O presente estudo recorre à modelação hidrodinâmica para avaliar os efeitos locais dos pilares da nova travessia rodoferroviária nas velocidades do escoamento e nos níveis de água. A nova travessia que é proposta neste projeto (doravante designada como cenário de Projeto de Execução) é analisada tendo como base a situação atual (cenário de Referência) e a anterior alternativa proposta no Estudo Prévio que serviu de base ao Estudo de Impacto Ambiental desenvolvido pela Infraestruturas de Portugal (cenário “EIA”).

A solução anteriormente proposta em fase de Estudo Prévio (cenário “EIA”) integrava ambas as travessias – ferroviária (nível superior) e rodoviária (nível inferior) – numa única estrutura, com dois pilares instalados no leito principal do Rio Douro. A nova proposta (cenário de Projeto de Execução) também integra ambas as travessias numa única estrutura, mas, neste caso, prevê a instalação de três alinhamentos de apoio no leito do rio, dois de maior dimensão, um junto à margem esquerda e outro entre o canal de navegação e a margem direita, e um terceiro apoio de dimensões muito reduzidas e mais afastado do canal de navegação do Rio Douro, junto à margem direita.

O estudo numérico foi feito com o modelo hidrodinâmico Delft3D-4, calibrado tendo por base a informação e dados do estudo numérico previamente realizado pelo IHRH (2019), tendo-se obtido uma concordância muito satisfatória entre os resultados dos dois modelos. Uma vez implementado, o modelo foi usado para caracterizar as condições hidrodinâmicas de referência e avaliar os efeitos potenciais dos pilares da nova ponte para caudais extremos com períodos de retorno de 100 (cheia centenária) e de 1000 anos (cheia milenar).

Os resultados obtidos mostram que, para ambos os cenários, a presença dos pilares provoca alterações locais nas velocidades do escoamento fluvial. A obstrução criada resulta numa redução da velocidade do escoamento a montante e a jusante (até 3 m/s), e num aumento da velocidade lateralmente (até 1 m/s). No entanto, o escoamento tende a recuperar as características originais algumas dezenas de metros a jusante. A comparação direta dos cenários “EIA” e de Projeto de Execução mostra que o impacto no escoamento fluvial é ligeiramente maior neste último caso, o que se justifica pela maior obstrução do escoamento pelos pilares colocados no leito do rio e pela localização de um dos pilares numa posição mais central da secção, onde as velocidades do escoamento são maiores. No entanto, importa referir que estas alterações ocorrem em áreas muito localizadas e perdem relevância quando se analisam os efeitos globalmente.

É ainda possível observar que a desaceleração do escoamento a montante do pilar provoca uma elevação local do nível da água, enquanto a aceleração nas laterais origina uma ligeira depressão. Imediatamente a jusante do pilar, a separação do escoamento na zona da esteira provoca um novo abaixamento local. Verifica-se assim um padrão característico de elevação da superfície da livre água (até 0,75 m) a montante dos pilares e de depressão ligeira (até 0,45 m) a jusante. A jusante da ponte, os efeitos nos níveis de água são desprezáveis. A montante, contudo, verifica-se a criação de uma “curva de regolfo”, que pode conduzir a pequenos aumentos locais do nível de água: até 0,05 m no cenário “EIA” e até 0,11 m no cenário de Projeto de Execução, para a cheia centenária. Dado que a profundidade de água na secção para essas condições é de cerca de 30 m, essas alterações representam, no máximo, um aumento de cerca de 0,5% da profundidade de água local.

Os resultados apresentados neste relatório devem ser considerados como uma primeira aproximação aos efeitos dos pilares no escoamento fluvial, dadas as limitações inerentes à aplicação deste tipo de modelos numéricos. Para a análise das alterações morfológicas junto a pilares de pontes é recomendado o uso de ferramentas de modelação com maior flexibilidade na definição da malha, permitindo assim uma maior resolução espacial em torno de estruturas complexas (*e.g.*, o HEC-RAS ou o Delft3D-FM). Por esse motivo, o estudo de caracterização da dinâmica da erosão do leito do rio, complementar ao presente estudo, foi realizado com o modelo HEC-RAS (ver relatório específico e autónomo desse estudo).

2 MODELO NUMÉRICO DELFT3D

Esta secção apresenta uma breve introdução ao pacote numérico Delft3D-4, uma ferramenta *open-source* de última geração. Esta ferramenta usa modelos de malha estruturada baseados em processos e permite simular a hidrodinâmica 2D e 3D, o transporte de sedimentos, as alterações morfológicas e a qualidade da água. Resolve as equações de águas pouco profundas usando o método das diferenças finitas e inclui módulos acoplados para ondas, salinidade, temperatura e ecodinâmica, sendo amplamente aplicado em ambientes fluviais, estuarinos e costeiros. Consequentemente, o pacote numérico Delft3D-4 é composto por vários módulos, designadamente: FLOW (modelação de escoamentos não estacionários e fenómenos de transporte resultantes da ação da maré e forçamento meteorológico), WAVE (modelação da evolução das ondas geradas pelo vento em zonas costeiras), MOR (modelação do transporte de sedimentos e dos processos morfológicos), WAQ (modelação da qualidade da água em sistemas que envolvem processos físicos, bioquímicos e biológicos) e PART (rastreamento de partículas). No presente trabalho, apenas o módulo FLOW foi utilizado.

O Delft3D-FLOW é um modelo hidrodinâmico baseado no método das diferenças finitas que, na sua forma 2DH, resolve as equações do escoamento em superfície livre com média em profundidade, considerando diversos processos como o atrito de fundo, turbulência, escoamentos supercríticos e subcríticos, efeitos de densidade associados a gradientes horizontais de temperatura e salinidade, e forças de arrastamento provocadas por estruturas verticais. Na direção vertical, o Delft3D-FLOW assume que a conservação da quantidade de movimento é simplificada para uma distribuição hidrostática da pressão p , como resultado da hipótese de águas pouco profundas, na qual as acelerações do escoamento na direção vertical z podem ser desprezadas:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1)$$

em que g é a aceleração da gravidade e ρ é a massa volúmica da água do mar, calculada de acordo com a formulação da UNESCO. As equações de conservação da quantidade de movimento para as direções horizontais podem ser expressas da seguinte forma:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV = -g \frac{\partial V}{\partial x} - \frac{g}{\rho_0} \int_{-d}^V \frac{\partial \rho}{\partial x} dz + \frac{\tau_{sx} - \tau_{bx}}{\rho_0(d+V)} + \nu_H \nabla^2 U \quad (2)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU = -g \frac{\partial V}{\partial y} - \frac{g}{\rho_0} \int_{-d}^V \frac{\partial \rho}{\partial y} dz + \frac{\tau_{sy} - \tau_{by}}{\rho_0(d+V)} + \nu_H \nabla^2 V \quad (3)$$

em que V representa a elevação da superfície livre da água em relação a um plano de referência $z = 0$, ρ_0 a massa volúmica de referência da água do mar, f o parâmetro de *Coriolis*, U e V as componentes da velocidade *Euleriana* (média em profundidade) nas direções x e y , respetivamente, ν_H o coeficiente de viscosidade turbulenta horizontal, τ_{sx} e τ_{sy} a tensão do vento na superfície livre da água nas direções x e y , respetivamente, e, por fim, τ_{bx} e τ_{by} correspondem à tensão de corte no fundo para as direções x e y , respetivamente, e podem ser calculadas através de:

$$\overline{\tau}_b = \frac{\rho_0 g |\overline{u}_b| \overline{u}_b}{C_{3D}^2} \quad (4)$$

em que $\overline{u}_b$ é a velocidade horizontal na camada de fundo e C_{3D} é o coeficiente de Chézy tridimensional, calculado a partir do coeficiente de Chézy bidimensional C_{2D} , da seguinte forma:

$$C_{3D} = C_{2D} + \frac{\sqrt{g}}{\kappa} \ln \left(\frac{\delta_{zb}}{2H} \right) \quad (5)$$

em que δ_{zb} representa a distância vertical entre o fundo e o ponto de malha computacional mais próximo, κ é a constante de von Karman, e H é a profundidade total da água. Por fim, C_{2D} é calculado a partir do coeficiente de Manning, n , da seguinte forma:

$$C_{2D} = \frac{\sqrt[6]{H}}{n} \quad (6)$$

A equação de conservação da massa, para escoamentos incompressíveis, conduz a:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial [(d + V)U]}{\partial x} + \frac{\partial [(d + V)V]}{\partial y} = Q \quad (7)$$

em que Q representa a intensidade das fontes de massa por unidade de área.

O transporte de quantidades escalares, tais como calor ou matéria, é modelado através da equação de advecção-difusão:

$$\frac{\partial (V + d)c}{\partial t} + \frac{\partial [(V + d)Uc]}{\partial x} + \frac{\partial [(V + d)Vc]}{\partial y} = D_H \nabla^2 c - \lambda_d (d + V)c + C \quad (8)$$

em que c representa a quantidade escalar a modelar (neste caso, salinidade e temperatura), C o termo de fonte ou sorvedouro de cada constituinte, D_H o coeficiente de difusividade turbulenta horizontal, e λ_d o coeficiente de decaimento de primeira ordem.

3 MODELO HIDRODINÂMICO

3.1 INTRODUÇÃO

O objetivo principal do presente estudo de modelação hidrodinâmica é analisar, em detalhe, o impacto dos pilares de duas propostas alternativas para uma nova travessia rodoferroviária do rio Douro (cenário EIA e de Projeto de Execução) nas velocidades locais de escoamento e nos níveis de água. Para tal, foi desenvolvido um modelo hidrodinâmico do rio Douro com a ferramenta computacional Delft3D-4 (Secção 3.2), para simular as condições hidrodinâmicas para cenários de caudal extremo, associados a períodos de retorno de 100 e 1000 anos (Secção 3.3), para três cenários distintos:

- Cenário atual (cenário de referência), sem pontes;
- Cenário que sustentou o EIA – ponte única rodoferroviária, com dois pilares no leito do rio;
- Cenário de Projeto de Execução – ponte única rodoferroviária, com três eixos de apoio no leito do rio.

3.2 DELFT3D: IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO

3.2.1 DOMÍNIO DO MODELO

Após a análise de várias hipóteses alternativas e a realização de testes, para a implementação do modelo hidrodinâmico foi selecionada uma malha curvilínea. Esta malha abrange a região estuarina e as zonas potencialmente inundáveis desde a barragem de Crestuma-Lever até à foz do rio Douro, incluindo a zona costeira adjacente e o Porto de Leixões (Figura 1). Adicionalmente, para captar com maior detalhe os potenciais efeitos dos pilares das pontes nas condições de escoamento, foi adotada uma abordagem de decomposição de domínio. Como resultado, a malha computacional na área de interesse foi refinada numa proporção de 1:5 em relação aos subdomínios interior e exterior, obtendo-se assim uma elevada resolução espacial na zona de maior interesse (entre 3 e 5 m). Este refinamento permitiu uma representação mais detalhada e precisa dos pilares das pontes e dos seus efeitos no escoamento fluvial (Figura 2).

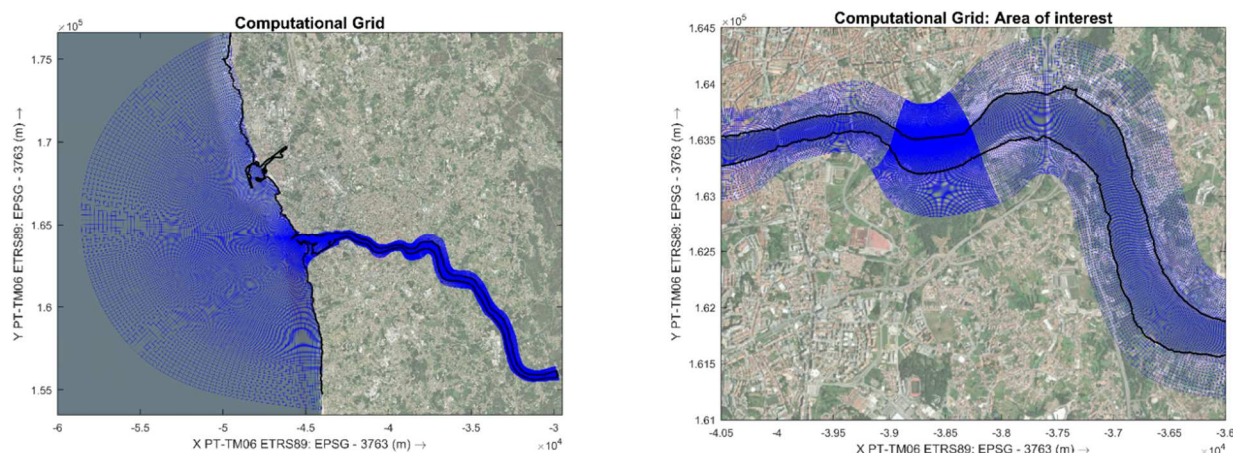


Figura 1 - Malha computacional do Delft3D-FLOW.

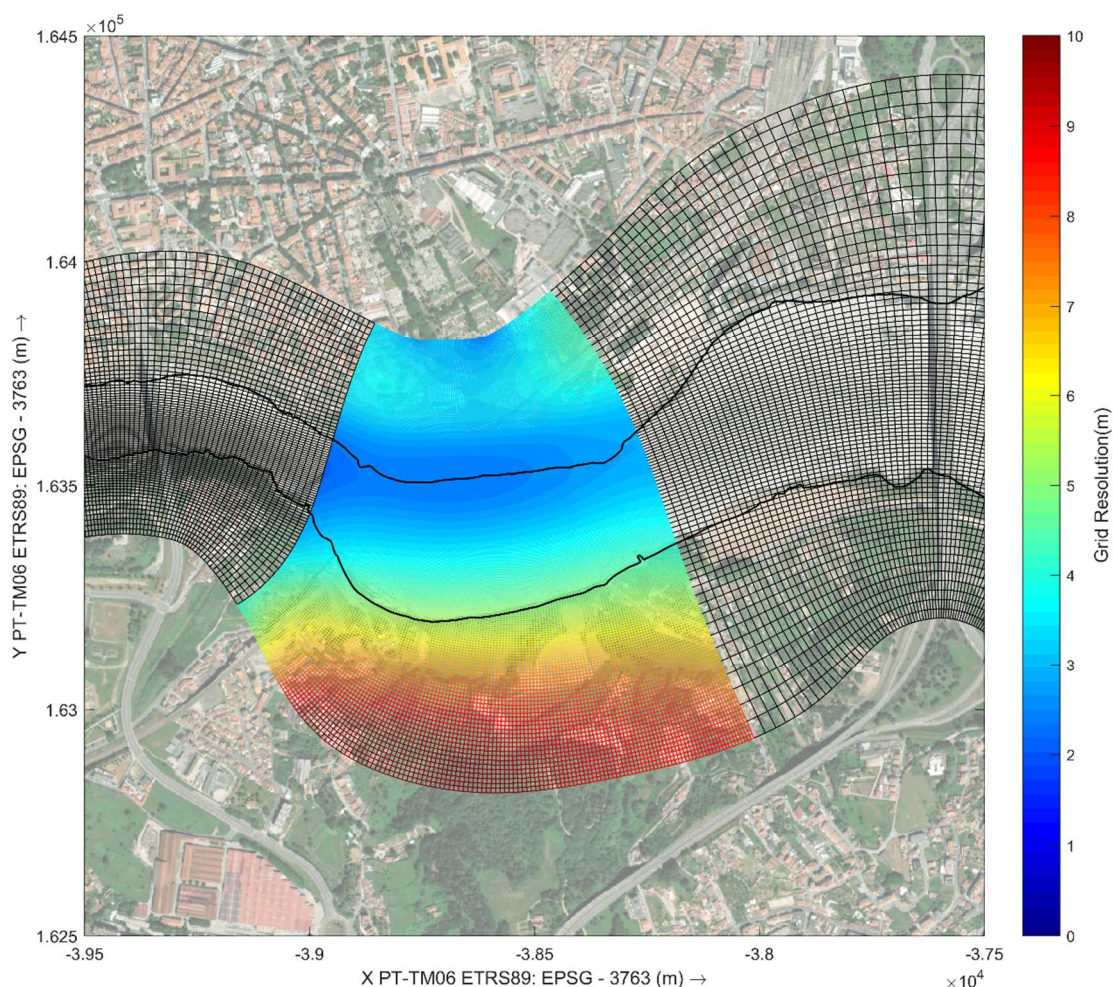


Figura 2 - Resolução da malha computacional na área de interesse.

3.2.2 BATIMETRIA

A batimetria do rio Douro varia no tempo em função das condições hidrodinâmicas e de outros fatores. O levantamento hidrográfico mais recente de todo o estuário do rio Douro, margem a margem, é o realizado em 2015 pelo Instituto Hidrográfico (IH). A Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo S.A., responsável pela via navegável do Douro, dispõe de levantamentos hidrográficos realizados em 2020 e 2021, mas apenas do canal de navegação, entre a barra do Douro e Crestuma. Há ainda levantamentos mais localizados e realizados com propósitos diferentes, designadamente o levantamento batimétrico feito aquando da realização das sondagens da Ponte do Douro na fase de concurso da LAV (03/2024).

Dada a variabilidade natural dos fundos fluviais e o facto de se pretender analisar, comparativamente, os três cenários referidos anteriormente, a batimetria utilizada no modelo numérico foi obtida, principalmente, a partir do levantamento de 2015 realizado pelo IH, complementado por outros levantamentos, dado que esta informação se considera adequada para a análise a realizar. A batimetria da zona costeira foi obtida a partir do modelo batimétrico do rio Douro (IH), com uma resolução de 100 x 100 m, e foi complementada com informação batimétrica da base de dados EMODnet (Figura 3). Por fim, todos os conjuntos de dados foram interpolados para a grelha computacional do modelo através da ferramenta Delft3D-QUICKIN.

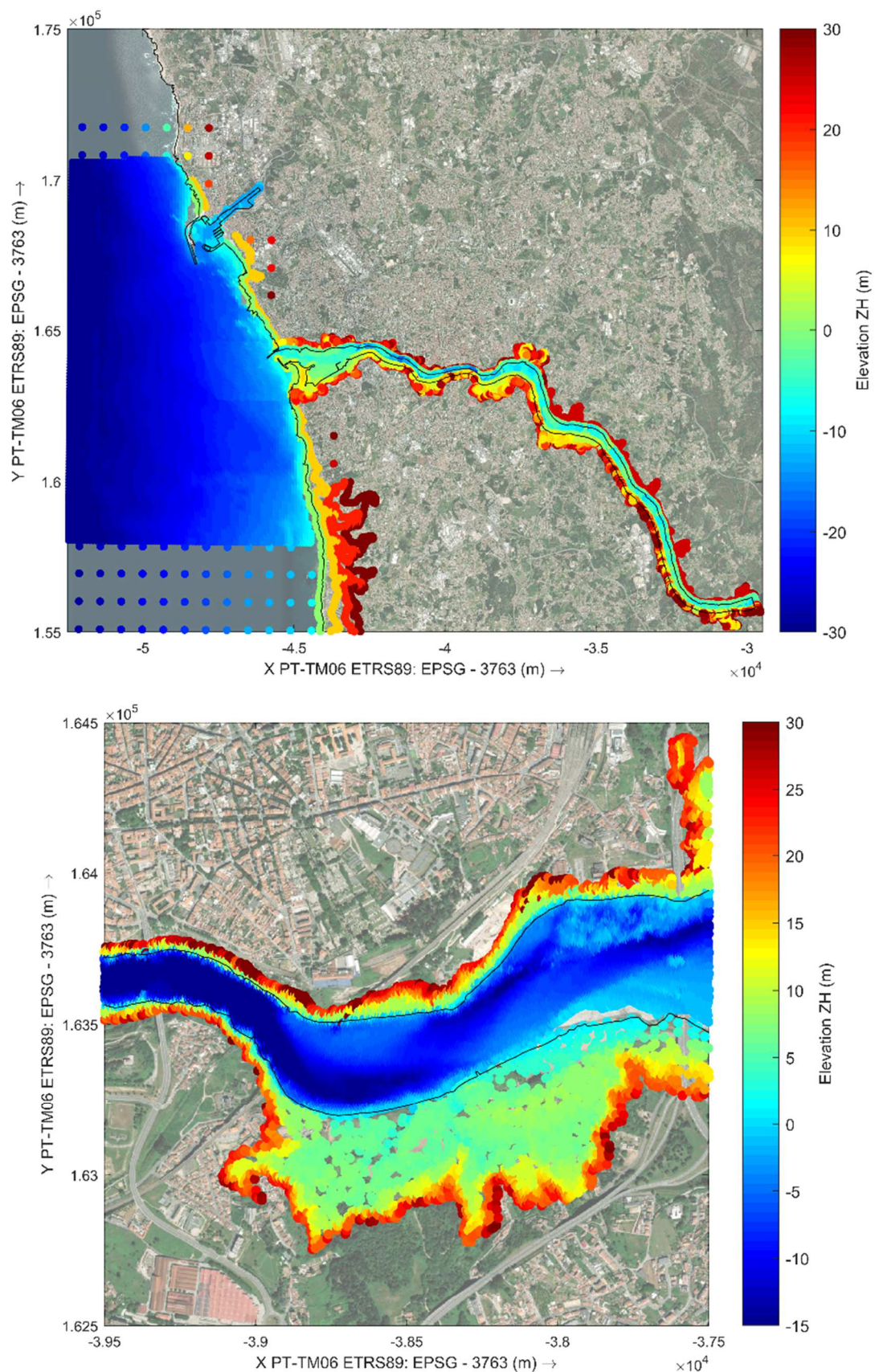


Figura 3 - Dados batimétricos para todo o domínio computacional (em cima) e para a área de interesse (em baixo).

3.2.3 FATORES FORÇADORES DO MODELO E CONDIÇÕES FRONTEIRA

No Delft3D, o escoamento pode ser forçado por vários fatores, tais como: variações de maré/nível de água nas fronteiras abertas, ação do vento na superfície livre da água, gradientes de pressão devido a variações na superfície livre da água ou gradientes de densidade. Além disso, podem ser incluídos termos fonte e sumidouro nas equações do modelo para representar descargas e captações de caudal. Neste caso, para a implementação do modelo hidrodinâmico, foram considerados os seguintes fatores forçadores:

- Força de Coriolis (*i.e.*, os efeitos da rotação da Terra sobre o escoamento);
- Variações do nível da água;
- Variações de salinidade e temperatura;
- Caudais fluviais.

Consequentemente, foram definidas duas fronteiras abertas: uma fronteira oceânica e uma fronteira fluvial. Na fronteira oceânica, foi imposto um nível de água constante igual a 4,79 m (ZH). Este valor resulta da contribuição combinada de: (i) nível máximo da preia-mar de águas vivas (PMAV) esperada em Leixões, 3,96 m ZH (Reis, 2015); (ii) uma sobrelevação meteorológica muito significativa (acima do percentil 99), 0,58 m (Carvalho, 2013); (iii) o facto de o nível médio anual do mar em Leixões estar, em média, 0,16 m acima do Zero Topográfico (ZT) (Reis, 2015); e (iv) considerando uma subida projetada do nível médio do mar de aproximadamente 0,09 m nos próximos 50 anos, com base numa tendência de $1,75 \pm 0,13$ mm/ano (IH, 2017).

Por outro lado, foi imposto um caudal extremo constante na fronteira fluvial (montante). Estes valores foram obtidos a partir de IHRH (2017), com base no ajuste de uma distribuição de extremos de Gumbel a uma análise estatística dos registos anuais de caudais instantâneos no estuário do Douro. No presente estudo, foram considerados os valores de caudal correspondentes aos períodos de retorno de 100 e 1000 anos, tendo em conta os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95%, conforme apresentado no Quadro 1:

Quadro 1: Valores extremos de caudal no rio Douro para os períodos de retorno de 100 e 1000 anos (IHRH, 2017).

Período de retorno (anos)	Intervalo de confiança (%)	Caudal (m^3s^{-1})
100	5	19814
	50	17634
	95	15981
1000	5	27962
	50	24629
	95	22125

Com o intuito de simular o escoamento induzido por gradientes de salinidade e/ou temperatura, foi prescrita uma distribuição diária média de salinidade e temperatura ao longo das fronteiras oceânica e fluvial. Com base no trabalho de Iglesias *et al.* (2019), os valores de salinidade e temperatura foram definidos como 35,8 ppt e 17 °C para a fronteira oceânica, e 0 ppt e 8 °C para a fronteira fluvial.

Nas zonas de transição terra-água foram consideradas as condições fronteira “escoamento nulo” e “tensão de arrastamento zero” (*free slip*). Na fronteira inferior, a tensão de arrastamento no fundo foi calculada com base numa lei quadrática, conforme definido na Eq. 4. De acordo com Iglesias *et al.* (2017), foi adotado um coeficiente de rugosidade de *Manning* de $n = 0,04 \text{ sm}^{-1/3}$, assim como coeficientes de viscosidade e difusividade turbulenta horizontais de $1 \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. As condições iniciais do modelo assumiram velocidade nula e nível médio do mar (2,0 m ZH) em todos os nós da grelha (*cold start*). Foi usado um período de *spin-up* de um dia para atingir condições de escoamento em regime permanente e permitir o ajustamento dinâmico das variáveis termohalinas, de forma a minimizar a influência das condições iniciais nos resultados. Por fim, o modelo foi executado com um passo temporal de 0,025 minutos, valor suficientemente pequeno para garantir a estabilidade numérica segundo o critério de *Courant–Friedrichs–Lewy* (CFL).

3.3 RESULTADOS

Após implementação, o modelo numérico foi usado para avaliar o impacto no escoamento dos pilares das diferentes soluções propostas para a travessia do rio Douro (“EIA” na Secção 3.3.1 e de Projeto de Execução de na Secção 3.3.2) tendo como referência a situação atual (sem pontes) e para diferentes cenários de caudal (Quadro 1). Para esse efeito, foram analisados em pormenor os níveis de água e as velocidades do escoamento, com enfoque nas diferenças entre o cenário de referência (situação atual) e os cenários que incluem os pilares da ponte no leito principal do rio.

3.3.1 CENÁRIO EIA

No cenário relativo à solução analisada no Estudo de Impacto Ambiental (EIA), a ponte inclui apenas dois pilares de maior dimensão no leito do rio Douro, conforme representado na Figura 4. Cada pilar possui 4,4 m de largura e 27,5 m de comprimento. Como se pode observar na Figura 4, a elevada resolução da grelha computacional permite uma representação precisa da geometria dos pilares, que foram modelados como uma área permanentemente seca. Importa ainda referir que estudos anteriores que utilizaram o Delft3D para simular o escoamento em torno de pilares de pontes recomendam uma resolução local da grelha da ordem de 1/9 da dimensão característica do pilar (Liu *et al.*, 2024). No entanto, importa referir que esses estudos, de carácter puramente académico, analisaram apenas domínios de pequena extensão espacial e geometrias simples.

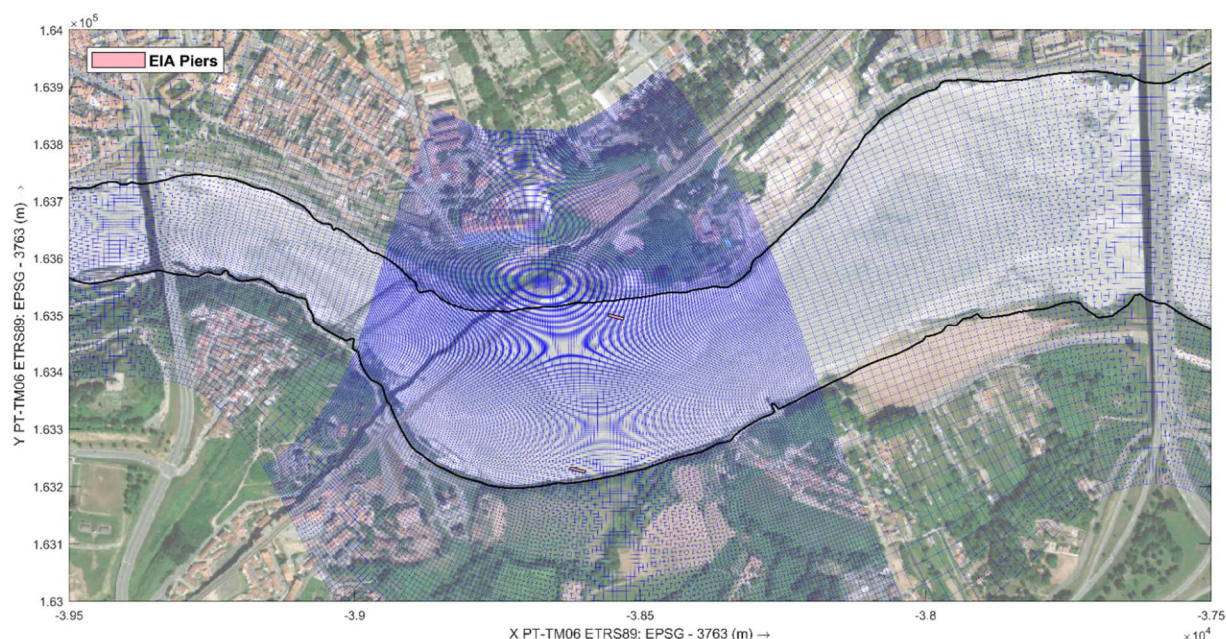


Figura 4 - Localização dos pilares da ponte rodoferroviária para o cenário do EIA.

3.3.1.1 Caudal com período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 50%)

Em primeiro lugar, as condições de escoamento foram simuladas para os cenários de referência e com a presença da ponte rodoferroviária (cenário EIA), conforme apresentado na Figura 5 e na Figura 6. De forma geral, as velocidades do escoamento na zona da ponte situam-se entre aproximadamente 2,5 e 3,0 m/s para o caudal considerado. A jusante da área de interesse, o estreitamento da secção do rio conduz ao afunilamento do escoamento, resultando num aumento significativo da velocidade, com valores que ultrapassam os 4,0 m/s.

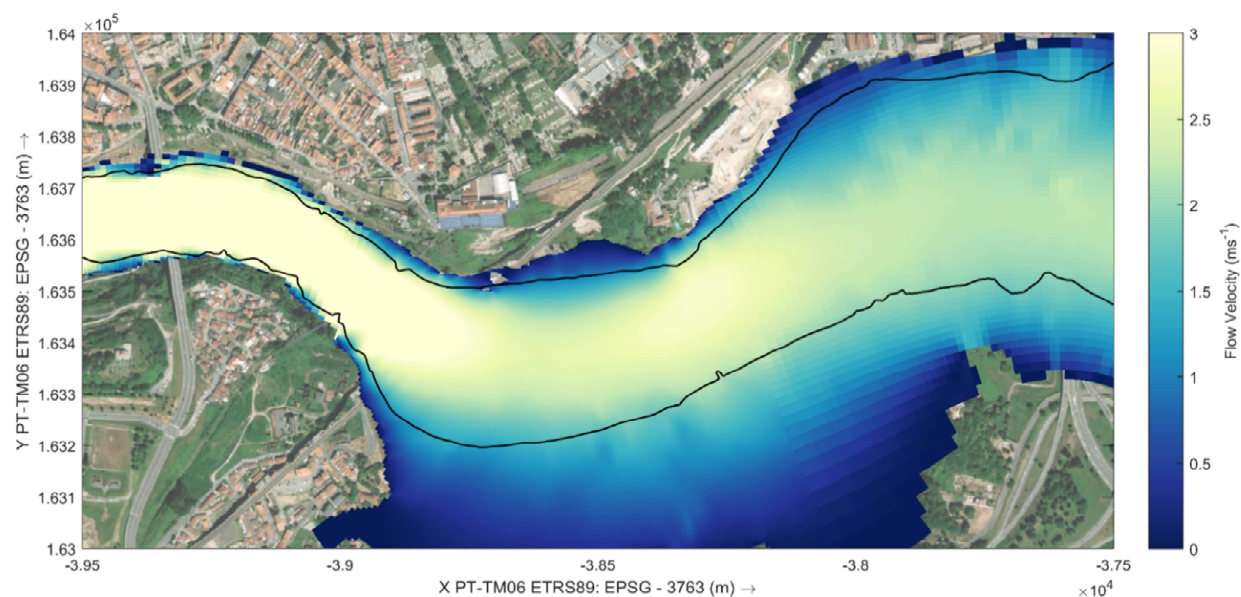


Figura 5 - Velocidade do escoamento para o cenário de referência (sem pontes) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

A presença dos pilares provoca alterações localizadas no escoamento na sua proximidade (Figura 7). Como seria de esperar, a presença dos pilares tem um efeito de bloqueio, levando à desaceleração local do escoamento imediatamente a montante e a jusante, com reduções locais da velocidade do escoamento que podem atingir 1,36 m/s. O escoamento é forçado a contornar lateralmente os pilares, causando zonas de aceleração com aumentos de velocidade que podem atingir localmente 0,25 m/s. Este desvio lateral gera turbulência e dá origem à formação de esteiras a jusante de cada um dos pilares. Estas perturbações estão maioritariamente concentradas nas imediações dos pilares, pois o escoamento tende a restabelecer, progressivamente, o seu padrão original algumas dezenas de metros a jusante, como evidenciado na Figura 7.

Importa referir que os resultados do modelo apresentam uma esteira com padrão de escoamento simétrico, não captando corretamente as oscilações características do escoamento turbulento a jusante dos pilares, o que se deve, principalmente, às limitações na resolução da grelha nas proximidades das estruturas. Tal como explicado anteriormente, este facto não tem implicações relevantes na análise e conclusões que se pretendem obter com o presente estudo. O estudo com o modelo HEC-RAS complementar a análise dos efeitos dos pilares no escoamento fluvial e no leito do rio.

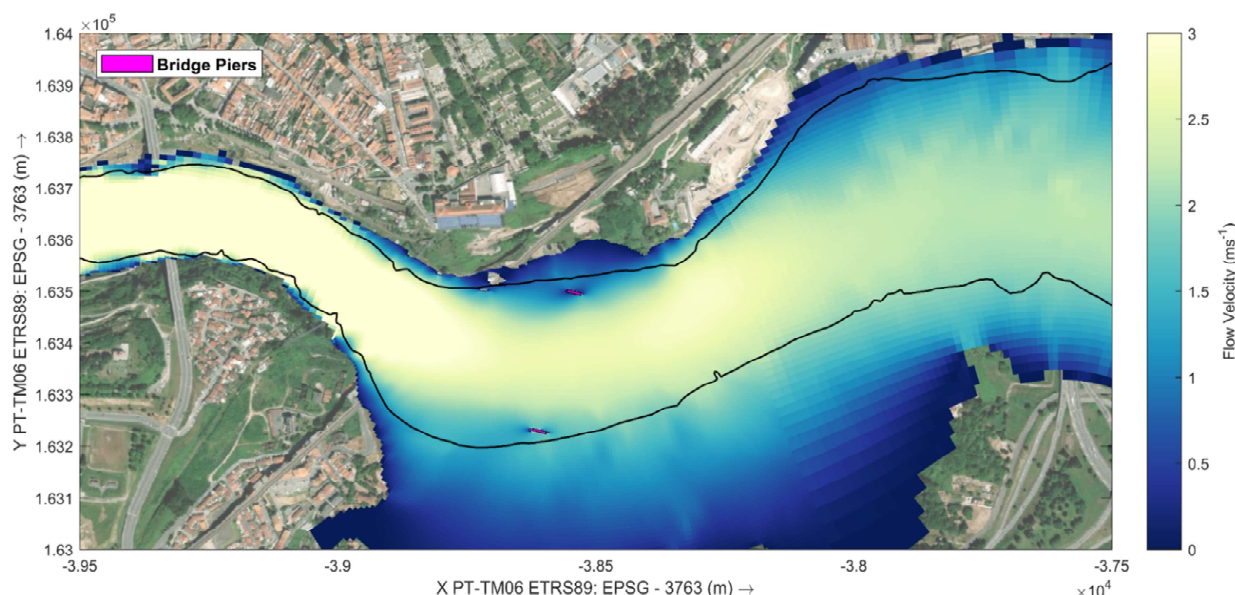


Figura 6 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoviária (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

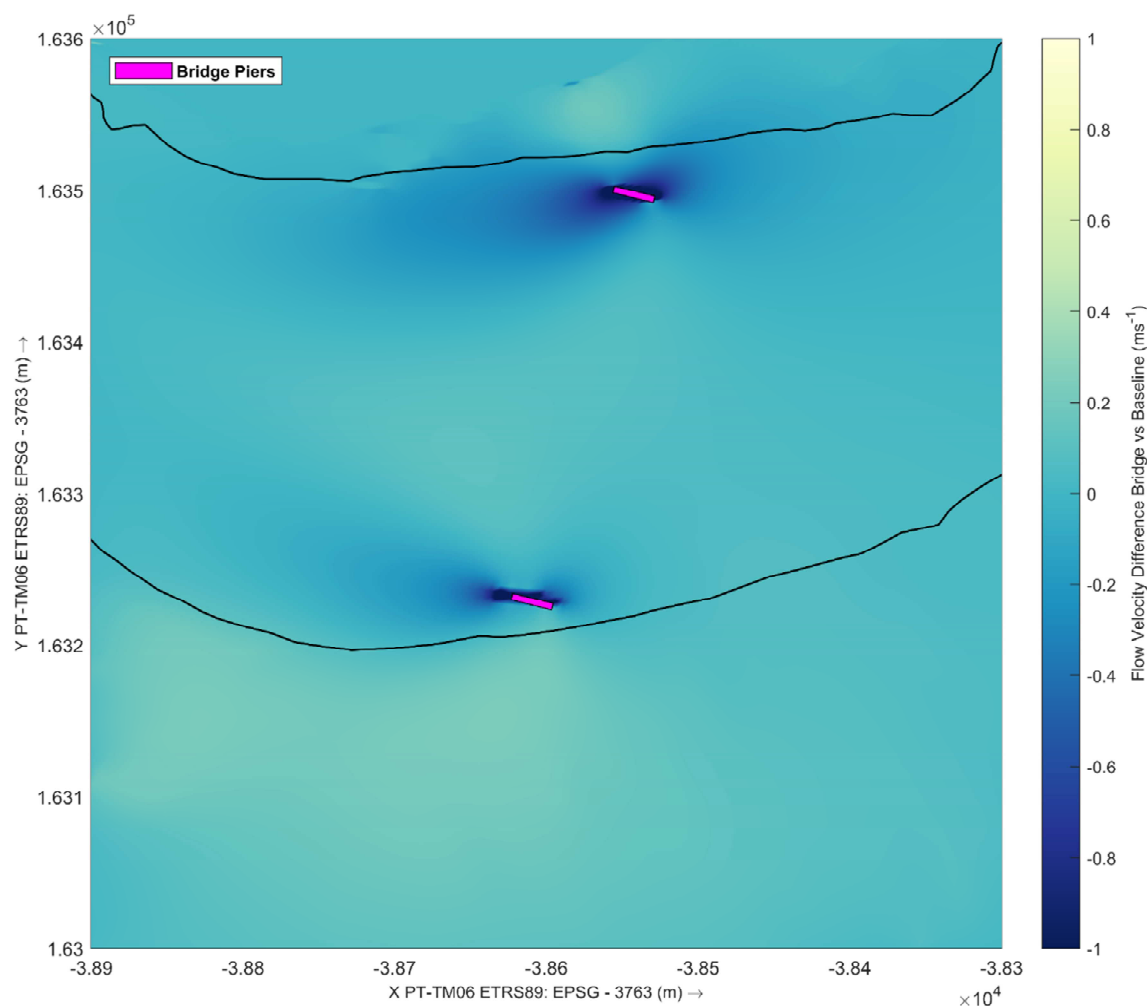


Figura 7 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%).

De forma semelhante, a distribuição espacial do nível de água foi calculada para os cenários de referência, *i.e.*, sem ponte (Figura 8), e com a presença dos pilares da ponte (Figura 9). De um modo geral, os resultados obtidos para a situação de referência apresentam boa concordância com os valores reportados por IHRH (2019), tanto em termos dos níveis de água atingidos na zona da ponte (até 14,8 m ZH) como da extensão das áreas inundadas.

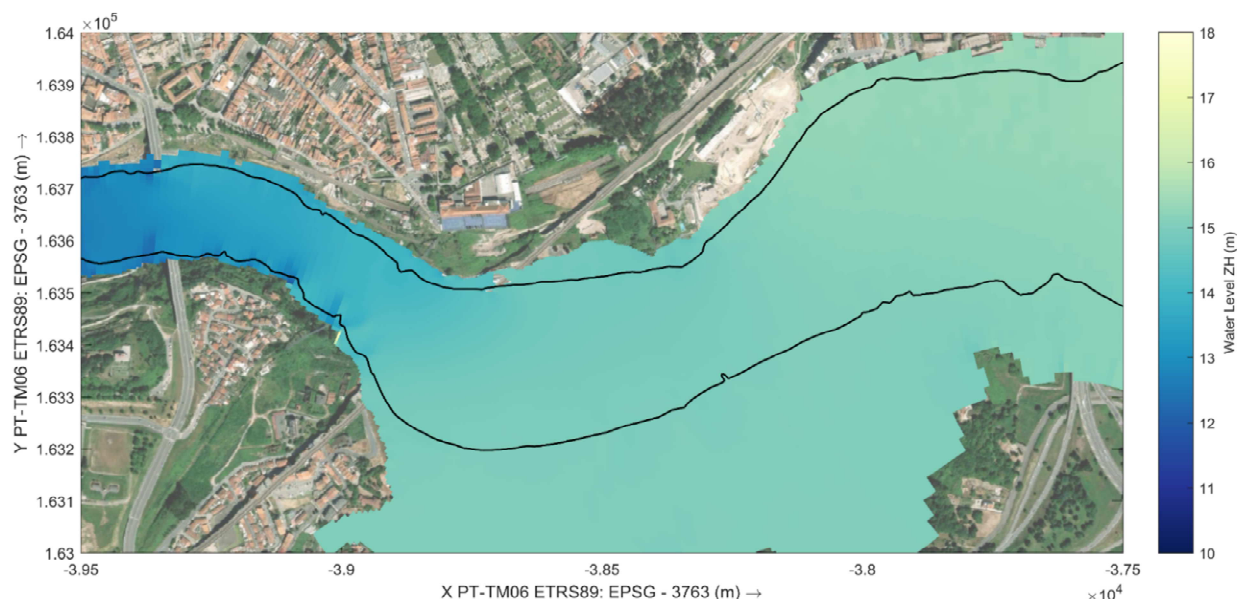


Figura 8 - Nível da água para o cenário de referência (sem pontes) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

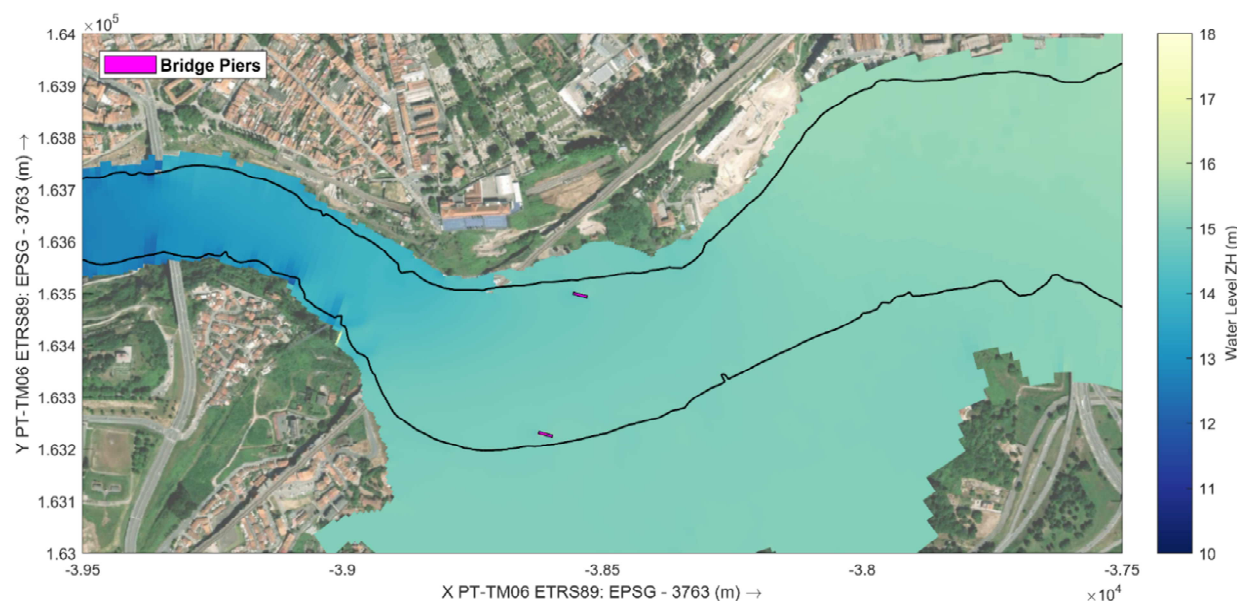


Figura 9 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

A comparação entre os cenários com e sem a ponte rodoferroviária (Figura 10) mostra que a presença dos dois pilares no leito do rio provoca um aumento local do nível de água a montante, devido à obstrução do escoamento fluvial, com diferenças que podem atingir 0,29 m. A jusante da ponte observa-se uma ligeira redução do nível da água, até 0,23 m, associada à aceleração do escoamento ao contornar esses pilares. Mais a montante, *i.e.*, para lá da área de influência direta dos pilares da ponte, ocorre um aumento praticamente uniforme do nível da água de aproximadamente 0,05 m, o que indica um ligeiro ajustamento hidráulico de maior escala espacial em resposta à presença dos pilares.

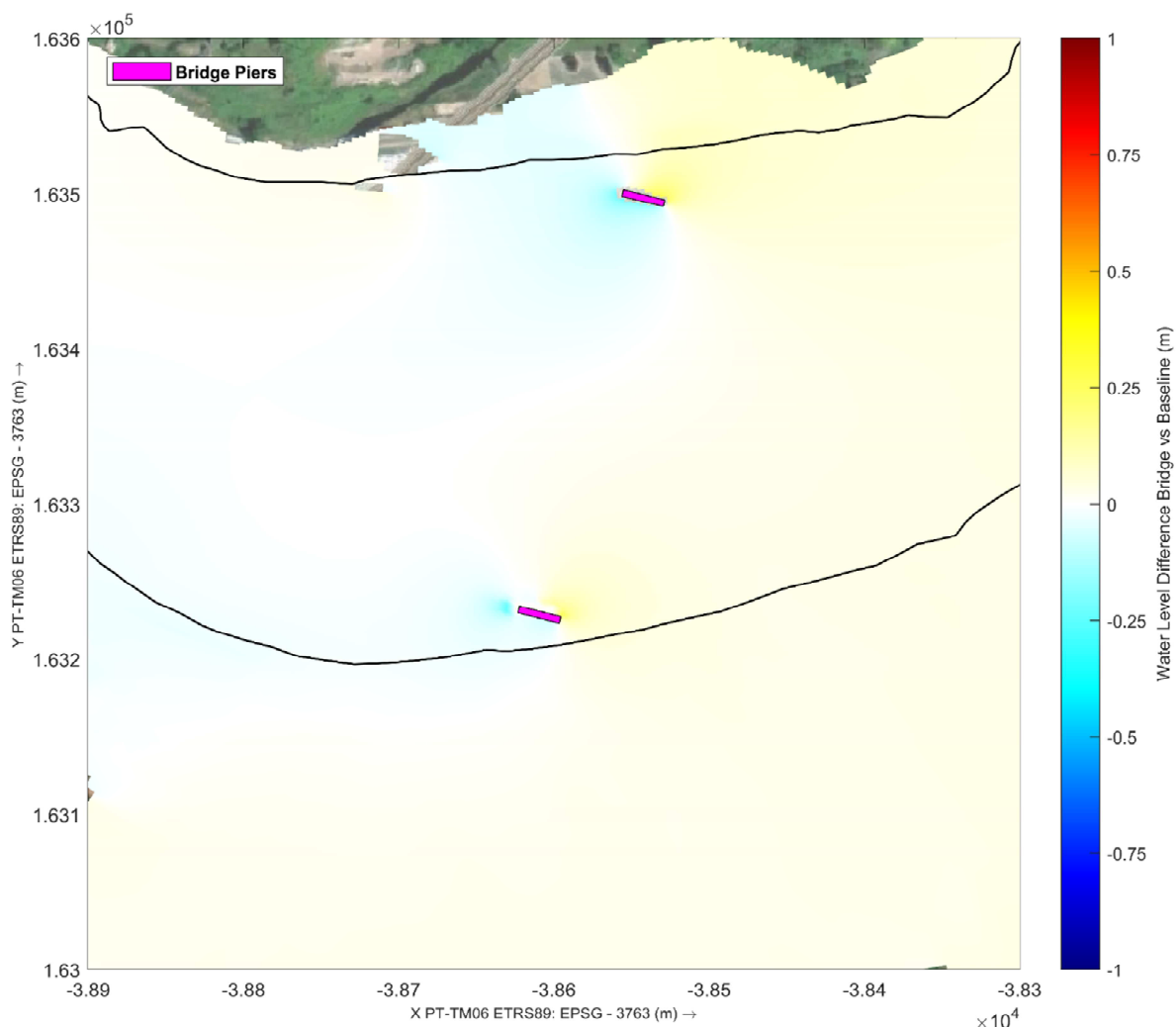


Figura 10 - Diferenças de nível de água: cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%.

A Figura 11 compara a posição da superfície livre da água na secção referente à ponte rodoferroviária, evidenciando os efeitos dos pilares no escoamento fluvial. Os resultados obtidos estão em concordância com os apresentados nas figuras anteriores, mostrando que os pilares provocam um aumento consistente do nível de água em toda a secção transversal, com diferenças que podem atingir 0,05 m. Adicionalmente, a Figura 12 mostra os perfis longitudinais da superfície livre da água ao longo do eixo central do estuário, desde a foz até uma secção a montante da ponte, para o caudal com um período de retorno de 100 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95%, comparando os cenários de referência com o da ponte. De forma geral, os resultados confirmam as tendências apresentadas na Figura 10. A jusante da ponte, o impacto nos níveis de água é negligenciável, enquanto a montante se observa um aumento uniforme do nível da água que pode chegar a 0,05 m. Informações adicionais sobre as condições de escoamento e níveis de água para os intervalos de confiança de 5% e 95% podem ser consultadas nos Anexos A1 e A2.

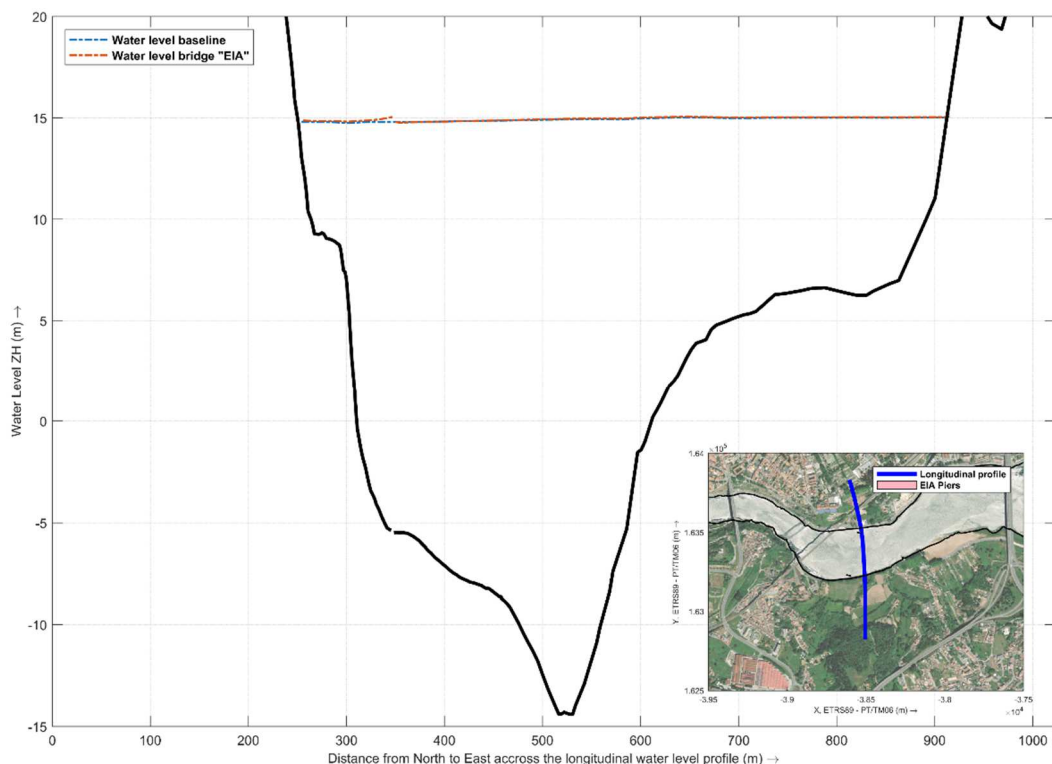


Figura 11 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte rodoferroviária para um período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares (EIA).

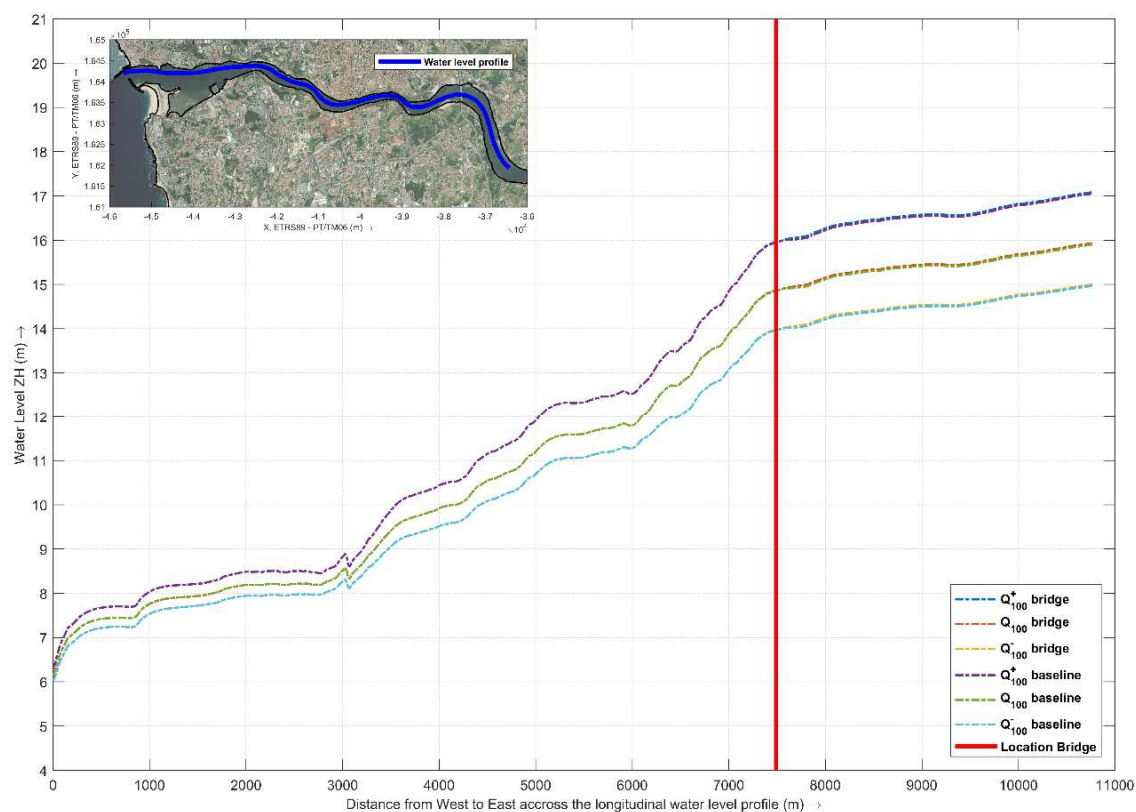


Figura 12 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 100 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (EIA).

3.3.1.2 Caudal com período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 50%)

Tal como na situação anterior, relativa ao período de retorno de 100 anos, as condições de escoamento foram avaliadas para os cenários de referência e com a ponte (EIA), conforme ilustrado na Figura 13 e Figura 14. Os resultados obtidos mostram que na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento se situam, regra geral, entre 3,0 e 3,5 m/s. Mais a jusante, o estrangulamento do canal do rio concentra o escoamento, originando um aumento da velocidade, com valores que ultrapassam os 5 m/s.

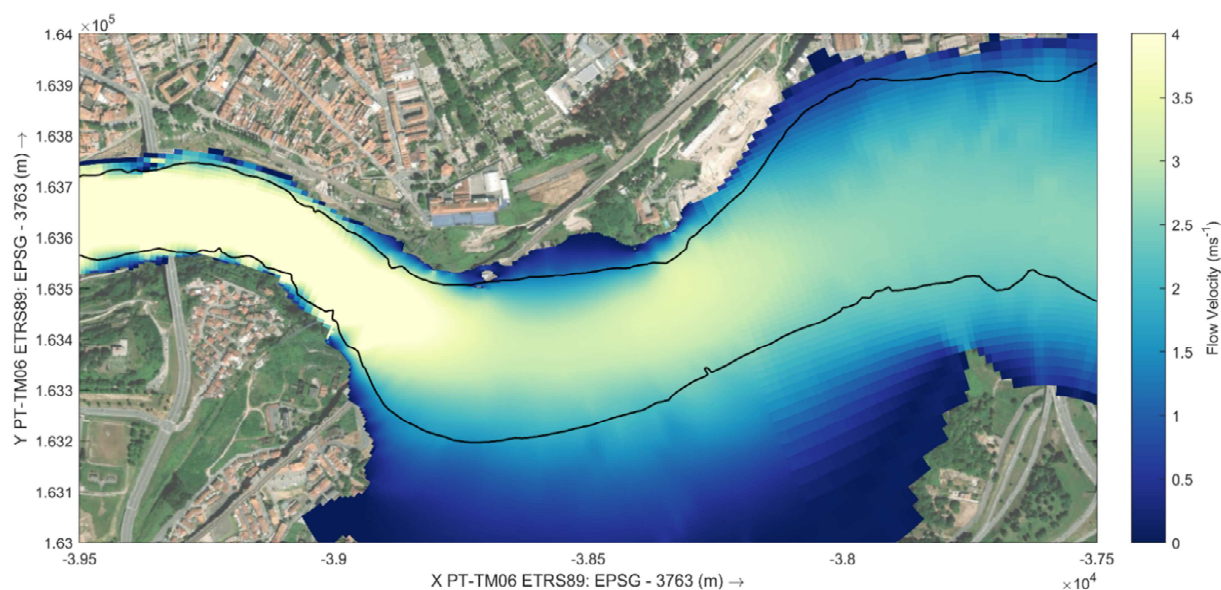


Figura 13 - Velocidade do escoamento para o cenário de referência (sem ponte) e para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

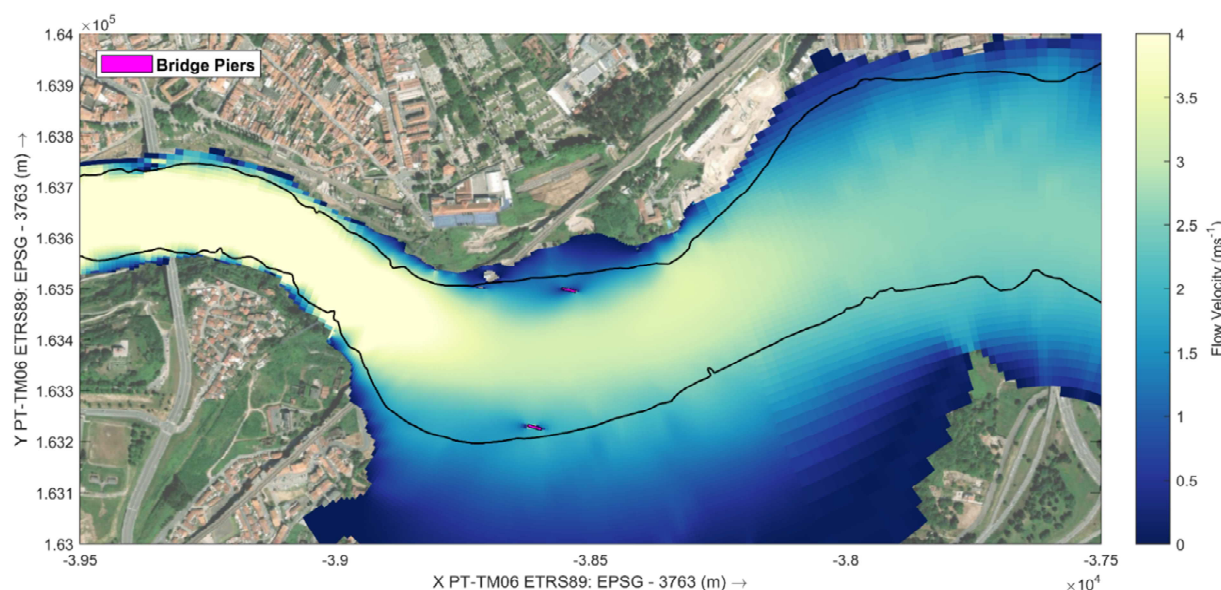


Figura 14 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

À semelhança do que foi observado para o período de retorno de 100 anos, a presença dos pilares provoca alterações localizadas no campo de velocidades (Figura 15). Neste caso, observam-se reduções de velocidade de até 1,70 m/s a montante e jusante dos pilares, enquanto a aceleração do escoamento em torno das suas laterais resulta em aumentos localizados da velocidade que podem atingir 0,50 m/s. Como seria de esperar, estas alterações são mais pronunciadas do que as verificadas para a cheia centenária, devido às maiores velocidades de escoamento associadas ao caudal mais extremo.

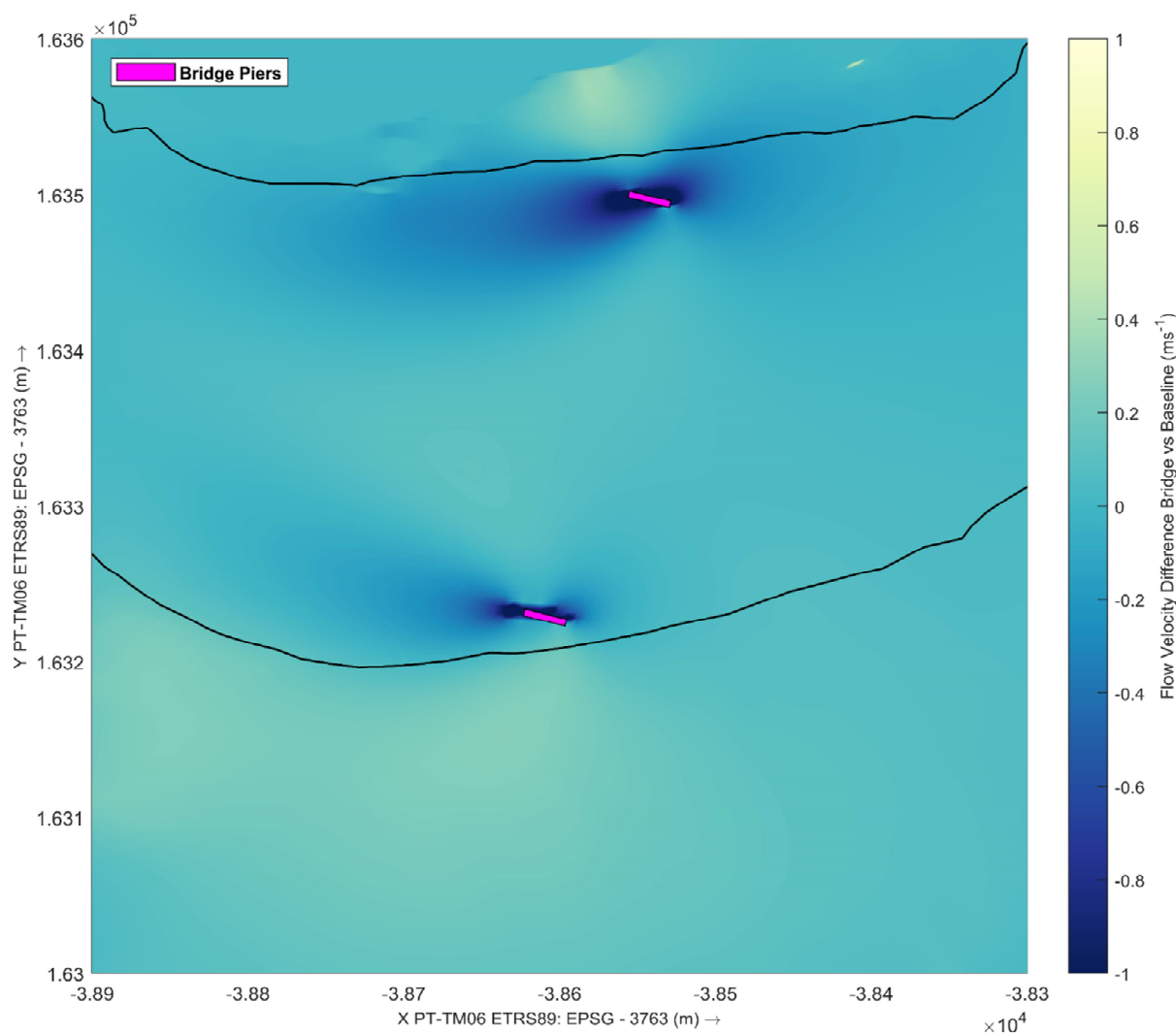


Figura 15 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%).

Também neste caso, e tal como observado para a cheia centenária, a esteira criada pelos pilares tem um padrão de escoamento simétrico, não reproduzindo fielmente as oscilações características do escoamento turbulento que se deverá verificar a jusante dos pilares. Importa referir que essa simplificação não deverá ter implicações relevantes na análise e conclusões que se pretende obter com o presente estudo.

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada para os cenários de referência (Figura 16) e com a presença da ponte (Figura 17), registando-se cotas da superfície livre da água que atingem 18,0 m ZH na zona de interesse. Em comparação com o cenário atual de referência, a presença dos pilares provoca alterações localizadas nos níveis de água, com aumentos a montante que podem

atingir 0,36 m e reduções a jusante de até 0,31 m. Verifica-se ainda uma elevação da superfície livre mais ampla, a montante, que pode ser ligeiramente superior a 0,05 m, em linha com a resposta hidráulica antes observada para a cheia centenária (Figura 18).

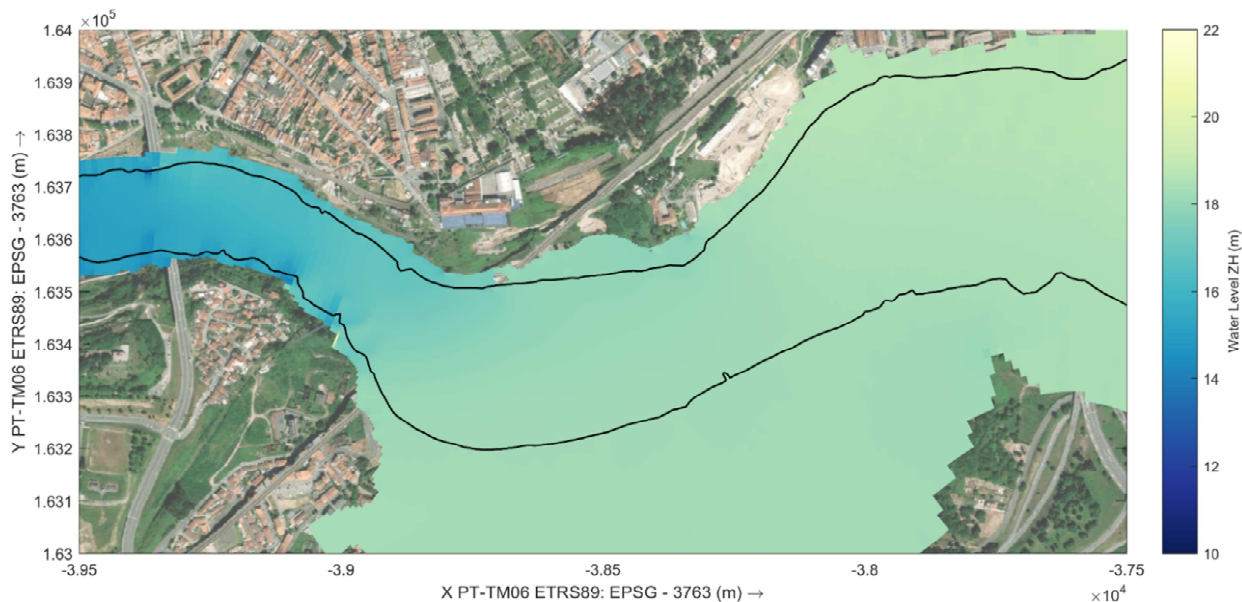


Figura 16 - Nível da água para o cenário de referência (sem pontes) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

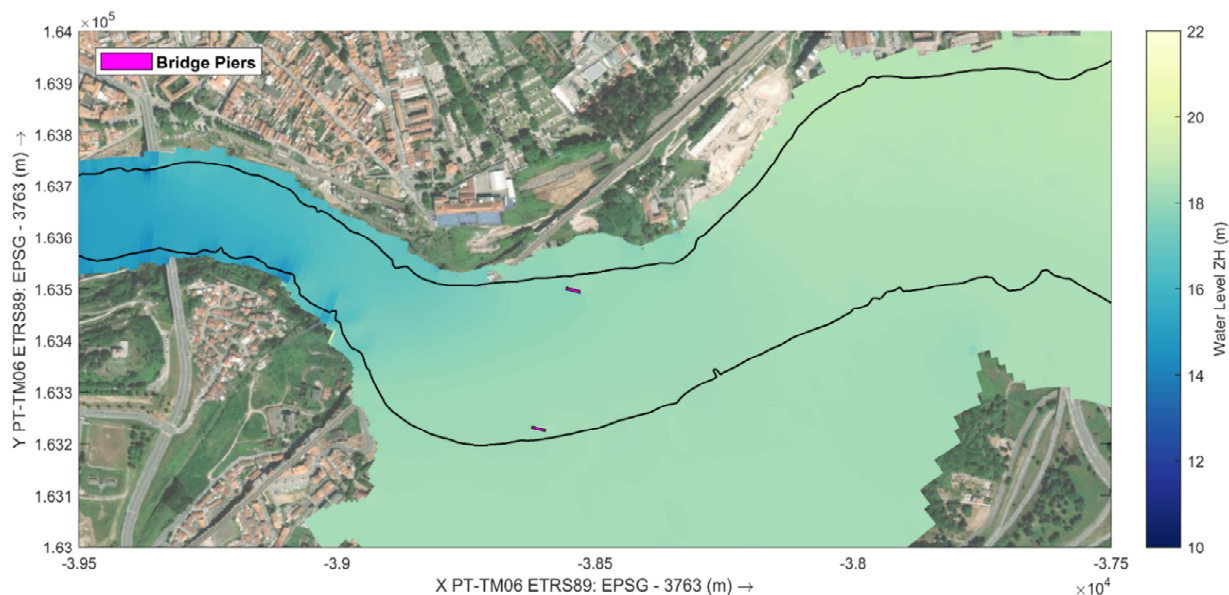


Figura 17 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

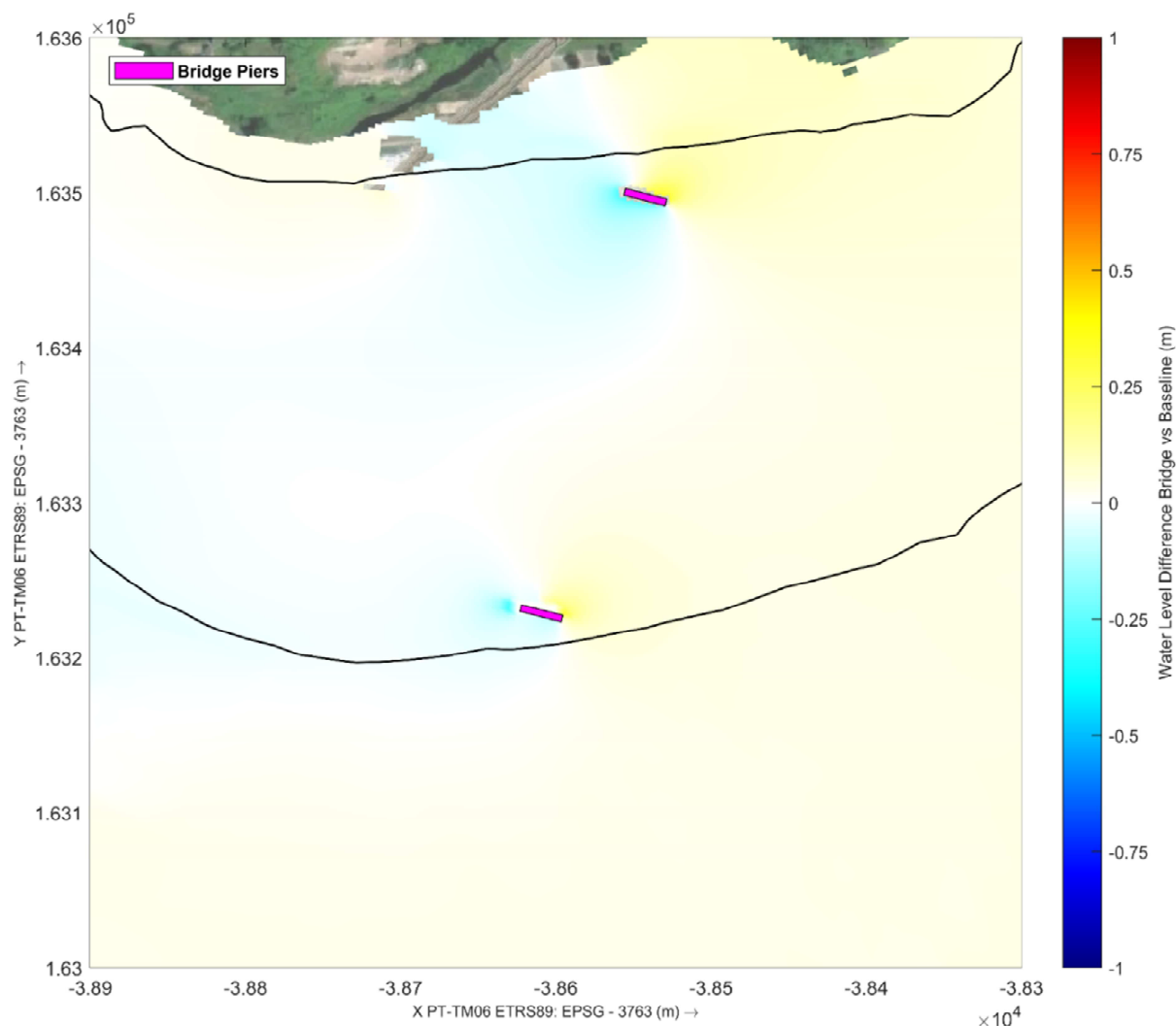


Figura 18 - Diferenças de nível de água: o cenário relativo à ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%.

A Figura 19 apresenta a posição da superfície livre da água ao longo da secção transversal associada à ponte, ilustrando a influência dos pilares. Esses resultados estão em consonância com os anteriormente apresentados na Figura 18, evidenciando uma elevação consistente dos níveis de água ao longo de toda a secção, com diferenças máximas que atingem pouco mais de 0,05 m.

Adicionalmente, a Figura 20 apresenta os perfis longitudinais da superfície livre da água ao longo do eixo central do estuário, para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95%, comparando os cenários de referência e com a ponte rodoferroviária proposta no EIA. Estes resultados reforçam as constatações que foram apresentadas aquando da análise da Figura 18. O impacto dos dois pilares nos níveis de água a jusante da ponte é negligenciável, enquanto a montante se verifica um aumento uniforme que pode ultrapassar ligeiramente 0,05 m.

Os Anexos A3 e A4 apresentam informação complementar sobre as condições de escoamento e níveis de água para os intervalos de confiança de 5% e 95%.

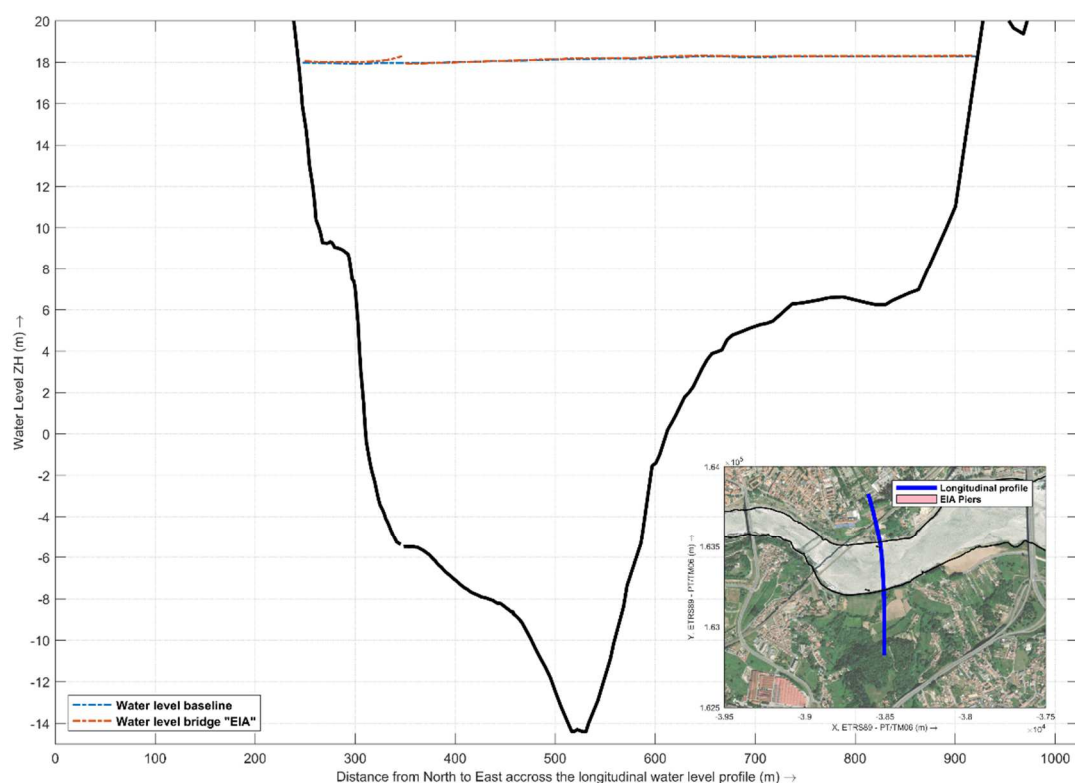


Figura 19 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte para um período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares (EIA).

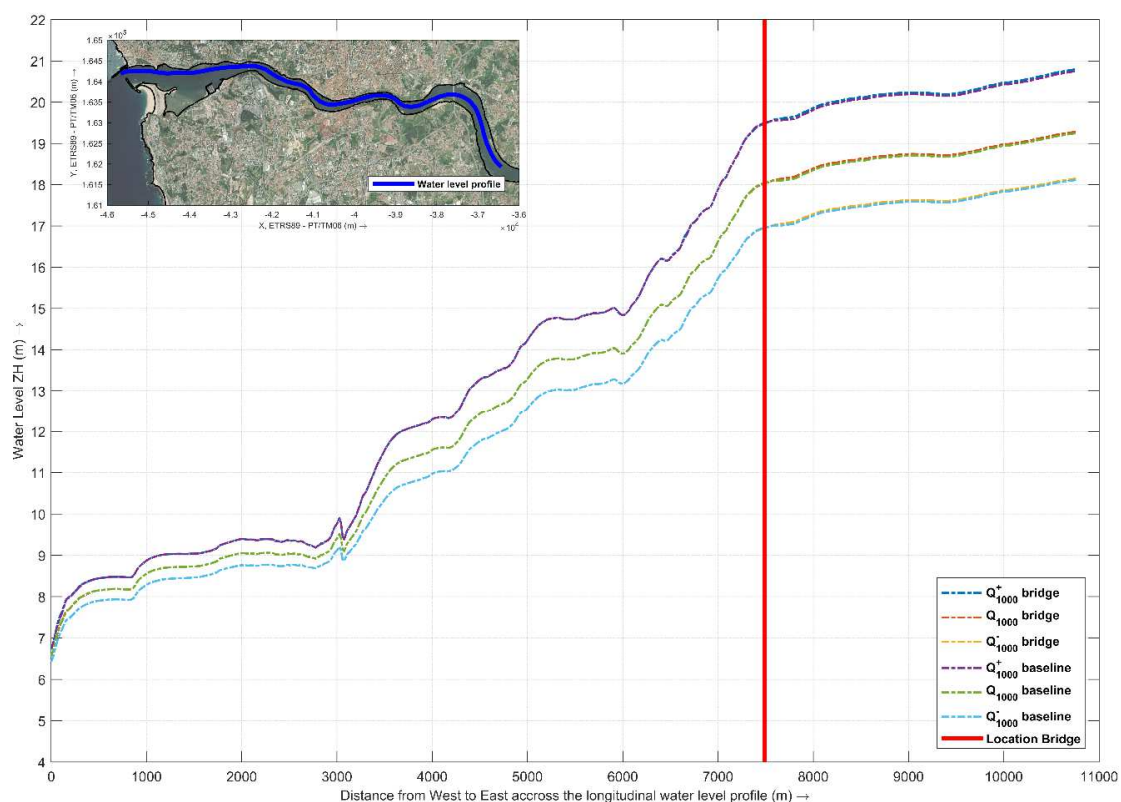


Figura 20 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 1000 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (EIA).

3.3.2 CENÁRIO SOLUÇÃO DE PROJETO

No cenário relativo à proposta apresentada neste Projeto de Execução, a ponte inclui três alinhamentos de pilares no leito principal do rio Douro – dois alinhamentos com os pilares/torres principais e um alinhamento com dois pilares secundários, conforme representado na Figura 21. Os pilares associados às torres T1 e T2 possuem 9,4 m de largura e 19,3 m de comprimento, enquanto os pilares PR10 apresentam uma secção circular de 2 m de diâmetro. Tal como no cenário “EIA”, estes pilares foram modelados no Delft3D-4 como áreas permanentemente secas. A resolução da grelha computacional usada permite representar a geometria dos pilares através de várias células, assegurando assim uma descrição espacial adequada da sua forma e posição no leito do Rio Douro.

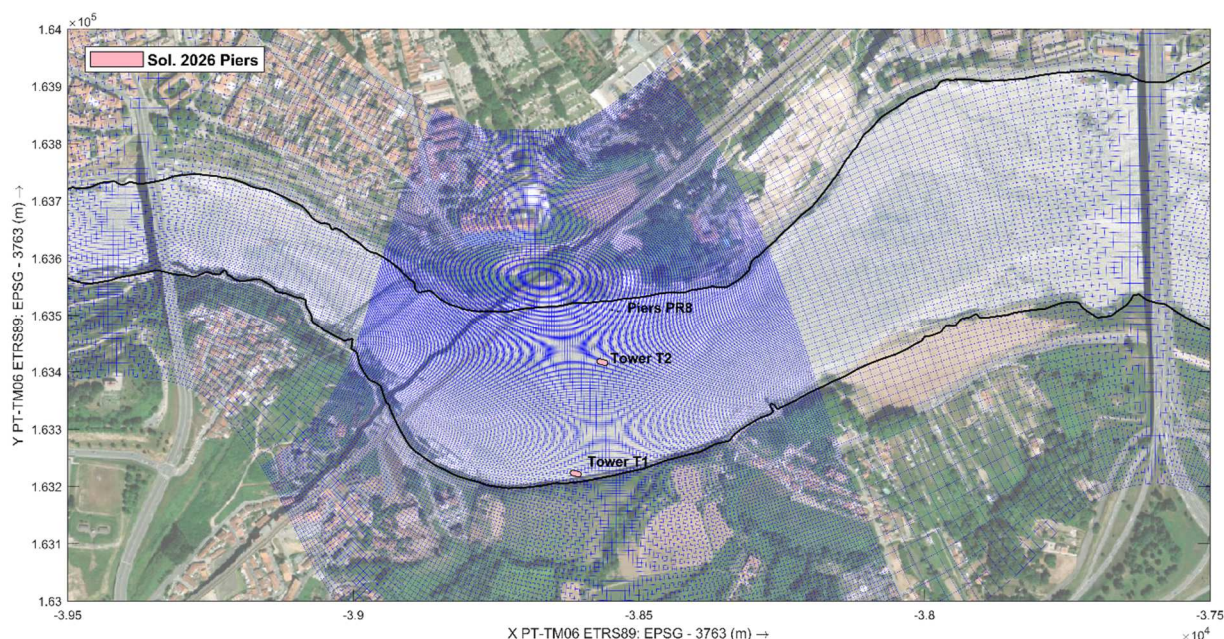


Figura 21 - Localização dos pilares da ponte rodoferroviária para o cenário de Projeto de Execução.

3.3.2.1 Caudal com período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 50%)

A Figura 22 apresenta as condições de escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução. Tal como no cenário “EIA”, as velocidades locais do escoamento na zona da ponte situam-se entre aproximadamente 2,5 e 3,0 m/s. A presença dos pilares provoca alterações localizadas no escoamento na sua proximidade (Figura 23). Neste cenário, observam-se reduções da velocidade do escoamento que podem atingir 1,9 e 2,15 m/s a montante e a jusante da torre T2, respetivamente. No caso do pilar da torre T1 e dos pilares PR10, as reduções de velocidade são significativamente menores, pois estas estruturas encontram-se implantadas mais próximo das margens do rio, atingindo-se reduções máximas de até 1,4 e 1,0 m/s, respetivamente. Por outro lado, observam-se aumentos de velocidade localizadas nos flancos dos pilares e no tramo compreendido entre as torres T1 e T2, que podem atingir valores até 0,4 m/s. Em comparação com o cenário “EIA”, as modificações locais no escoamento são um pouco maiores devido à localização da torre T2 numa posição mais central do leito principal do rio. Ainda assim, importa salientar que estas alterações se verificam apenas em zonas localizadas, tornando-se pouco significativas quando os efeitos são analisados a uma escala global. Por fim, à semelhança dos casos anteriores, os resultados mostram um padrão de escoamento simétrico na zona de esteira dos pilares, não reproduzindo fielmente as oscilações características do escoamento turbulento a jusante dos mesmos.

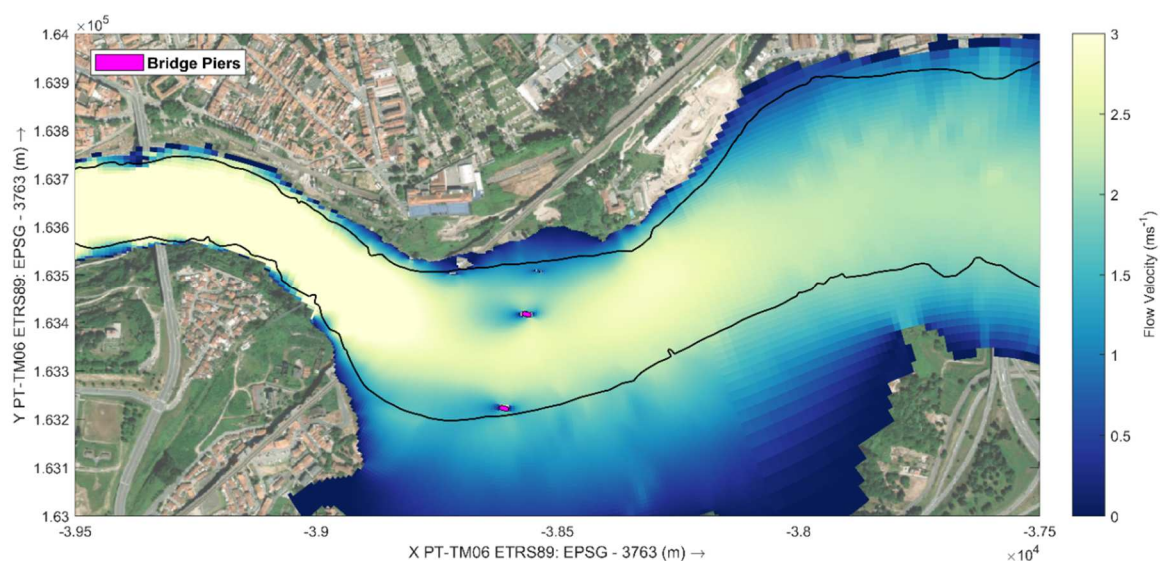


Figura 22 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

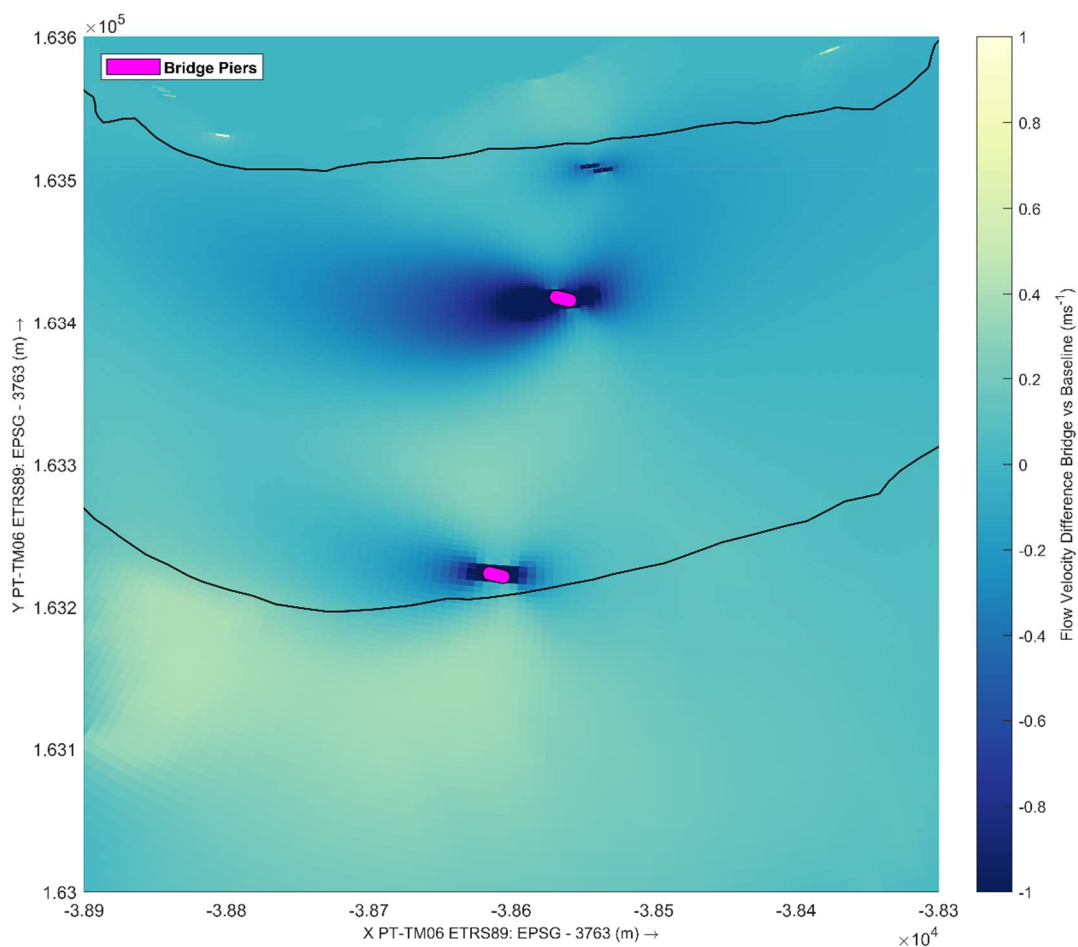


Figura 23 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%).

Tal como referido anteriormente, para o cenário de referência, os níveis de água na zona da ponte atingem, no máximo, 14,8 m ZH (Figura 24), o que corrobora os estudos realizados anteriormente. Comparando os cenários com e sem ponte (Figura 25), verifica-se que a presença dos pilares provoca um aumento local do nível de água a montante, devido à obstrução do escoamento, com diferenças que podem atingir no máximo 0,52 m.

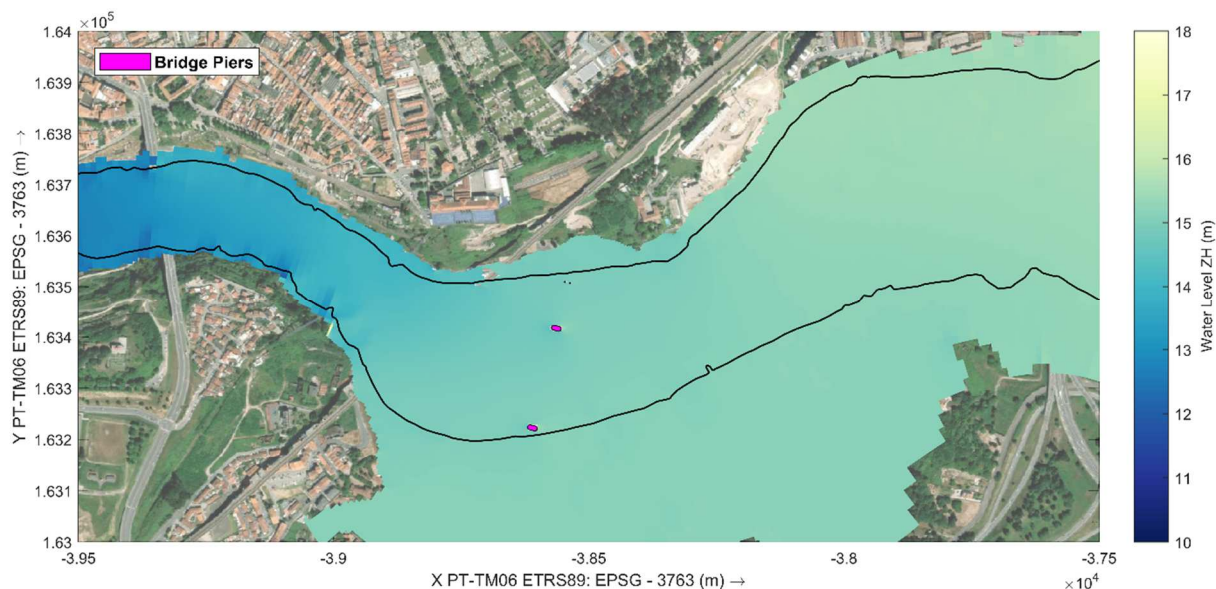


Figura 24 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

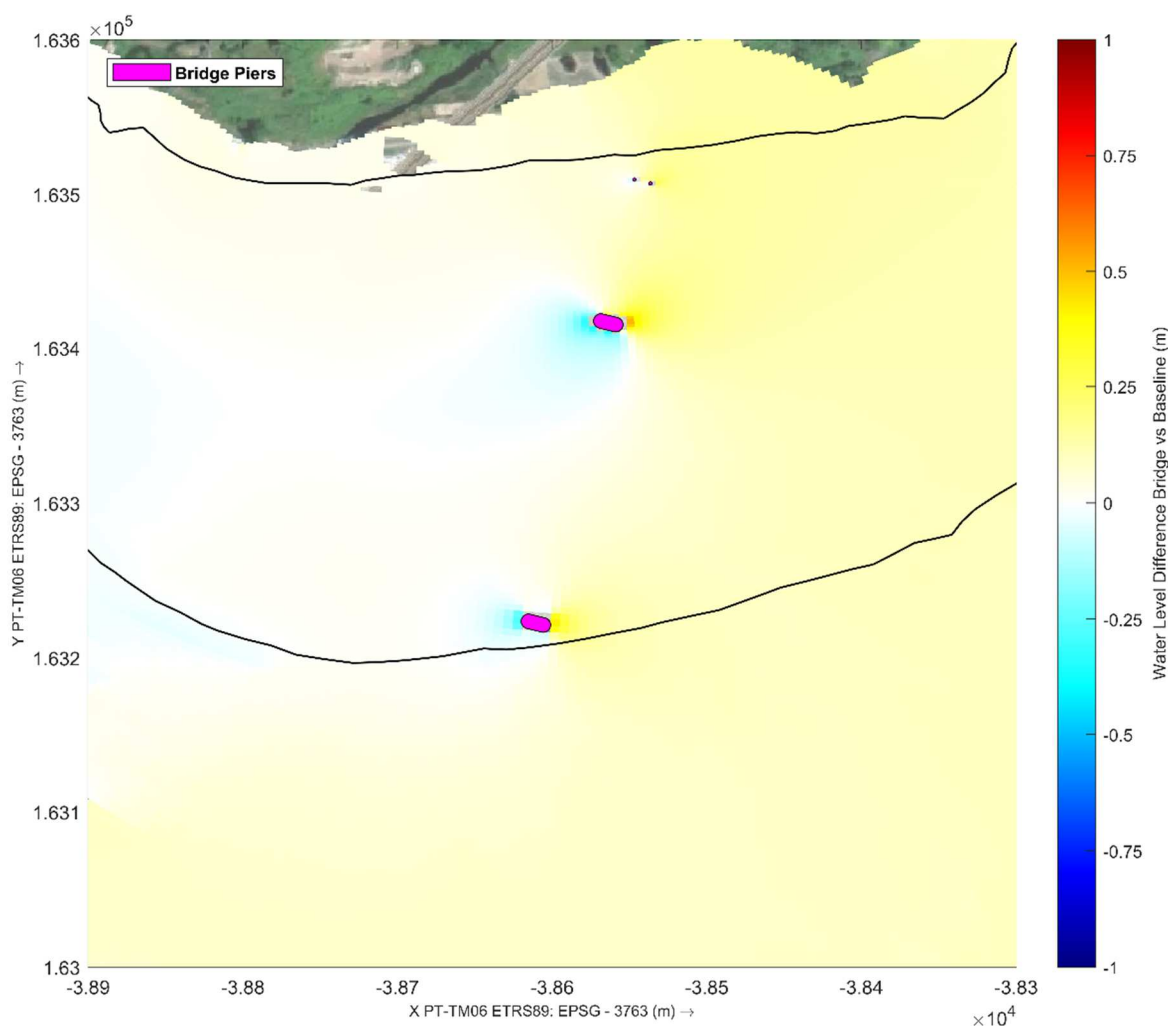


Figura 25 - Diferenças de nível de água: cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 50%.

A jusante da ponte observa-se uma ligeira redução do nível da água, até 0,32 m, associada à aceleração do escoamento fluvial ao contornar os pilares. Mais a montante, *i.e.*, para lá da área de influência direta dos pilares, ocorre um aumento praticamente uniforme do nível da água de aproximadamente 0,105 m. Em comparação com a configuração relativa ao “EIA”, constata-se que o impacto no nível de água é maior para este cenário, o que se justifica pela maior obstrução do escoamento resultante da localização e maior número de pilares no leito do rio da solução de Projeto de Execução. Importa novamente referir que essas modificações ocorrem em áreas muito localizadas e perdem relevância quando se analisam os efeitos globalmente.

A Figura 26 compara a posição da superfície livre da água na secção referente à ponte rodoferroviária, evidenciando os efeitos dos pilares no escoamento fluvial. Os resultados obtidos estão em concordância com os apresentados nas figuras anteriores, mostrando que os pilares provocam um aumento consistente do nível de água em toda a secção transversal, com diferenças que podem atingir 0,12 m. Adicionalmente, a Figura 27 mostra os perfis longitudinais da superfície livre da água ao longo do eixo central do estuário, desde a foz até uma secção a montante da ponte, para o caudal com um período de retorno de 100 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95%, comparando o cenário de referência com o da ponte. De forma geral, os resultados confirmam as tendências apresentadas na Figura 10. A jusante da ponte, o impacto nos níveis de água é negligenciável, enquanto a montante se observa um aumento uniforme do nível da água que pode

chegar a 0,11 m. Informações adicionais sobre as condições de escoamento e níveis de água para os intervalos de confiança de 5% e 95% podem ser consultadas nos Anexos B1 e B2.

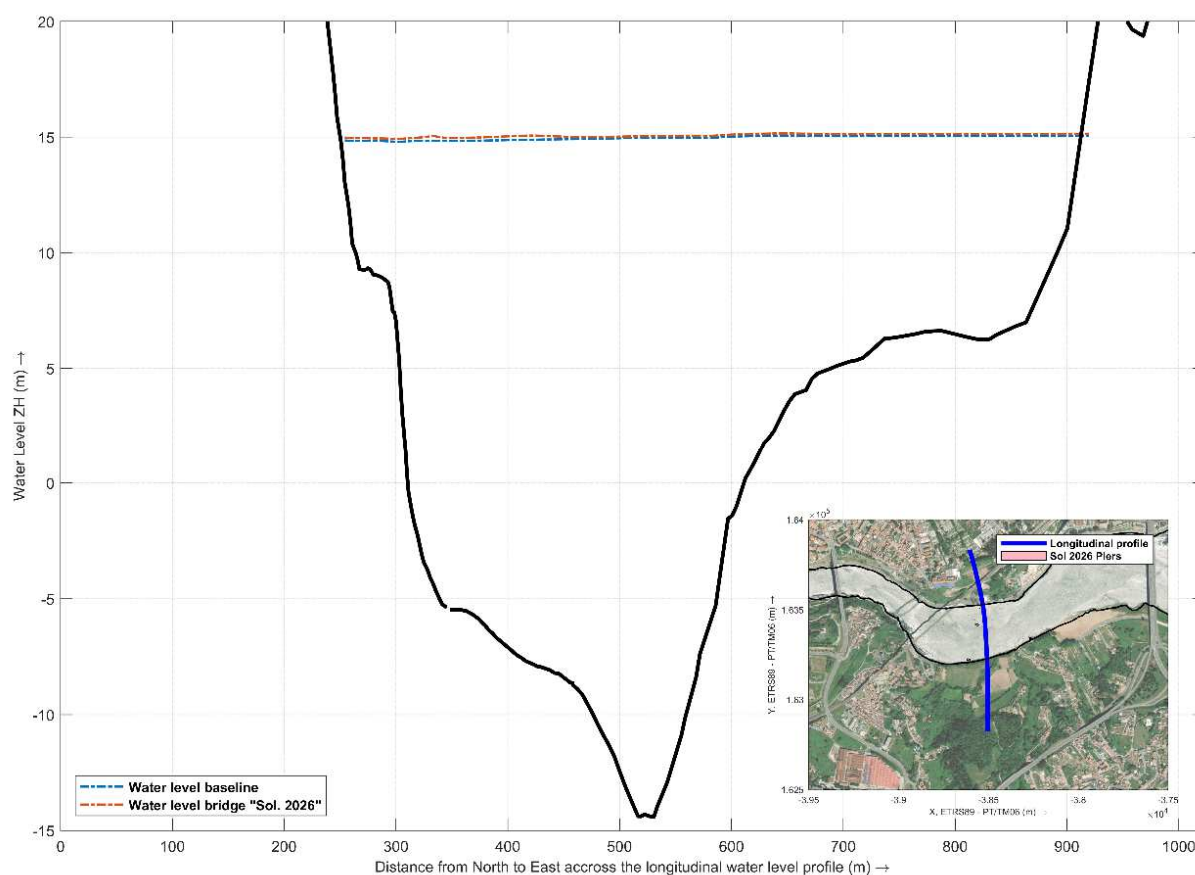


Figura 26 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte rodoferroviária para um período de retorno de 100 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares (Solução de Projeto de Execução).

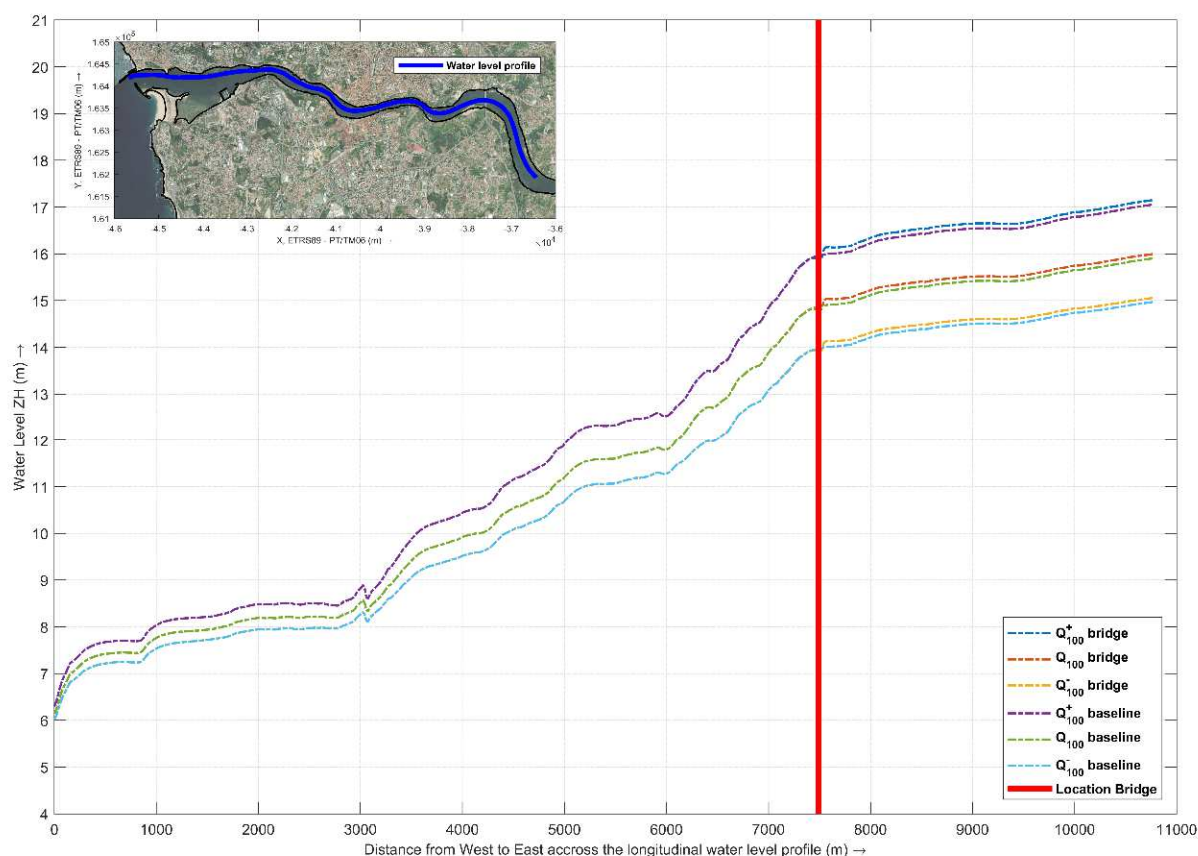


Figura 27 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 100 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (Solução de Projeto).

3.3.2.2 Caudal com período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 50%)

A Figura 28 apresenta a distribuição espacial da velocidade do escoamento para o cenário com a ponte. Tal como no cenário relativo ao “EIA”, as velocidades na zona da ponte variam, geralmente, entre 3,0 e 3,5 m/s. A presença dos pilares introduz alterações no campo de velocidades nas suas imediações (Figura 29). De forma semelhante ao cenário correspondente a um caudal com período de retorno de 100 anos, a maior atenuação de velocidade verifica-se no elemento implantado na posição mais central do rio (torre T2), onde se registam reduções que podem atingir cerca de 2,4 e 2,6 m/s, a montante e a jusante do pilar, respetivamente. Nos apoios posicionados mais próximos das margens, o efeito é menos expressivo, com reduções compreendidas entre aproximadamente 1,56 (torre T1) e 1,23 m/s (pilares PR10). Em contraste, desenvolvem-se zonas de aceleração ao longo dos flancos dos pilares e no espaço entre as torres T1 e T2, onde os incrementos de velocidade podem atingir valores entre cerca de 0,5 e 0,6 m/s. A magnitude destas modificações é ligeiramente superior à observada na configuração relativa ao cenário “EIA”. Por fim, tal como nas situações analisadas anteriormente, a esteira criada pelos dois pilares tem um padrão de escoamento simétrico, não captando fielmente as oscilações características do escoamento turbulento que normalmente ocorrem a jusante dos pilares de uma ponte.

Neste cenário, o nível de água na zona da ponte rodoferroviária pode atingir 18,0 m ZH (Figura 30). Ao comparar os cenários com e sem a ponte (Figura 31), verifica-se que a introdução dos pilares provoca uma subida local do nível de água a montante até 0,67 m, atribuída à obstrução do

escoamento criada pelos pilares. A jusante, a aceleração do escoamento em torno dos pilares origina uma diminuição da cota da superfície livre da água, com diferenças que podem chegar a 0,41 m.

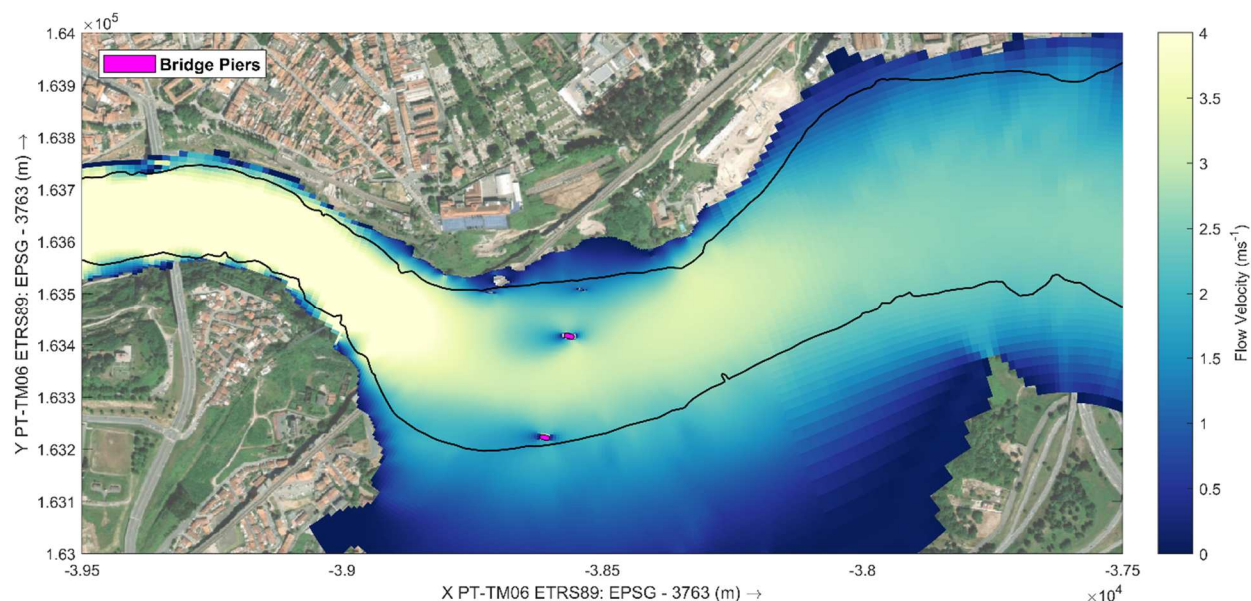


Figura 28 - Velocidade do escoamento para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

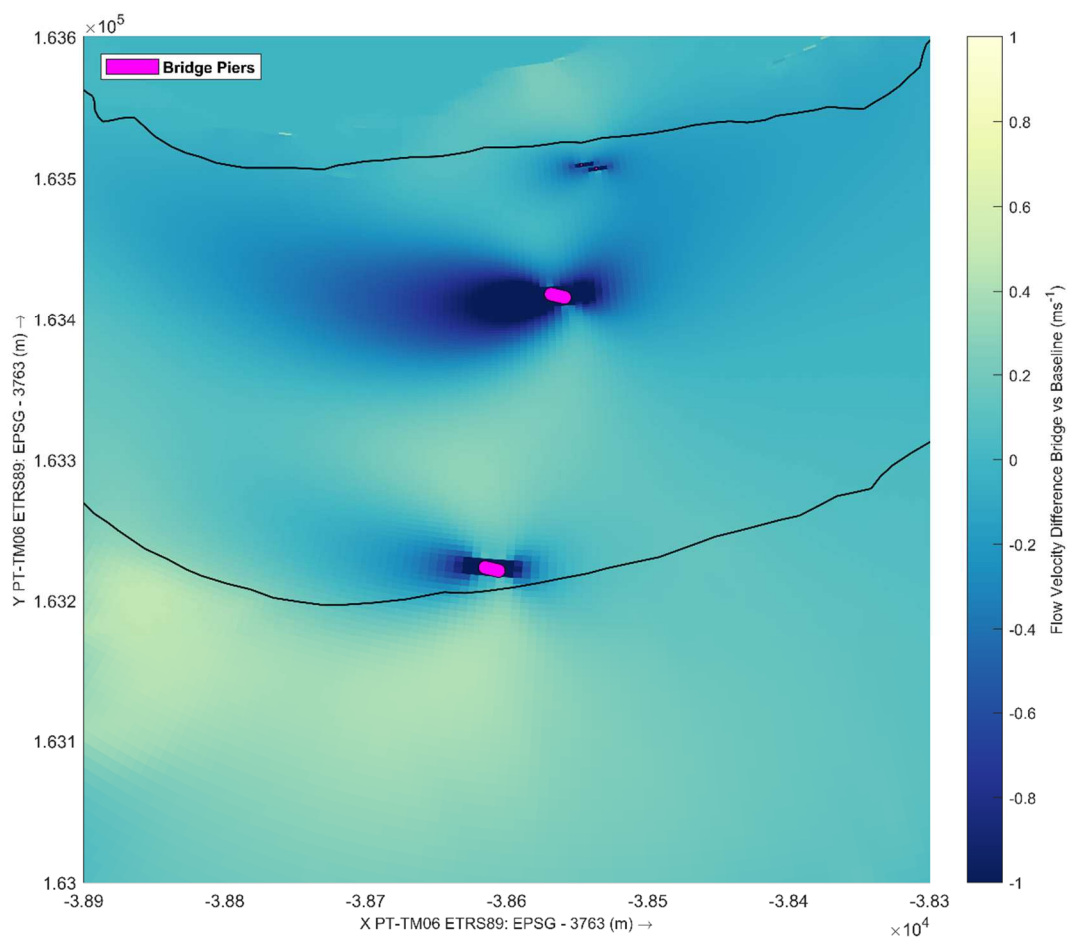


Figura 29 - Diferenças na velocidade do escoamento entre o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%).

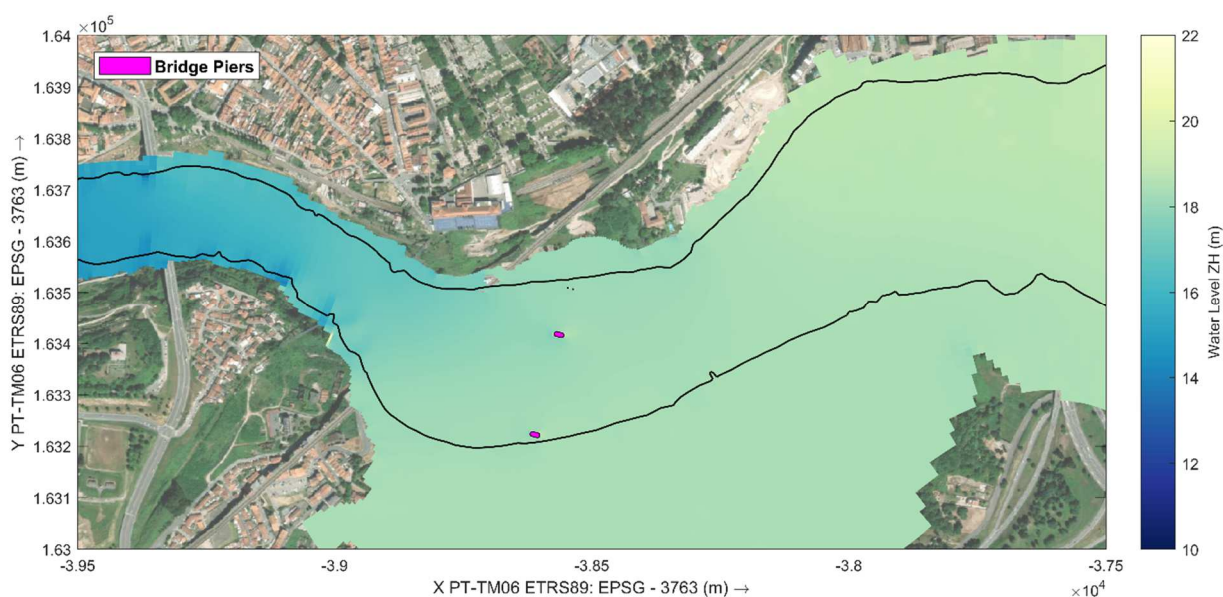


Figura 30 - Nível de água para o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 50%.

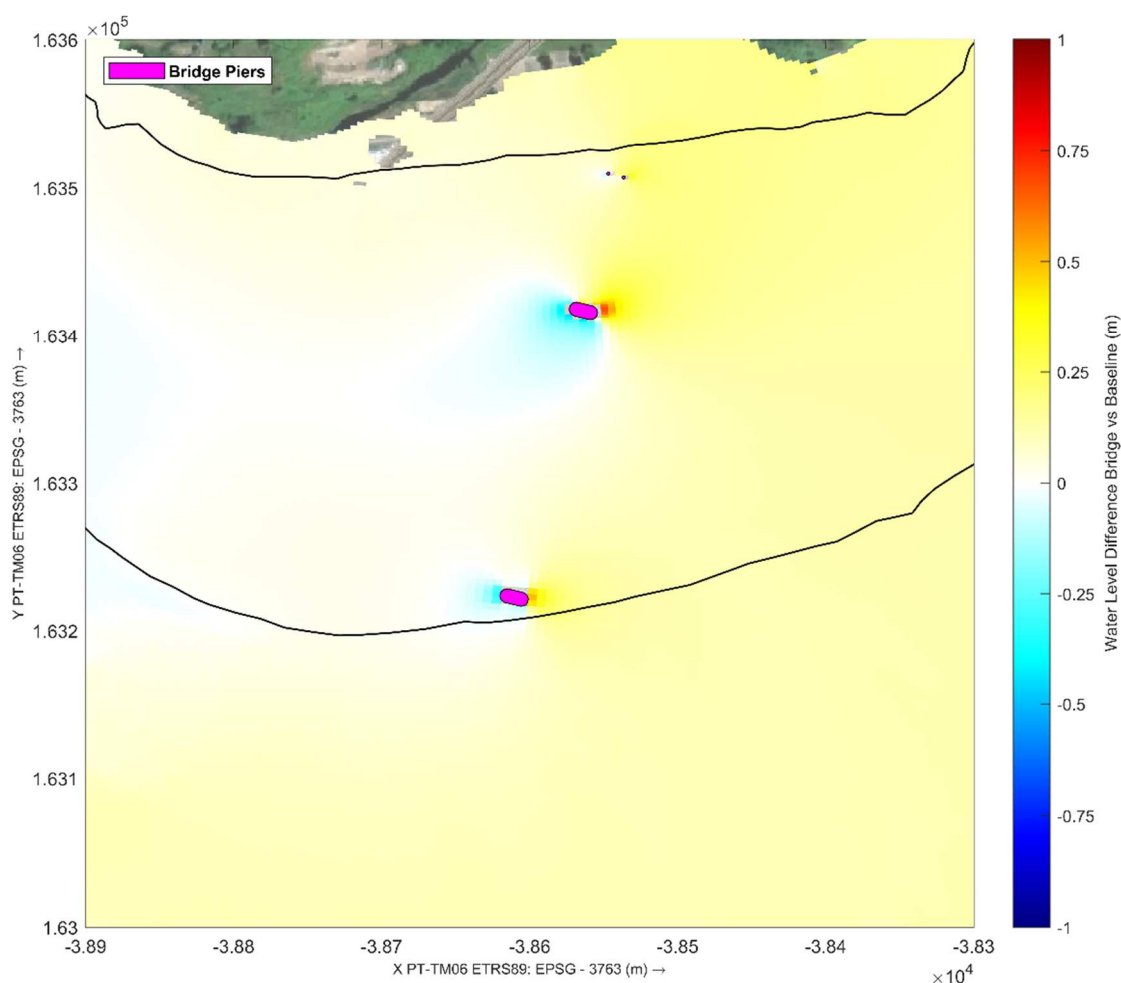


Figura 31 - Diferenças de nível de água: o cenário relativo à ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 50%.

Para além dos efeitos referidos na zona de influência direta dos pilares, mais a montante, é detetado um aumento mais moderado e uniforme do nível da água, que poderá ser um pouco superior a 0,13 m. Em termos globais, o impacto hidrodinâmico associado à construção da nova ponte rodoferroviária nos níveis de água é ligeiramente superior ao observado anteriormente para o cenário “EIA”, devido principalmente à maior obstrução do escoamento fluvial proporcionada pela configuração proposta no cenário de Projeto de Execução. Pese embora o referido, essas diferenças perdem relevância quando se analisam os efeitos globalmente.

A Figura 32 apresenta a posição da superfície livre da água ao longo da secção transversal associada à ponte, ilustrando a influência dos pilares. Esses resultados estão em consonância com os anteriormente apresentados na Figura 31, evidenciando uma elevação consistente dos níveis de água ao longo de toda a secção, com diferenças máximas que atingem pouco mais de 0,14 m. Adicionalmente, a Figura 33 apresenta os perfis longitudinais da superfície livre da água ao longo do eixo central do estuário, para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95%, comparando o cenário de referência com o cenário relativo à ponte rodoferroviária. Estes resultados reforçam as constatações efetuadas aquando da análise da Figura 31. O impacto dos dois pilares sobre os níveis de água a jusante da ponte é negligenciável, enquanto a montante se verifica um aumento uniforme que pode chegar até 0,15 m. Os Anexos B3 e B4 apresentam informação complementar sobre as condições de escoamento e níveis de água para os intervalos de confiança de 5% e 95%.

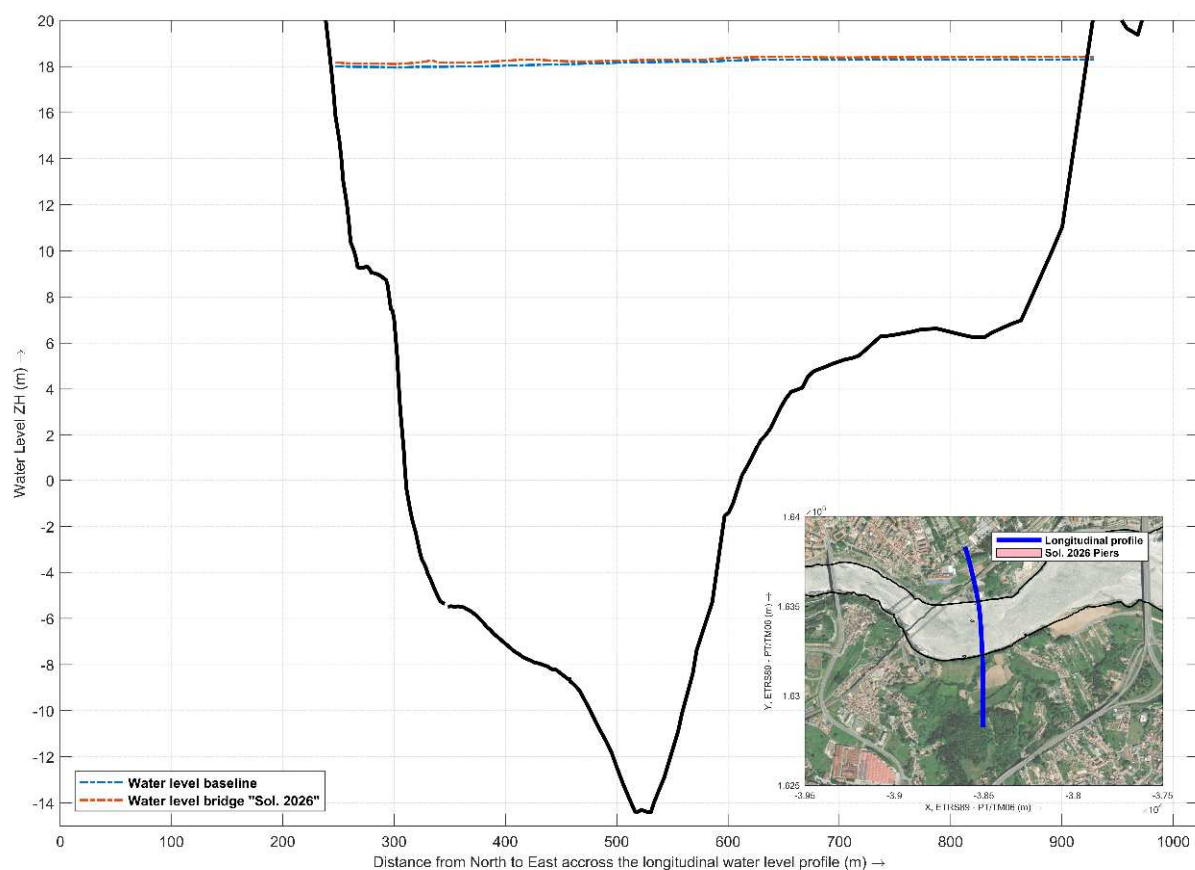


Figura 32 - Diferenças de nível de água na secção transversal relativa à ponte para um período de retorno de 1000 anos (intervalo de confiança de 50%). Cenário de referência e cenário com os pilares de Projeto de Execução.

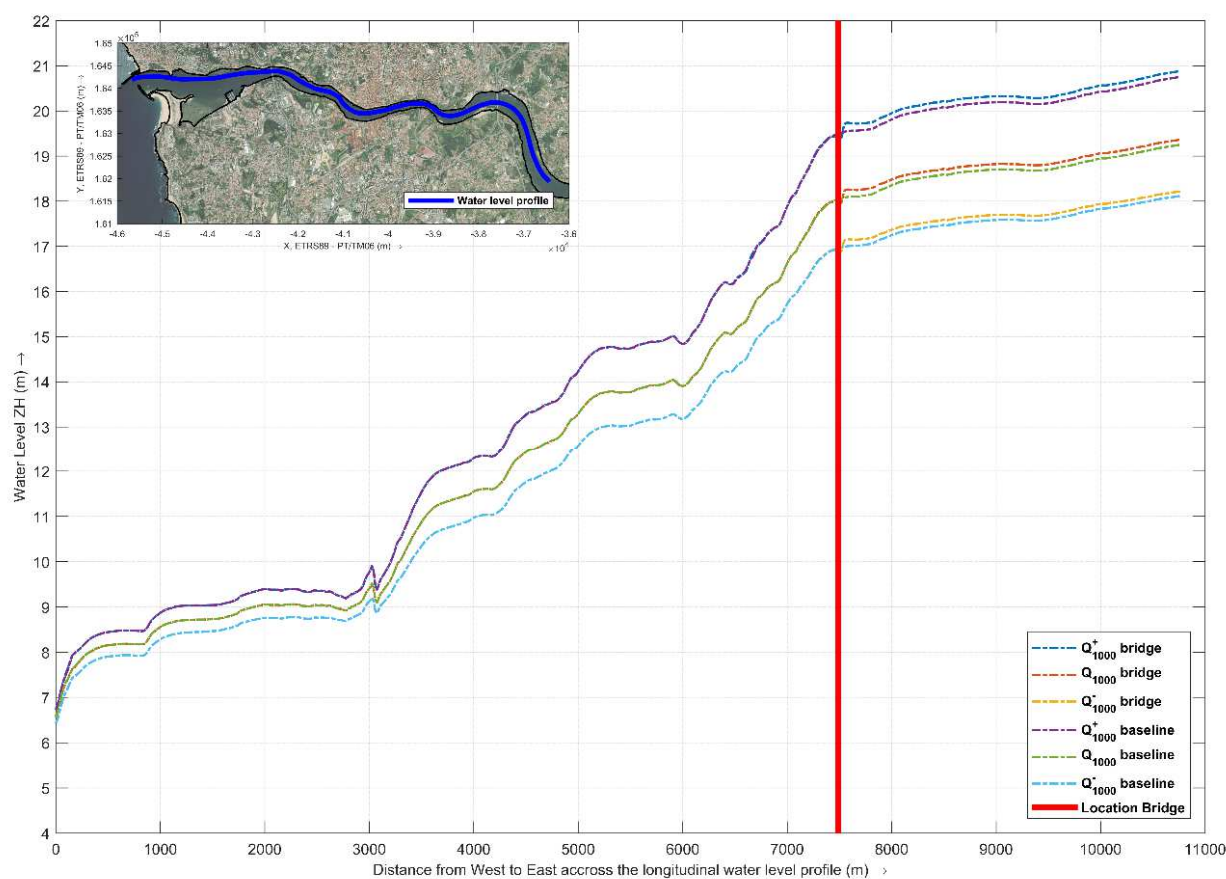


Figura 33 - Perfil longitudinal do nível de água ao longo do eixo do rio para um caudal com um período de retorno de 1000 anos e para os intervalos de confiança de 5%, 50% e 95% (Sol. de Projeto de Execução).

4 CONCLUSÕES

A avaliação dos efeitos associados à construção de uma nova travessia rodoferroviária no Rio Douro, nas velocidades locais do escoamento e nos níveis de água, foi realizada através da modelação hidrodinâmica. Foram analisadas duas alternativas tendo como base a situação atual (i.e., cenário de referência): a primeira, designada cenário “EIA”, integra as vias ferroviária (nível superior) e rodoviária (nível inferior), numa única estrutura/ponte, apresentando dois pilares no leito do rio; a segunda, mais recente e designada cenário de Projeto de Execução, caracteriza-se igualmente por integrar as duas vias numa única estrutura, prevendo, neste caso, um vão central de menor dimensão, resultando em três alinhamentos de apoio no leito do rio, dois de maior dimensão, um junto à margem esquerda e outro entre o canal de navegação e a margem direita, e um terceiro apoio de dimensões muito reduzidas e mais afastado do canal de navegação do Rio Douro, junto à margem direita. Entre outros aspetos, a escolha desta solução resultou de uma conceção que atende aos requisitos do caderno de encargos, mas no que respeita à afectação do rio Douro durante a construção da obra é uma solução francamente muito menos intrusiva uma vez que na solução do cenário “EIA” estavam previstas soluções construtivas de fundações provisórias no leito de rio de grande porte, o que se consegue minimizar com a solução do cenário “de Projeto de Execução” agora projetada.

Para este fim, foi utilizado o modelo hidrodinâmico *open-source* de última geração Delft3D-4 (modelo de grelha estruturada). Após uma série de simulações iniciais, o modelo foi implementado com recurso a uma abordagem de decomposição de domínio, o que permitiu aumentar a resolução da grelha na proximidade das pontes em estudo. O modelo foi calibração tendo por base a informação e dados do estudo numérico previamente realizado pelo IHRH (2019), tendo-se garantido uma concordância muito satisfatória entre os resultados dos dois modelos. Uma vez implementado, o modelo numérico foi utilizado para caracterizar as condições hidrodinâmicas de referência e avaliar os efeitos potenciais dos pilares das novas pontes para caudais extremos com períodos de retorno de 100 (cheia centenária) e 1000 anos (cheia milenar), considerando os intervalos de confiança associados os percentis 5%, 50% e 95%.

É importante salientar que os resultados apresentados neste relatório devem ser considerados como uma primeira aproximação aos efeitos dos pilares no escoamento fluvial, tendo em conta as limitações inerentes à utilização deste tipo de modelos numéricos. Com efeito, o modelo não permite representar com suficiente rigor alterações morfológicas locais junto aos pilares. Para esse tipo de análise, é recomendado o uso de ferramentas com maior flexibilidade na definição da malha, permitindo assim maior resolução espacial em torno de estruturas complexas (e.g., modelo HEC-RAS ou Delft3D-FM). Assim, o estudo de caracterização da dinâmica da erosão do leito do rio, complementar ao presente estudo, foi realizado com o modelo HEC-RAS (ver relatório específico desse estudo).

Com base nos resultados obtidos neste estudo, podem retirar-se as seguintes conclusões principais:

- O modelo Delft3D é capaz de representar com suficiente precisão as condições hidrodinâmicas de referência. Os resultados obtidos apresentam uma concordância qualitativa muito satisfatória com os resultados do modelo Open-TELEMAC aplicado pelo IHRH (2019), em termos de velocidades do escoamento, níveis de água e extensão das áreas inundadas para o caudal com um período de retorno de 100 anos.
- A presença dos pilares provoca alterações relevantes no campo de velocidades local, sobretudo na sua envolvente e apenas em zonas muito localizadas. Devido à obstrução criada, os pilares reduzem as velocidades do escoamento a montante e a jusante (até 2.9 m/s), desviando lateralmente o escoamento fluvial, o que produz aumentos localizados de velocidade (até 0.7 m/s). No entanto, essa esteira turbulenta dissipa-se rapidamente e o

escoamento tende a recuperar as características originais algumas dezenas de metros a jusante.

- A comparação dos resultados obtidos para os cenários de Projeto de Execução e “EIA” mostra que o impacto no escoamento é menor neste último, o que se poderá justificar pela menor obstrução ao escoamento devido ao menor número de pilares no leito do rio, e pela sua localização mais próxima das margens, onde as velocidades do escoamento fluvial são inferiores. Importa, no entanto, fazer notar que essas modificações ocorrem em áreas localizadas e perdem relevância quando se analisam os efeitos globalmente.
- No que diz respeito ao impacto dos pilares nos níveis de água, é possível identificar dois padrões distintos. Na zona mais próxima, a desaceleração do escoamento a montante do pilar provoca uma elevação do nível da água, enquanto a aceleração observada nas laterais do pilar origina uma ligeira depressão. Imediatamente a jusante, a separação do escoamento na zona da esteira provoca um novo abaixamento local. Este comportamento traduz-se num padrão característico de elevação da superfície da livre água (até 0,52 m) a montante do pilar e de depressão ligeira (até 0,32 m) a jusante. A jusante da ponte, os efeitos nos níveis de água são desprezáveis. A montante, contudo, verifica-se a criação de uma “curva de regolfo”, que conduz a um aumento do nível de água: até 0,05 m no cenário “EIA” e até 0,11 m no cenário de Projeto de Execução, para a cheia centenária. Tal como no campo de velocidades, o cenário “EIA” tem um impacto hidrodinâmico menor nos níveis da superfície livre da água, devido sobretudo ao menor número de pilares, à sua geometria esbelta e à sua colocação mais próximo das margens.

REFERÊNCIAS

Carvalho, I. (2013). Impactes do Storm Surge em Portugal Continental. Tese de Mestrado, Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, Universidade de Lisboa.

Iglesias, I., Venâncio, S., Pinho, J. L., Avilez-Valente, P., & Vieira, J. M. P. (2019). Two models solutions for the Douro estuary: Flood risk assessment and breakwater effects. *Estuaries and Coasts*, 42, 348-364.

IH (2017). Tabelas de Marés. Instituto Hidrográfico, Lisboa.

IHRH, 2017. Delimitação das zonas inundáveis, nas margens direita e esquerda do rio Douro, entre a Embocadura e a Marina do Freixo. Relatório Técnico. Administração dos Portos do Douro, Leixões e Viana do Castelo. Relatório Técnico. FEUP, abril de 2017. 44p.

IHRH, 2019. Elaboração do Programa Preliminar e Estudos Auxiliares para o Lançamento do Concurso Público de Conceção da Ponte D. António Francisco dos Santos e Acessos. Estudos Hidráulicos. Relatório Preliminar. FEUP, novembro de 2019. 4p.

Liu, X., Chen, Q. S., Zeng, Z. N., & Dong, Z. (2024). Optimisation of Bridge Pier Winding Flow Numerical Simulation Scheme Based on Delft3D. *Water*, 16(15), 2079.

Reis J.M. (2005). Caracterização da Maré do Porto de Leixões. Relatório PT OC 05/05, Proj. OC 22 RM03, Instituto Hidrográfico, Lisboa.

ANEXOS

ANEXO A: RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO – CENÁRIO EIA

A.1 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 5%)

A Figura A-1 e a Figura A-2 apresentam as condições de escoamento para as configurações de referência e com ponte. Na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento variam geralmente entre 2,5 e 3,0 m/s para o caudal especificado. Mais a jusante, o canal do rio estreita-se, concentrando o escoamento e resultando num aumento acentuado da velocidade, com valores que ultrapassam os 4,6 m/s.

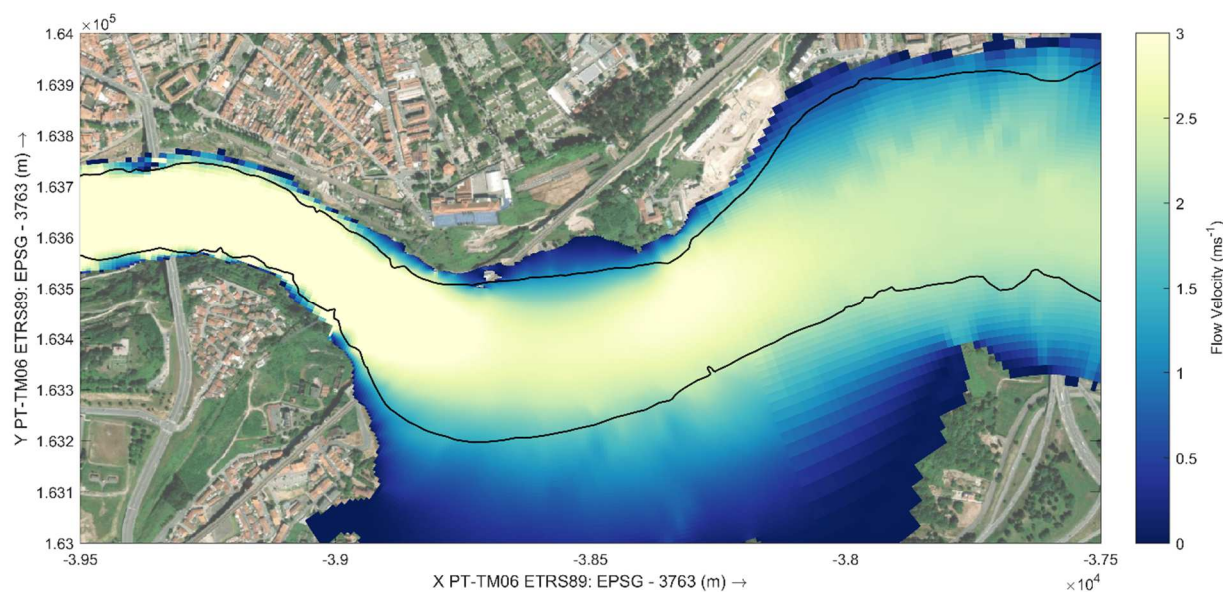


Figura A-1: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

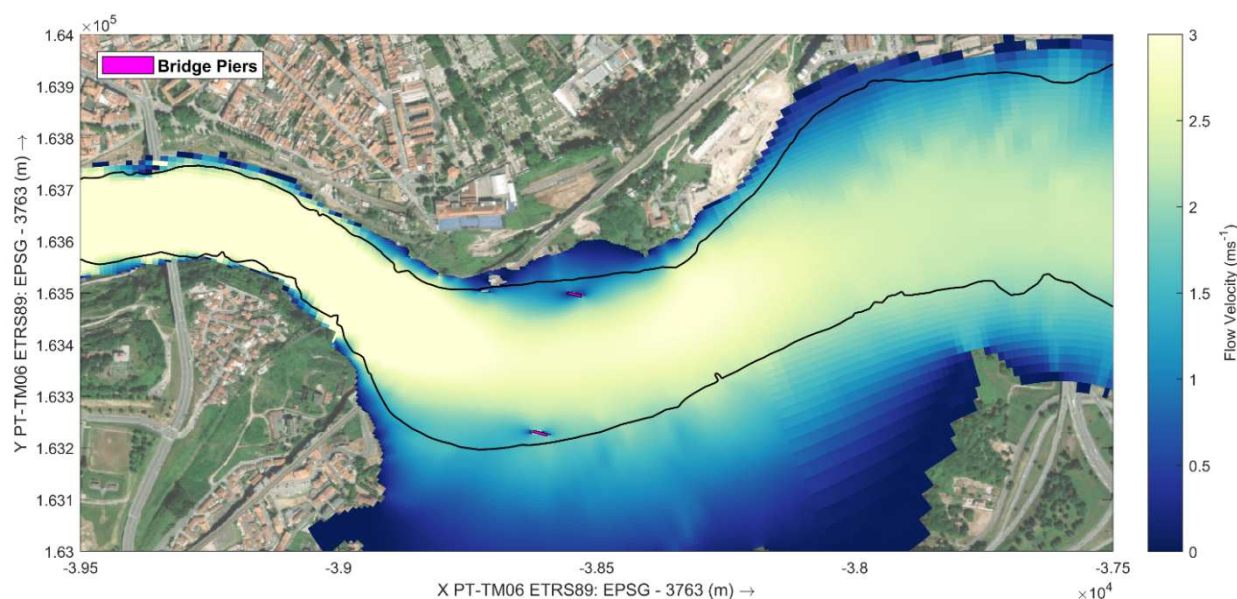


Figura A-2: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rododiferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

A presença dos pilares da ponte provoca alterações localizadas no campo de escoamento nas imediações das estruturas (Figura B-27). Neste cenário, observam-se reduções de velocidade de até 1,31 m/s a montante e a jusante dos pilares, enquanto a aceleração localizada em torno dos seus flancos conduz a aumentos de velocidade que podem atingir 0,28 m/s.

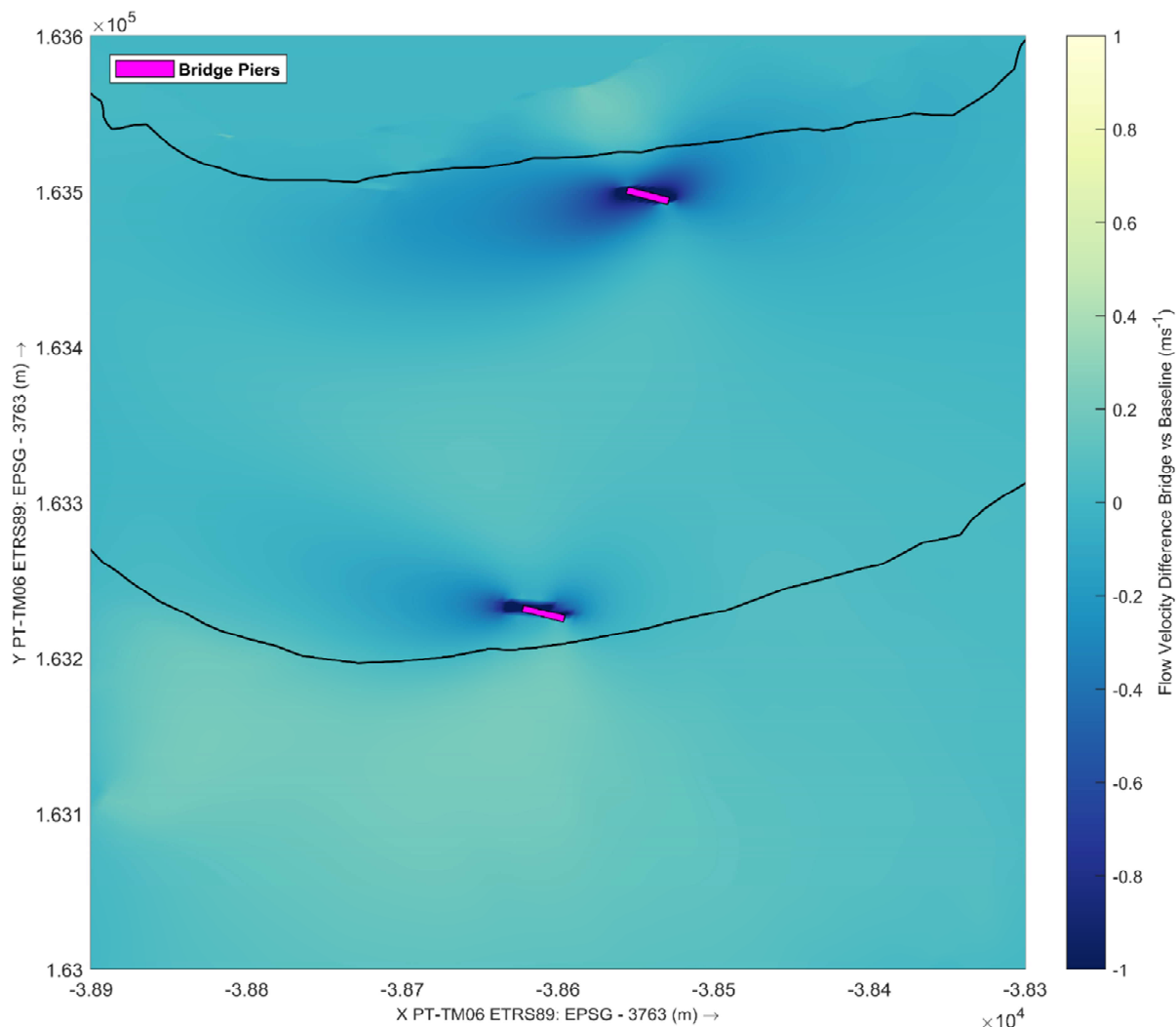


Figura A-3: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%).

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada tanto para o cenário de referência (Figura A-4) como para o cenário com ponte (Figura A-5). De forma geral, os níveis de água na zona da ponte atingem a cota 16,0 m ZH. Comparando os cenários com e sem ponte (Figura A-6), verifica-se que a presença dos pilares introduz um aumento local dos níveis de água a montante, devido à obstrução do escoamento, com diferenças máximas que atingem 0,31 m.

Por outro lado, a jusante dos pilares observa-se uma ligeira diminuição da cota da superfície livre da água, de até 0,26 m, à medida que o escoamento acelera ao contornar e ultrapassar a restrição imposta pelos pilares. Adicionalmente, verifica-se um aumento uniforme do nível de água de aproximadamente 4,5 cm a montante da zona de influência direta, evidenciando um ajustamento hidráulico a maior escala em resposta à presença dos pilares.

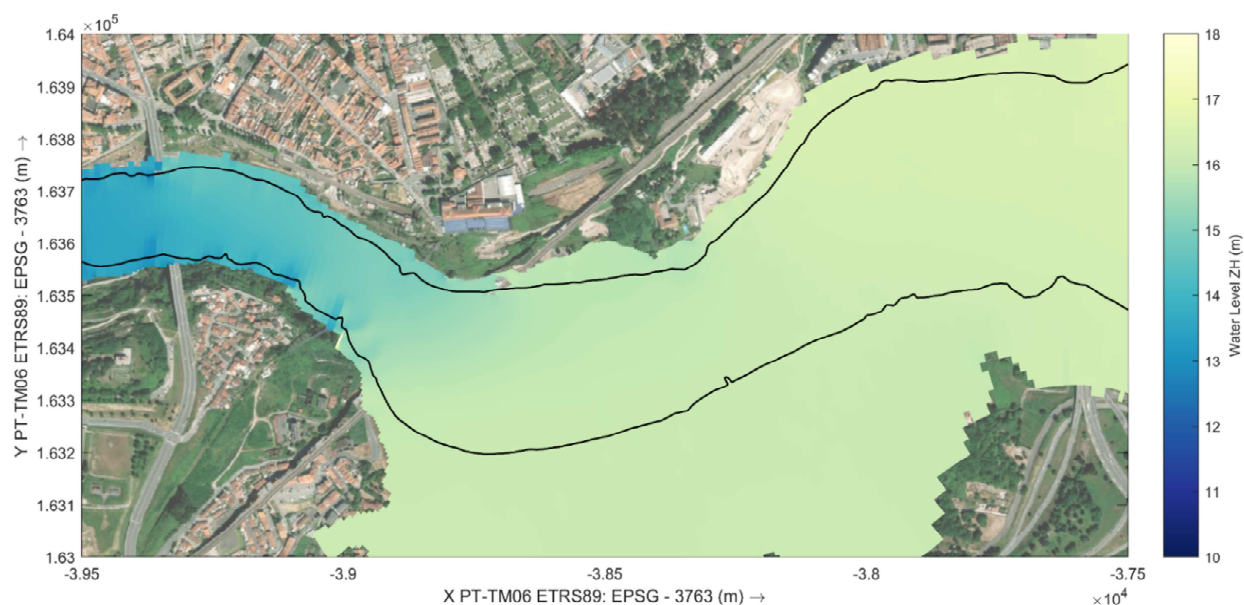


Figura A-4: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

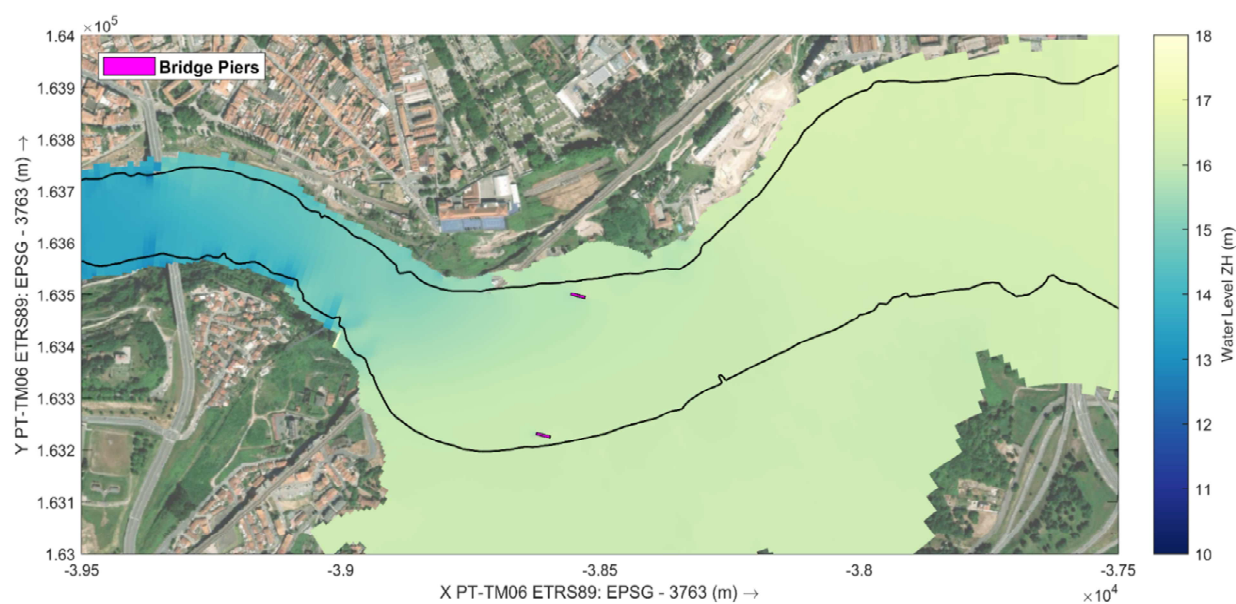


Figura A-5: Nível de água para o cenário com a ponte rododiferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

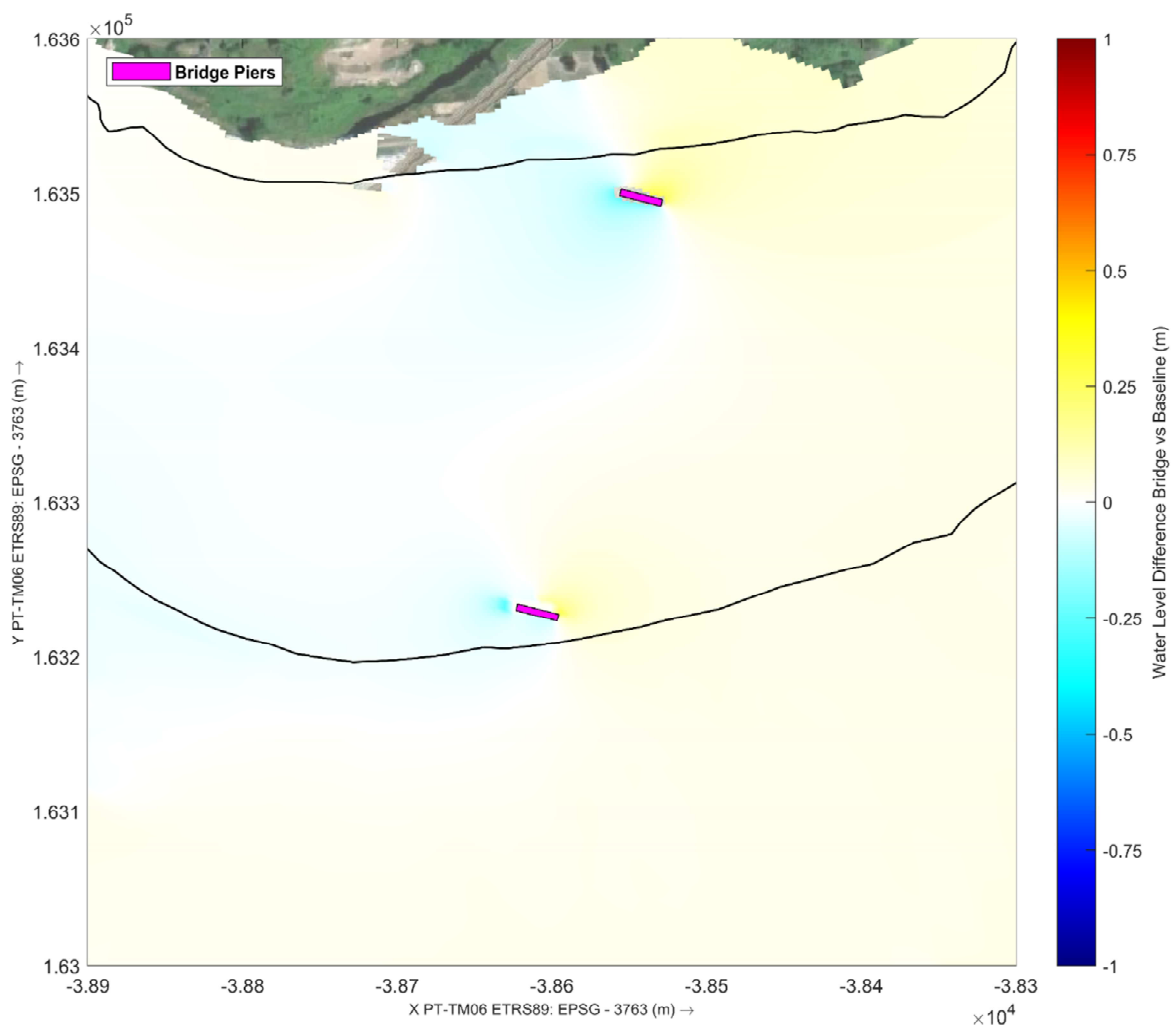


Figura A-6: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%.

A.2 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%)

A Figura A-7 e Figura A-8 apresentam as condições de escoamento para os cenários de referência e com ponte, respetivamente. Na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento situam-se, geralmente, entre 2,0 e 2,5 m/s para o caudal associado à cheia centenária. Mais a jusante, a secção do rio estreita-se, canalizando o escoamento e originando um aumento mais acentuado da velocidade, com valores que podem atingir 4,0 m/s.

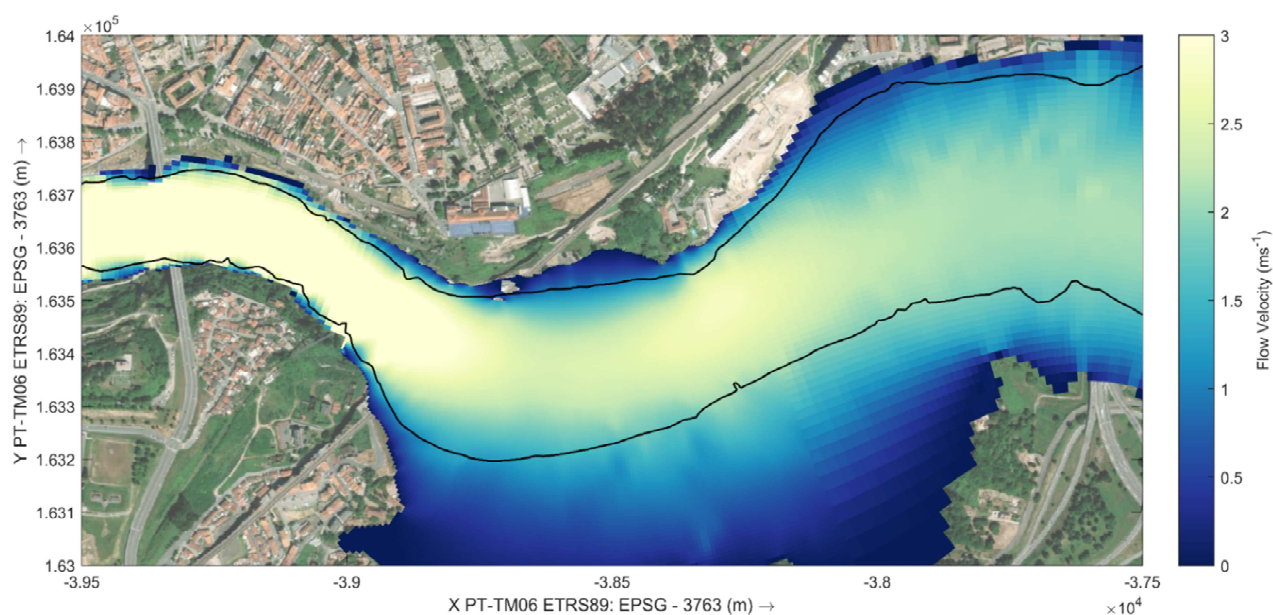


Figura A-7: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

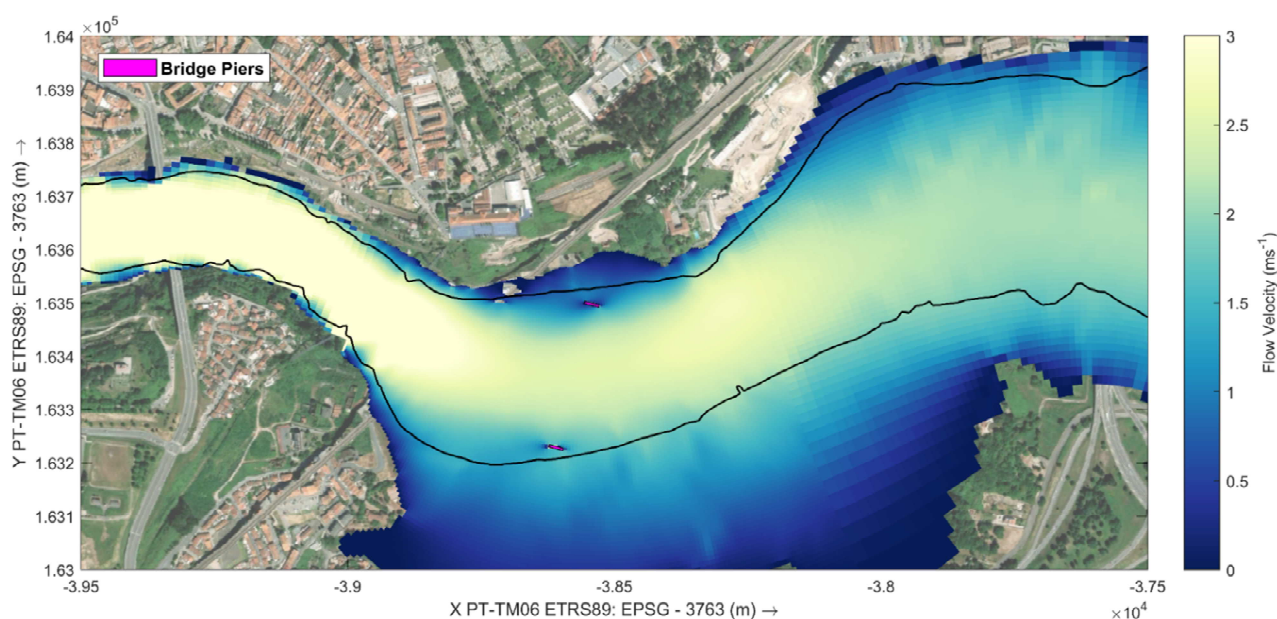


Figura A-8: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

A presença dos pilares da ponte provoca alterações localizadas no campo de escoamento nas imediações das estruturas (Figura B-9). Neste cenário, observam-se reduções de velocidade de até 1,30 m/s a montante e jusante dos pilares, enquanto a aceleração localizada em torno dos seus flancos origina aumentos de velocidade que podem atingir 0,22 m/s.

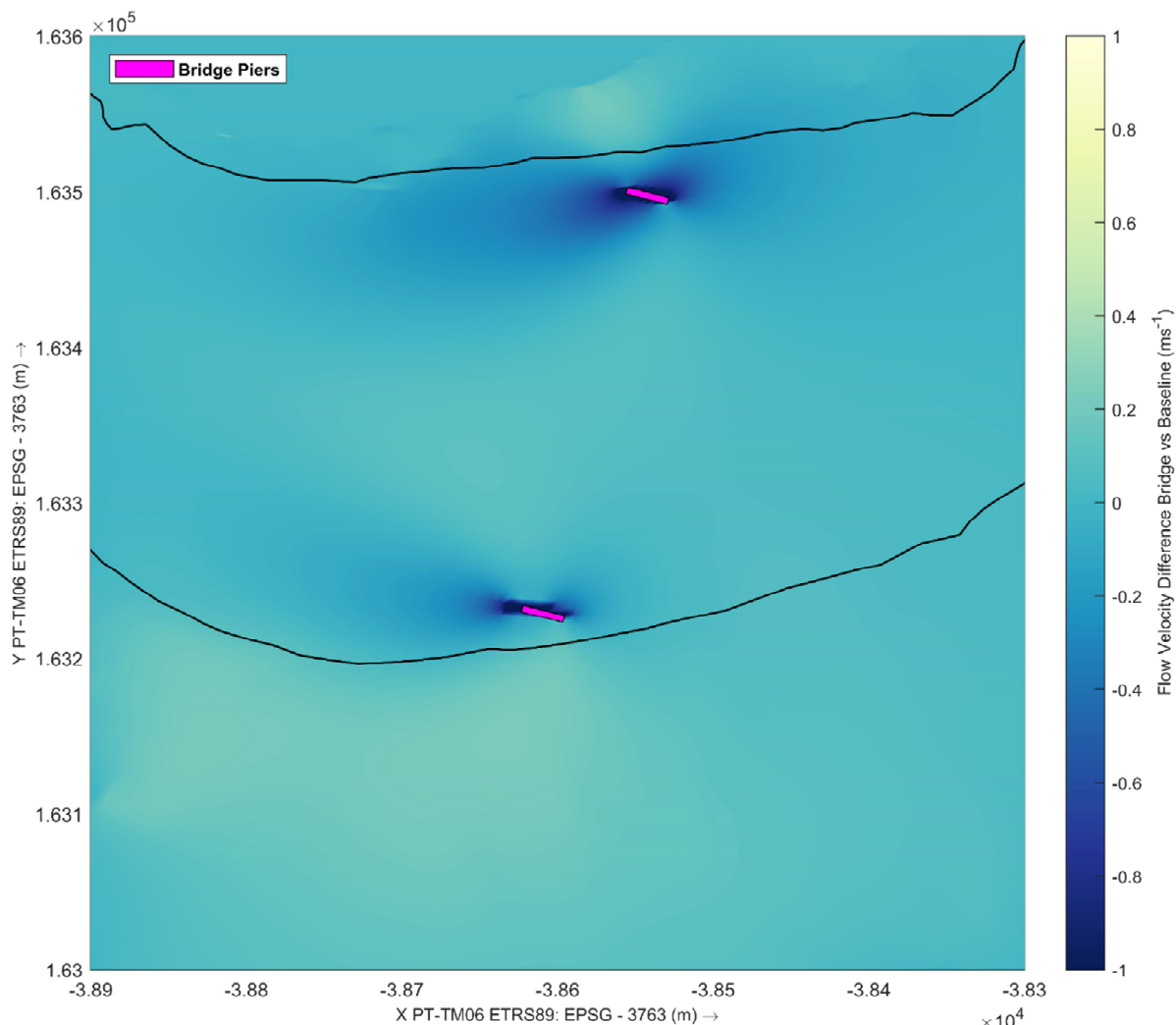


Figura B-9: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%).

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada para os cenários de referência (Figura A-10) e com a presença da ponte (Figura A-11). De forma geral, a superfície livre da água atinge a cota 14,0 m ZH na zona da ponte. Comparando os cenários com e sem pilares (Figura A-12), verifica-se que a presença dos pilares induz um aumento local do nível de água a montante, devido ao efeito de obstrução do escoamento, com diferenças máximas que podem atingir 0,28 m.

Por outro lado, a jusante dos pilares, observa-se uma ligeira redução da cota da superfície livre, de até 0,22 m, resultante da aceleração local do escoamento ao contornar o estreitamento imposto pelos pilares. Adicionalmente, verifica-se um aumento uniforme do nível de água, da ordem de 3,5 a 4,0 cm, mais a montante da zona de influência imediata, evidenciando um ajustamento hidrodinâmico de maior escala induzido pela presença dos pilares.

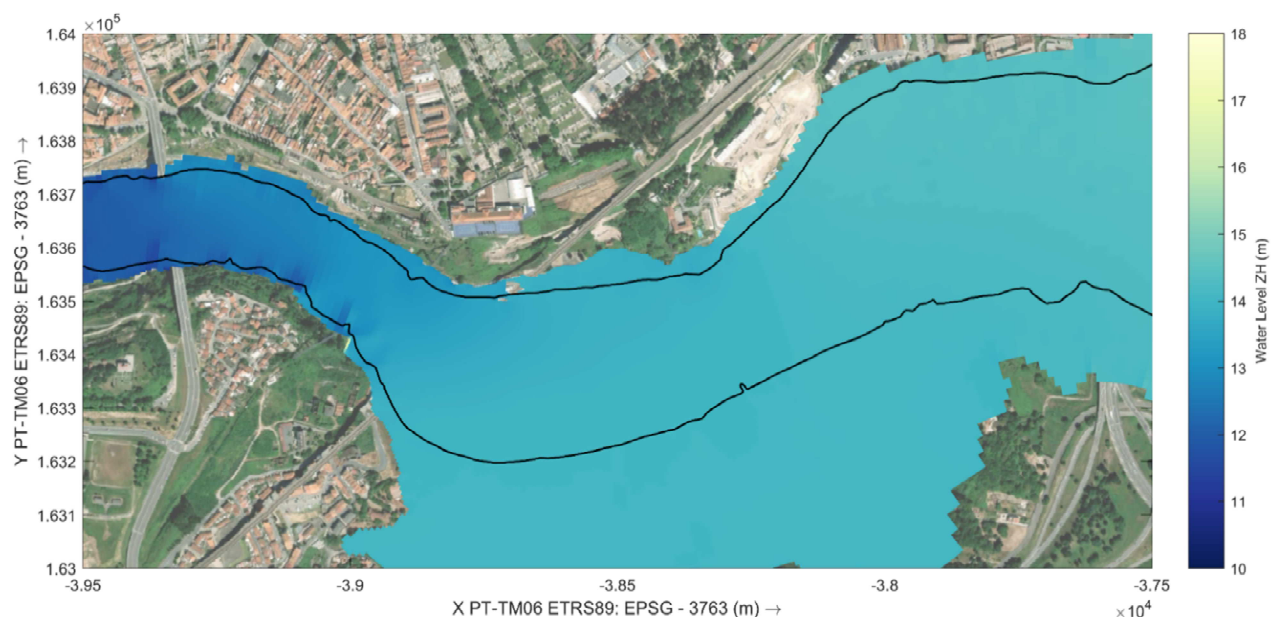


Figura A-10: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

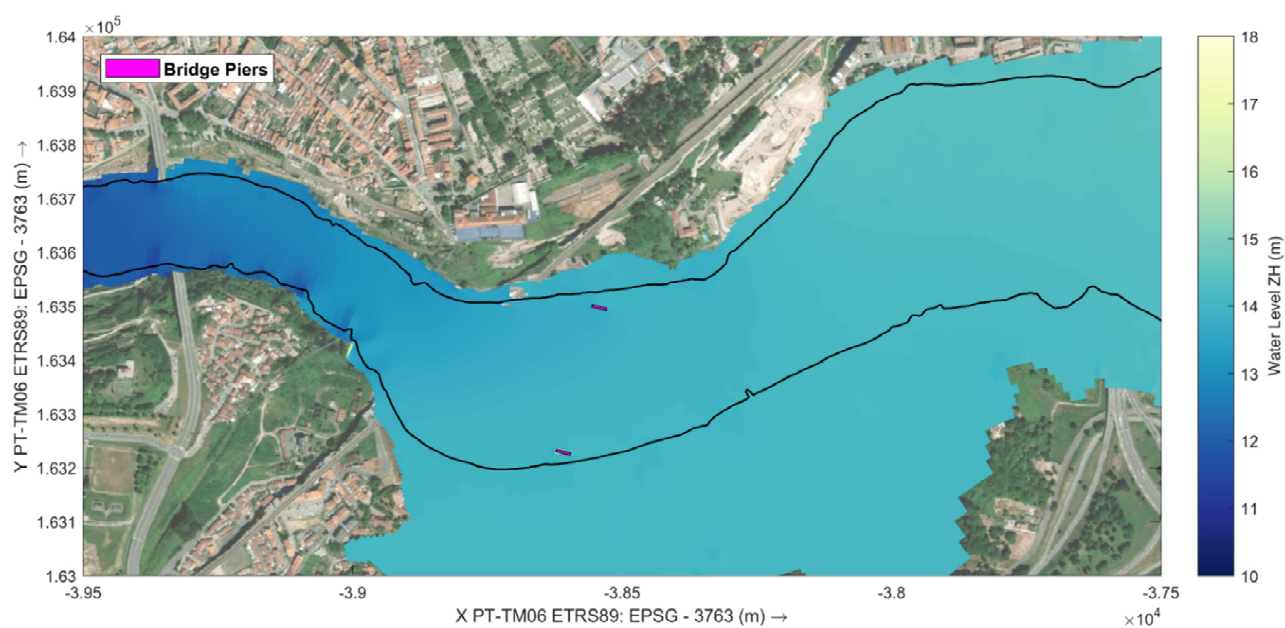


Figura A-11: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

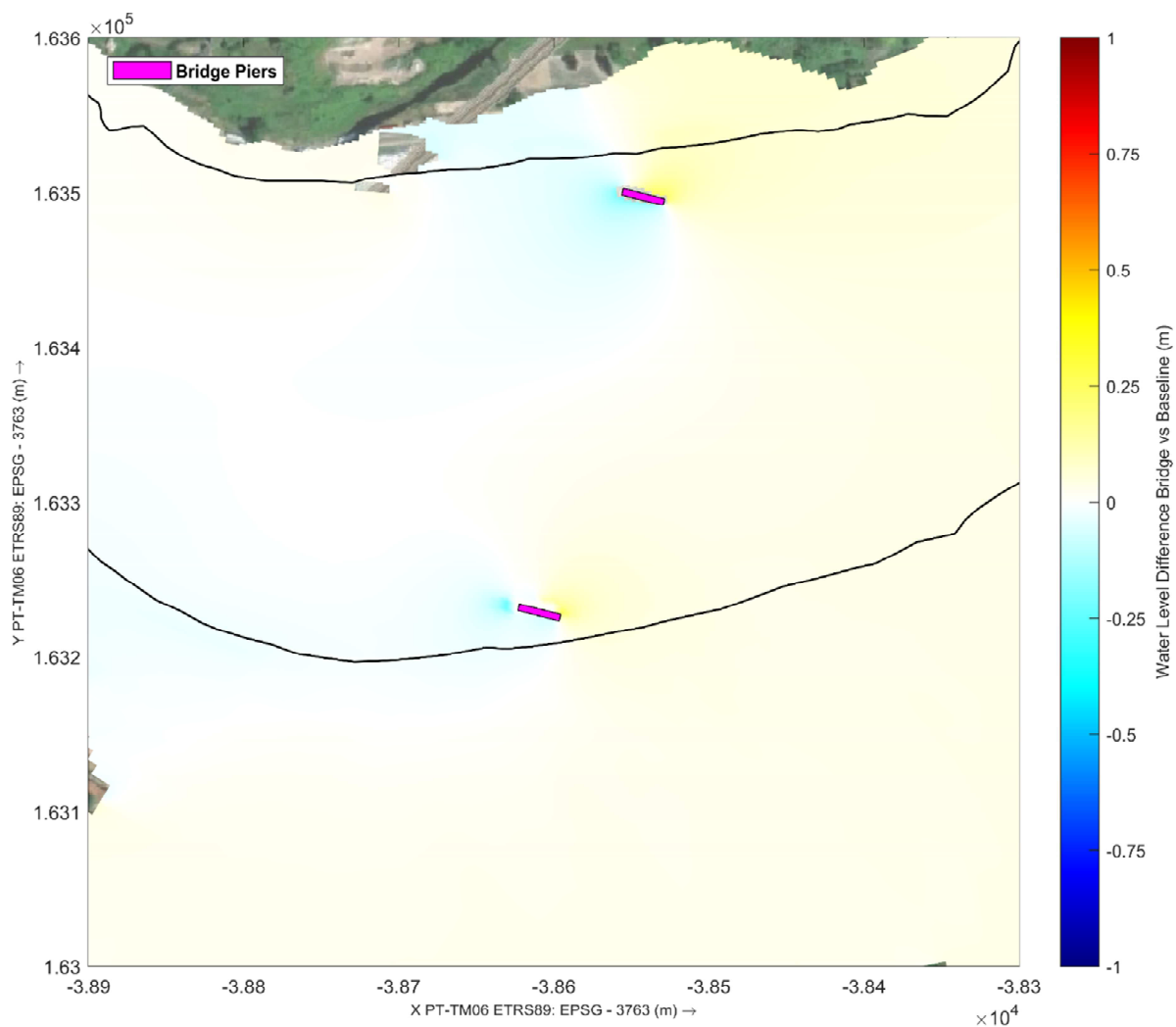


Figura A-12: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%.

A.3 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 1000 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 5%)

A Figura A-13 e Figura A-14 apresentam as condições de escoamento para os cenários de referência e com a presença da ponte, respetivamente. Na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento situam-se geralmente entre 3,0 e 3,5 m/s para a vazão considerada. Mais a jusante, a secção do rio estreita-se, concentrando o escoamento e originando um aumento significativo da velocidade, com valores que atingem os 5,5 m/s.

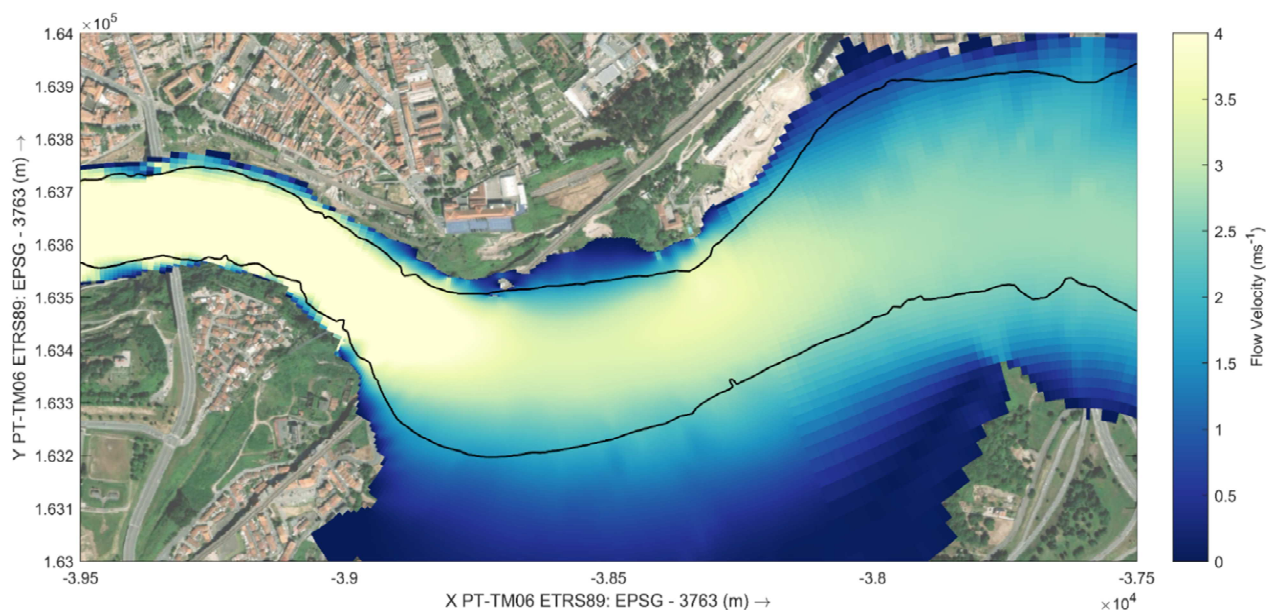


Figura A-13: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

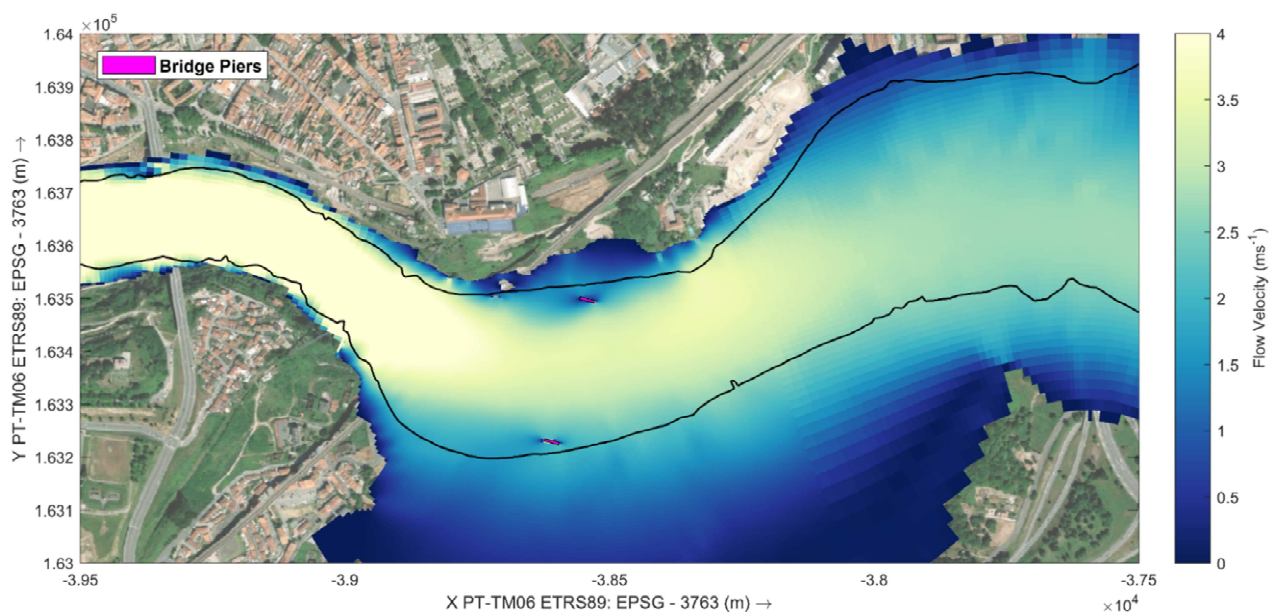


Figura A-14: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

A presença dos pilares da ponte provoca alterações localizadas no campo de escoamento nas proximidades das estruturas (Figura A-15). Neste cenário, observam-se reduções de velocidade de até 1,70 m/s a montante e a jusante dos pilares, enquanto a aceleração localizada nos seus flancos origina aumentos de velocidade que podem atingir 0,57 m/s.

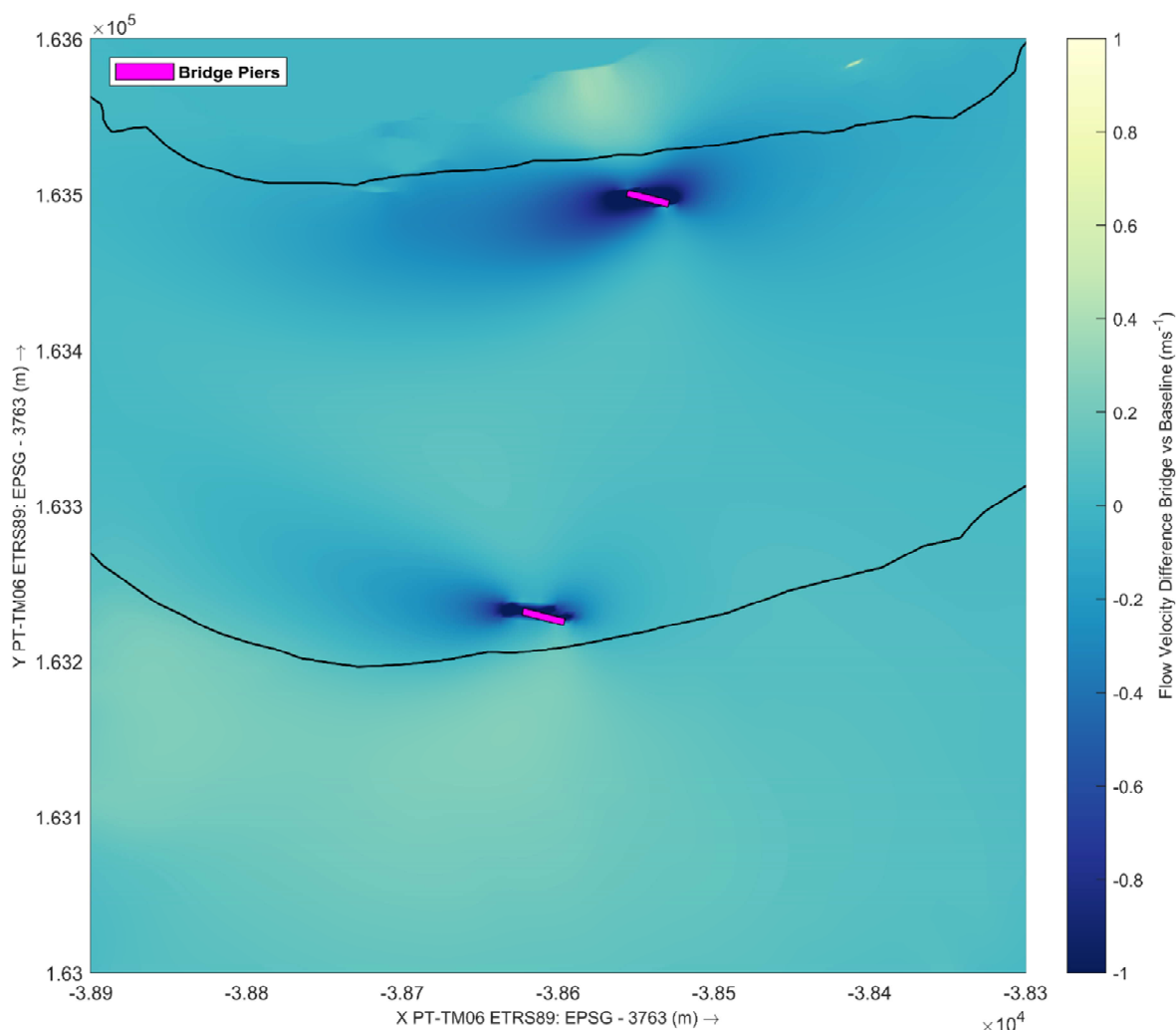


Figura A-15: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%).

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada para os cenários de referência (Figura A-16) e com a presença da ponte (Figura A-17). De forma geral, os níveis de água atingem até 19,6 m ZH na zona da ponte. Comparando os cenários com e sem pilares (Figura A-18), verifica-se que a presença dos pilares induz um aumento local dos níveis de água a montante, devido ao efeito de obstrução do escoamento, com diferenças máximas que podem atingir 0,42 m. Por outro lado, a jusante dos pilares observa-se uma ligeira descida da superfície livre, até 0,36 m, resultante da aceleração do escoamento ao contornar os pilares. Além disso, é visível um aumento uniforme do nível de água da ordem dos 5,5 a 6,0 cm mais a montante da zona de influência direta, o que indica um ajustamento hidráulico em maior escala em resposta à presença dos pilares.

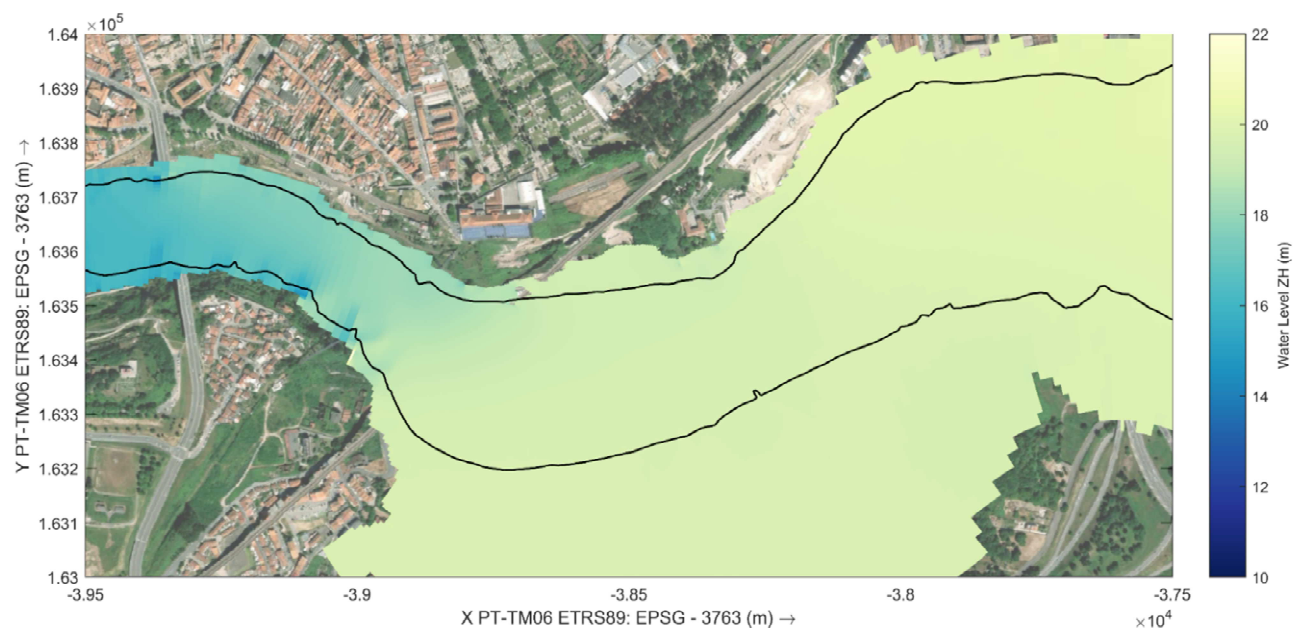


Figura A-16: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

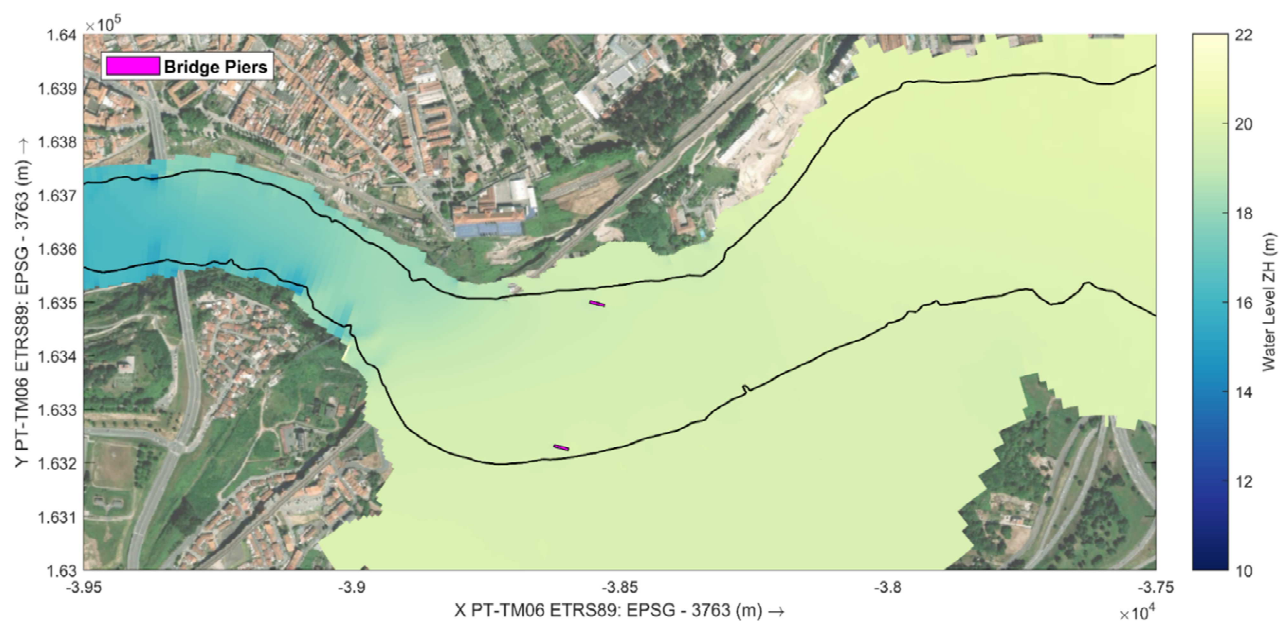


Figura A-17: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

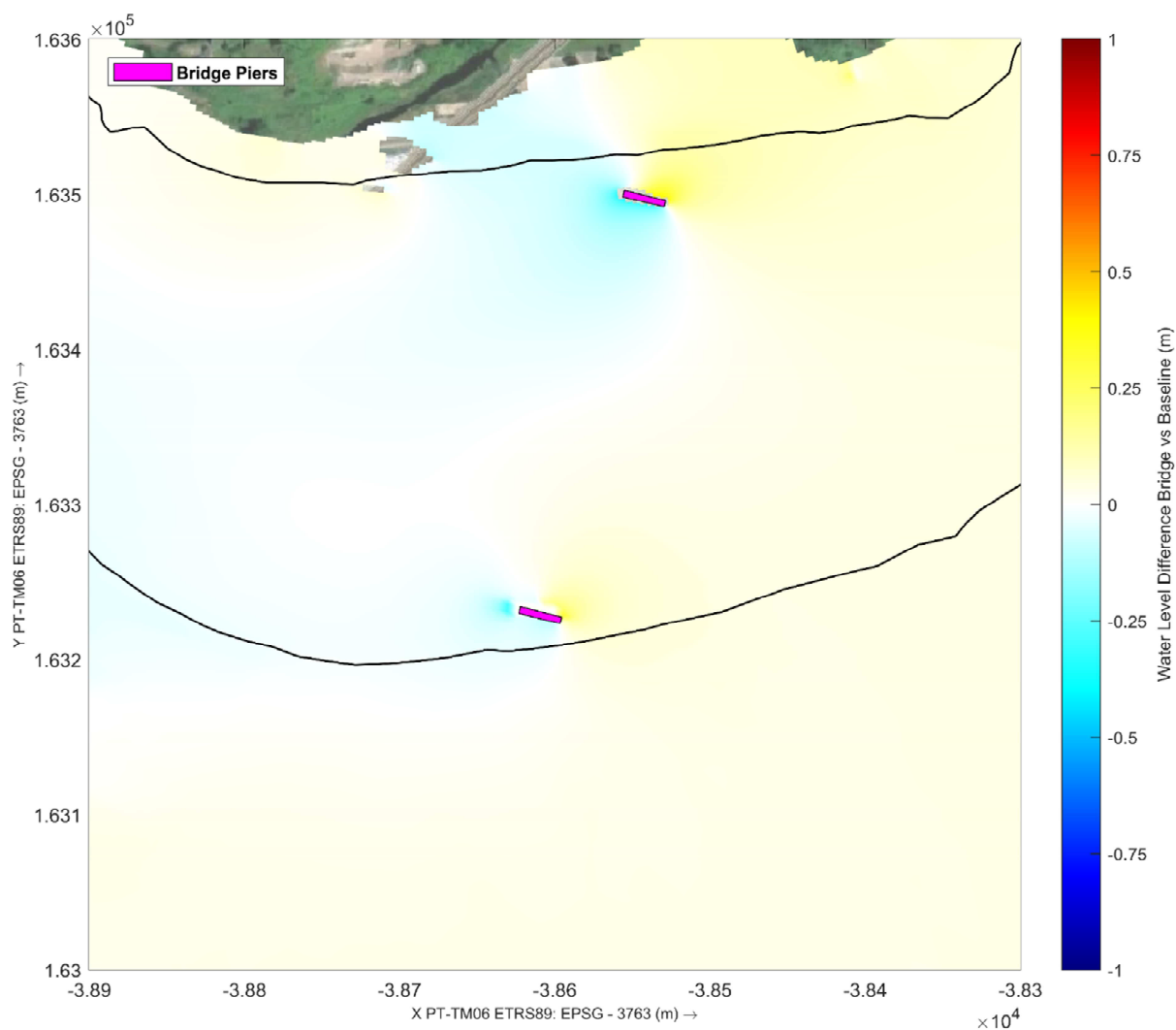


Figura A-18: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%.

A.4 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 1000 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%)

A Figura A-19 e Figura A-20 apresentam as condições de escoamento para os cenários de referência e com a presença da ponte, respetivamente. Na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento situam-se geralmente entre 2,5 e 3,0 m/s para a descarga considerada. Mais a jusante, a secção do rio torna-se mais estreita, canalizando o escoamento e originando um aumento acentuado da velocidade, com valores que atingem até 4,85 m/s.

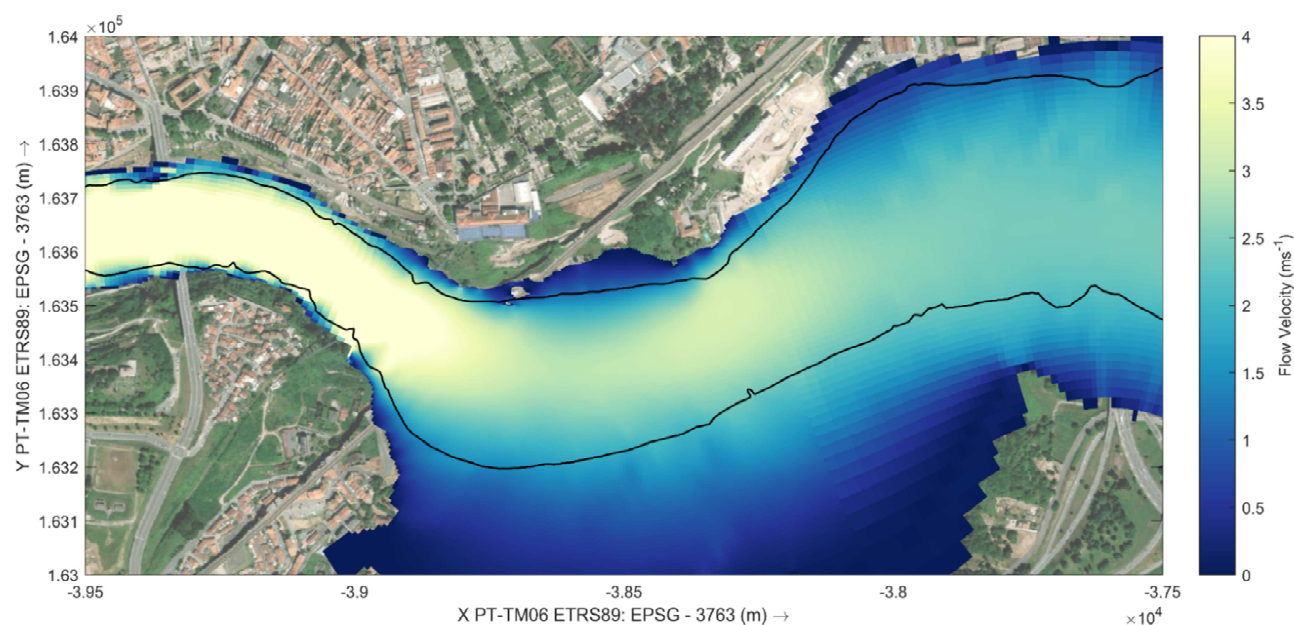


Figura A-19: Velocidade do escoamento para o cenário de referência (EIA) para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

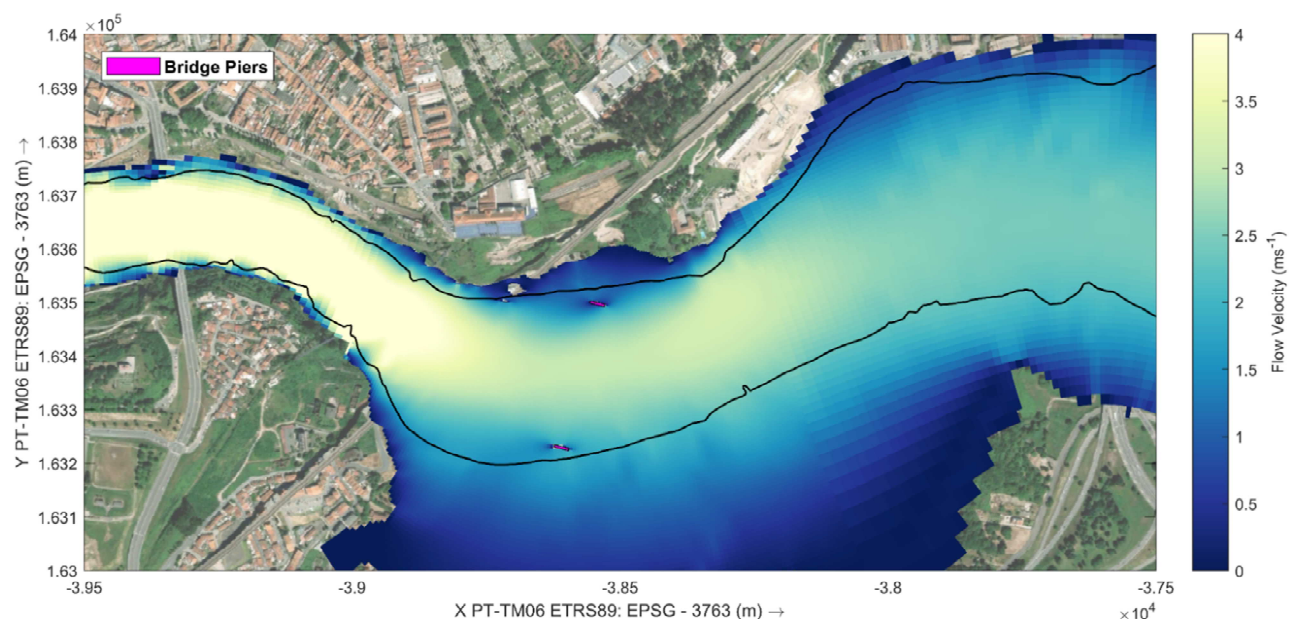


Figura A-20: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA), para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

A presença dos pilares da ponte provoca alterações localizadas no campo de escoamento nas imediações das estruturas (Figura A-21). Neste cenário, observam-se reduções de velocidade de até 1,57 m/s a montante e a jusante dos pilares, enquanto a aceleração localizada nos seus flancos conduz a aumentos de velocidade que podem atingir 0,4 m/s.

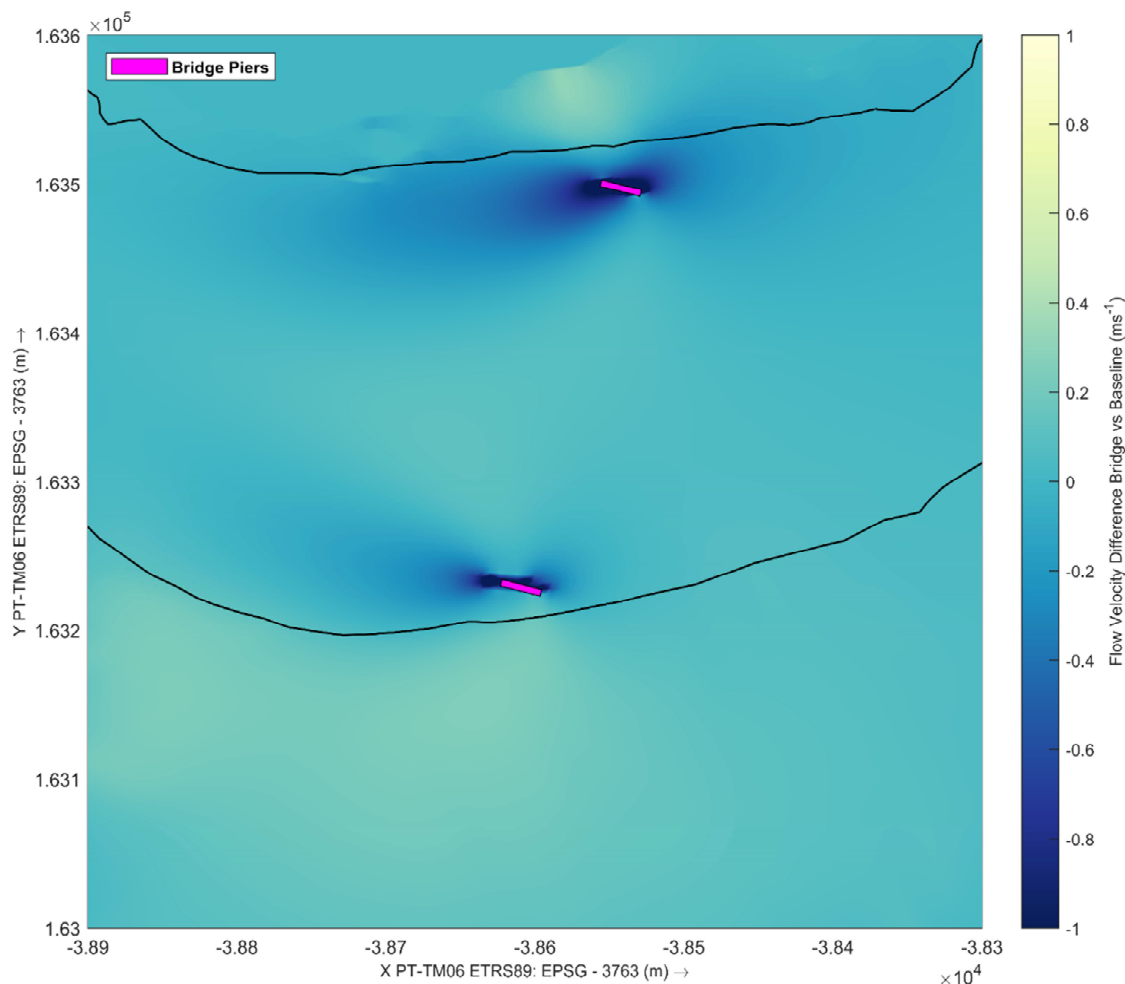


Figura A-21: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária (EIA) e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%).

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada para os cenários de referência (Figura A-22) e com ponte (Figura A-23). No geral, os níveis de água atingem até 17 m ZH na zona da ponte. Comparando os cenários com e sem pilares (Figura A-24), verifica-se que a presença dos pilares induz um aumento local dos níveis de água a montante, devido ao efeito de obstrução do escoamento, com diferenças máximas a atingir os 34 cm. A jusante dos pilares, observa-se uma ligeira descida da superfície livre, até 28 cm, resultante da aceleração do escoamento ao contornar o estrangulamento imposto pelas estruturas. Adicionalmente, é visível um aumento uniforme do nível de água de aproximadamente 4,7 cm mais a montante da zona de influência imediata, evidenciando um ajustamento hidrodinâmico em maior escala causado pela presença dos pilares.

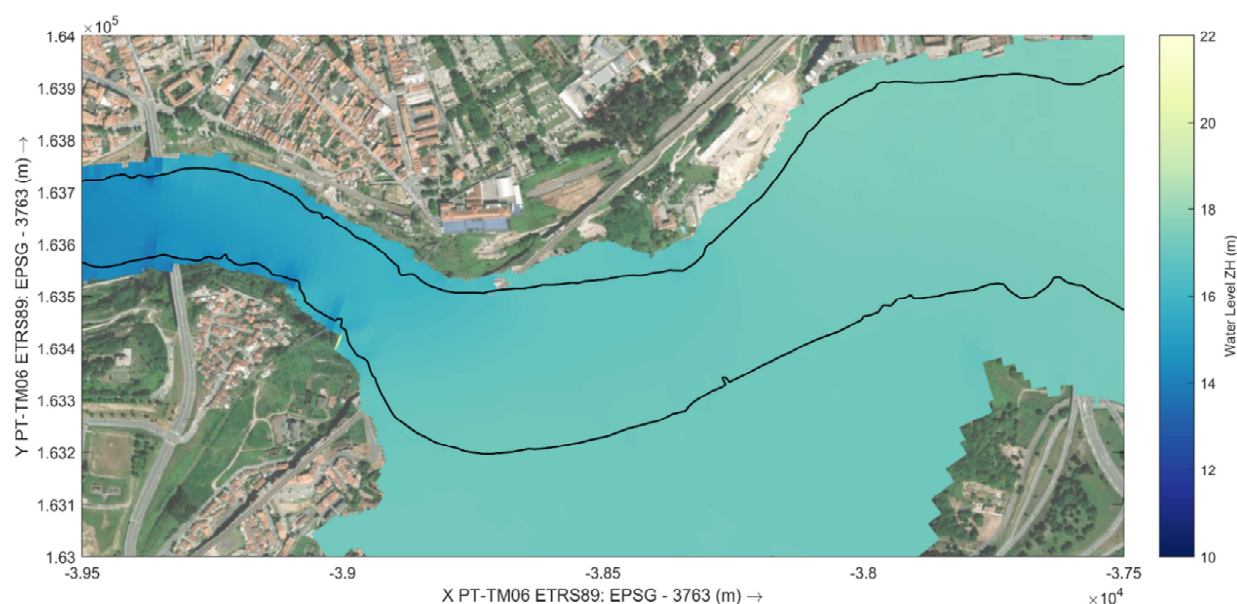


Figura A-22: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

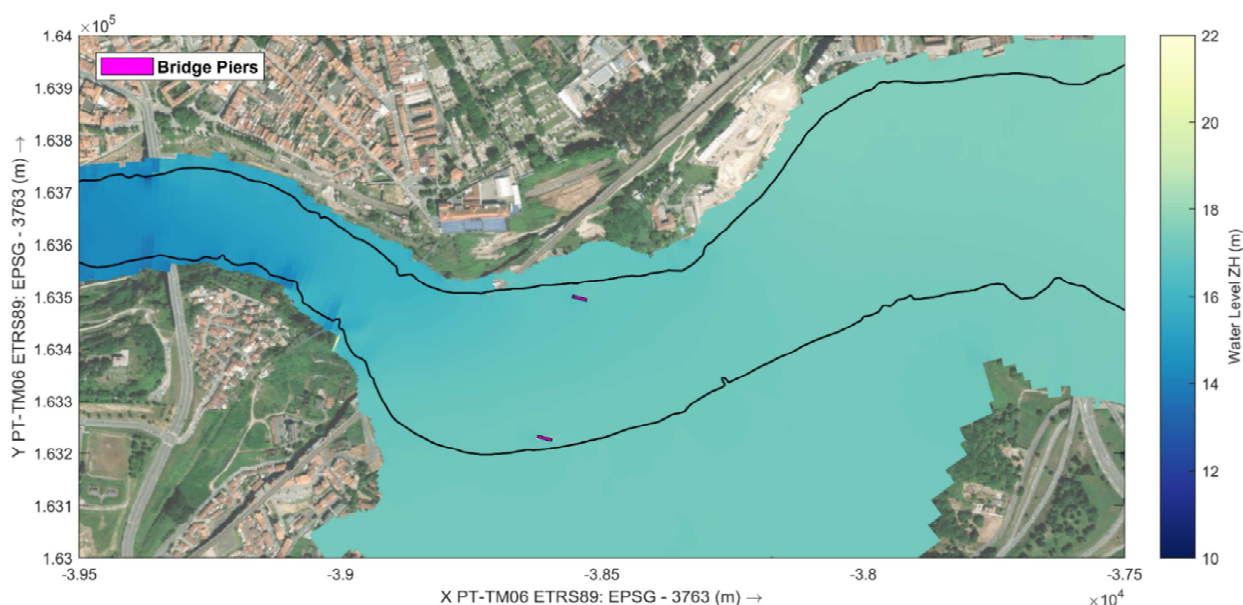


Figura A-23: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

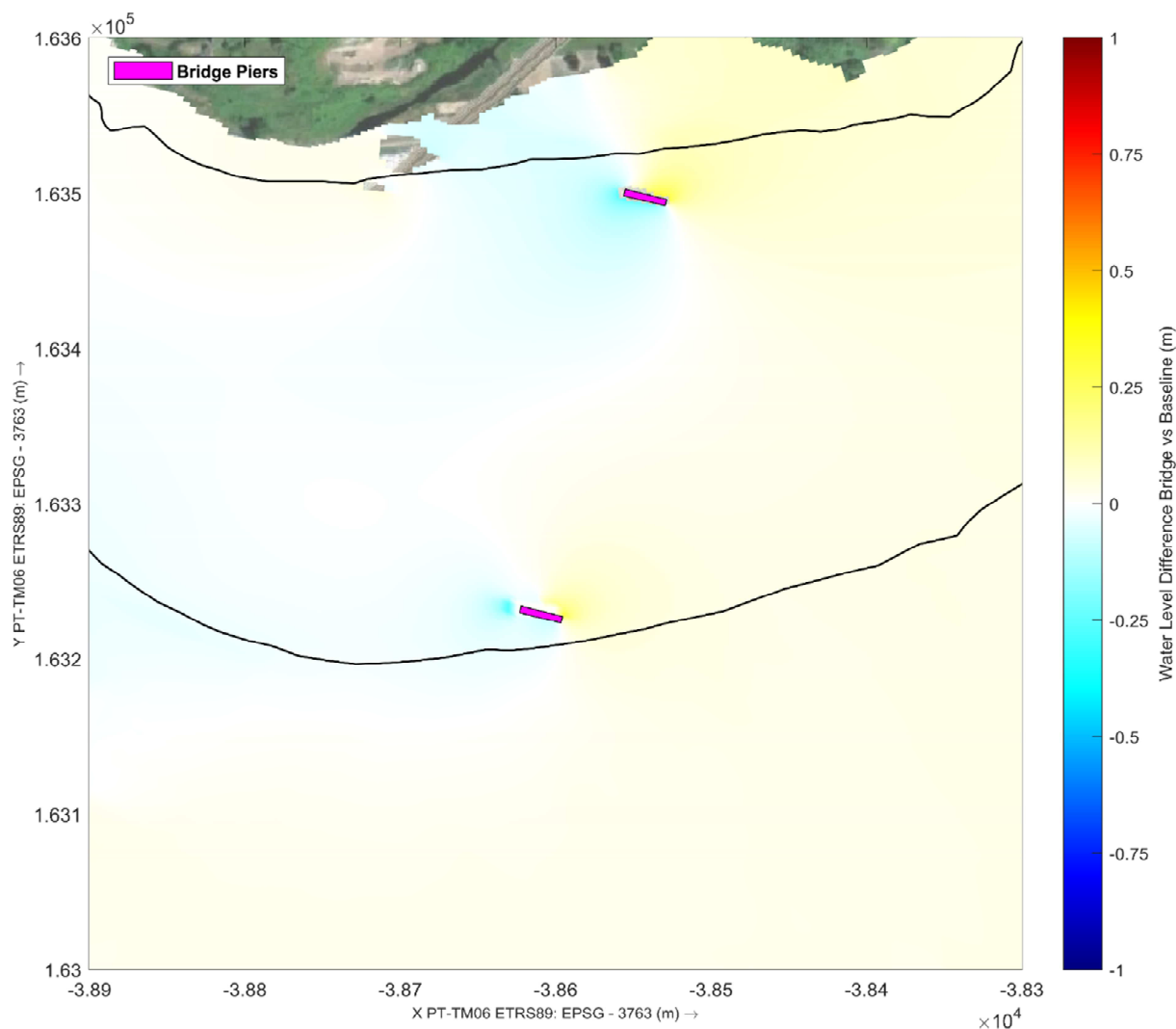


Figura A-24: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária (EIA) versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%.

ANEXO B: RESULTADOS DO MODELO HIDRODINÂMICO –CENÁRIO DE PROJETO DE EXECUÇÃO

B.1 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 5%)

A Figura B-25 e a Figura B-26 apresentam as condições de escoamento para os cenários de referência e com a nova ponte rodoferroviária (cenário de Projeto de Execução). Na zona das pontes, as velocidades do escoamento variam, regra geral, entre 2,5 e 3,0 m/s para o caudal considerado. Mais a jusante, o canal do rio estreita-se, concentrando o escoamento e provocando um aumento acentuado da velocidade, com valores que podem ultrapassar 4,6 m/s.

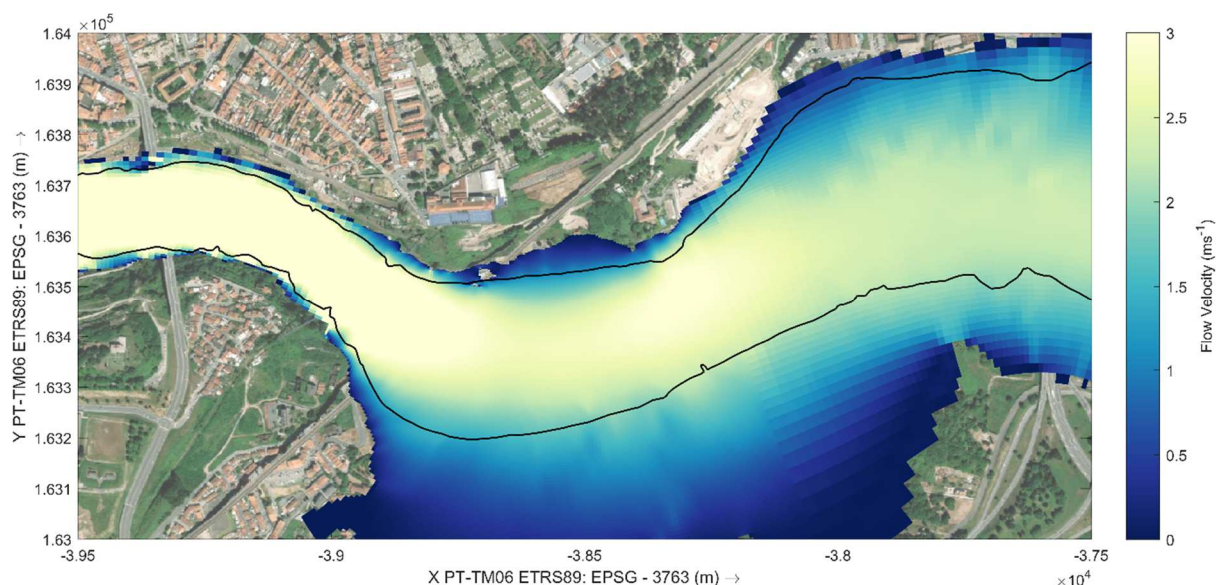


Figura B-25: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

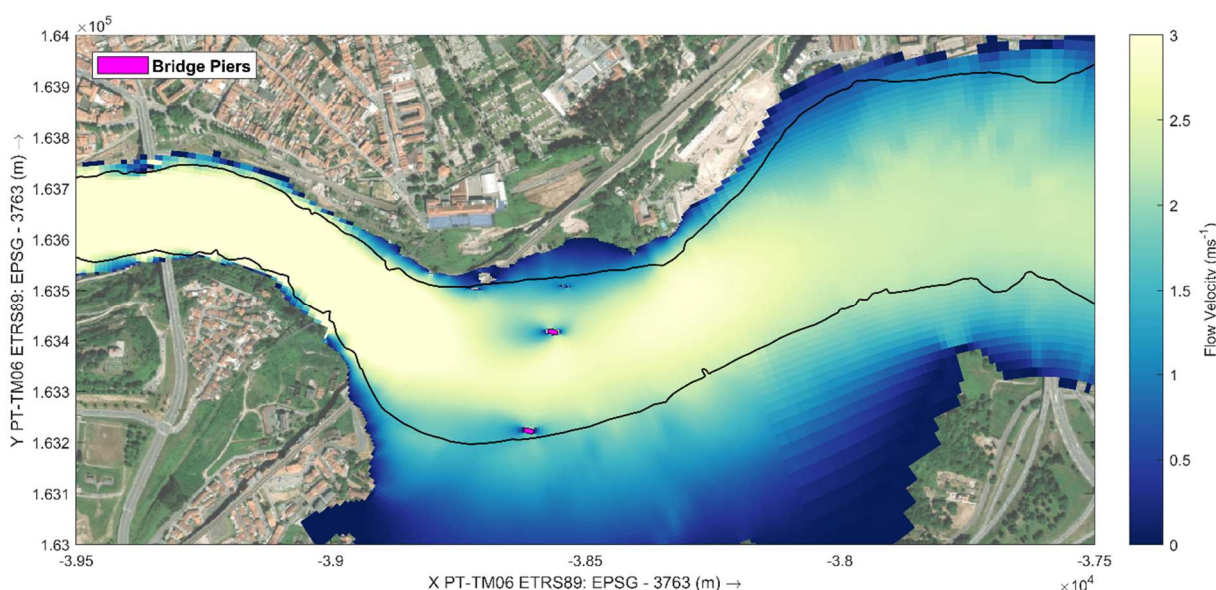


Figura B-26: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

A presença dos pilares da ponte provoca alterações localizadas no campo de escoamento nas imediações das estruturas (Figura B-27). Neste cenário, observam-se reduções da velocidade do escoamento junto ao pilar localizado numa posição central no leito do rio (torre T2) de até 2.3 m/s, tanto a montante como a jusante. Nos restantes pilares, implantados mais próximos das margens do rio, a diminuição da velocidade é significativamente inferior, situando-se entre 1,5 m/s (torre T1) e 1,0 m/s (pilares PR10). Por outro lado, observam-se acelerações localizadas nos flancos dos pilares e no tramo compreendido entre as torres T1 e T2, que atingem valores até 0,5 m/s.

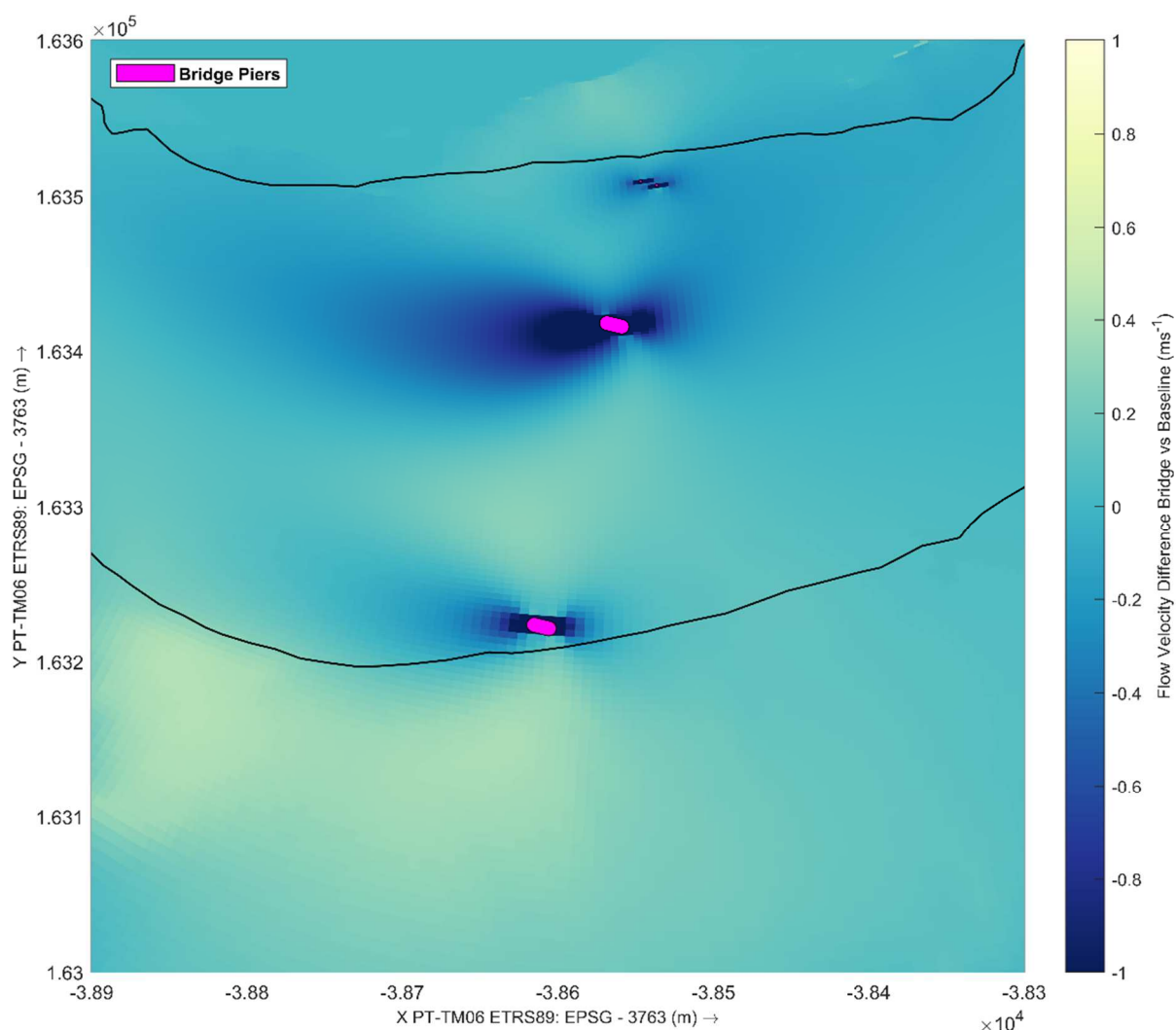


Figura B-27: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rododiferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%).

A variação espacial dos níveis de água foi calculada tanto para o cenário de referência (Figura B-28), como para o cenário com a presença da ponte (Figura B-29). De forma geral, os níveis de água na zona da ponte podem atingir cerca de 16,0 m ZH. Comparando os cenários com e sem ponte (Figura B-30/Figura A-5), verifica-se que a presença dos pilares introduz um aumento local dos níveis de água a montante, devido à obstrução do escoamento, com diferenças máximas de 0,55 m na proximidade da torre T2. Por outro lado, a jusante dos pilares, observa-se uma ligeira diminuição da cota da superfície livre da água, de até 0,34 m, à medida que o escoamento contorna os pilares. Adicionalmente, verifica-se um aumento quase uniforme do nível da superfície livre da água de

aproximadamente 0,11 m a montante da zona de influência direta dos pilares, evidenciando um ajustamento hidráulico em maior escala em resposta à presença dos pilares.

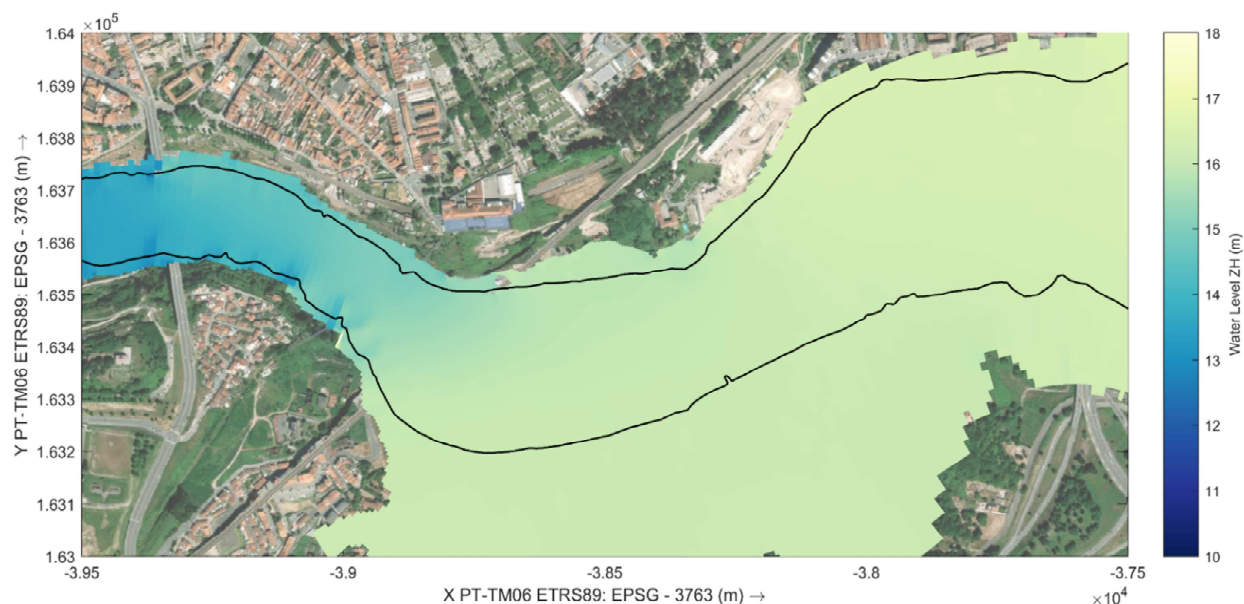


Figura B-28: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

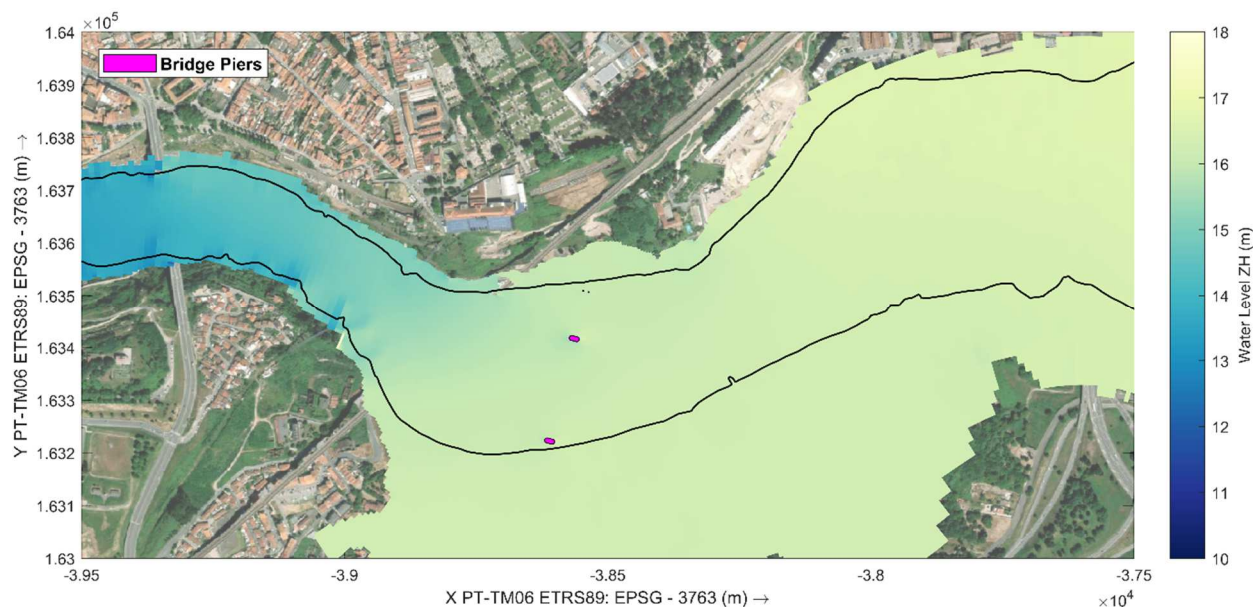


Figura B-29: Nível de água para o cenário com a ponte rodoviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

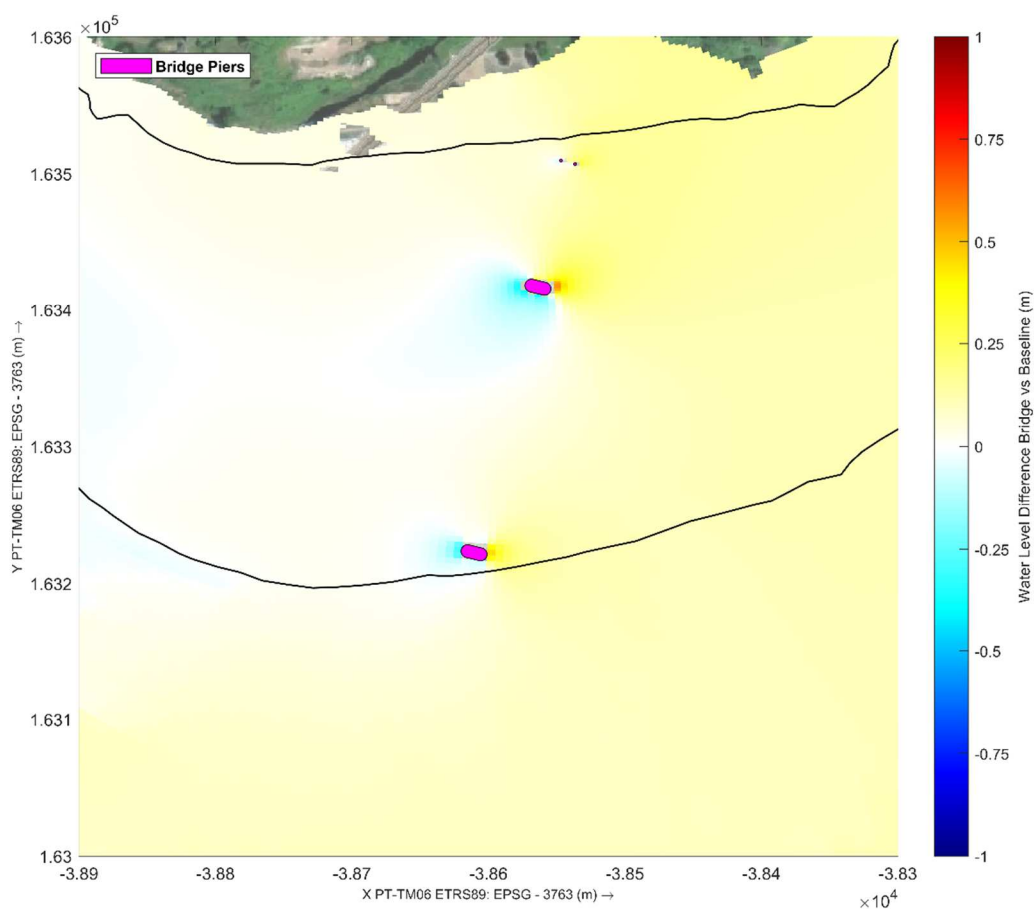


Figura B-30: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 5%.

B.2 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 100 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%)

A Figura B-31 e Figura B-32 apresentam as condições de escoamento para os cenários de referência e com a presença da nova ponte rodoferroviária de Projeto de Execução. Na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento variam geralmente entre 2,5 e 3,0 m/s para o caudal de cheia especificado. Mais a jusante, o canal do rio estreita-se, concentrando o escoamento e resultando num aumento acentuado da velocidade, com valores que podem ultrapassar 4,0 m/s.

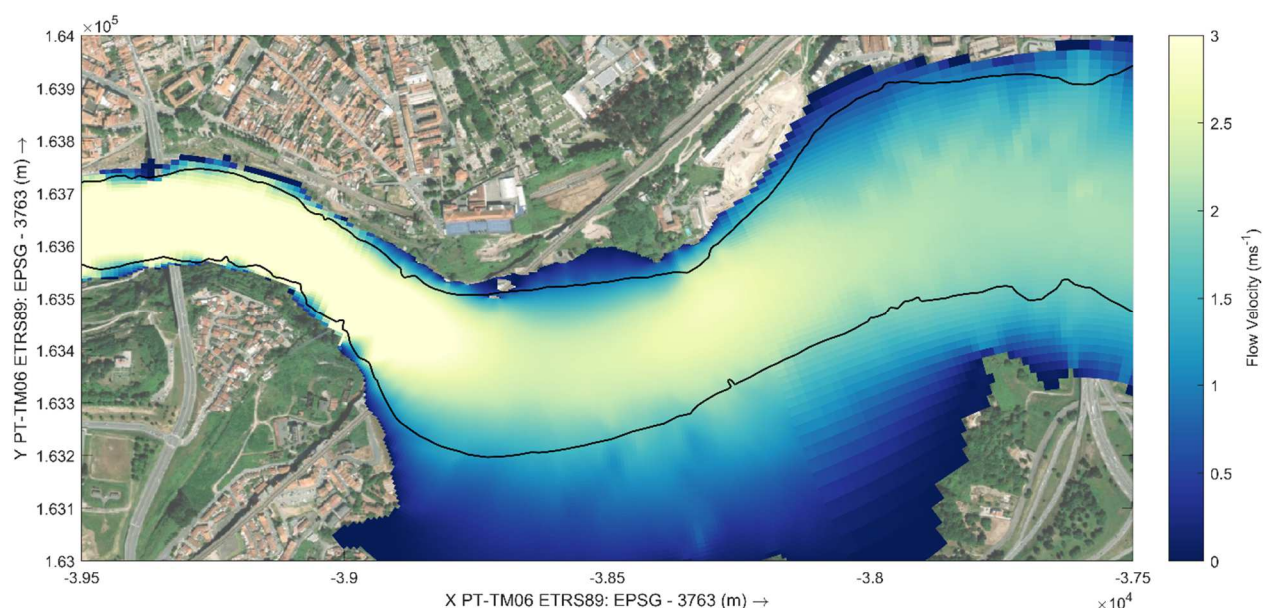


Figura B-31: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

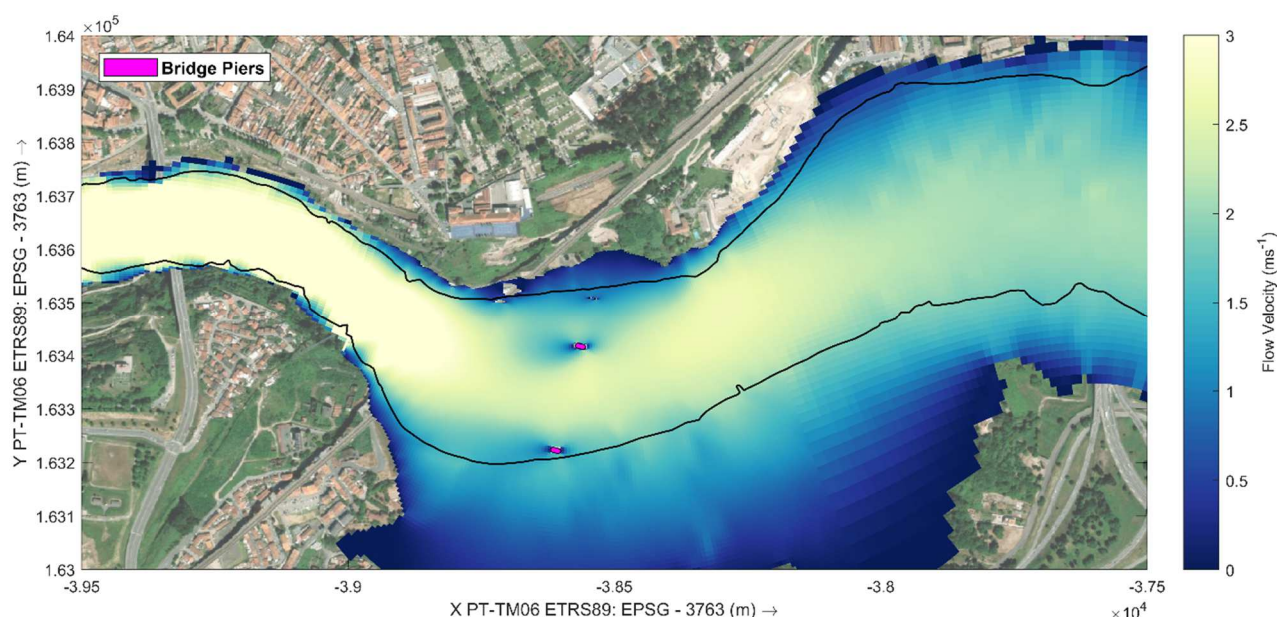


Figura B-32: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

A presença dos pilares da ponte provoca alterações localizadas no campo de escoamento nas imediações dos mesmos (Figura B-33). Neste cenário, as maiores reduções de velocidade (até 2,0 m/s) são observadas junto ao pilar localizado na posição mais central (torre T2), tanto a montante como a jusante da estrutura. Nos restantes pilares, implantados num local mais próximo das margens, as diminuições de velocidade são significativamente menores, situando-se entre 1,3 m/s (torre T1) e 0,93 m/s (pilares PR10). Por outro lado, observam-se aumentos localizados de velocidade do escoamento nos flancos dos pilares e no tramo compreendido entre as torres T1 e T2 (valores até 0,3 m/s).

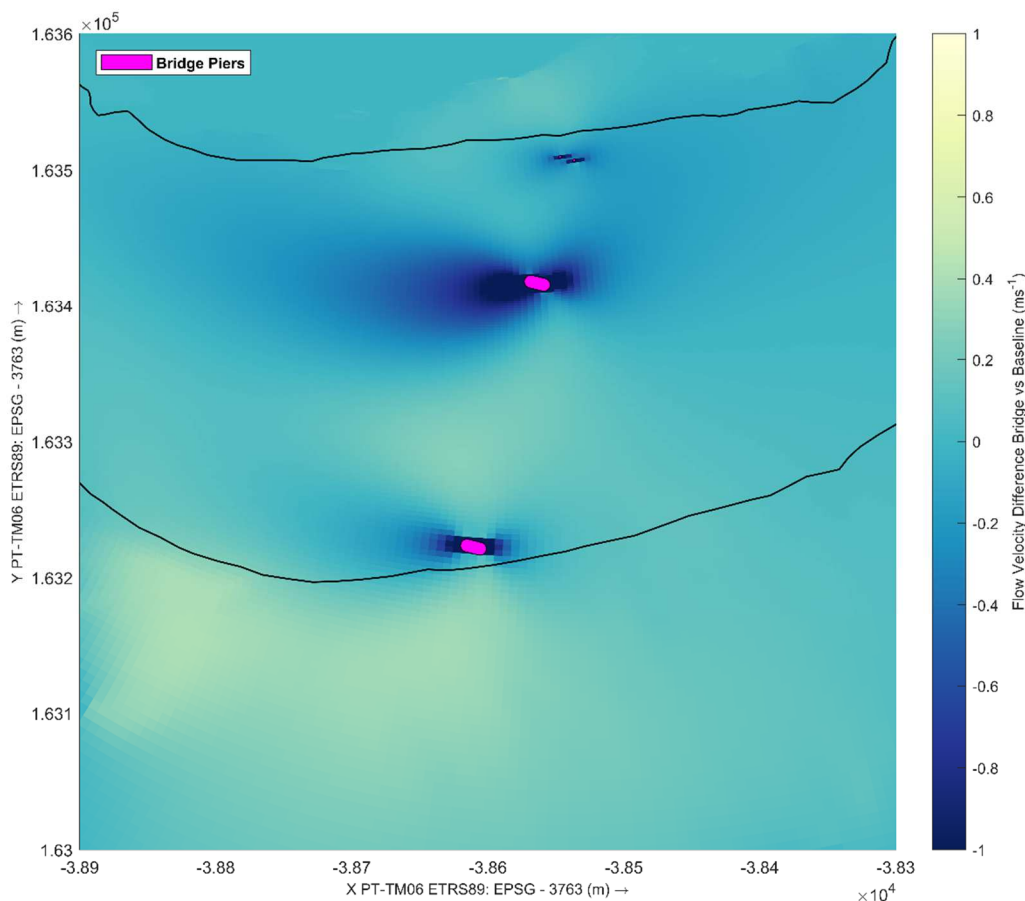


Figura B-33: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%).

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada para o cenário de referência (Figura B-34) e com a presença da ponte (Figura B-35). De uma forma geral, os níveis de água podem atingir até 14 m ZH na zona da ponte. Comparando os cenários com e sem pilares (Figura B-36), verifica-se que a presença dos pilares induz um aumento local do nível de água a montante, devido ao efeito de obstrução do escoamento, com diferenças máximas que podem atingir 0,48 m.

Por outro lado, a jusante dos pilares, observa-se uma ligeira redução da cota da superfície livre da água, de até 0,30 m, resultante da aceleração do escoamento ao contornar o estreitamento imposto pelos pilares. Adicionalmente, verifica-se um aumento uniforme do nível de água, de 0,09 a 0,10 m, mais a montante da zona de influência imediata, evidenciando um ajustamento hidrodinâmico de maior escala induzido pela presença dos pilares.

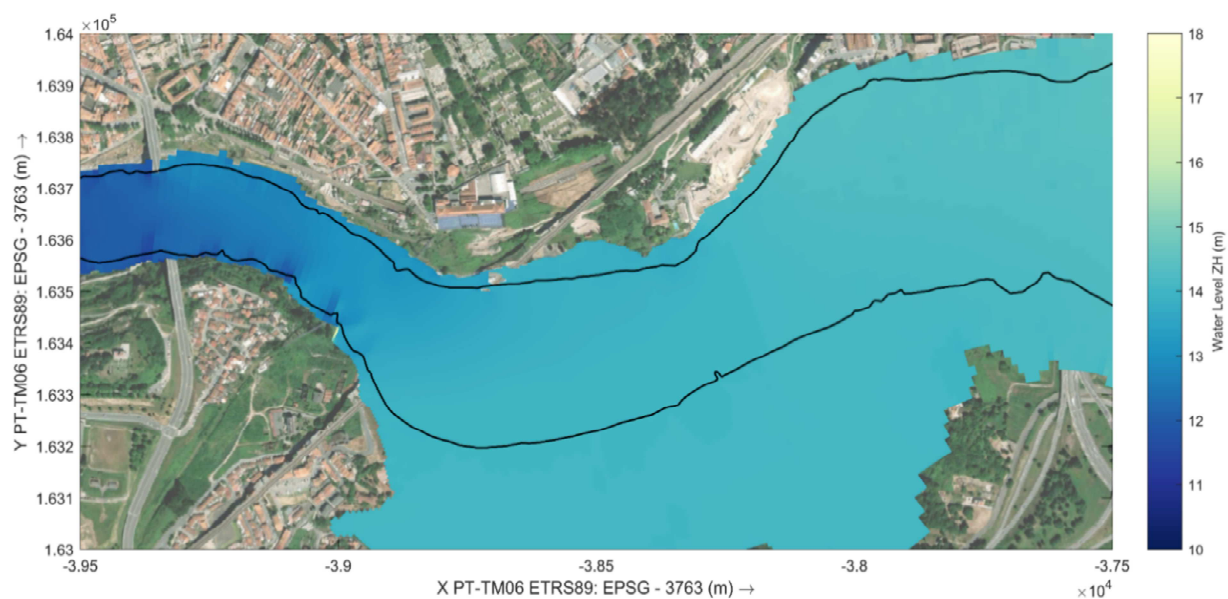


Figura B-34: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

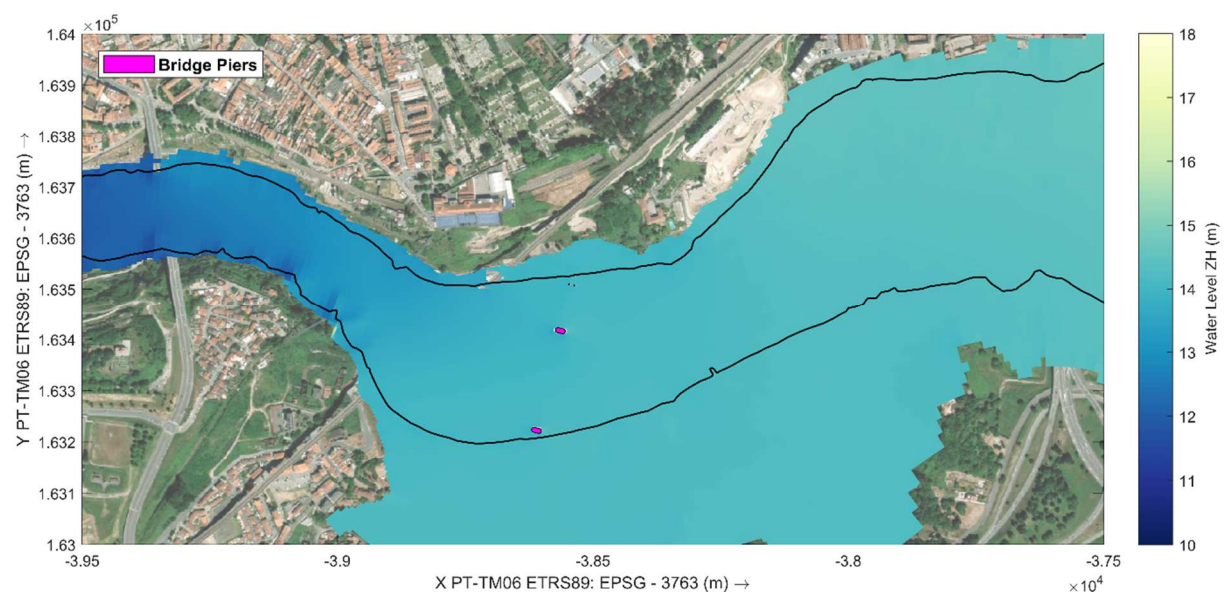


Figura B-35: Nível de água para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

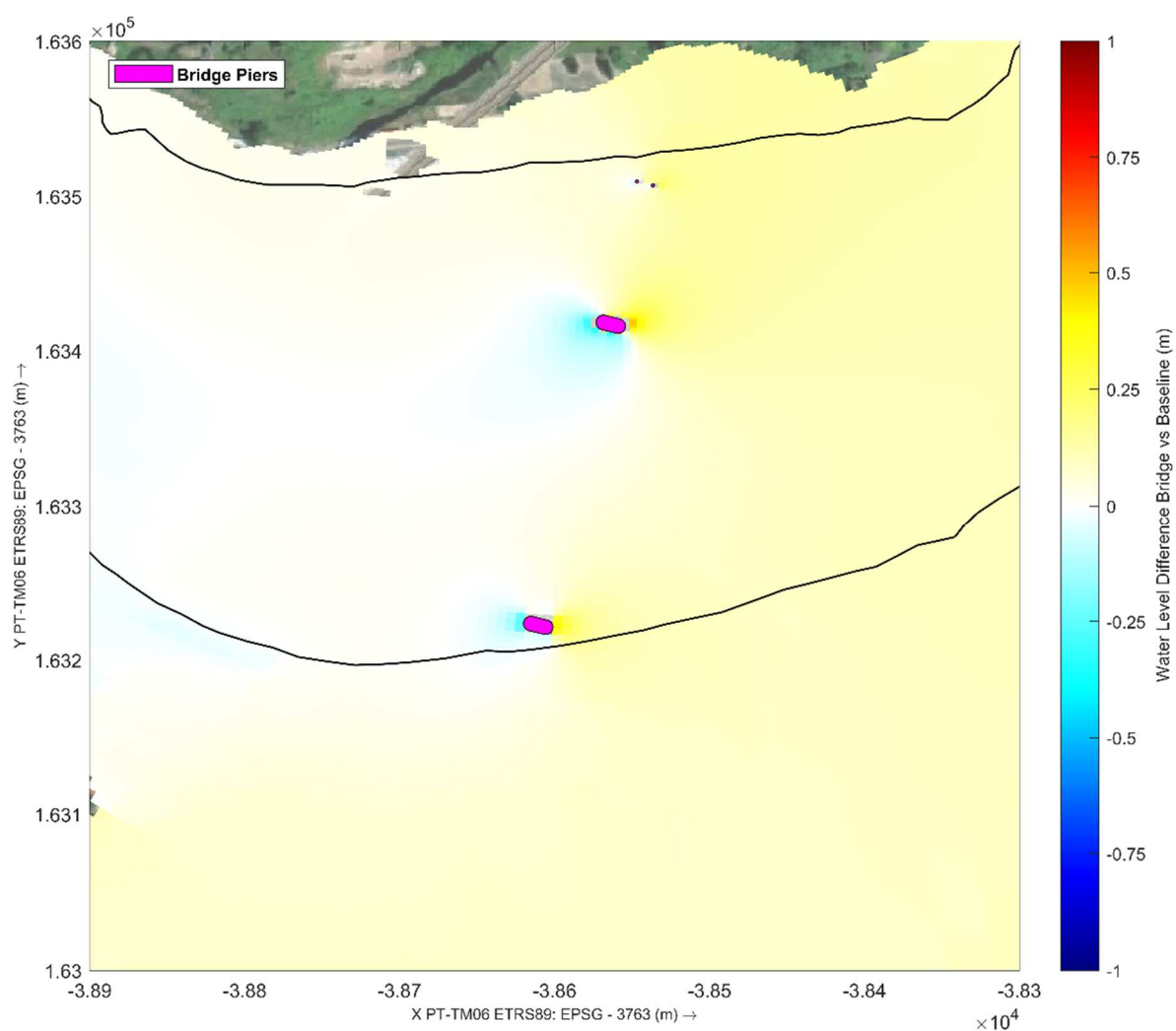


Figura B-36: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 100 anos e para o intervalo de confiança de 95%.

B.3 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 1000 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 5%)

A Figura B-37 e a Figura B-38 apresentam as condições de escoamento para os cenários de referência e com a presença da ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, respetivamente. Na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento situam-se geralmente entre 3,0 e 3,5 m/s para o caudal considerado. Mais a jusante, a secção do rio estreita-se, concentrando o escoamento e originando um aumento significativo da velocidade, com valores que podem atingir os 5,5 m/s.

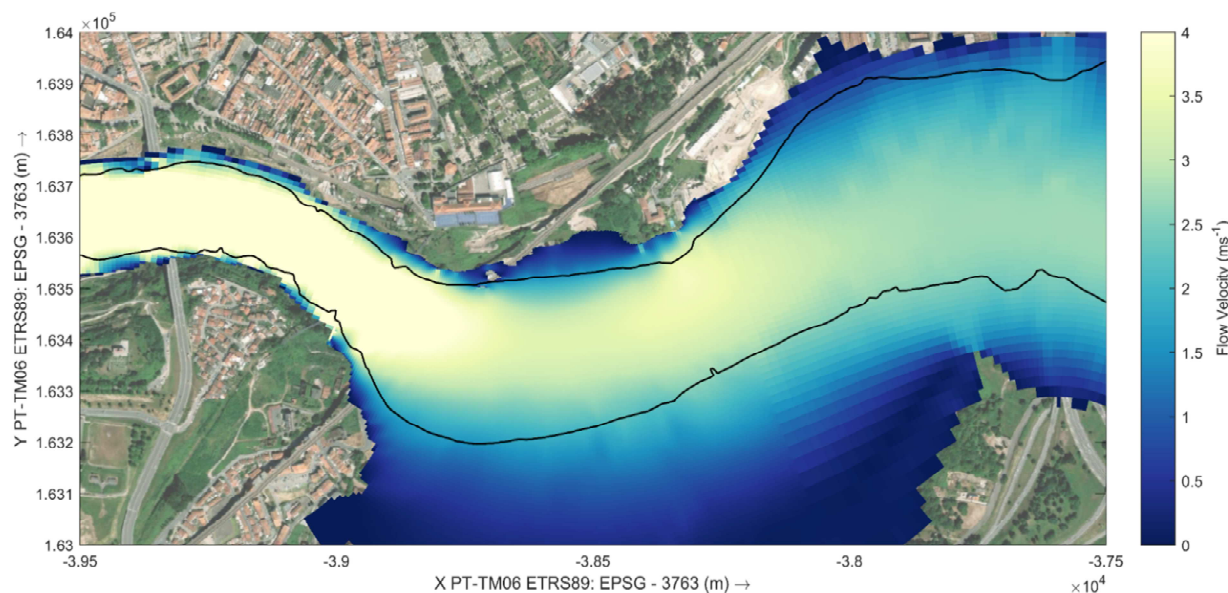


Figura B-37: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

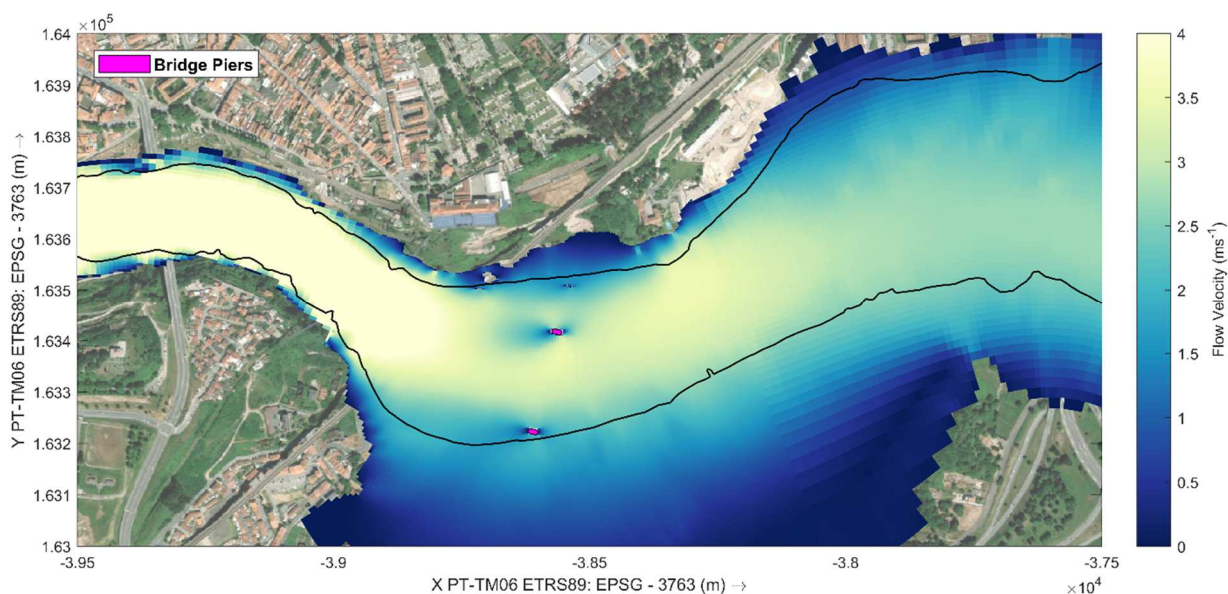


Figura B-38: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

Os pilares da ponte introduzem perturbações locais no padrão de escoamento nas áreas adjacentes aos mesmos (Figura B-39). A maior atenuação das velocidades do escoamento verifica-se junto ao elemento implantado na posição mais central (torre T2), onde se registam reduções que podem atingir cerca de 2,6 e 2,9 m/s, a montante e a jusante do pilar, respetivamente. Nos apoios posicionados junto às margens, o efeito é menos expressivo, com decréscimos compreendidos entre aproximadamente 1,6 m/s (torre T1) e 1,4 m/s (pilares PR10). Em contraste, desenvolvem-se zonas de aceleração ao longo dos flancos dos pilares e no espaço entre as torres T1 e T2, onde os incrementos de velocidade podem alcançar valores da ordem de 0,7 m/s.

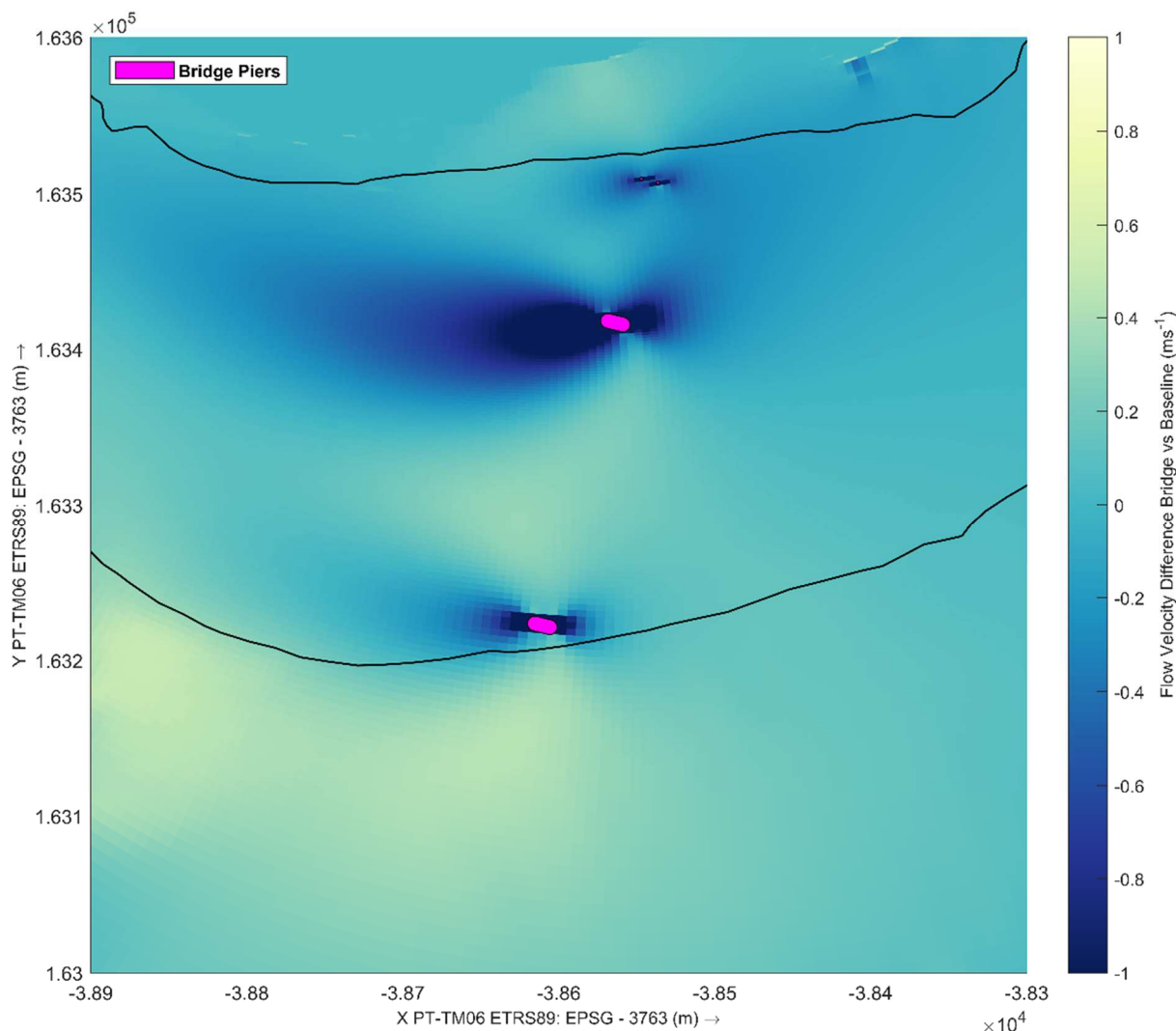


Figura B-39: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%).

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada para os cenários de referência (Figura B-40) e com a presença da ponte (Figura B-41). De forma geral, os níveis de água atingem até 19,6 m ZH na zona da ponte. Comparando os cenários com e sem ponte (Figura A-18), verifica-se que a presença dos pilares induz um aumento local dos níveis de água a montante, devido ao efeito de obstrução do escoamento, com diferenças máximas que podem atingir 0,75 m. Por outro lado, a jusante dos pilares observa-se uma redução da cota da superfície livre, até 0,44 m, resultante da aceleração do escoamento ao contornar os pilares. Além disso, é visível um aumento uniforme do

nível de água da ordem dos 0,15 m a montante da zona de influência direta, o que indica um ajustamento hidráulico em maior escala em resposta à presença dos pilares.

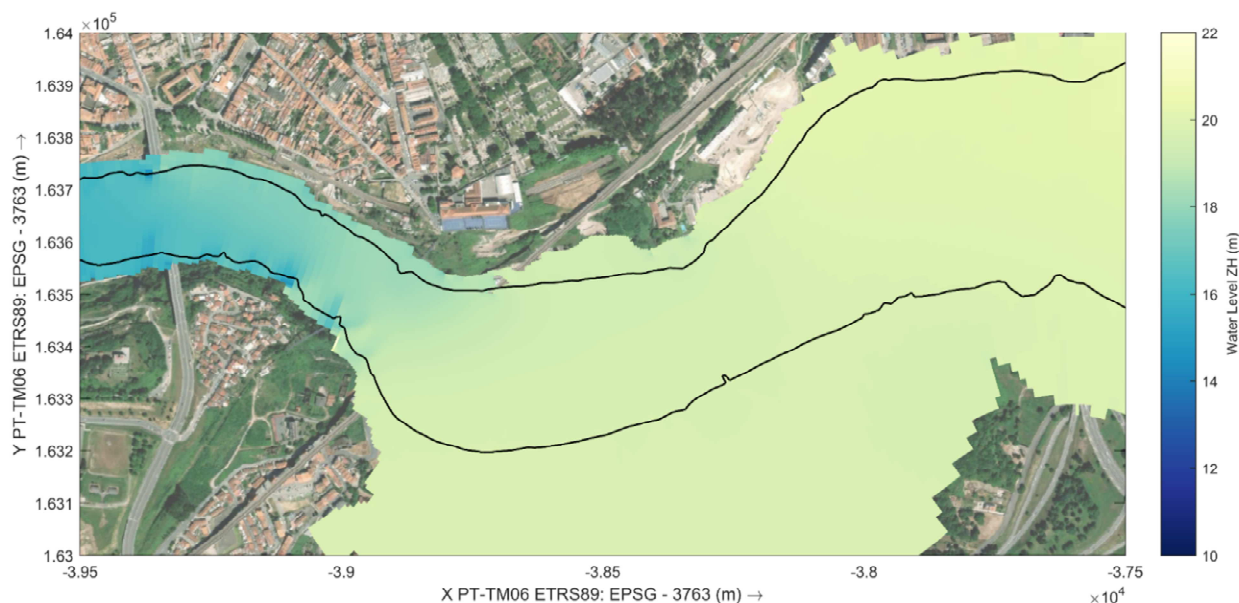


Figura B-40: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

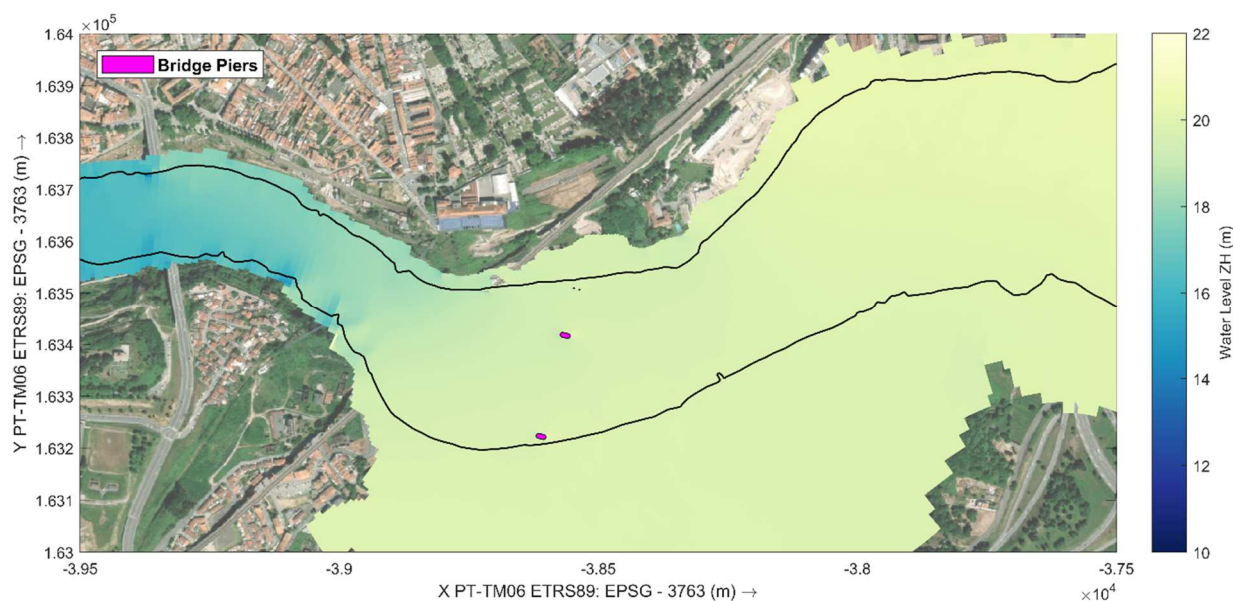


Figura B-41: Nível da água para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 5%.

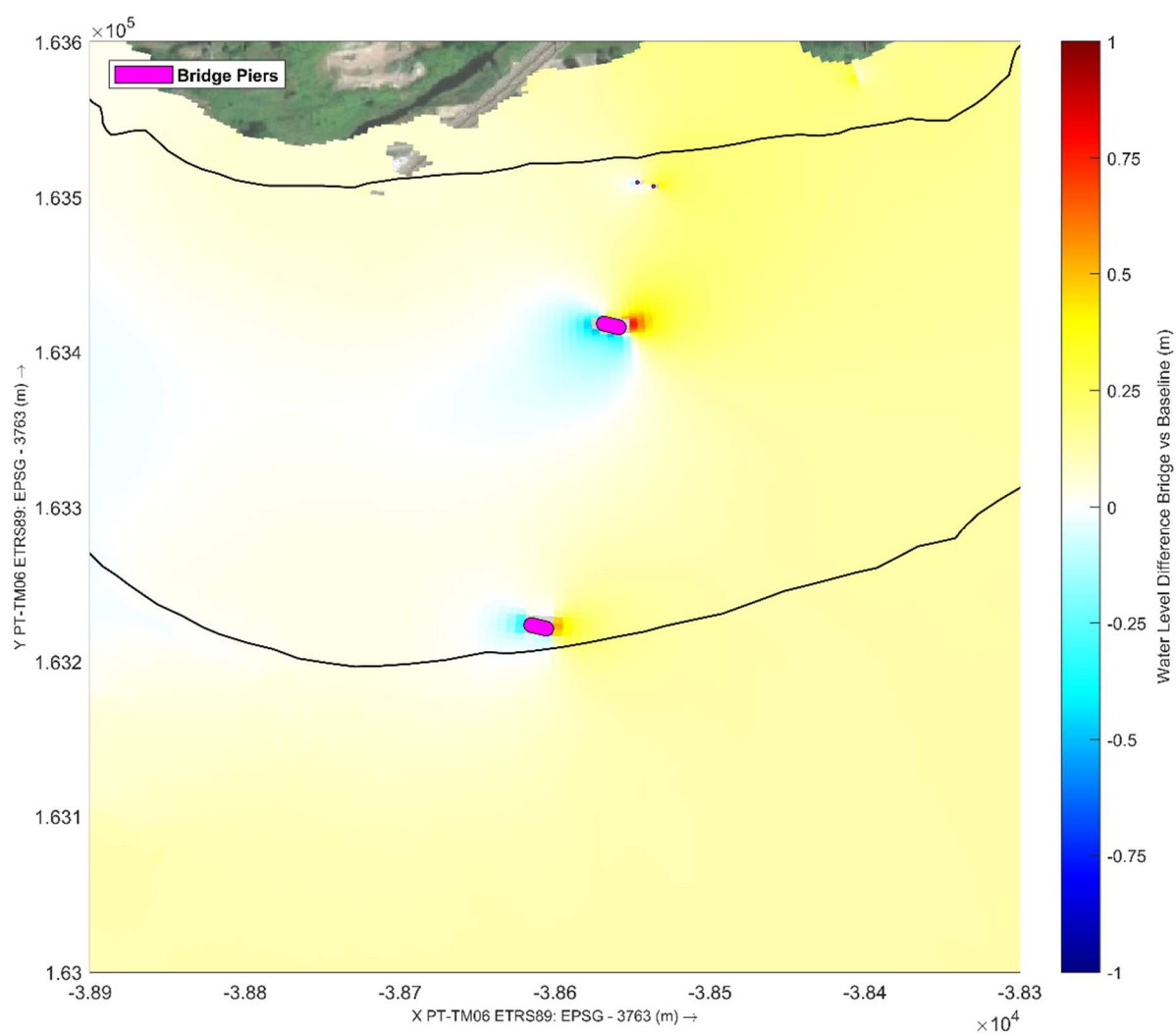


Figura B-42: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 5%.

B.4 CAUDAL COM PERÍODO DE RETORNO DE 1000 ANOS (INTERVALO DE CONFIANÇA DE 95%)

A Figura B-43 e a Figura B-44 apresentam as condições de escoamento para os cenários de referência e com a presença da ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, respetivamente. Na proximidade da ponte, as velocidades do escoamento situam-se geralmente entre 2,5 e 3,0 m/s para o caudal de cheia considerado. Mais a jusante, a secção do rio torna-se mais estreita, canalizando o escoamento e originando um aumento acentuado da velocidade, com valores que ultrapassam 4,8 m/s.

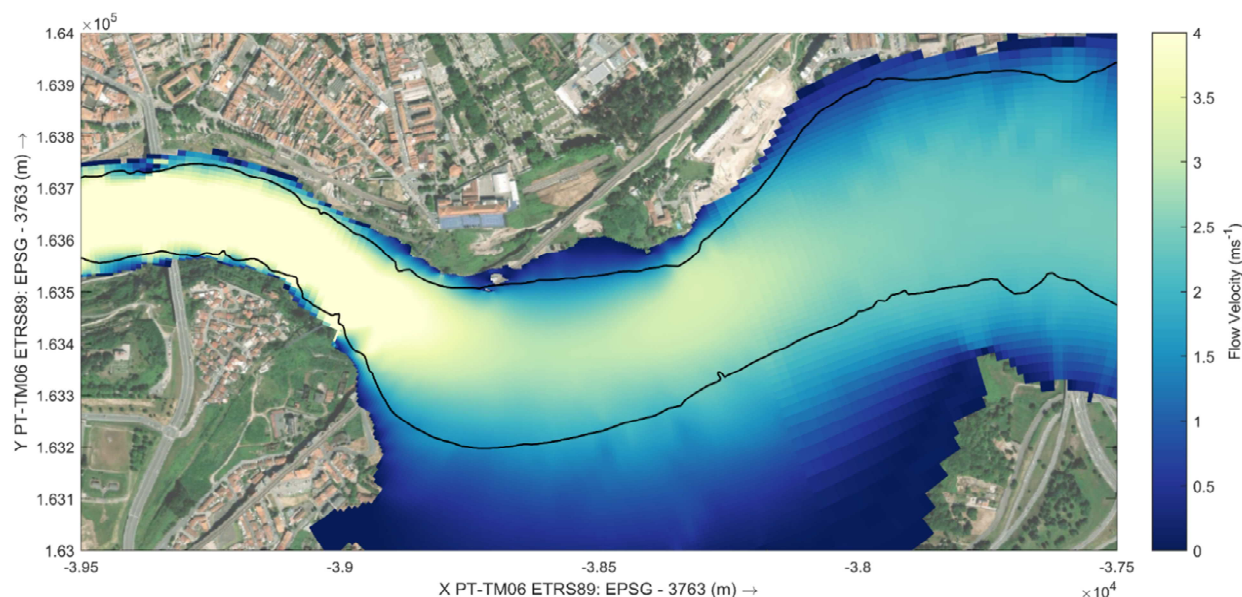


Figura B-43: Velocidade do escoamento para o cenário de referência para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

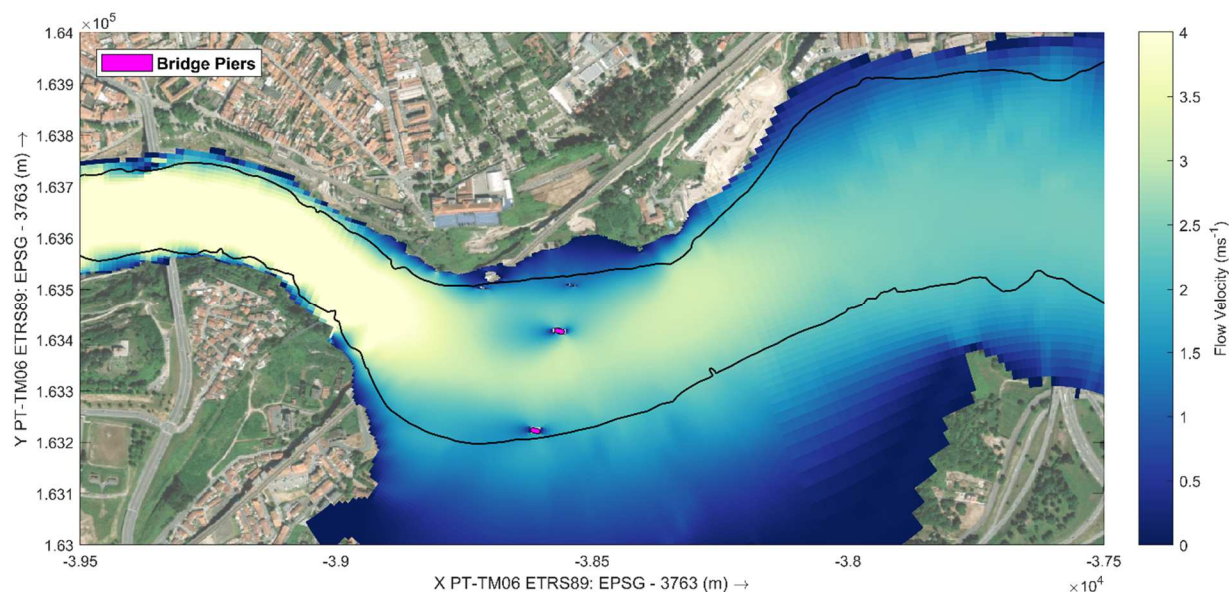


Figura B-44: Velocidade do escoamento para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução, para o caudal associado ao período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

A presença dos pilares da ponte provoca alterações localizadas no campo de escoamento nas imediações das estruturas (Figura B-45). Neste cenário, as maiores reduções de velocidade são observadas junto ao pilar localizado na posição mais central do rio (torre T2), atingindo valores até 2,3 e 2,5 m/s, a montante e a jusante do pilar, respetivamente. Nos restantes pilares, implantados mais próximo das margens do rio, as diminuições são significativamente inferiores, situando-se entre 1,4 (torre T1) e 1,1 m/s (pilares PR10). Por outro lado, observam-se acelerações localizadas nos flancos dos pilares e no tramo compreendido entre as torres T1 e T2, que atingem valores entre 0,4 e 0,5 m/s.

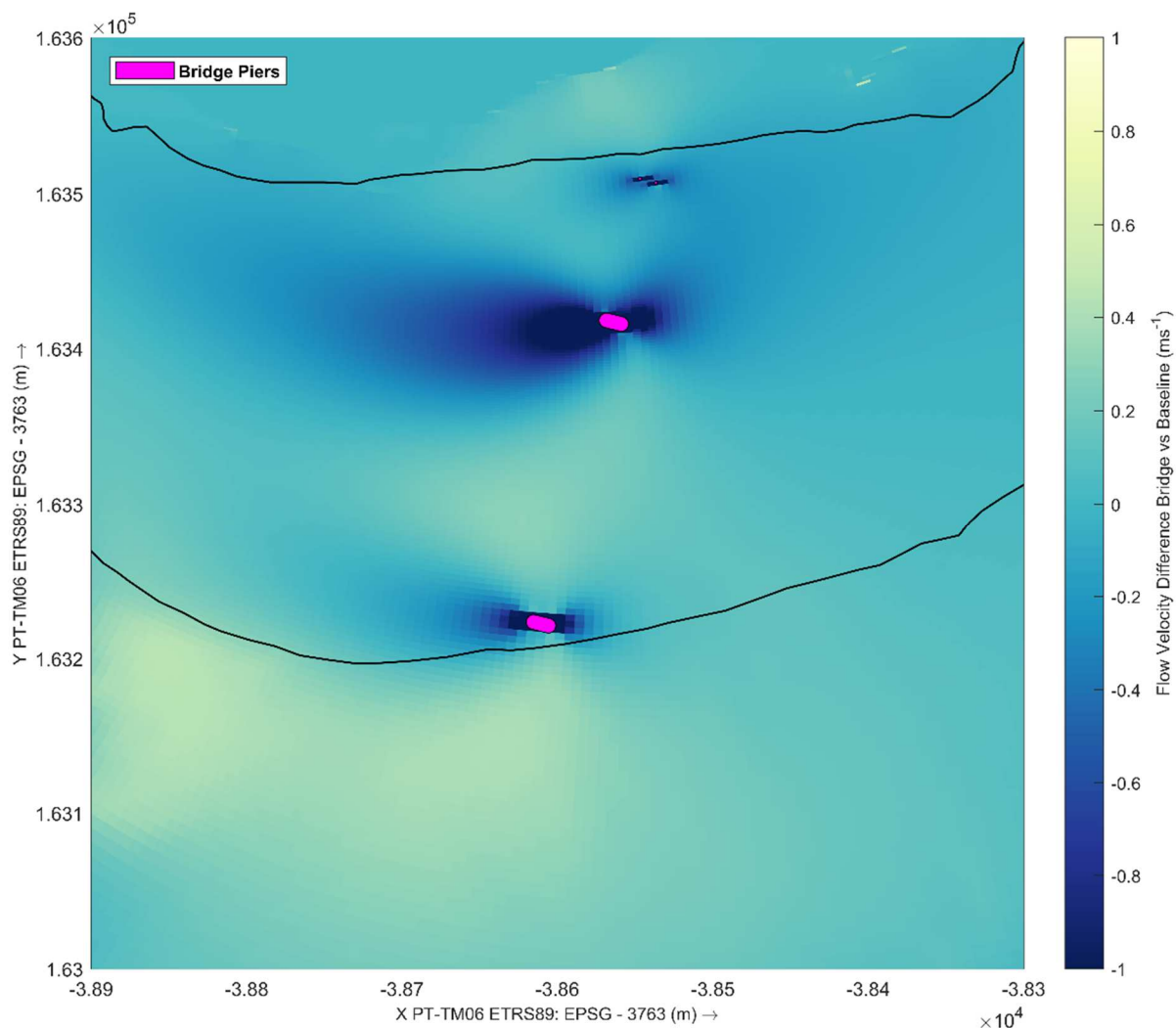


Figura B-45: Diferenças na velocidade do escoamento entre os cenários com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o de referência (caudal associado ao período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%).

A distribuição espacial dos níveis de água foi calculada para os cenários de referência (Figura B-46) e com ponte (Figura B-47). Em geral, a cota da superfície livre da água pode chegar até 17,0 m ZH na zona da ponte. Comparando os cenários com e sem pilares (Figura B-48), verifica-se que a presença dos pilares introduz um aumento local dos níveis de água a montante, devido ao efeito de obstrução do escoamento, com as diferenças máximas a atingir 0,61 m. A jusante dos pilares, observa-se uma ligeira descida da cota da superfície livre, até 0,37 m, resultante da aceleração do escoamento ao contornar o estrangulamento imposto pelos pilares. Além disso, é visível um aumento

uniforme do nível de água de aproximadamente 12,5 cm a montante da zona de influência direta dos pilares, evidenciando um ajustamento hidrodinâmico em maior escala causado pela presença dos pilares.

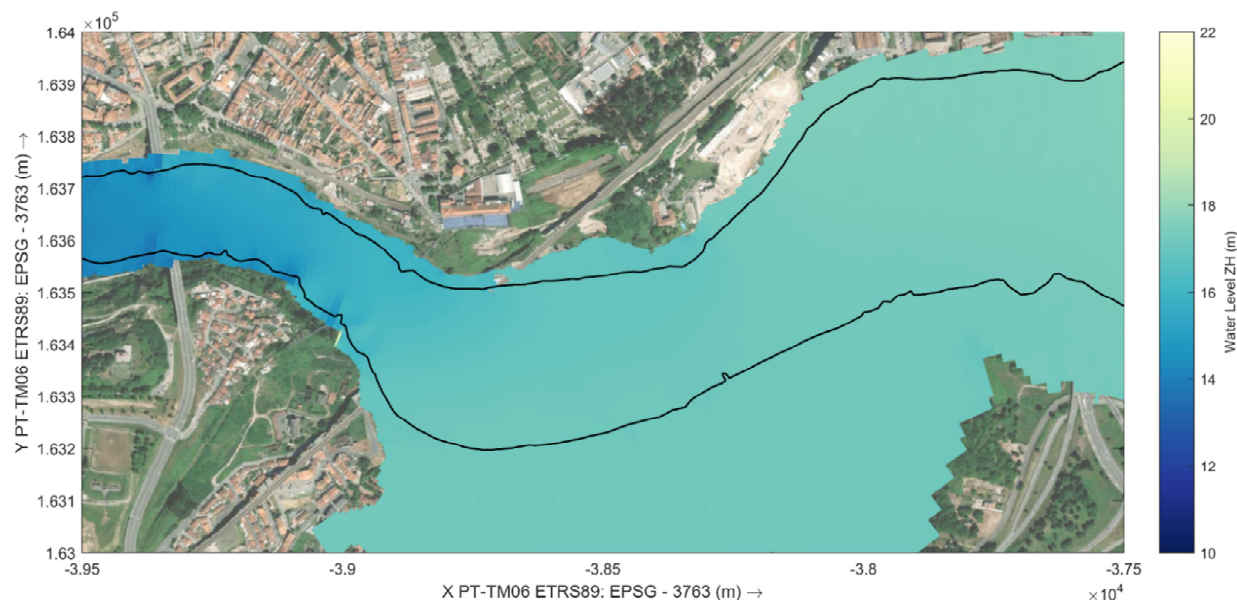


Figura B-46: Nível da água para o cenário de referência e o caudal com um período de retorno de 100 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

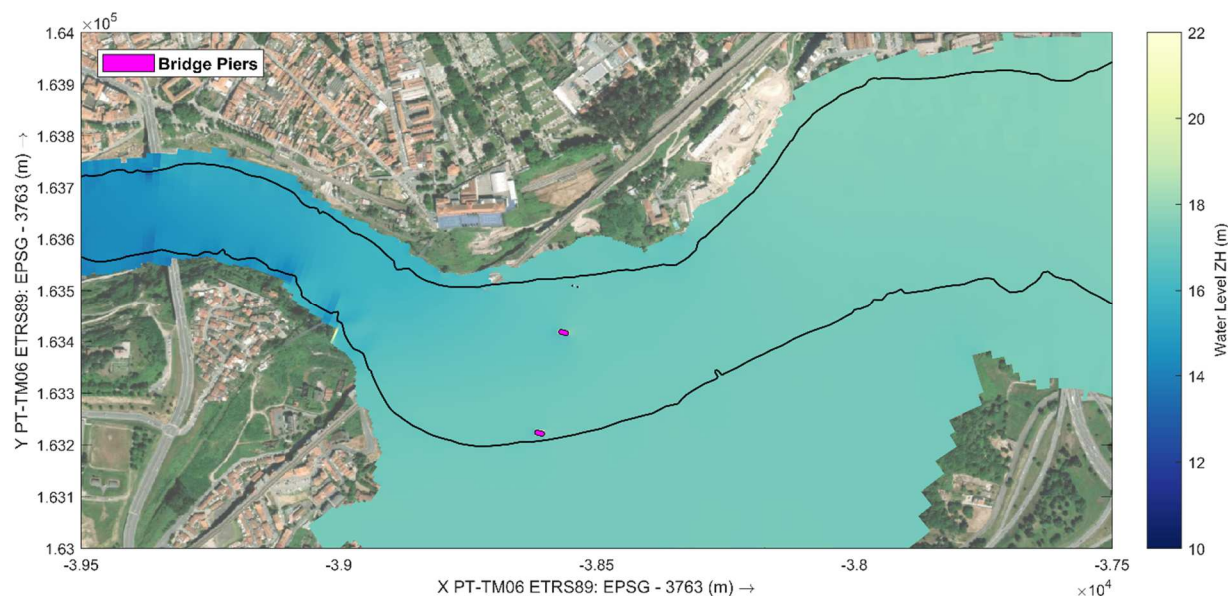


Figura B-47: Nível da água para o cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução e o caudal com um período de retorno de 1000 anos, correspondente ao intervalo de confiança de 95%.

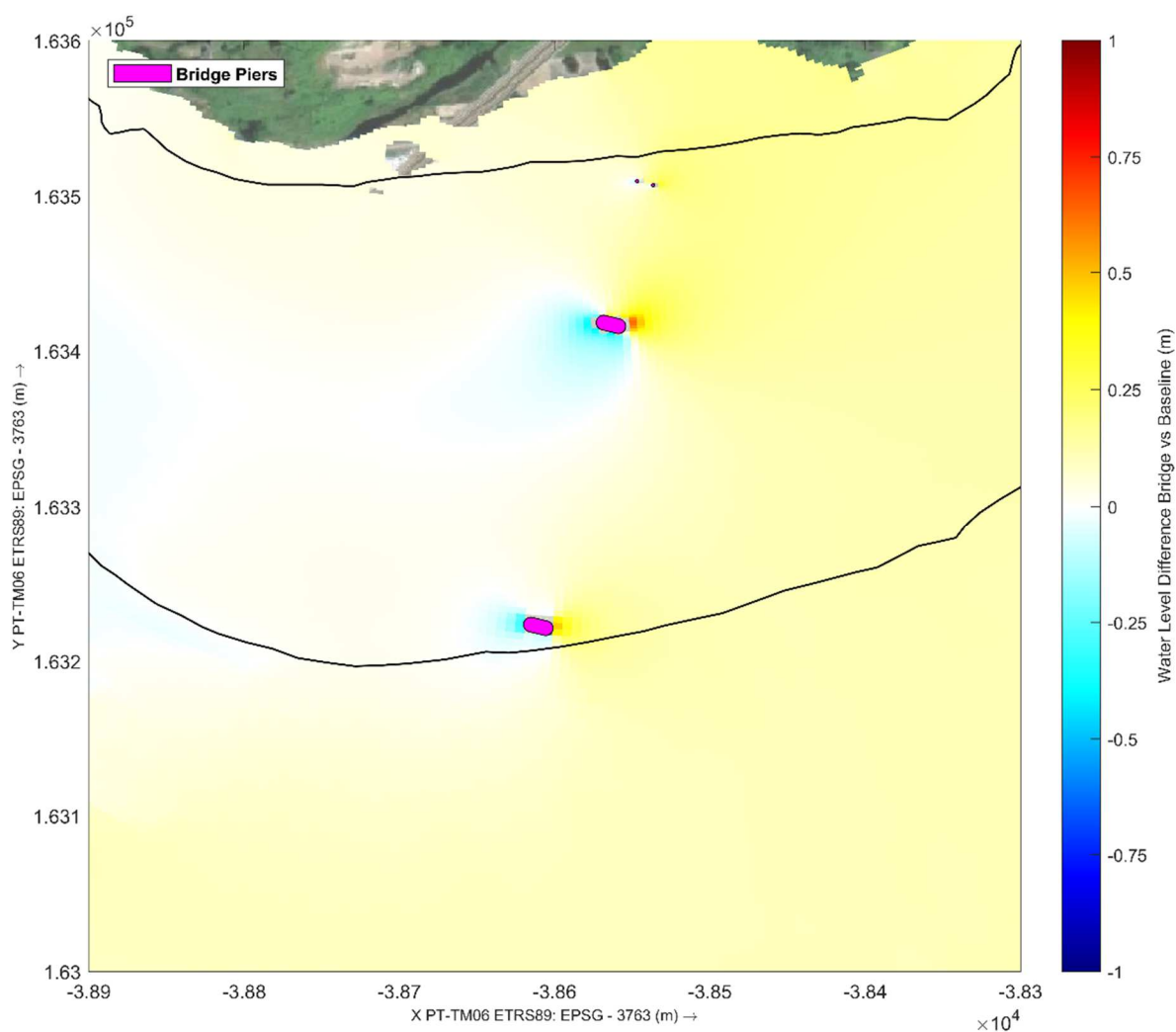


Figura B-48: Diferenças de nível de água: cenário com a ponte rodoferroviária de Projeto de Execução versus cenário de referência para o período de retorno de 1000 anos e para o intervalo de confiança de 95%.