

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS E SANEAMENTO  
AMBIENTAL

JULIANA KAIBER DA SILVA

ESCOAMENTOS TRANSIENTES BIFÁSICOS EM SISTEMAS DE DRENAGEM  
URBANA: UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE A RELEVÂNCIA DAS  
SINGULARIDADES GEOMÉTRICAS DO SISTEMA

PORTO ALEGRE

2019

JULIANA KAIBER DA SILVA

ESCOAMENTOS TRANSIENTES BIFÁSICOS EM SISTEMAS DE DRENAGEM  
URBANA: UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE A RELEVÂNCIA DAS  
SINGULARIDADES GEOMÉTRICAS DO SISTEMA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do grau de doutora.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Ana Luiza de Oliveira Borges

Coorientador: Prof. Dr. José Goes de Vasconcelos Neto

Colaborador: Prof. Me. Rogério Dornelles Maestri

PORTO ALEGRE

2019

### CIP - Catalogação na Publicação

Kaiber da Silva, Juliana  
ESCOAMENTOS TRANSIENTES BIFÁSICOS EM SISTEMAS DE  
DRENAGEM URBANA: UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE A  
RELEVÂNCIA DAS SINGULARIDADES GEOMÉTRICAS DO SISTEMA /  
Juliana Kaiber da Silva. -- 2019.  
221 f.  
Orientador: Ana Luiza de Oliveira Borges.

Coorientador: José Goes Vasconcelos Neto.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas,  
Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2019.

1. escoamentos transientes em sistemas de drenagem  
urbana. 2. drenagem urbana. 3. escoamentos bifásicos.  
4. singularidades geométricas. 5. aprisionamento de  
bolsões de ar. I. Borges, Ana Luiza de Oliveira,  
orient. II. Vasconcelos Neto, José Goes, coorient.  
III. Título.

JULIANA KAIBER DA SILVA

ESCOAMENTOS TRANSIENTES BIFÁSICOS EM SISTEMAS DE DRENAGEM  
URBANA: UMA INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL SOBRE A RELEVÂNCIA DAS  
SINGULARIDADES GEOMÉTRICAS DO SISTEMA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em  
Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como  
requisito parcial à obtenção do grau doutora.

Aprovado em: Porto Alegre, 1º de julho de 2019.

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Ana Luiza de Oliveira Borges – UFRGS

Orientadora

---

Prof. Dr. Joel Avruch Goldenfum – UFRGS

Examinador

---

Prof. Dr. Daniel Gustavo Allasia Piccilli – UFSM

Examinador

---

Prof. Dr. Harry Edmar Schulz – UFC

Examinador

*Aos meus pais, pelo amor e apoio infinitos.*

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Carmen e João Batista, por todo o amor, compreensão e apoio. Vocês são, nestes tempos difíceis, os melhores exemplos de persistência, cuidado e vontade de viver. Espero sempre honrar os esforços e a dedicação de vocês. Ao meu irmão Rafael, pelo companheirismo e por ter nos dado a florzinha mais linda, a pequena Maria. Eu amo muito vocês!

À Prof. Ana Luiza de Oliveira Borges e ao Prof. Rogério Dornelles Maestri, meus orientadores, pelo acolhimento, paciência e, principalmente, por terem me dado esse presente especial, a Hidráulica Experimental, que vem mudando a minha vida e ampliando os meus horizontes. Espero seguir os passos profissionais de vocês e passar os próximos anos construindo modelos e fazendo ensaios.

Ao Prof. José Goes Vasconcelos Neto, pela coorientação, disposição em me ajudar e pelos grandes incentivos desses dois últimos anos.

À Carolina e à Patrícia, amigas e companheiras nessa jornada da pós-graduação, por todas as gargalhadas e suporte.

Ao Cristian, por toda a parceria desses anos e, em especial, pela ajuda durante a execução dos experimentos.

Ao Prof. Rafael Manica e à equipe do Neced, pelo suporte.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelas bolsas de estudo que recebi ao longo da vida.

Ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas e à Universidade Federal do Rio Grande do Sul por terem me formado engenheira, mestra e agora doutora.

Ao povo brasileiro,  
eu agradeço!



## RESUMO

Escoamentos transientes bifásicos em sistemas de drenagem urbana e as interações entre as fases ar-água podem causar danos estruturais severos aos sistemas. Os danos na estrutura de parte do sistema do Conduto Forçado Álvaro Chaves (Porto Alegre – Brasil), ocorridos em fevereiro de 2013, motivaram a implantação de um modelo físico de detalhe em escala reduzida no Pavilhão Fluvial do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Um longo trecho do sistema do Conduto Forçado Álvaro Chaves foi reproduzido no modelo reduzido, incluindo a representação detalhada de suas singularidades geométricas: mudança de direção em ângulos vivos com diminuição da seção transversal, desníveis na base e no topo do conduto, estreitamentos e diminuição da área da seção transversal na direção de jusante. A escala de redução geométrica adotada foi de 1:15, resultando em um modelo de 30 m de comprimento, com alturas (16 – 42 cm) e larguras variáveis (20 – 50 cm). O modelo foi construído com placas de acrílico de 10 mm de espessura, para possibilitar a visualização do escoamento. O procedimento experimental consistiu no estabelecimento de condições iniciais de regime permanente e, em seguida, na propagação de uma frente de enchimento através da abertura de um registro esfera. As variáveis experimentais testadas incluíram: condições de jusante, nível inicial d'água e condições de ventilação do sistema. A instrumentação utilizada durante os experimentos era composta por medidores de vazão eletromagnéticos, 10 transdutores de pressão, 3 sensores de velocidade (Velocímetro Acústico Doppler – ADV) e 5 câmeras de vídeo de alta resolução. A metodologia de análise dos dados baseou-se nas seguintes etapas: (i) avaliação das imagens de vídeo previamente editadas, visando à identificação dos fenômenos hidráulicos de interesse; (ii) avaliação dos dados de pressão, visando identificar padrões de variação de pressão e associá-los aos fenômenos hidráulicos identificados nos vídeos; (iii) avaliação dos dados de velocidade, buscando perceber os efeitos dos fenômenos hidráulicos e do padrão de variação da pressão observado no transdutor de pressão TP06. Os dados coletados durante a realização dos experimentos no modelo físico permitiram o estabelecimento de três conjuntos de resultados: (i) mecanismos de aprisionamento de ar; (ii) processo de enchimento, movimentação dos bolsões de ar e seus impactos no comportamento hidráulico do sistema de drenagem; (iii) efeitos da restrição da ventilação dos pontos altos do sistema no processo de pressurização do escoamento. Dois mecanismos de aprisionamento de ar ainda não reportados na literatura foram identificados e denominados de Interface de Pressurização e Impacto da Frente de Enchimento. Esses resultados evidenciam a importância das singularidades geométricas presentes no sistema, apontando suas influências no estabelecimento de diversos fenômenos hidráulicos. Um modelo de coluna rígida foi adaptado, para representar a pressurização do sistema em função da restrição das condições de ventilação.

**Palavras-chave:** escoamentos transientes em sistemas de drenagem urbana, escoamentos bifásicos, singularidades geométricas, aprisionamento de bolsões de ar, Conduto Forçado Álvaro Chaves.

## ABSTRACT

Severe structural damages in stormwater systems are related to biphasic unsteady flows and interactions between air and water phases. The damage to the structure of part of the Álvaro Chaves stormwater system (Porto Alegre – Brazil), occurred in February 2013, encouraged the implementation of a physical model at the Institute of Hydraulic Research of the Federal University of Rio Grande do Sul. A long section of the stormwater system was reproduced in the hydraulic physical model, including detailed representations of its geometric singularities, e.g. sharp bends, drop sections, decrease cross sectional area in the downstream direction. The geometric scale factor adopted was 1:15, resulting in a 30 m length, variable height (16 – 42 cm) and width (20 – 50 cm). The apparatus was built in Plexiglas panels (10 mm-thick) to allow for flow visualization. The experimental procedure consisted in establishing initial steady-state conditions and then propagating a filling front through the opening of a ball valve. Experimental variables tested included downstream conditions, initial water level and system's ventilation conditions. Electromagnetic flowmeters, 10 pressure transducers, 3 ADV probes and 5 high-resolution video cameras comprised the instrumentation used during the experiments. The data analysis methodology was based on the following steps: (i) evaluation of previously edited video images aiming at identifying the hydraulic phenomena of interest; (ii) evaluation of pressure data in order to identify patterns of pressure variation and to associate it with the hydraulic phenomena identified during video analysis; (iii) evaluation of the velocity data seeking to understand the effects of hydraulic phenomena and the pressure variation pattern observed in a specific pressure transducer. The data collected during the experiments allowed the establishment of three sets of results: (i) air entrapment mechanisms; (ii) filling process, air pocket movement and its impacts on the hydraulic behavior of the system; (iii) effects of the ventilation restriction of the higher points during the pressurization process. Two air entrapment mechanisms not yet reported in the literature were identified during experiments and named Pressurization Interface and Impact of the Filling Front. These results highlight the relevance of the geometric singularities present in the system, pointing out its influence in the establishment of several hydraulic phenomena. A rigid column model was adapted to represent the overall pressurization process as a function of the restriction of the ventilation conditions.

**Keywords:** unsteady flows in stormwater systems, two-phase flows, geometric singularities, air pocket entrapment, Álvaro Chaves System.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estágios da transição entre escoamento à superfície livre e escoamento pressurizado. ....	22
Figura 2. Estágios da transição entre o escoamento à superfície livre e pressurizado .....	23
Figura 3. Sequência temporal do avanço do ressalto hidráulico sem a pressurização imediata do conduto. ....	30
Figura 4. Propagação de ondas senoidais de jusante para montante. ....	30
Figura 5. Movimentação de jusante para montante do bolsão de ar aprisionado. ....	31
Figura 6. Fotos publicadas na imprensa local sobre o colapso estrutural do Conduto Forçado Álvaro Chaves em 20/02/2013 .....	53
Figura 7. Enchimento do CFAC proposto no Parecer Técnico elaborado pelo CREA-RS.....	55
Figura 8. Lotes de execução da obra e bacia de contribuição ao Conduto Forçado Álvaro Chaves. ....	56
Figura 9. Detalhe das estruturas por onde as contribuições das galerias dos Lotes 2 e 3 afluem para a seção de montante do Lote 1.....	57
Figura 10. Traçado e dimensões das galerias CFAC.....	58
Figura 11. Buraco que se formou na Dr. Timóteo em 28 de outubro de 2013 em dois pontos distintos.....	59
Figura 12. Esboço do aparato experimental .....	63
Figura 13. Detalhes geométricos do modelo reduzido. ....	64
Figura 14. Localização dos transdutores de pressão e dos ADV's.....	65
Figura 15. Dados de vazão afluyente, pressão e velocidade do escoamento após tratamento preliminar.....	68
Figura 16. Esboço do modelo conceitual desenvolvido na avaliação numérica. ....	69
Figura 17. Processo de enchimento rápido, tendo o degrau como local de aprisionamento de ar .....	73
Figura 18. Registros de velocidade e pressão do ensaio N(2)J(5)V(VL).....	75
Figura 19. Processo de enchimento considerando o aprisionamento de ar na rampa. ....	77
Figura 20. Registros de pressão e velocidade do ensaio N(3)J(10)V(VL).....	79
Figura 21. Principais etapas de desenvolvimento do mecanismo Interface de Pressurização .	82
Figura 22. Etapas de desenvolvimento do mecanismo de aprisionamento de ar Interface de Pressurização (IP) na rampa, considerando imagens relativas ao ensaio N(3)J(10)V(VL). ....	84
Figura 23. Registros de pressão considerando o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização (IP), no ensaio (N(3)J(10)V(VL))......	85
Figura 24. Pressurização do ar no momento do aprisionamento pelo mecanismo Interface de Pressurização (IP), registrado nos transdutores de pressão TP06 e TPAr07 para os ensaios N(3)J(10)V(VL), N(3)J(14)V(VL) e N(3)J(27)V(VL). ....	86
Figura 25. Etapas de desenvolvimento do mecanismo de aprisionamento de ar Estabelecimento Interface de Pressurização (IP) no degrau. ....	88
Figura 26. Registro de pressão do transdutor TP Jusante o e local de análise do vídeo. ....	89
Figura 27. Principais etapas de desenvolvimento do mecanismo Impacto da Frente de Enchimento (IFE) .....	90
Figura 28. Eventos que marcam o estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE no degrau (Ensaio N(2)J(5)V(VL)). ....	92
Figura 29. Local do aprisionamento de ar (análise do vídeo) e registro de pressão do transdutor de pressão TP08 referente ao ensaio N(2)J(5)V(VL) .....	93
Figura 30. Eventos que marcam o estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE, seguido pela ocorrência do mecanismo de aprisionamento de ar IP, tomando o ensaio N(3)J(5)V(VL) como referência.....	94

Figura 31. Local do aprisionamento de ar (análise do vídeo) e registros de pressão de ensaios onde os mecanismos de aprisionamento de ar IFE e IP ocorrem, sequencialmente, na rampa. ....	95
Figura 32. Registros de pressão e velocidade do ensaio N(2)J(5)V(VL). ....	98
Figura 33. Passagem do bolsão pela região de análise. ....	100
Figura 34. Distribuição das câmeras ao longo do Trecho B. ....	101
Figura 35. Descrição da movimentação de bolsões de ar pela singularidade geométrica. ....	103
Figura 36. Avanço e passagem do bolsão de ar pela parede vertical superior do modelo. ....	104
Figura 37. Transientes de pressão causados pelo avanço de bolsões de ar aprisionados na rampa, N(3)J(5)V(VL). ....	105
Figura 38. Detalhe da passagem dos bolsões pela rampa considerando os registros do transdutor TPAr03, N(3)J(5)V(VL). ....	106
Figura 39. Pressurização do ar devido à restrição das condições de ventilação registrada pelo transdutor de pressão TP06. ....	107
Figura 40. Variação da pressão do ar devido à restrição de ventilação. ....	108
Figura 41. Pressurização do ar devido à restrição de ventilação registradas pelo transdutor de pressão TPAr 01. ....	109
Figura 42. Variação da vazão afluyente em função da pressurização ....	110
Figura 43. Comparação de registros experimentais e valores calculados para a pressurização do ar. ....	111
Figura 44. Comparação dos registros experimentais e os valores calculados para a variação da vazão afluyente. ....	112
Figura 45. Detalhe das vazões afluentes 1 medida e calculada. ....	112
Figura 46. Níveis iniciais do escoamento. ....	124
Figura 47. Ensaio N(1)J(5)V(VL) - Séries temporais de vazão afluyente, pressão e velocidade. ....	127
Figura 48. Ensaio N(1)J(5)V(VL) – Chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP. ....	128
Figura 49. Ensaio N(1)J(5)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa. ....	132
Figura 50. Ensaio N(1)J(10)V(VL) - Séries temporais de vazão afluyente, pressão e velocidade. ....	137
Figura 51. Ensaio N(1)J(10)V(VL) - Estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP no degrau. ....	138
Figura 52. Ensaio N(1)J(10)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem dos bolsões de ar pela rampa. ....	142
Figura 53. Ensaio N(1)J(14)V(VL) - Séries temporais de vazão afluyente, pressão e velocidade. ....	147
Figura 54. Ensaio N(1)J(14)V(VL) - Estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP no degrau. ....	148
Figura 55. Ensaio N(1)J(14)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa. ....	151
Figura 56. Ensaio N(1)J(27)V(VL) - Séries temporais de vazão afluyente, pressão e velocidade. ....	157
Figura 57. Ensaio N(1)J(27)V(VL) - Chegada da frente de enchimento ao degrau sem aprisionamento de bolsões de ar. ....	158
Figura 58. Ensaio N(1)J(27)V(VL) - Passagem da onda de choque pela rampa. ....	162
Figura 59. Ensaio N(2)J(5)V(VL) - Séries temporais de vazão afluyente, pressão e velocidade. ....	165

Figura 60. Ensaio N(2)J(5)V(VL) – Chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE. ....	166
Figura 61. Ensaio N(2)J(5)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa. ....	170
Figura 62. Ensaio N(2)J(10)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade. ....	177
Figura 63. Ensaio N(2)J(10)V(VL) – Chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE. ....	178
Figura 64. Ensaio N(2)J(10)V(VL) - Avanço do bolsão de ar de jusante para montante e sua passagem pela rampa. ....	182
Figura 65. Ensaio N(2)J(14)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade. ....	186
Figura 66. Ensaio N(2)J(14)V(VL) - Sequência temporal da chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento de mecanismo de aprisionamento de ar. ....	187
Figura 67. Ensaio N(2)J(14)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa. ....	190
Figura 68. Ensaio N(3)J(5)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade. ....	195
Figura 69. Ensaio N(3)J(5)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE. ....	196
Figura 70. Ensaio N(3)J(10)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade. ....	200
Figura 71. Ensaio N(3)J(10)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP. ....	201
Figura 72. Ensaio N(3)J(14)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade. ....	207
Figura 73. Ensaio N(3)J(14)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP. ....	208
Figura 74. Ensaio N(3)J(27)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade. ....	215
Figura 75. Ensaio N(3)J(27)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP. ....	216

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Cenários experimentais testados e faixa de variação das variáveis experimentais...	67
Tabela 2. Celeridades da frente de enchimento calculada e medida .....	96
Tabela 3. Comparação entre os valores de celeridade da onda de choque e da carga piezométrica sobre o topo do conduto.....	98
Tabela 4. Celeridades dos bolsões de ar ao se propagarem ao longo do Trecho B. ....	101
Tabela 5. Tabela resumo dos valores de vazão, nível e velocidade de momentos de interesse durante os ensaios.....	125

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	16
2	DIRETRIZES DA PESQUISA .....	19
2.1	Justificativa da pesquisa .....	19
2.2	Questão de pesquisa .....	20
2.3	Hipótese de pesquisa .....	20
2.4	Objetivos .....	20
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	21
3.1	Escoamento bifásico e a transição entre o escoamento à superfície livre e o pressurizado em sistemas de drenagem urbana .....	21
3.2	Modelos hidráulicos físicos.....	32
4	CASO EM ESTUDO: CONDUTO FORÇADO ÁLVARO CHAVES .....	53
5	METODOLOGIA .....	61
5.1	Aparato experimental .....	61
5.2	Condições e procedimentos experimentais .....	65
5.3	Metodologia de análise de dados.....	68
5.4	Avaliação analítica através de Modelo de Coluna Rígida.....	69
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	72
6.1	Descrição geral do processo de enchimento do modelo do CFAC .....	72
6.2	Mecanismos de aprisionamento de ar decorrentes das singularidades do CFAC .....	79
6.2.1	Aprisionamento de bolsões de ar: estabelecimento de Interface de Pressurização (IP) .....	80
6.2.2	Aprisionamento de bolsões de ar: impacto da frente de enchimento com singularidades geométricas do topo do conduto.....	89
6.3	Cinemática das feições do escoamento do CFAC .....	95
6.3.1	Caracterização da frente de enchimento e da onda de choque .....	96
6.3.2	Caracterização dos bolsões de ar.....	99

6.3.3	Passagem dos bolsões de ar pela singularidade geométrica.....	101
6.4	Efeitos da restrição da ventilação dos pontos altos do sistema .....	106
6.4.1	Resultados experimentais .....	106
6.4.2	Resultados do modelo de Coluna Rígida .....	110
6.5	Considerações gerais sobre os resultados.....	112
7	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	115
7.1	Conclusões gerais .....	115
7.2	Recomendações para trabalhos futuros .....	117
	REFERÊNCIAS .....	118
	APÊNDICE .....	123
	Ensaio N(1)J(5)V(VL) .....	126
	Ensaio N(1)J(10)V(VL) .....	136
	Ensaio N(1)J(14)V(VL) .....	146
	Ensaio N(1)J(27)V(VL) .....	156
	Ensaio N(2)J(5)V(VL) .....	164
	Ensaio N(2)J(10)V(VL) .....	176
	Ensaio N(2)J(14)V(VL) .....	185
	Ensaio N(3)J(5)V(VL) .....	194
	Ensaio N(3)J(10)V(VL) .....	199
	Ensaio N(3)J(14)V(VL) .....	206
	Ensaio N(3)J(27)V(VL) .....	214

## 1 INTRODUÇÃO

Os sistemas de drenagem urbana são elementos complexos e essenciais na infraestrutura urbana e a literatura relata colapsos estruturais nos mesmos em várias cidades do mundo (WIGGERT, 1972, HAMAM; MCCORQUODALE, 1982, GUO; SONG, 1990, ZHOU; HICKS; STEFFLER, 2002b; WRIGHT et al., 2008, POZOS-ESTRADA et al., 2015). Parte da estrutura do Conduto Forçado Álvaro Chaves (CFAC), implantado na cidade de Porto Alegre (Rio Grande do Sul, Brasil), apresentou danos durante um evento chuvoso em fevereiro de 2013.

A transição do escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado bem como os fenômenos hidráulicos que podem ocorrer durante essa transição são apontados pelos autores como causas potenciais para essas falhas. Yen (1978) destaca que o escoamento, em um sistema de drenagem urbana, é um problema hidráulico complexo, devido à sua natureza transiente, não-uniforme e o fato do escoamento apresentar-se ora como à superfície livre ora como pressurizado.

O aprisionamento de grandes quantidades de ar, na forma de bolsões, durante o processo de transição, torna o escoamento em sistemas de drenagem ainda mais complexo e resulta em um escoamento bifásico pressurizado. A redução da seção transversal efetiva dos condutos e a consequente diminuição da capacidade de escoamento e de armazenamento é um dos inconvenientes decorrentes do aprisionamento e acúmulo de ar no interior dos sistemas (LAUHLAN et al., 2005, POZOS-ESTRADA et al., 2010, POTHOF; CLEMENS, 2010). Em sistemas que operam como condutos forçados, a súbita despressurização de bolsões de ar (e/ou de vapor d'água), devida à existência de ventosas ou outros dispositivos de eliminação de ar pode ocasionar o estabelecimento de transientes de pressão, comprometendo estruturalmente o sistema. Estudos atuais, focados na compreensão dos mecanismos de estabelecimento de *geysers* urbanos (VASCONCELOS; WRIGHT, 2011, WRIGHT; LEWIS; VASCONCELOS, 2011a, WRIGHT; LEWIS; VASCONCELOS, 2011b, MULLER; WANG; VASCONCELOS, 2017, CONG; CHAN; LEE, 2017, LEON, 2019, LEON; ELAYEB; TANG, 2019) também os associam ao aprisionamento, pressurização, movimentação e liberação de ar nas estruturas verticais dos sistemas de drenagem.

Adaptar os sistemas de drenagem urbana ao traçado de ruas e avenidas e à disposição dos demais elementos da infraestrutura urbana, tais como sistemas de abastecimento de água, sistemas de esgotamento sanitário e sistemas de abastecimento de gás é um desafio para engenheiros e projetistas. As junções são elementos que conectam os condutos de drenagem e

são comumente utilizados pelos projetistas na tarefa de dispor o sistema de drenagem no contexto urbano. Mudanças de direção, alterações na declividade de fundo dos condutos, desníveis geométricos na base e no topo dos condutos, alargamentos e estreitamentos ou qualquer outro ponto do sistema onde haja a necessidade de adaptar seções transversais com características geométricas distintas são entendidas como junções, ou singularidades geométricas do sistema, como são referidas neste trabalho.

O escoamento transiente, no interior dos condutos de sistemas de drenagem urbana, é relativamente bem compreendido atualmente, pois tem sido investigado experimental e numericamente desde os anos 1970 (WIGGERT, 1972, HAMAM; MCCORQUODALE, 1982, CARDLE; SONG, 1988, CARDLE; SONG; YUAN, 1989, GUO; SONG, 1990, CAPART; SILLEN; ZECH, 1997, TRAJKOVIC et al., 1999, LI; MCCORQUODALE, 1999, VASCONCELOS, 2005, VASCONCELOS; WRIGHT, 2005, VASCONCELOS; WRIGHT; ROE, 2006, FERRERI; CIRAIOLO; RE, 2014a e 2014b). Apesar de sua abundância nos sistemas de drenagem, não é comum encontrar trabalhos que investiguem o estabelecimento do escoamento transiente nas singularidades geométricas e suas relações com os mecanismos de aprisionamento de ar e tampouco estudos que associem singularidades geométricas às falhas funcionais e estruturais registradas nos sistemas de drenagem.

Nesse contexto, o presente trabalho buscou discutir e avaliar o papel das singularidades geométricas no estabelecimento do escoamento transiente bifásico em sistemas de drenagem. Para tanto, realizou-se uma investigação experimental, em um modelo físico hidráulico, o qual reproduz trechos do sistema do Conduto Forçado Álvaro Chaves, incluindo aí suas singularidades geométricas. O procedimento experimental empregado buscou reproduzir o processo de enchimento de um sistema de drenagem de forma natural, através da admissão de vazões adicionais na extremidade de montante e sem manobras rápidas na extremidade de jusante.

O estudo pioneiro desenvolvido no modelo reduzido do Conduto Forçado Álvaro Chaves, no âmbito de uma dissertação de mestrado, apresentado em Kaiber da Silva (2015), descreveu qualitativamente as instabilidades e fenômenos hidráulicos observados nos experimentos. Assim, a presente tese é uma ampliação e um aprofundamento desse estudo, cujos resultados experimentais constituíram o ponto de partida para a concepção e realização da investigação aqui apresentada. Assim, por ser uma continuação do trabalho inicial, o presente trabalho relata alguns detalhes já apresentados em Kaiber da Silva (2015), tanto em termos dos resultados experimentais obtidos quanto em relação aos temas abordados na revisão bibliográfica. Esses aspectos são devidamente destacados na revisão bibliográfica.

O texto que apresenta o trabalho desenvolvido está organizado em sete capítulos, cuja introdução se constitui no capítulo um. O segundo capítulo destaca as diretrizes gerais da pesquisa. O Capítulo 3, Revisão Bibliográfica, a qual aborda os temas relativos à hidráulica dos sistemas de drenagem urbana e que permeiam este trabalho experimental: transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado, escoamento bifásico, mecanismos de aprisionamento de bolsões de ar e os trabalhos experimentais previamente realizados sobre o tema.

O sistema do Conduto Forçado Álvaro Chaves, cujos danos à estrutura motivaram a construção do modelo físico em 2013, é apresentado como Caso em Estudo no Capítulo 4. Já o Capítulo 5, Metodologia, detalha o aparato experimental, as condições testadas e os procedimentos experimentais executados, bem como a metodologia de análise dos dados. Ainda, um modelo de coluna rígida é apresentado para a avaliação da pressurização do ar nas partes altas do sistema.

Os resultados estão no Capítulo 6, Resultados e Discussão. Partindo da análise dos dados, são apresentados três conjuntos de resultados que visam destacar a importância das singularidades geométricas no processo de enchimento de sistemas de drenagem urbana.

O Capítulo 7, Conclusões e Recomendações, sintetiza e revisa os resultados alcançados frente às questões de pesquisa e aos objetivos propostos. Sugestões para os futuros trabalhos que poderão ser desenvolvidos sobre o tema estão igualmente inseridas nesse capítulo.

Por fim, um conjunto de imagens dos fenômenos hidráulicos de interesse e registros de velocidade, pressão e vazão de alguns ensaios são apresentados na Sessão Apêndice. A apresentação desses dados visa embasar e reforçar os resultados apresentados nesse trabalho.

## 2 DIRETRIZES DA PESQUISA

Apresentam-se, neste capítulo, as diretrizes que orientaram a presente da investigação. São destacados a justificativa, questão de pesquisa, hipóteses e objetivos.

### 2.1 Justificativa da pesquisa

A compreensão dos fenômenos hidráulicos que ocorrem em sistemas de drenagem urbana é essencial para garantir a sua estabilidade estrutural e, conseqüentemente, a segurança e o bem-estar dos cidadãos. Nesse sentido, a investigação experimental dos escoamentos em sistemas de drenagem urbana constitui-se em uma ferramenta importante, proporcionando embasamento técnico para os engenheiros projetistas nas fases de concepção, dimensionamento e operação dessas estruturas.

O comportamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana, onde o escoamento já é naturalmente transiente e não-uniforme, envolve o estabelecimento de uma grande variedade de fenômenos e produtos das instabilidades hidráulicas, muitas vezes sobrepostos, que incorporam ainda mais dificuldade ao estudo desses tipos de escoamentos. Embora significativos avanços tenham ocorrido em relação ao entendimento dos fenômenos que ocorrem durante a transição entre escoamento à superfície livre e escoamento pressurizado, lacunas ainda persistem e a necessidade de ampliação do conhecimento é consenso entre os especialistas da área, particularmente no que tange a situações em que o escoamento se torna pressurizado e bifásico.

Investigações experimentais que avaliam o escoamento transiente em singularidades geométricas e seus efeitos no comportamento global do sistema são escassas. Nessas circunstâncias, os resultados oriundos da pesquisa aqui apresentada podem oferecer pistas sobre questões ainda pouco compreendidas, tais como oscilações de pressão relacionadas à movimentação de bolsões de ar e o estabelecimento de *geysers* urbanos.

Finalmente, argumenta-se que as pesquisas realizadas no modelo do CFAC apresentam potencial de generalização de seus resultados. Trata-se de um modelo que reproduz a geometria exata de um trecho de um sistema de drenagem que apresentou falhas e envolve procedimentos experimentais que tentam mimetizar o enchimento do sistema de forma mais realística possível.

## 2.2 Questão de pesquisa

Os argumentos postos e os resultados apresentados em Kaiber da Silva (2015) conduziram à questão que orientou a presente investigação: As singularidades geométricas de um sistema de drenagem urbana condicionam o escoamento a ponto de influenciar as interações ar-água e o comportamento global do sistema?

Considera-se que questões de pesquisa auxiliares expõem em detalhes o que envolve a questão posta, a saber:

1. A geometria do sistema condiciona os mecanismos envolvidos no aprisionamento de ar?
2. A movimentação dos bolsões de ar, no interior do sistema, impacta o comportamento hidráulico global do sistema?
3. A existência de restrições na ventilação do sistema de drenagem influencia o processo de pressurização do escoamento em um contexto de enchimento rápido?

## 2.3 Hipótese de pesquisa

As interações entre as singularidades geométricas presentes no sistema e o escoamento transiente influenciam os processos de transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado, que podem levar ao aprisionamento e pressurização de bolsões de ar, determinando o comportamento hidráulico do sistema.

## 2.4 Objetivos

O presente estudo teve como objetivo investigar o papel das singularidades geométricas nos fenômenos hidráulicos que ocorrem durante o processo de enchimento rápido de sistemas de drenagem urbana, considerando as condições de escoamento transiente bifásico, a partir do estudo de trecho do Conduto Forçado Álvaro Chaves (CFAC), reproduzido em modelo físico.

Para alcançar o objetivo geral, foram propostos os seguintes objetivos específicos:

1. avaliar a influência das singularidades geométricas nas alterações do escoamento e nos mecanismos de aprisionamento de ar que ocorrem no modelo reduzido;
2. identificar e quantificar os efeitos dos mecanismos de aprisionamento de ar e do local do aprisionamento sobre as variáveis que descrevem o escoamento;
3. identificar e avaliar as possíveis oscilações de pressão causadas pela movimentação do bolsão de ar;
4. investigar a influência dos diferentes tamanhos de orifício de saída de ar no processo de pressurização.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A literatura relacionada ao comportamento hidráulico de sistemas de drenagem ampliou-se enormemente desde os anos 1970. Pesquisas envolvendo investigações experimentais e modelagem numérica dos fenômenos foram desenvolvidas, revelando diferentes particularidades do escoamento.

O processo de transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado, em sistemas de drenagem urbana, é apontado na literatura como o momento de formação de fenômenos hidráulicos que comprometem a integridade estrutural do sistema. Os mecanismos de aprisionamento desses bolsões e o papel dual da presença de ar nos sistemas em relação aos transientes de pressão, ora atenuando-os ora contribuindo para sua amplificação, são questões ainda em aberto na literatura e diretamente vinculadas ao desenvolvimento dessa pesquisa.

As investigações experimentais, em modelos reduzidos, conduzidas em laboratórios de hidráulica, mostraram-se de fundamental importância no avanço do conhecimento dos fenômenos hidráulicos em questão. Os trabalhos experimentais são brevemente comentados, destacando os principais objetivos de pesquisa, a instalação experimental utilizada, bem como os resultados mais relevantes.

Como mencionado na Introdução, o presente trabalho amplia e aprofunda a pesquisa experimental iniciada durante o mestrado da autora. Assim, a revisão bibliográfica parte da apresentada previamente por Kaiber da Silva (2015), agrega os trabalhos recentes relativos aos temas de interesse e aborda, também, outros assuntos, tais como os trabalhos experimentais relativos ao escoamento em junções e a movimentação de bolsões de ar.

#### **3.1 Escoamento bifásico e a transição entre o escoamento à superfície livre e o pressurizado em sistemas de drenagem urbana**

A transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado foi classificada por Yen (1978) como uma instabilidade hidráulica observada em sistemas de drenagem urbana. A falha de bombas e/ou capacidade inadequada de bombeamento, a ocorrência de descargas não-permanentes afluentes ao sistema, concordâncias horizontais ou verticais impróprias, presença de interceptores ou outros dispositivos de controle, bloqueios do conduto ou a presença de um sifão invertido são situações que podem ocasionar transições abruptas entre escoamentos à superfície livre e o pressurizado (HAMAM; MCCORQUODALE, 1982).

Hamam e McCorquodale (1982) conceberam a transição do escoamento à superfície livre para pressurizado em três estágios, como pode ser observado na Figura 1. Durante o primeiro estágio, uma onda de choque se propagava (com velocidade  $V_w$ ) em um conduto de drenagem que estava, inicialmente, à superfície livre. O avanço dessa onda de choque impelia o ar presente dentro do conduto, no sentido contrário ao do escoamento, criando um escoamento do tipo estratificado de contracorrente com uma interface bem definida. Ondas de superfície poderiam ser condicionadas pela velocidade relativa entre o ar e a água. O segundo estágio era marcado pelo rápido incremento na altura das ondas de superfície até que atingiam o topo do conduto. O rápido aumento da altura dessas ondas estava relacionado a um limiar de instabilidade da velocidade relativa da água e do ar, que tornava as ondas instáveis. O terceiro estágio era a transição para o escoamento pressurizado propriamente dito e decorria do aprisionamento completo do escoamento de ar, devido à interface de instabilidade que atingia o topo do conduto. O limiar de instabilidade ao qual estava condicionado o surgimento de ondas de superfície no estágio 2 é previsto através das ondas de Kelvin-Helmholtz e pode ser estimado por:

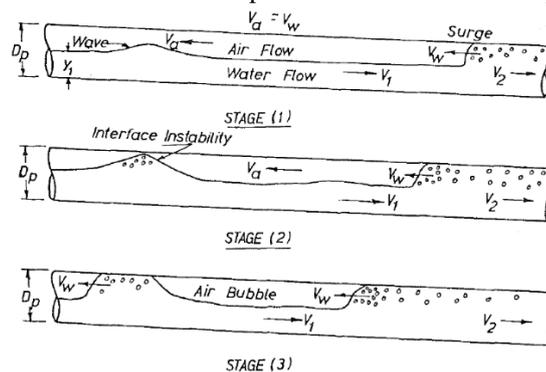
$$V_H = \frac{1}{\sqrt{\rho_a/\rho_w}} C_0 \quad (1)$$

onde  $V_H$  é a velocidade limiar de instabilidade da interface;  $\rho_w$  = massa específica da água,  $\rho_a$  = massa específica do ar e  $C_0$  = celeridade das ondas de superfície.

Ainda, segundo os autores, em condutos fechados, a velocidade crítica da interface de instabilidade,  $V_1$ , é uma função de  $V_H$ ,  $y_1/D_p$  e o formato do conduto.

$$\frac{V_1}{V_H} = f\left(\frac{y_1}{D_p}, \text{forma do conduto}\right)$$

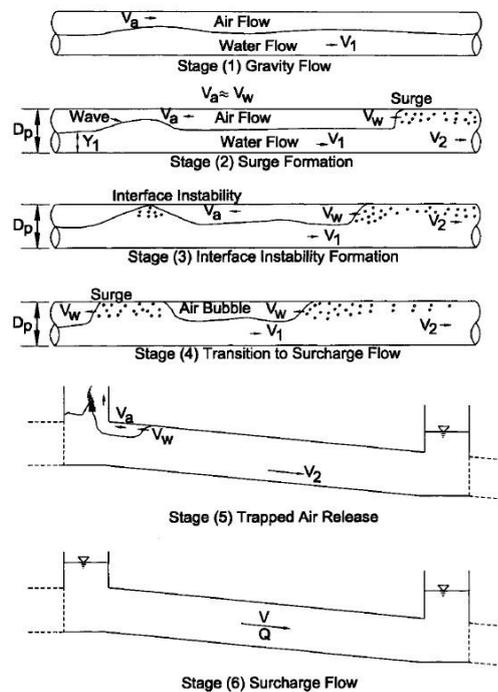
Figura 1. Estágios da transição entre escoamento à superfície livre e escoamento pressurizado.



Fonte: Hamam e McCorquodale (1982).

Li e McCorquodale (1999) revisaram o enquadramento teórico dos estágios da transição de escoamento à superfície livre para escoamento pressurizado, proposto por Hamam e McCorquodale (1982), ampliaram-no em mais três estágios (Figura 2) e propuseram um modelo matemático de cada um desses estágios. Os autores inseriram um estágio anterior ao estágio 1 de Hamam e McCorquodale, o qual representava as condições iniciais do escoamento da água, que ocorre em regime permanente à superfície livre, e o escoamento do ar possui a mesma direção da água (estágio 1). Os estágios 2, 3 e 4, de Li e McCorquodale (1999) equivaleram aos estágios 1, 2 e 3 descritos por Hamam e McCorquodale (1982). A liberação de bolsões de ar no poço de visita de montante e o escoamento pressurizado foram representados pelos estágios 5 e 6, respectivamente.

Figura 2. Estágios da transição entre o escoamento à superfície livre e pressurizado



Fonte: Li e McCorquodale (1999).

As descrições da transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado, detalhadas por Hamam e McCorquodale (1982) e Li e McCorquodale (1999), sugerem que bolsões de ar podem ser aprisionados no sistema de drenagem durante o estabelecimento desse processo. Nesses trabalhos, os autores atribuíram o aprisionamento de bolsões de ar à formação de instabilidades da interface ar-água, devido à ocorrência de escoamento desses dois fluidos em sentidos opostos, durante o rápido enchimento de condutos. A interface de enchimento empurra o ar na direção oposta à do escoamento d'água, condicionando a formação de instabilidades.

Vasconcelos e Wright (2006) investigaram os mecanismos de formação e aprisionamento de bolsões de ar. Em suas conclusões, destacaram a influência da geometria do sistema e da velocidade de enchimento no condicionamento do aprisionamento de bolsões de ar. Para as condições testadas experimentalmente, os autores constataram que o aprisionamento e a formação de bolsões de ar eram mais prováveis em situações de baixas taxas de enchimento do conduto do que a altas taxas. Para evitar a forte pressurização do ar, eles recomendaram que a razão entre a área transversal das torres de ventilação e a área transversal do conduto deveria ser maior ou igual a 1%. Uma breve descrição dos mecanismos de aprisionamento de bolsões de ar observados pelos autores é apresentada a seguir:

- VENT – Quantidade de ventilação inadequada (*Inadequate amount of ventilation*): mecanismo de aprisionamento identificado quando orifícios pequenos foram utilizados, não permitindo a completa exaustão do ar durante o enchimento do conduto.
- GEO – Ventilação geometricamente inadequada (*Geometrically misplaced ventilation*): mecanismo observado em ensaios em que as torres de ventilação foram colocadas à jusante do local de formação dos bolsões. Inicialmente, certa quantidade de ar foi expulsa por essas torres e, em seguida, o conduto pressurizou-se nesse ponto, bloqueando a exaustão do ar e favorecendo o aprisionamento dos bolsões.
- IBD — Colapso de interface (*Interface Breakdown*): em algumas situações, a interface de enchimento (onda de choque) convertia-se em um ressalto hidráulico móvel (ou a alguma frente de enchimento à superfície livre), favorecendo a intrusão de ar após a sua passagem.
- SFI — Instabilidade de escoamento cisalhante (*Shear flow Instability*): mecanismo já relatado por Hamam e McCorquodale (1982) e Li e McCorquodale (1999). Observado quando a interface de enchimento (onda de choque) avançava rapidamente de jusante para montante pressurizando totalmente o conduto e empurrando o ar no sentido oposto ao escoamento de água. Os escoamentos do ar e da água em sentidos opostos causava ondulações na superfície da água que poderiam se ampliar, alcançar o topo do conduto e bloquear totalmente a seção transversal, ocasionando o aprisionamento de bolsões de ar.
- GFRT – Transição gradual de regime de escoamento (*Gradual flow regime transition*): mecanismo observado em ensaios nos quais o enchimento do conduto ocorreu de forma gradual, sem propagação de interface positiva de enchimento e em que o escoamento se pressurizou nas torres de ventilação antes da completa exaustão do ar.

Assim como em Vasconcelos e Wright (2006), a ventilação inadequada ou inexistente nos sistemas de drenagem urbana também foi apontada por Zhou, Hicks e Steffler (2002a) como causa do aprisionamento de grandes volumes de ar no interior dos sistemas. Vale lembrar que um sistema de drenagem urbana é uma estrutura preenchida de ar durante a maior parte do tempo. Em eventos chuvosos, grandes volumes de ar devem deixar o interior do sistema para dar espaço à água que começa a escoar. Nesse sentido, a implantação de um sistema de ventilação adequado é de extrema relevância e um aspecto a ser devidamente contemplado durante as fases de concepção e dimensionamento de sistemas de drenagem urbana.

Além dos estudos relativos aos escoamentos transientes em sistemas de drenagem urbana, a transição entre regimes de escoamento e os mecanismos de aprisionamento de ar foi igualmente investigada em outras disciplinas. No contexto dos escoamentos bifásicos de interesse da Engenharia Química, Taitel e Dukler (1976) apresentaram um modelo de previsão de transição entre regimes de escoamento em condutos horizontais ou quase horizontais. No que diz respeito ao escoamento tipo *slug*, assim como Hamam e McCorquodale (1982), esses autores também utilizaram a Teoria de Kelvin-Helmholtz, a fim de estabelecer critérios de estabilidade para a amplitude de ondas infinitesimais formadas em escoamentos entre dois fluidos. Taitel e Dukler (1977) descreveram especificamente os mecanismos envolvidos no processo de estabelecimento de escoamentos do tipo *slug*. Observações visuais dos autores revelaram que esse tipo de escoamento se estabelecia como resultado do crescimento de ondas transientes formadas na interface e que bloqueavam a passagem do ar. Issa e Kempf (2003) demonstraram que o seu modelo unidimensional transiente de dois fluidos foi capaz de simular corretamente o crescimento de instabilidades em escoamentos estratificados, capturando automaticamente o seu desenvolvimento em *slugs*.

O escoamento bifásico ar-água se estabelece, no sistema de drenagem, porque o ar é aprisionado do interior dos condutos. Segundo Falvey (1980), o escoamento bifásico em condutos fechados, pode ser classificado de acordo com o padrão que desenvolve, pela relação entre a vazão do escoamento do ar e a do escoamento da água e a declividade do conduto. Os escoamentos em condutos horizontais apresentam um padrão assimétrico, em oposição à simetria axial observada em escoamentos bifásicos em condutos verticais (LAUHLAN et al., 2005). Considerando os trabalhos de Falvey (1980), Rouhani e Sohal (1983) e Lauchlan et al. (2005), as principais características dos diferentes padrões de escoamentos bifásicos em condutos horizontais são resumidas nos itens que seguem:

- Escoamento estratificado: uma interface horizontal bem marcada separa o escoamento de ar e de água. Desenvolve-se a baixas velocidades relativas de escoamento da água e do ar.
- Escoamento tipo onda: em um escoamento do tipo estratificado, caso a velocidade do escoamento de ar aumente, ondas de superfície aparecem e se deslocam na direção do escoamento.
- Escoamento tipo *slug*: com o aumento das velocidades de ambos os fluidos, a amplitude das ondas pode ser suficiente para tocar o topo do conduto, preenchendo toda a seção transversal. O ar aprisionado se move com uma velocidade maior do que a velocidade média da água.
- Escoamento tipo bolha: o ar forma bolhas na superfície superior do conduto, sendo que a velocidade das bolhas e da água são similares. Caso as bolhas estejam dispersas na água, o escoamento é chamado "escoamento espuma".
- Escoamento tipo *plug* (tampão): na medida em que a vazão de ar aumenta, as bolhas de ar se agregam em tampões/bolsões e o escoamento no topo do conduto constitui-se, alternadamente, por água e por esses bolsões/tampões de ar. A transição entre o escoamento tipo bolha e o tipo tampão ocorre a uma fração de vazios entre 19 e 23%.
- Escoamento tipo anular: para vazões de escoamento de ar ainda maiores, a água escoava como um filme anular próximo às paredes do conduto, o ar escoava em um núcleo de alta velocidade no eixo do conduto.
- Escoamento tipo *spray*: para vazões de escoamento de ar extremamente altas, o filme anular desaparece das paredes do conduto e o ar arrasta a água na forma de gotículas.

Diversos trabalhos experimentais desenvolvidos nas últimas décadas indicam a existência de uma estreita relação entre a ocorrência de transientes de pressão, em sistemas de drenagem, e as interações do escoamento bifásico ar-água, característica inerente desses escoamentos. A celeridade da onda de pressão é uma importante característica do escoamento, influenciada pela presença de ar e o tipo de escoamento que se estabelece entre esses dois fluidos. Segundo Martin (1981), os efeitos da presença de ar no transiente de pressão podem ser tanto benéficos quanto prejudiciais, dependendo da quantidade de ar, do regime de escoamento da mistura, bem como da natureza e causa do transiente. A velocidade de propagação de uma onda de pressão em um conduto contendo água pode ser reduzida, se há presença de bolhas de gás dispersas no líquido (WYLIE; STREETER, 1978).

Hamam e McCorquodale (1982) apresentaram o equacionamento para a estimativa da carga de sobrepressão que segue a rápida pressurização do conduto, em função da celeridade da onda de pressão ( $a$ ), da fração de ar no conduto ( $\alpha_a$ ), do regime de escoamento, das características elásticas do material do conduto e dos modos de vinculação do conduto, de acordo com a seguinte equação:

$$\Delta H \approx \frac{a(V_1 - V_2)}{g} (1 - \alpha_a) \quad (2)$$

Onde:  $V_1$ : velocidade do escoamento à superfície livre [m/s];

$V_2$ : velocidade do escoamento pressurizado [m/s] (ambos indicados na Figura 1);

$a$ : celeridade da onda de pressão, determinada pela expressão:

$$a = \frac{\sqrt{K'/\rho'}}{\sqrt{1 + (D_p K'/eE_p)}} \quad (3)$$

Onde:  $E_p$ : módulo de elasticidade do material do conduto [Pa]

$D_p$ : diâmetro do conduto [m];

$\rho'$ : massa específica da mistura ar-água [kg/m<sup>3</sup>];

$K'$ : módulo de elasticidade volumétrica efetiva da mistura ar-água, dado por:

$$K' = \bar{a}^2 \rho' \quad (4)$$

Onde:  $\bar{a}$ : celeridade da onda em um escoamento ar-água, em um conduto rígido, e dependendo do tipo de escoamento.

Para escoamentos do tipo *slug*, estratificado e bolha, a celeridade da onda pode ser estimada de acordo com as seguintes equações (RHODES; SCOTT, 1968 *apud* HAMAM; MCCORQUODALE, 1982):

$$\text{Escoamento } \textit{slug} \quad \bar{a} = \frac{a_a a_w}{\alpha_a a_w + (1 - \alpha_a) a_a} \quad (5)$$

$$\text{Escoamento estratificado} \quad \bar{a} = a_a \left[ 1 + \frac{1 - \alpha_a}{\alpha_a} \left( \frac{\rho_a}{\rho_w} \right) \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\text{Escoamento } \textit{bubble} \quad \bar{a} = a_a \left[ \alpha_a^2 + \frac{\alpha_a (1 - \alpha_a) \rho_w}{\rho_a} \right]^{1/2} \quad (7)$$

Onde:  $a_a$ : velocidade do som no ar [m/s];

$a_w$ : velocidade do som na água [m/s];

$\rho_a$ : massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>];

$\rho_w$ : massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>]

Os valores de  $\bar{a}$  típicos dessas equações variam de 22 m/s (escoamento *bubble*) a 1400 m/s (para escoamento *slug*). A análise dos registros de pressão dos experimentos realizados por Hamam e McCorquodale (1982) indicaram uma celeridade da onda de pressão da ordem de 300 m/s.

A movimentação dos bolsões de ar, no interior dos condutos, é outro aspecto importante das interações do escoamento bifásico e tem sido objeto de investigações analíticas, experimentais e numéricas nas últimas décadas. O trabalho analítico pioneiro, desenvolvido por Benjamin (1968), descreveu a movimentação de uma cavidade de ar em um tubo horizontal preenchido com água como uma corrente de gravidade e estabeleceu que a celeridade da cavidade de ar é da ordem de  $\sqrt{gH}$ , onde  $g$  é a aceleração da gravidade e  $H$  é o diâmetro do conduto. Wilkinson (1982) mediu o formato das cavidades de ar em um conduto horizontal e demonstrou que correspondia com o perfil proposto por Benjamin (1968), com exceção de um ponto de estagnação próximo à parede.

O comportamento dos bolsões de ar em condutos de inclinações moderadas, foi classificado por Baines e Wilkinson (1986) considerando o volume característico do bolsão ( $A/H^2$ , onde  $A$  é a área longitudinal do bolsão e  $H$  é a altura do conduto), enquanto critério de classificação. Os autores também observaram um formato característico dos bolsões de ar, quando esses se propagavam em condutos com inclinações suaves: uma seção frontal (na qual o escoamento era basicamente irrotacional), uma seção traseira dissipativa (onde havia uma rápida alteração da profundidade do escoamento) e, seguindo a região dissipativa, uma cauda em forma de cunha com superfície da água quase horizontal.

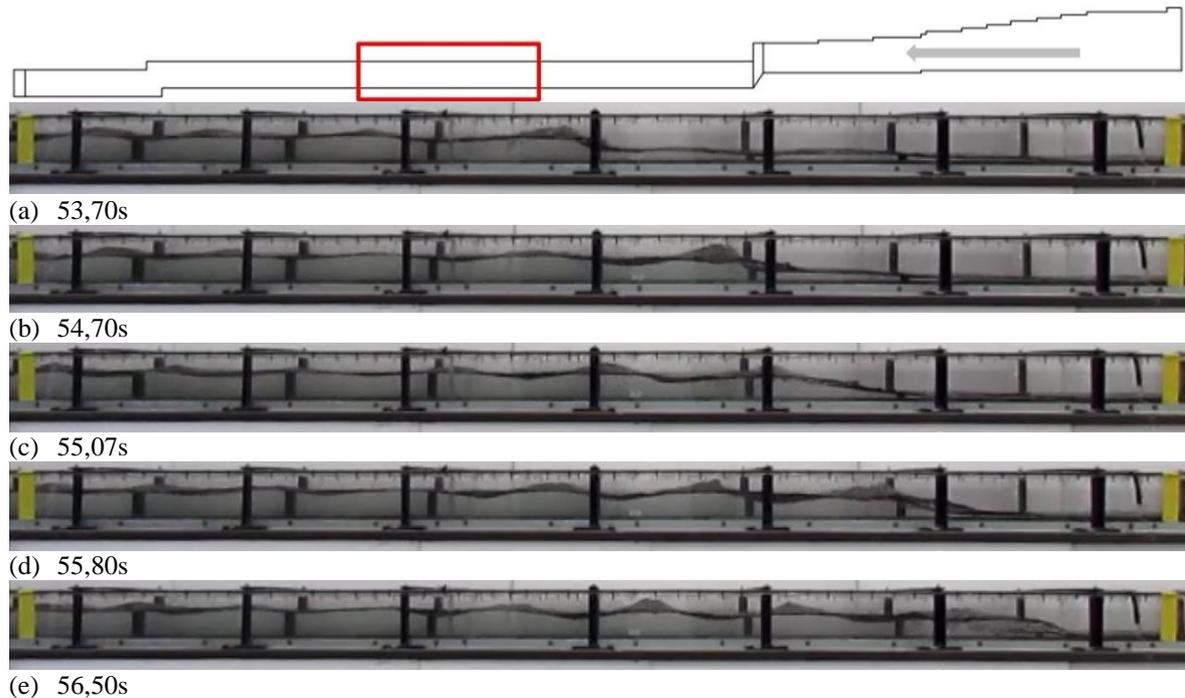
Baines (1991) estudou a forma e a movimentação de cavidades de ar formadas a partir da abertura, total ou parcial, de uma comporta localizada na extremidade de jusante de um conduto quadrado inicialmente cheio de água. A comporta funcionava como um vertedor quando aberta parcialmente. O autor apresentou uma classificação esquemática de quatro tipos de correntes de gravidade, formadas a partir do deslocamento de um fluido mais pesado (fluido B) sob um fluido mais leve (fluido A). A influência da declividade (variadas de horizontal a 8°) do conduto na formação das cavidades de ar também foi avaliada teórica e experimentalmente por Baines (1991), que verificou que a velocidade de deslocamento da frente da cavidade de ar aumenta com a declividade e que a celeridade é da ordem de  $\sqrt{gH}$ . Nas situações de aberturas parciais da comporta, o escoamento sobre a mesma reproduzia o escoamento sobre um vertedor.

Para alturas do vertedor superiores à metade da altura do conduto, verificou-se o estabelecimento de um ressalto hidráulico. Nessas situações, Baines observou um fenômeno de vedação de cavidades de ar ao qual denominou de *gulping*. Dadas as condições experimentais, o autor atribuiu esse fenômeno ao aumento do nível do escoamento sobre o vertedor, devido à desaceleração do ressalto hidráulico que se forma a montante do vertedor durante o avanço da cavidade de ar. Caso o nível aumentasse e alcançasse o topo do modelo, a cavidade de ar que avançava a montante era vedada e reiniciava-se o processo de formação de cavidades de ar. Na medida que o experimento avançava, cavidades de ar eram formadas em intervalos de tempo constantes.

Uma ampla revisão da literatura relacionada à presença de ar em condutos foi apresentada por Lauchlan et al. (2005), considerando fontes de distintos domínios do conhecimento, sobretudo Engenharias Civil e Química. Os temas abordados pelos autores incluíram: padrões de escoamentos ar/água e movimentação do ar, considerando o regime de escoamento para condutos horizontais, verticais e inclinados; critérios para movimento das bolhas/bolsões; remoção do ar através de válvulas em condutos verticais; efeitos do ar aprisionado no transiente de pressão. Os autores apresentaram e comentaram detalhadamente os trabalhos realizados em cada um desses temas. Além disso, compararam resultados experimentais oriundos de diversas pesquisas, como o caso dos mapas de padrão de escoamento vertical. A revisão da literatura apresentada por Chosie, Hatcher e Vasconcelos (2014) contemplou mais especificamente os estudos experimentais e numéricos relativos à movimentação de bolsões de ar.

Kaiber da Silva (2015) detalhou a formação de ondas de superfície e de instabilidades hidráulicas durante o processo de enchimento do modelo reduzido do CFAC. As condições experimentais testadas (vazões, condições de ventilação) diferenciam os experimentos realizados no âmbito do presente trabalho e os ensaios cujos resultados foram apresentados por Kaiber da Silva (2015). Durante o processo de enchimento do CFAC, Kaiber da Silva (2015) observou que, no avanço de jusante para montante, um ressalto hidráulico móvel se sobrepunha às ondas de choque lateral (ou ondas de Mach) estabelecidas nas regiões de escoamento supercrítico. A sobreposição desses dois fenômenos originou uma sequência de cristas e cavas, denominada de cristas de galo, claramente observadas na Figura 3 (b), (c), (d) e (e).

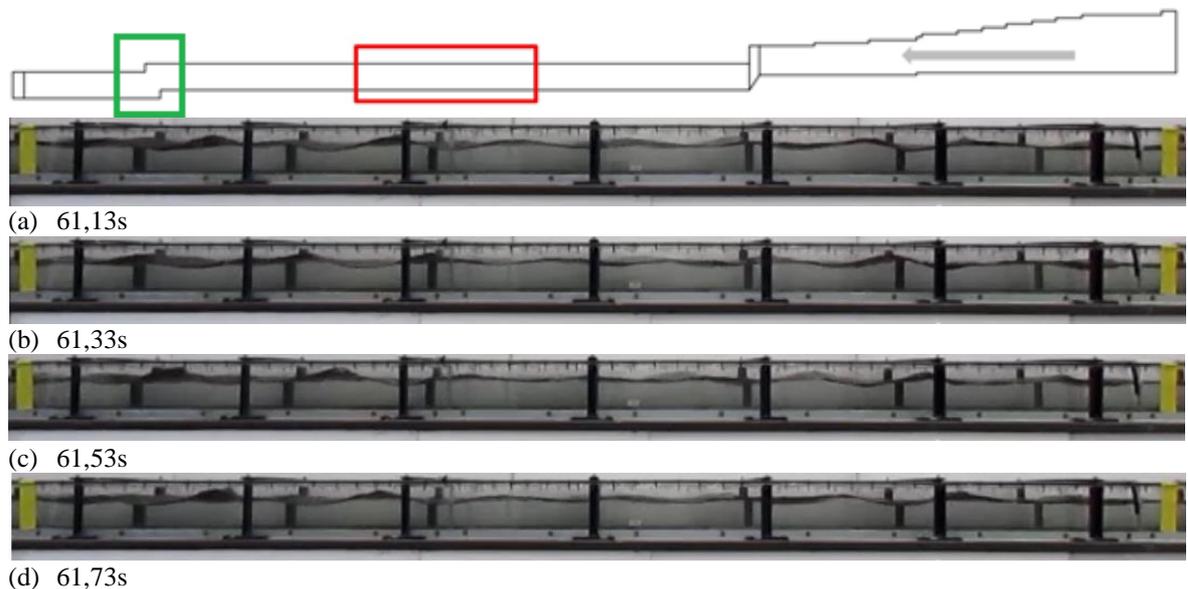
Figura 3. Sequência temporal do avanço do ressalto hidráulico sem a pressurização imediata do conduto.



Fonte: Kaiber da Silva (2015).

Além dessa sequência de cristas e cavas, a autora observou, também, a geração de ondas senoidais e sua consequente propagação de jusante para montante. No esboço do modelo do conduto apresentado na Figura 4, o local de geração dessas ondas senoidais está destacado em verde. O trecho do modelo onde as imagens foram feitas está destacado em vermelho. A interação entre o escoamento e a estrutura superior do conduto, nesse ponto, foi apontada pela autora como a principal causa da geração dessas ondas senoidais. Na Figura 4, é possível identificar a propagação dessas estruturas ao acompanhar o deslocamento das cristas.

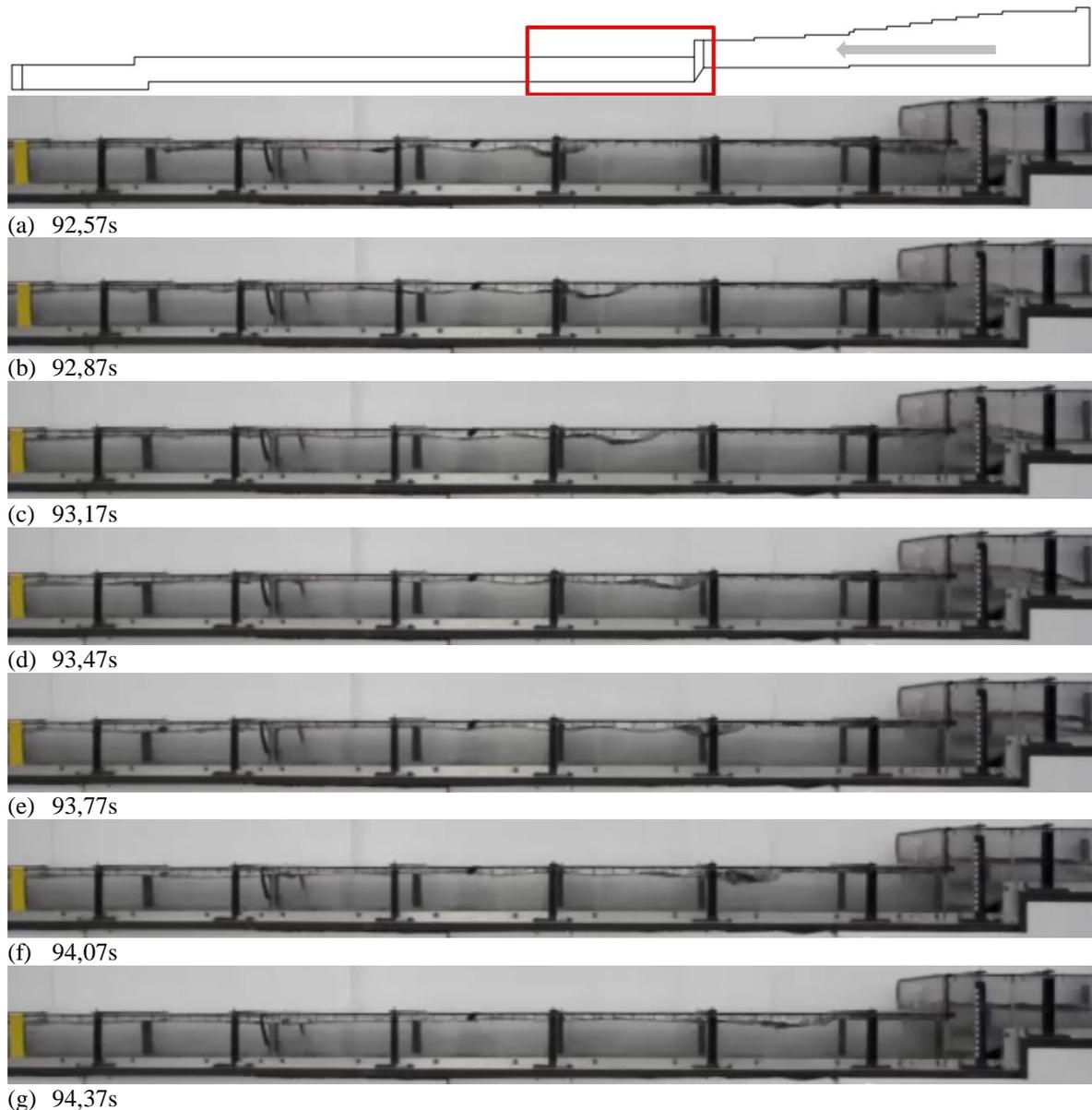
Figura 4. Propagação de ondas senoidais de jusante para montante.



Fonte: Kaiber da Silva (2015).

Kaiber da Silva (2015) também relatou que as perturbações causadas na superfície do escoamento pela propagação das ondas senoidais e das cristas de galo eram determinantes no processo de aprisionamento de ar durante a transição do escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado. A sequência temporal da Figura 5 apresenta a movimentação de um bolsão de ar aprisionado devido aos fenômenos descritos anteriormente.

Figura 5. Movimentação de jusante para montante do bolsão de ar aprisionado.



Fonte: Kaiber da Silva (2015).

Os resultados experimentais apresentados por Kaiber da Silva (2015) destacaram a natureza bifásica do comportamento hidráulico dos sistemas de drenagem urbana. Tais resultados sugeriram que as interações entre o escoamento transiente e as singularidades geométricas do sistema, potencialmente, ocasionavam instabilidades e fenômenos hidráulicos indesejáveis, tais como ondas de superfície e aprisionamento de bolsões de ar

### 3.2 Modelos hidráulicos físicos

Investigações experimentais em modelos hidráulicos físicos, realizadas com a finalidade de compreender os fenômenos e instabilidades hidráulicas em sistemas de drenagem urbana, são relatadas nesta seção. Detalhes da instalação experimental, seus objetivos, principais resultados e conclusões são destacados.

A rápida expulsão de bolsões de ar presentes em condutos fechados já foi, há muito tempo, identificada como uma das causas dos transientes de pressão nesse tipo de estrutura. Os trabalhos experimentais e teóricos de Albertson e Andrews (1971) se basearam na análise de duas situações distintas: (i) configuração simulando a abertura de uma válvula manual de liberação de ar após o enchimento e pressurização do conduto; (ii) configuração simulando o enchimento de um conduto a distintas taxas e com a válvula de liberação de ar já aberta.

Os resultados dos ensaios realizados com a primeira configuração indicaram uma sobrepressão de até quinze vezes a pressão estática. Já os da segunda configuração indicaram o estabelecimento de dois tipos de transientes de pressão: (i) transientes de período curto associados à exaustão de bolsões de ar e que resultaram do choque do escoamento de água com a ventosa, com magnitude de cerca de três vezes a pressão estática e dependente da razão entre o diâmetro do tubo de subida e o diâmetro do tubo; (ii) transientes de longo período e dependentes da quantidade restante de ar no conduto quando a água atingia o tubo de subida, que refletiram o comprimento do conduto e apresentaram magnitude de 40 - 50% acima da pressão de trabalho. Albertson e Andrews (1971) concluíram seu trabalho recomendando a utilização de válvulas de liberação de ar de pequenos diâmetros (razão entre diâmetro da válvula e diâmetro da canalização principal inferiores a 0,001), pois mostraram-se mais efetivas na redução dos picos de pressão.

Zhou et al. (2011) e Lee (2005) descreveram o aparato experimental utilizado por Ocasio em sua pesquisa sobre o estabelecimento de transientes de pressão que seguiam a rápida expulsão de diferentes volumes de ar desenvolvida na década de 1970. Segundo esses autores, Ocasio utilizou um conduto horizontal conectado a um reservatório de montante. Havia uma válvula de abertura rápida em uma posição intermediária do conduto e orifícios de diferentes tamanhos poderiam ser instalados no final do conduto horizontal. A abertura instantânea da válvula permitia o avanço da coluna de água em direção ao ar aprisionado entre a válvula e o orifício instalado na extremidade final do conduto. Os resultados indicaram que as maiores pressões foram observadas com os volumes iniciais menores e que picos de pressão ocorreram para orifícios com razão (diâmetro do orifício/diâmetro do conduto) entre 0,10 e 0,20.

Hamam e McCorquodale (1982) realizaram um estudo experimental sobre a formação de ondas em sistema de drenagem urbana e os transientes de pressão associados. A instalação experimental consistia de um conduto de acrílico de cerca de 13,5 m de comprimento com seções intercambiáveis (140 x 140 mm e 152 mm de diâmetro), alimentada por um reservatório de montante. O controle do escoamento era feito pelo fechamento rápido de uma comporta, simulando a falha de uma estação de bombeamento. A instrumentação era composta por medidores de vazão eletromagnéticos, nove piezômetros (elevação da linha d'água) e dois transdutores de pressão (transientes de pressão). Durante os ensaios, estabelecia-se um escoamento de água com vazão constante, na seção de montante, enquanto que ar era insuflado na seção de jusante, gerando um escoamento estratificado ar-água de contracorrente. A declividade do conduto era ajustada de modo a produzir escoamentos crítico, subcrítico e supercrítico para várias profundidades relativas. Os ensaios confirmaram que transientes de pressão podem ocorrer em sistemas de drenagem urbana durante a transição entre o escoamento à superfície livre e o pressurizado. A análise de frequência dos transientes de pressão confirmou que a celeridade da onda de pressão era próxima àquela do escoamento estratificado.

Cardle, Song e Yuan (1989) conduziram investigações experimentais com o objetivo de examinar os mecanismos de transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado em um conduto circular. A instalação utilizada nesse trabalho era composta de um conduto de PVC transparente, de seção circular (16,26 cm de diâmetro) e 48,8 m de comprimento, um tanque de montante e um reservatório de jusante. Tanto o reservatório de montante quanto o de jusante tinham adufas que poderiam proporcionar rápidas variações no escoamento. Dez sondas de nível capacitivas foram utilizadas para monitorar as profundidades, ao longo do conduto e dentro dos reservatórios de montante e jusante. Seis transdutores de pressão foram distribuídos ao longo do conduto. Seus experimentos basearam-se no estabelecimento de distintas condições de escoamento através da manipulação das adufas e da válvula de alimentação do modelo. Seus ensaios conduziram à identificação de três tipos de interface ar-água, apresentados a seguir.

- Interface positiva: avançava para a região de escoamento à superfície livre e ocorria devido ao fechamento repentino da adufa de jusante, característica do processo de pressurização. O avanço da interface positiva fazia com que o ar presente dentro do conduto se movimentasse de jusante para montante. Na medida em que a velocidade relativa entre o escoamento de ar (jusante-montante) e o escoamento de água (montante-jusante) alcançasse um valor limite, instabilidades se desenvolviam na superfície da água à frente da interface positiva, podendo atingir o topo do conduto. O efeito dessas

instabilidades era ainda mais pronunciado quando o nível d'água inicial encontrava-se em uma região próxima do topo do conduto, sendo que para condutos de seção circular essa região é  $y/D > 0,81$ . Para profundidades relativas inferiores, o processo de pressurização ocorreu de uma forma gradual, com o avanço de uma onda após o fechamento repentino da adufa. Além disso, transientes de pressão (Golpe de Aríete) foram registrados em alguns ensaios.

- Interface negativa: estabelecia-se quando o escoamento encontrava-se inicialmente pressurizado (escoamento em regime permanente ou apenas o conduto cheio de água) e a adufa localizada a jusante era aberta repentinamente, resultando em maior capacidade de escoamento. As interfaces negativas avançavam sobre a região pressurizada, tanto na extremidade de montante quanto na de jusante, sendo característica da depressurização do conduto. Sondas de nível registraram a propagação das interfaces negativas ao longo do conduto.
- Reversão de interface: uma interface positiva estabelecia-se devido ao fechamento repentino da adufa de jusante. Em seguida, a adufa era reaberta e interfaces negativas se estabeleciam tanto a montante quanto a jusante.

Capart, Sillen e Zech (1997) estudaram, especificamente, as transições entre o regime rápido e o regime lento no escoamento à superfície livre, realizando estudos experimentais, a fim de validar seu modelo numérico. O aparato constituiu-se de um conduto de seção circular (diâmetro 145 mm) de 12,74 m de comprimento com um reservatório de montante e um de jusante. O nível d'água dentro do conduto foi controlado pelo nível de um vertedor localizado no reservatório de jusante. A vazão era medida, continuamente, por um medidor de vazão eletromagnético e os níveis d'água foram medidos por nove transdutores de pressão. Na primeira série de ensaios, a condição inicial era de regime permanente supercrítico e, em seguida, elevava-se o vertedor móvel do reservatório de jusante, provocando o surgimento de um ressalto hidráulico móvel que se propagava de jusante para montante. Quando o ressalto hidráulico móvel estava prestes a alcançar o reservatório de montante, o vertedor móvel de jusante era rebaixado repentinamente, fazendo com que se estabelecesse uma forte onda negativa e a condição inicial fosse reestabelecida. A segunda série de ensaios baseou-se na propagação de um hidrograma triangular, gerado pelo aumento repentino na vazão afluente ao reservatório de montante. Ressalta-se que a instalação experimental conta com o controle do escoamento efetuado tanto de jusante quanto de montante. Os resultados da modelagem

numérica do escoamento transiente em transições de regime de escoamento foram consistentes com os resultados observados no modelo físico.

A instalação experimental utilizada por Trajkovic et al. (1999) era composta por um conduto de seção circular cilíndrica em acrílico de cerca de 10 m de comprimento, 10 cm de diâmetro e 5 mm de espessura. A inclinação do conduto era ajustável e os ensaios foram realizados com 1,4% e 2,7%. Tanto o reservatório de montante quanto o de jusante eram equipados com comportas automatizadas que permitiam a rápida alteração das condições de escoamento e a vazão foi medida por um medidor de vazão ultrassônico. Tomadas piezométricas foram instaladas na base do conduto e conectadas por tubos a um painel com um transdutor de pressão. Como havia apenas um transdutor de pressão disponível, os autores realizaram experimentos com as mesmas condições iniciais e de contorno repetidas vezes. Na parte superior do conduto, nos mesmos pontos onde havia as tomadas piezométricas, pequenos tubos de ventilação foram instalados, os quais poderiam permanecer abertos ou fechados. Trajkovic et al. apresentaram uma distinção dos experimentos em seis classes, dependendo das condições iniciais e de contorno. As condições iniciais foram de escoamento supercrítico em toda a extensão do conduto, dada pela abertura total da comporta localizada a jusante, ou de escoamento com um ressalto hidráulico marcando a transição entre o escoamento supercrítico e o subcrítico, caso a comporta de jusante estivesse parcialmente fechada. As condições de contorno poderiam ser alteradas através da abertura e fechamento das comportas de montante (com velocidades que variaram de 0,5 a 2 cm/s) e de jusante (manobra praticamente instantânea). Dessa forma, as condições iniciais e de contorno eram definidas através de controle tanto de montante quanto de jusante. O principal objetivo dessa investigação experimental foi fornecer dados para a verificação do modelo numérico, como bem colocado pelos próprios autores.

Com uma instalação experimental similar àquela utilizada por Hamam e McCorquodale (1982), Li e McCorquodale (1999) estudaram o comportamento do transiente de pressão durante a transição entre escoamento à superfície livre e pressurizado, visando à obtenção de dados adequados à calibração do modelo matemático desenvolvido por eles. Dois tipos de experimentos foram realizados: (i) bloqueio completo do escoamento, através do rápido fechamento da comporta localizada entre o fim do conduto e o reservatório de jusante; (ii) inundação do reservatório de jusante, devido ao fechamento da válvula de controle de drenagem, simulando a falha de uma bomba. Ambos os experimentos caracterizaram-se pelo controle do escoamento feito na seção de jusante. Na primeira série de ensaios, a parada repentina do escoamento sempre resultou em transientes de pressão iniciais mais intensos,

associados ao Golpe de Aríete e transientes de pressão subsequentes, menos intensos e associados à expulsão dos bolsões de ar. Um comportamento bem distinto foi observado na segunda série de ensaios, onde as oscilações de pressão iniciais associadas ao Golpe de Aríete eram menos intensas e as oscilações posteriores, associadas à expulsão dos bolsões de ar, apresentavam maior amplitude e frequência.

Zhou, Hicks e Steffler (2002a e 2002b) investigaram, experimentalmente, a pressão nos bolsões de ar aprisionados durante o enchimento rápido de condutos horizontais. A instalação utilizada nesse trabalho era constituída por um reservatório pressurizado de abastecimento de água doméstico (42 cm de diâmetro, 120 cm de altura) na extremidade de montante e um conduto de seção circular (35 mm de diâmetro) de 10 m de comprimento. Tanto o reservatório de pressão quanto o conduto eram feitos de aço galvanizado. Na extremidade de jusante do conduto, havia um orifício que regulava a saída do ar e que poderia ser configurado de distintas maneiras. Três válvulas esfera do tipo um quarto de volta estavam instaladas em três pontos do conduto, de modo a permitir três cenários diferentes de volume de ar. Transdutores de pressão estavam instalados em pontos intermediários jusante de cada uma das válvulas esfera. Uma manobra rápida nas válvulas esfera (estimada entre 0,06 s e 0,08 s) garantia o enchimento rápido do conduto. Foram estabelecidos 144 casos teste, variando as cargas de montante (4), o volume inicial de ar dentro do conduto (3 volumes que correspondiam à abertura das válvulas esfera) e distintos tamanhos de orifício (12).

Os resultados desse estudo revelaram a existência de três padrões de oscilação de pressão dentro do bolsão de ar, durante o rápido enchimento do conduto, condicionados pelo tamanho do orifício que regulava a saída do ar na extremidade de jusante. O tipo de comportamento denominado efeito desprezível do Golpe de Aríete (Negligible Water Hammer Effect) foi observado nas situações em que o orifício de saída de ar estava completamente lacrado ou em que o orifício era extremamente pequeno (razão diâmetro do orifício/diâmetro do conduto  $d/D \leq 0,086$ ). Os bolsões de ar persistiram por um longo período e funcionaram como “absorvedores de choque”, fazendo com que a pressão nos bolsões de ar oscilasse (longo período) e sofresse amortecimento. Já o comportamento denominado efeito mitigado do Golpe de Aríete (Mitigated Water Hammer Effect) foi verificado em experimentos com tamanhos de orifício intermediários ( $d/D$  entre 0,086 e 0,171 – 0,257). Os ensaios desse tipo de comportamento revelam que a magnitude do pico de pressão é altamente sensível à quantidade de ar aprisionado. Finalmente, o terceiro tipo de comportamento observado foi denominado Golpe de Aríete (Water Hammer Dominated) em que, para razões de diâmetro de orifício superiores a 0,171 – 0,257, a expulsão de ar ocorria de forma tão rápida que o efeito “absorvedor

de choque” do bolsão de ar já não era observado. Nele foram registrados picos de pressão de cerca de 4000 kPa (aproximadamente 14 vezes a carga de montante para esse ensaio), que poderiam exceder a capacidade estrutural de dimensionamento dos sistemas de drenagem. Os autores também examinaram esses picos de pressão em função do tamanho do orifício, do comprimento da coluna de água (e conseqüente volume de ar no interior do conduto) e da carga de montante. Finalmente, observaram uma grande variação da velocidade da onda de pressão (200 – 1400 m/s), dependendo do tamanho relativo do orifício e do comprimento da coluna de água (e conseqüente volume de ar no interior do conduto).

O aparato experimental utilizado por Vasconcelos e Wright (2005) era uma reprodução simplificada de alguns elementos-chave presentes em um sistema de drenagem da cidade de Dearborn (MI), com uma escala de redução geométrica de 1:50. O estudo das interações ar-água, durante o enchimento do conduto, foi o objetivo desse estudo. O aparato contava com um conduto de 10 cm de diâmetro e 14,6 m de comprimento. Na extremidade de jusante, havia uma chaminé de equilíbrio de 19 cm de diâmetro e, na extremidade de montante, havia um reservatório de enchimento de nível constante de 25 x 25 cm, colocado a 15 cm de altura, para permitir o extravasamento do excesso de vazão afluente. Essa estratégia de enchimento foi adotada visando representar condições de carga constante durante o enchimento do conduto e da chaminé de equilíbrio. A alimentação do modelo por apenas um local constituiu-se numa simplificação conservativa realizada pelos autores, já que o sistema real recebe contribuição em distintos poços de visita.

Certa quantidade de água era vertida dentro do conduto, resultando em um nível de água estático e, em seguida, o escoamento era admitido, na caixa de enchimento, a uma vazão constante após a abertura de uma válvula. As variáveis consideradas foram vazão afluente, declividade do conduto (tanto positiva quanto negativa) e profundidade de água na seção de jusante (chaminé de equilíbrio). Um velocímetro acústico doppler (ADV) e um transdutor de pressão piezorresistivo compuseram a instrumentação utilizada nesse experimento. Dois grupos de ensaios foram realizados para: (i) definição das condições que propiciaram o desenvolvimento dos maiores transientes; (ii) descrição qualitativa dos tipos de interação entre o ar e a água durante o processo de enchimento. Vasconcelos e Wright (2005) destacaram que o comportamento do escoamento era compreendido somente se a pressurização do ar fosse devidamente considerada. O nível inicial de água no interior do conduto mostrou-se como a variável de controle mais importante na determinação do tipo de interação observada no escoamento bifásico.

Zhou et al. (2011) investigaram os efeitos da fração de vazios dos bolsões de ar sobre as pressões verificadas em um sistema de condutos em enchimento. A instalação experimental utilizada nesse estudo constituiu-se de um reservatório de montante com 5 m<sup>2</sup> de área, um registro gaveta, um registro esfera de um quarto de volta, um dreno para ajuste inicial do bolsão de ar e um tubo de 4,44 m de comprimento e 9 cm de diâmetro. A instrumentação era composta por um medidor de pressão instalado imediatamente a montante do registro esfera, para medir a pressão estática inicial e cinco transdutores de pressão, para medir oscilações instantâneas de pressão. A condição inicial do experimento era estabelecida através do fechamento do registro esfera e do dreno de ajuste do bolsão de ar e a abertura do registro gaveta, fazendo com que o ar ficasse aprisionado entre o final do conduto e o registro esfera. O início do experimento se dava pela abertura rápida do registro esfera. Os resultados experimentais apresentados por Zhou et al. (2011) indicaram que as mais altas pressões ocorriam com uma fração de vazios da ordem de 6,18%. Além disso, os resultados dos autores sugeriram um padrão massa-mola para a oscilação de pressão devido às interações ar-água.

Vasconcelos e Leite (2012) investigaram o aprisionamento e compressão de bolsões de ar. Um reservatório de montante, um de jusante e um conduto de 101.6 mm de diâmetro e de comprimento variável (10.6 m para declividades favoráveis e 12 m para declividades adversas e na posição horizontal) compuseram a instalação experimental. As condições iniciais do ensaio foram obtidas com vazões em regime permanente, de modo que o escoamento na seção de montante do conduto ficasse pressurizada e, na seção de jusante, ocorresse escoamento à superfície livre. Essas condições foram estabelecidas através da combinação de diversas vazões afluentes e distintas declividades. Uma manobra rápida no registro gaveta, localizado na extremidade de jusante, ocasionava o aprisionamento do ar acima do escoamento à superfície livre. Dois transdutores de pressão e uma micro-sonda ADV estavam instalados ao longo do conduto para medição de pressões e velocidades, respectivamente. As variáveis analisadas foram a declividade do conduto (adversa, horizontal e favorável), vazões e distintos estágios de fechamento do registro gaveta. Os resultados dos experimentos indicaram que pulsos de pressão extremamente fortes são gerados pela obstrução total do registro gaveta, seguidos de um padrão oscilatório de pressão. Pressões negativas significativas também foram observadas após o fechamento total da válvula. Para condições de bloqueio parcial do escoamento, através de fechamentos intermediários da válvula, verificou-se não mais um padrão de pressões oscilatório, mas um único pico de pressão inicial. Os autores ressaltaram que os resultados apresentados eram fortemente dependentes das características geométricas do sistema,

condições de vazão e da distância entre o local de aprisionamento de bolsões de ar e o local do mecanismo de alívio de pressão.

Trindade e Vasconcelos (2012 e 2013) utilizaram um aparato composto por um tubo de PVC transparente, com 101.6 mm de diâmetro e 10.96 m de comprimento, com declividades ajustáveis. O reservatório de montante apresentava capacidade de 0.66 m<sup>3</sup> e o de jusante, 0.62 m<sup>3</sup>. Na extremidade de jusante do conduto, havia um registro gaveta. Um orifício de ventilação foi instalado na extremidade de montante do conduto. Dois transdutores de pressão foram instalados no conduto e as vazões afluentes foram medidas por um ADV. O foco desses trabalhos são as interações ar-água durante o enchimento de condutos de distribuição de água, e não mais os sistemas de drenagem urbana. O procedimento experimental era semelhante àquele descrito por Vasconcelos e Leite (2012), à exceção da possibilidade de instalação de distintos tamanhos de orifícios de ventilação. As conclusões de ambos os trabalhos confirmaram a importância do dimensionamento do sistema de ventilação na oscilação dos picos de pressão observados no sistema.

O trabalho de Chosie, Hatcher e Vasconcelos (2014) explorou o elo entre as declividades e velocidades do escoamento no conduto e a movimentação de bolsões de ar aprisionados. As situações simuladas incluem uma ampla gama de volumes de bolsões de ar, declividades do conduto e vazões que podem ser verificadas em eventos de enchimento de condutos. O procedimento experimental baseava-se na abertura dos registros gaveta, colocados em posições intermediárias do conduto após o estabelecimento de regime permanente (dada uma declividade, vazão e volume de ar injetado). Os resultados da velocidade dos bolsões de ar, para situações em que não há escoamento de água, foram compatíveis com os valores relatados anteriormente na literatura, ou seja, na ordem de  $\sqrt{gH}$ . No caso em que havia escoamento de água, em condições de conduto horizontal e em declividades adversas, a celeridade da porção frontal do bolsão de ar foi bem aproximada pela soma dos valores observados em condições quiescentes e pela velocidade do escoamento da água.

Ferreri, Ciraolo e Lo Re (2014a e 2014b) apresentaram os resultados de 144 experimentos realizados em um conduto circular em acrílico (diâmetro de 0,244 m e comprimento de 26,09 m), conectando dois reservatórios, reproduzindo um conduto conectando dois poços de visita. A inclinação do conduto era ajustável e variava de 0 a 3%. O reservatório de montante era composto de duas câmaras de 40 cm de largura, conectadas por conduto circular de 0,244 m diâmetro. Um vertedor estava instalado no reservatório de montante a uma cota de 1 m acima de sua base. O reservatório de jusante era equipado com

uma parede móvel que possibilitava a variação da capacidade de armazenamento do reservatório, permitindo, assim, a avaliação das características do transiente gerado em diferentes situações de capacidade de armazenamento. O rápido enchimento do conduto e sua pressurização era causado pelo fechamento rápido de uma comporta localizada na porção inferior da parede móvel. Na porção superior da mesma havia um vertedor, com cota 1 m acima da base. As variáveis experimentais exploradas pelos autores foram: inclinação do conduto (6 inclinações variando de 0,2 a 2,5%), posição da parede móvel do reservatório de jusante (resultando em três valores de armazenamento: 120l, 60l e 0l), vazão de entrada (de 6 a 9 vazões, variando de 15 a 65 l/s), fração de enchimento (razão entre a profundidade do escoamento à superfície livre e o diâmetro do conduto, variando de 0,3 a 0,8). O procedimento experimental realizado pelos autores envolveu o estabelecimento de condições de escoamento permanente, seguido do fechamento rápido da comporta do reservatório de jusante que causava a pressurização do conduto e o enchimento do reservatório de montante. A comporta de jusante era reaberta quando o nível do reservatório de montante se equilibrava.

As observações experimentais dos autores levaram ao estabelecimento de dois padrões de pressurização, denominados de pressurização suave e abrupta. As características hidráulicas que condicionam o estabelecimento de cada um deles foram amplamente exploradas em Ferreri, Ciraolo e Lo Re (2014b).

O processo de formação de *geysers* urbanos é outro aspecto do comportamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana estudado em modelos em escala reduzida. Inicialmente, associou-se a ocorrência de *geysers* a oscilações em massa da água presente em condutos verticais de ventilação (GUO e SONG, 1991). Os trabalhos experimentais mais recentes apontam a liberação descontrolada de bolsões de ar, através de condutos verticais preenchidos de água, como um mecanismo que também pode resultar no estabelecimento de *geysers* urbanos. Wright, Lewis e Vasconcelos (2011b) apresentaram registros de pressão e velocidade e analisaram os vídeos de um evento de *geysers* urbanos registrados no dia 11 de julho de 2004 no sistema de drenagem na cidade de Minneapolis (MN – Estados Unidos). Esse local do sistema de drenagem era sistematicamente monitorado, pois apresentava falhas funcionais e estruturais recorrentes. Baseados nesses registros, os autores argumentaram:

Apesar dessas incertezas, a única explicação razoável para a formação de *geysers* urbanos é a interação entre o bolsão aprisionado e em ascensão no conduto vertical e a água inicialmente aí presente, devido às condições de sobrecarga do sistema. As pressões medidas dentro do conduto eram incapazes de elevar a água mesmo próxima

à superfície do solo, quanto mais ejetá-la 20 m ou mais no ar. (WRIGHT; LEWIS; VASCONCELOS, 2011b)<sup>1</sup>

Nos registros de pressão apresentados pelos autores, nota-se que a ocorrência dos *geysers* coincidia com alívios momentâneos de pressão do sistema. Alguns trabalhos que abordam experimentalmente o estabelecimento de *geysers* urbanos são apresentados e brevemente comentados a seguir.

Vasconcelos e Wright (2011) investigaram os fenômenos envolvidos no estabelecimento de *geysers* causados pela liberação violenta de grandes bolsões de ar em torres de ventilação. O aparato utilizado pelos autores era composto por três trechos de condutos horizontais e um vertical. O trecho horizontal de montante (0,55 m), inicialmente preenchido por ar, localizava-se entre uma bomba de ar comprimido e um registro borboleta inicialmente fechado. O trecho horizontal intermediário (2,97 m) estava entre o registro borboleta e a torre de ventilação (0,61 m de altura). O trecho de jusante de 0,49 m de comprimento estava a jusante da torre de ventilação e completamente vedado. O trecho horizontal intermediário e o trecho de jusante estavam completamente preenchidos por água, assim como a torre de ventilação até uma determinada altura. O diâmetro dos trechos horizontais era de 0,94 m e a torre de ventilação apresentava diâmetros variados. Um transdutor de pressão piezo-resistivo foi instalado cerca de 1 m a jusante do registro borboleta. O ensaio iniciava-se com a abertura manual do registro borboleta, permitindo o avanço do bolsão de ar na direção da torre vertical. O bolsão de ar ascendia ao longo da torre de ventilação, de forma similar uma bolha de Taylor e mantinha contato com o restante do ar que ainda permanecia no conduto horizontal. As variáveis experimentais testadas pelos autores incluíam a pressão inicial do ar aprisionado no conduto horizontal de montante (0,305 m, 0,610 m e 0,915 m), o nível inicial d'água na torre de ventilação (0,254 m, 0,356 m e 0,457 m) e o diâmetro da torre de ventilação (51,1 mm, 44,4 mm, 25,4 mm e 12,7 mm). Os autores concluíram que o diâmetro da torre de ventilação foi a variável experimental mais determinante para a ocorrência dos *geysers*, sendo que torres de ventilação com diâmetros menores mostraram-se mais propensas para a ocorrência de *geysers*. Nesse mesmo trabalho, o desenvolvimento de um modelo numérico simplificado foi apresentado, capaz de simular algumas características dos fenômenos observados nos experimentos.

---

<sup>1</sup> In spite of these uncertainties, the only plausible explanation for the geyser formation is the interaction of trapped air with water initially standing in the manhole shaft due to the existence of surcharge conditions. The measured pressures within the pipeline were incapable of lifting that water even close to the ground surface, let alone eject it 20 m or more into the air.

Cong, Chan e Lee (2017) utilizaram vídeos e fotografias registradas com câmeras de alta velocidade para descrever o mecanismo de formação de *geysers* urbanos, associando a sua ocorrência aos registros de pressão. O aparato empregado nesse estudo era composto por um conduto horizontal (5 cm de diâmetro e 6,60 m de comprimento) conectado a um reservatório de montante (volume de aproximadamente 0,22 m<sup>3</sup>). Condutos verticais (diâmetros variando entre 0,016 e 0,046 m) poderiam ser instalados em uma posição intermediária do conduto horizontal. Ao longo do conduto horizontal, havia quatro registros esfera: um separava o reservatório de montante e o conduto horizontal e outros três estavam instalados entre o conduto vertical e a extremidade de jusante do conduto horizontal, que era vedada com um tampão (cap). Esses últimos serviam para separar o conduto horizontal em diferentes seções, correspondentes aos diferentes volumes de ar testados. A abertura ou fechamento do registro esfera de montante propiciava dois arranjos experimentais: (i) sem carga de pressão externa, mantendo-se o registro esfera de montante fechado; (ii) com carga de pressão externa, mantendo-se o registro esfera de montante aberto. Os registros esfera de jusante permaneciam abertos ou fechados, dependendo do volume de ar ser testado. O aparato era preenchido com água e o ensaio iniciava-se com a abertura manual do registro esfera que separava o ar da água. O ar, inicialmente confinado entre o registro esfera e o cap de jusante, passava então a fluir em direção ao conduto vertical, ascendia pelo conduto e eventualmente provocava a ocorrência de *geysers*. Câmeras de vídeo, normais e de alta velocidade, foram utilizadas para rastrear a posição das interfaces do bolsão de ar e da interface de superfície livre no conduto vertical. Assim como Vasconcelos e Wright (2011), os autores concluíram que a ocorrência de *geysers* é mais provável em condutos verticais de diâmetros menores e bolsões de ar com volumes maiores. Também observaram o mesmo padrão de alívio de pressões que antecede a ocorrência dos *geysers* relatado nos experimentos de Vasconcelos e Wright (2011) e no sistema monitorado de Minneapolis (WRIGHT; LEWIS; VASCONCELOS, 2011 e VASCONCELOS; WRIGHT, 2011).

Muller, Wang e Vasconcelos (2017) investigaram numérica e experimentalmente *geysers* urbanos relacionados com a movimentação de bolsões de ar ao longo de condutos verticais. O objetivo experimental desse trabalho envolvia a observação de eventos de *geysers* em um aparato experimental de grande escala e a aquisição de dados para posterior calibração do modelo CFD desenvolvido em paralelo às simulações físicas. O aparato utilizado nos experimentos era composto por um conduto horizontal de 13,7 m de comprimento e 0,302 m de diâmetro conectando dois reservatórios (volume de 1,1 m<sup>3</sup>). Conectado ao conduto horizontal por um tê, um conduto vertical de 4,9 m e diâmetros variados (0,102 m, 0,153 m e

0,202 m) estava instalado a cerca de 10,7 m do reservatório de montante. Uma estrutura colocada próxima à extremidade de montante servia como câmara de pressurização de ar. Com o início do ensaio, uma válvula gaveta do tipo guilhotina, que conectava a câmara de ar ao conduto horizontal, era aberta e o ar era liberado para avançar até o interior do conduto horizontal. A maioria dos experimentos foi realizada com a água inicialmente em condições quiescentes. O diâmetro do conduto vertical e o volume inicial de ar foram as duas variáveis experimentais testadas. Transdutores de pressão estavam instalados no conduto horizontal (logo a jusante do ponto de entrada dos bolsões de ar e na base do tê) e no conduto vertical (entre 1,5 e 1,7 m do conduto horizontal). Os autores observaram características nos *geysers* que não haviam ainda sido relatadas em trabalhos realizados em experimentos de menor escala. Um decréscimo de pressão foi registrado pelo transdutor de pressão instalado na base do conduto horizontal, próximo ao tê, e coincidia com a ocorrência dos *geysers*.

Recentemente, Leon, Elayeb e Tang (2019) apresentaram os resultados de um estudo experimental sobre *geysers* violentos em condutos verticais. A instalação incluía condutos verticais e horizontais de 152,4 mm de diâmetro interno e um tanque de montante (volume de 1,7 m<sup>3</sup> e pressão máxima de operação de 105,5 m). Uma válvula de montante (152,4 mm de diâmetro) controlava o escoamento entre o reservatório de montante e o conduto horizontal. Na extremidade de jusante, um registro esfera (76,2 mm de diâmetro) controlava as vazões de saída do aparato. O conduto vertical situava-se em uma posição intermediária do conduto horizontal. As variáveis experimentais testadas pelos autores incluíram: altura do conduto vertical (3, 6, 9 e 12 m), volume inicial de água no reservatório de montante (0,7760 e 0,9615 m<sup>3</sup>) e pressão absoluta inicial do ar no interior do tanque de montante (variavam de cerca de 24 m até 55 m). A combinação dessas variáveis experimentais levou os autores a testar oito configurações experimentais. Visando estudar alternativas para mitigar os efeitos dos *geysers*, eles testaram a instalação de orifícios na base dos condutos verticais. Transdutores de pressão piezo-resistivos foram utilizados para registrar a pressão do escoamento em diferentes pontos nos condutos horizontal e vertical. Duas câmeras de alta velocidade foram utilizadas para registrar os principais eventos de todos os ensaios para posterior avaliação da altura alcançada pelo *geyser* e visualização das interações ar e água no interior dos condutos vertical e horizontal. Inicialmente, a água e o ar eram pressurizados no interior do tanque de montante e, em seguida, abria-se a válvula de montante, permitindo que a água e posteriormente o ar escoassem para o interior do conduto horizontal e para o vertical. Os autores reproduziram, em laboratório, os mecanismos envolvidos no estabelecimento de *geysers* tão violentos quanto aqueles observados em sistemas de drenagem reais. Observaram, ainda, que a dinâmica do escoamento do conduto

horizontal (estabelecimento de escoamento tipo *slug*) controlava o acionamento dos sucessivos *geysers* após a ascensão da primeira bolha de Taylor e do primeiro derramamento de água.

Sistemas de drenagem urbana são compostos por longos condutos horizontais, condutos verticais que conectam o sistema à superfície e singularidades geométricas (junções). Alguns trabalhos que investigam experimentalmente as particularidades do escoamento, através de singularidades geométricas comumente presentes em sistemas de drenagem urbana, são apresentados a seguir.

O escoamento à superfície livre em junções e outras singularidades geométricas encontradas em sistemas de drenagem urbana têm sido um dos objetos de estudos de Willi Hager desde a década de 1980. Utilizando um aparato experimental que reproduzia uma junção de três condutos (montante, lateral e jusante), Hager (1989a) investigou a transição entre os regimes de escoamento subcrítico, estabelecidos nos condutos de montante e lateral, e o regime supercrítico, estabelecido no conduto de jusante. O aparato consistia em um cilindro de 30 cm de diâmetro, inserido verticalmente em um conduto retangular de 50 cm de largura. A inserção desse dispositivo separava a vazão afluyente entre o trecho de montante e o trecho lateral. Na parte traseira desse dispositivo, o ângulo de confluência era ajustado. O trecho de jusante era acomodado por paredes verticais ajustáveis, considerando o ângulo de confluência. A largura de cada um dos trechos era de 0,09 m e os trechos montante e lateral poderiam ser fechados através de válvulas verticais. Três ângulos de confluência foram ajustados (22,5°, 45° e 90°) e a vazão no trecho de jusante variou entre 2 l/s e 13 l/s. Dentre os resultados desse trabalho, destacam-se: (i) apresentação de gráficos bidimensionais do campo de velocidade e profundidades do escoamento nos três trechos para diversas situações testadas; (ii) comparação, com concordância razoável, dos resultados experimentais obtidos com a abordagem teórica também apresentada nesse trabalho. O autor observou que a transição entre o regime subcrítico e supercrítico na junção só foi possível nos casos nos quais a contribuição do trecho de montante era, no máximo, de 85 % da vazão total. Uma equação semi-empírica para determinação da profundidade relativa do trecho de montante foi deduzida para os casos de ocorrência de escoamento supercrítico na junção.

Em um aparato experimental muito similar ao descrito anteriormente, Hager (1989b) investigou situações onde havia escoamento supercrítico em todos os trechos da junção. Foram testados dois ângulos de confluência (22,5° e 45°), com vazões de jusante que variaram entre 1 l/s e 15 l/s. A análise dos resultados apresentada pelo autor envolveu: (i) reconhecimento de padrões de escoamento; (ii) mapeamento e caracterização da onda estacionária que se formava na confluência; (iii) estabelecimento de critérios de dimensionamento para evitar o

estabelecimento de ressalto hidráulico na junção. O autor recomendou que a ocorrência de um ressalto hidráulico na junção deveria ser evitada devido à possibilidade de estrangulamento do escoamento, reduzindo a capacidade de drenagem (fenômeno descrito pelo autor como *choking flow*).

Desde meados dos anos 1990, Hager e seus associados de pesquisa realizaram uma extensa investigação experimental sobre o escoamento supercrítico em curvas e junções em poços de visita e em outras singularidades geométricas usuais em sistemas de drenagem urbana. Esses experimentos foram conduzidos no Laboratório de Hidráulica, Hidrologia e Glaciologia (VAW) do Instituto Federal de Tecnologia em Zurique (ETH Zurich). Reinauer e Hager (1997) exploraram o escoamento supercrítico em curvas de maneira teórica e experimental. Três geometrias de curvas foram testadas em canais retangulares: (i) canal de 250 mm de largura, 3607 mm de raio de curvatura e ângulo de deflexão de 51°; (ii) canal de 500 mm de largura, 3482 mm de raio de curvatura e ângulos de deflexão de 30° e 51°; (iii) canal de 500 mm de largura, 1616 mm de raio de curvatura e ângulo de deflexão de 30°. Os resultados apresentados incluíram a determinação das principais características da onda estacionária que se estabelecia junto à parede externa da curva e a apresentação de relações analíticas de dimensionamento que descreviam o perfil da onda estacionária junto à parede, altura máxima da onda estacionária e seu local de ocorrência. Eles também introduziram um número adimensional, Número de Curva de aproximação (*approach bend number*), que combinava o número de Froude do escoamento a montante da curva e as características geométricas da mesma.

O escoamento supercrítico em curvas em poços de visita de sistemas de drenagem foi estudado por Del Giudice, Gisonni e Hager (2000) para ângulos de deflexão de 45° e 90°, ampliando, assim, o estudo iniciado por Reinauer e Hager (1997). A curva com seção transversal em U foi construída com uma curva de PVC, até metade do diâmetro, e paredes verticais de acrílico até uma altura equivalente à uma vez e meia o diâmetro da curva. Foi posicionada, com uma declividade de fundo de 0,5%, em um canal retangular de 0,50 m e conectado a tubos de montante e jusante de acrílico de 0,24 m de diâmetro. A curvatura relativa da curva testada foi de 1/3. Resultados experimentais de distribuição de velocidade em diversas profundidades, de profundidades extremas (máximas e mínimas), perfil das superfícies ao longo das paredes internas e externas foram apresentados pelos autores. Considerando suas observações experimentais, eles reforçaram as recomendações de dimensionamento para que se evite a transição entre os regimes de escoamento no poço de visita, evitando a faixa de números de Froude no conduto de montante entre 0,75 e 1,50. Como uma alternativa para reduzir os efeitos das ondas de choque nas curvas, os autores testaram a colocação de uma placa

de cobertura removível no topo da curva a uma altura correspondente a 90% do diâmetro. Essa alternativa se mostrou satisfatória, pois aumentou a capacidade de vazão.

Del Giudice e Hager (2001) investigaram, de forma extensiva e sistemática, o escoamento em poços de visita com junções com características típicas de projeto, de maneira análoga ao realizado com o escoamento supercrítico em poços de visita com curvas. Os objetivos desse estudo incluíam o reconhecimento dos distintos padrões de escoamento em poços de visita com junções, a determinação dos principais parâmetros do escoamento nos ramos de montante e lateral da junção e o aperfeiçoamento nos procedimentos de dimensionamento dessas estruturas. O aparato experimental utilizado consistia de três condutos circulares de 0,24 m de diâmetro, um de montante, um lateral e um de jusante, além de uma junção com seção transversal em U com altura total equivalente a 1,5 vezes o diâmetro dos condutos circulares. Uma extensão retilínea foi inserida entre a extremidade de jusante da junção e a entrada do conduto de jusante, pois investigações prévias indicavam que a inserção de uma extensão retilínea com seção transversal em U, entre o final de uma curva e a entrada do conduto de jusante, aumentaria a capacidade de descarga da curva. Foram realizados mais de 300 experimentos que contemplaram distintas configurações, resultado da alternância do escoamento supercrítico e subcrítico nos condutos de montante e lateral. Os pesquisadores identificaram três tipos de ondas (denominadas ondas A, B e C), ocasionadas pelas distintas configurações dos escoamentos nos condutos de montante e lateral. Além disso, apresentaram relações para a estimativa da altura das distintas ondas e suas respectivas localizações em função do Número de Froude dos escoamentos nos condutos de montante e lateral. As vazões máximas e mínimas para evitar o estrangulamento do escoamento (*choking*) na junção foram determinadas. Os autores reafirmaram a importância de prevenir de situações que levem ao estrangulamento do escoamento e da capacidade de descarga na junção, salientando que essa condição é altamente indesejável.

Os experimentos apresentados por Gisonni e Hager (2002) mostraram que a inserção retilínea a jusante de uma curva de 45° aumenta significativamente a capacidade de escoamento da curva. Adicionalmente, duas configurações de placa de cobertura foram testadas, uma somente na curva e outra abrangendo a mesma e a extensão, na tentativa de eliminar os efeitos das ondas de choque que se formavam na curva.

Gargano e Hager (2002) realizaram experimentos em um poço de visita composto por um trecho retilíneo com seção transversal em U, que conectava dois condutos circulares. A intenção foi investigar o efeito de alterações na geometria das seções transversais na transição entre os condutos e o trecho retilíneo na formação de ondas e no consequente estrangulamento

do escoamento no poço de visita. Três padrões de ondas foram reconhecidos: (i) ondas de choque lateral se formaram devido ao sutil alargamento na transição entre o conduto circular e o trecho com seção transversal em U, quando a profundidade do escoamento era superior à metade do diâmetro do conduto; (ii) intumescência causada pelo impacto do escoamento supercrítico na transição entre o trecho retilíneo e a entrada do conduto de jusante; (iii) onda estacionária diagonal, no interior do conduto de jusante, causada pela propagação de ondas de choque lateral simétricas. Assim como nos trabalhos anteriores, a posição e a altura dessas ondas foram determinadas por relações que consideravam o Número de Froude e a profundidade do escoamento no conduto de montante.

Os resultados relevantes dos trabalhos experimentais referentes ao escoamento supercrítico em três tipos de poços de visita foram condensados e resumidos por Hager e Gisonni (2005). Baseados em seus resultados experimentais, os autores apresentaram algumas recomendações práticas de dimensionamento de poços de visita de passagem direta, com junção e curvas e chamaram atenção para a reduzida capacidade de escoamento dos poços de visita com curvas. Ainda, apontaram duas medidas principais para que se evitem situações de estrangulamento do escoamento (*choking*): (i) manutenção do escoamento supercrítico em toda a extensão do poço de visita, evitando a formação de um ressalto hidráulico; (ii) implantação de medidas que diminuam os efeitos das ondas de choque lateral, sobretudo na transição entre a extremidade de jusante do poço de visita e o conduto de jusante.

Saldarriaga, Bermúdez e Rubio (2012) investigaram o comportamento hidráulico de poços de visita com junções em condições de escoamento supercrítico. O aparato experimental era composto por três condutos circulares (dois condutos afluentes, um axial e um lateral, e um conduto circular de jusante, que drenava o escoamento), além de um cilindro circular que representava um pequeno modelo de poço de visita com junção. Na base do cilindro, a junção de 90° era constituída de calhas semicirculares. Cerca de 188 ensaios foram realizados reproduzindo três condições experimentais consideradas: (i) entrada somente pelo conduto axial; (ii) entrada somente pelo conduto lateral; (iii) entrada por ambos os condutos afluentes. O Número de Froude testado variou entre 1,5 e 4,5 e o nível do escoamento não excedia 70% do diâmetro dos condutos afluentes. Os resultados apresentados pelos autores incluíam um mapeamento do padrão das ondas estacionárias que se formavam em cada uma das configurações experimentais.

Saldarriaga et al. (2017) expandiram o trabalho iniciado por Saldarriaga, Bermúdez e Rubio (2012), testando uma configuração experimental com três condutos afluentes. O aparato utilizado no estudo prévio foi adaptado e um novo arranjo experimental, similar ao anterior, foi

igualmente utilizado nesses experimentos. De maneira análoga à realizada no trabalho anterior, os autores mapearam os tipos de ondas estacionárias observadas durante os ensaios e apresentaram relações para a estimativa da altura máxima de cada tipo de onda. Também confirmaram o nível de escoamento equivalente a 75% do diâmetro como o limite para se evitar condições de estrangulamento do escoamento e possível pressurização.

Recentemente, Crispino, Pfister e Gisonni (2018) investigaram o escoamento supercrítico em poços de visita com junções com distintas geometrias dos condutos de montante, lateral e jusante. O aparato experimental era uma junção com seção transversal em U e raio de curvatura equivalente a três vezes o diâmetro do conduto lateral. Condutos de montante e lateral de diversos diâmetros foram testados, enquanto o diâmetro do conduto de jusante (0,24 m) foi mantido constante durante todos os ensaios. O alinhamento dos três condutos seguia suas geratrizes superiores. Oito configurações experimentais foram testadas, representativas de combinações de diferentes diâmetros de condutos de montante e lateral. O Número de Froude dos escoamentos nos condutos de montante e lateral variou entre 1,44 e 7,45, resultando em mais de 150 experimentos. Os padrões de escoamento observados pelos autores foram detalhadamente descritos, plotados em diagramas de estado propostos por trabalhos anteriores (DEL GIUDICE; HAGER, 2001 e GISONNI; HAGER, 2002) e comparados com os resultados de trabalhos experimentais prévios realizados nesse mesmo aparato, mas com configurações distintas, isto é, condutos com mesmo diâmetro e com alinhamento pela geratriz inferior. Os autores propuseram equações empíricas para a estimativa das características do escoamento supercrítico nesse tipo de arranjo.

O escoamento pressurizado em um poço de visita com junção foi o objeto do estudo experimental apresentado por Zhao, Zhu e Rajaratnam (2006). Dois arranjos foram testados, junções de 90° e 25,8° de dois condutos afluentes e um conduto efluente. A junção de 25,8° já havia sido utilizada pelos autores em estudos prévios e a maior parte dos experimentos apresentados nesse estudo foram realizados na junção de 90°. Os três condutos da junção de 90° apresentavam diâmetro de 0,152 m e a junção consistia de uma caixa retangular (0,456 m x 0,304 m) sem calhas. A geratriz inferior dos condutos afluentes estava posicionada a 5 cm do fundo da junção e a do conduto efluente, a 4 cm. As vazões afluentes foram variadas de 0 a 40 L/s, independentemente, resultando em 249 combinações de vazões afluentes testadas. Com o objetivo de estudar a transição entre os regimes de escoamento, a vazão do conduto axial poderia ser incrementada (1 l/s, 2 l/s e 4 l/s), enquanto que a a vazão no conduto lateral era mantida constante. Já a junção de 25,8° era composta por um conduto axial de 0,152 m de diâmetro e um conduto retangular (0,119 m x 0,135 m) com entrada na caixa retangular em

ângulo de  $25,8^\circ$  com o conduto axial. O estudo confirmou o estabelecimento de três possíveis regimes de escoamento: (i) Regime I: escoamento à superfície livre nos condutos e na junção; (ii) Regime II: escoamento parcialmente pressurizado no conduto de jusante; e (iii) Regime III: escoamento totalmente pressurizado nos condutos e na junção. Os autores ainda apresentaram interessantes comentários associando a transição entre os regimes II e III às ondas que se formam no interior do conduto de jusante.

Diferentes aspectos do comportamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana foram investigados em modelos em escala reduzida nas últimas décadas. Tendo em vista os modelos hidráulicos aqui relatados, estabelecem-se algumas considerações, apresentadas a seguir.

- 1) Na literatura consultada, não há registro de modelos que reproduzam trechos de sistemas de drenagem reais que apresentaram falhas funcionais ou estruturais. Assim, os modelos físicos empregados nesses estudos são representações idealizadas de partes do sistema (um conduto horizontal conectando dois reservatórios com o objetivo de reproduzir o escoamento em um conduto entre dois poços de visita) ou são arranjos experimentais concebidos para reproduzir um único fenômeno isoladamente (modelos com condutos verticais destinados ao estudo dos *geysers* urbanos).
- 2) Considerando os diferentes aspectos do comportamento hidráulico investigado nos distintos aparatos experimentais e os objetivos gerais dos estudos, entende-se que é razoável reunir os aparatos experimentais em cinco grupos distintos, os quais serão descritos a seguir.
  - a. Modelos orientados ao estudo da transição do escoamento à superfície livre e pressurizado: a configuração experimental usualmente empregada é composta por um conduto de seção transversal constante, conectando dois reservatórios, um de montante e outro de jusante. O regime permanente era inicialmente estabelecido e, em seguida, a vazão escoada era restringida através do fechamento rápido de uma válvula de jusante. Assim, a transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado era desencadeada. Os fenômenos hidráulicos tipicamente observados nesses estudos envolviam ressaltos hidráulicos móveis e ondas de choque. Além disso, o estabelecimento de mecanismos de aprisionamento de ar foi observado em alguns trabalhos. Entende-se que os seguintes trabalhos são exemplos desse conjunto de modelos: Hamam e McCorquodale (1982), Cardle, Song e Yuan (1989), Capart, Sillen e Zech (1997), Trajkovic et al. (1999), Li e McCorquodale (1999), Vasconcelos e Wright (2005) Ferreri, Ciraolo e Re (2014a e 2014b).

- b. Modelos orientados ao estudo da movimentação de bolsões de ar: o objetivo desses estudos envolvia a avaliação de aspectos cinemáticos envolvidos na movimentação dos bolsões de ar, no interior de trechos de condutos, com seção transversal constante. Os aparatos experimentais eram compostos por um reservatório de montante, um conduto e uma válvula de jusante (Chosie, Hatcher e Vasconcelos (2014)) ou somente por um conduto de seção transversal quadrada inicialmente repleto de água e uma válvula de jusante (BAINES, 1991).
- c. Modelos orientados ao estudo do estabelecimento de geysers urbanos: esse tipo de aparato experimental contava com um conduto vertical além do conduto horizontal. Enquanto algumas configurações eram compostas por dois reservatórios, um de montante e outro de jusante, outras eram compostas por um tanque de montante pressurizado. Em ambas as configurações o ar era admitido (ou insuflado) para o interior do aparato experimental através de algum tipo de manobra artificial. Em linhas gerais, o objetivo desses trabalhos era investigar as variações de pressão observadas durante os eventos de *geysers*, a fim de melhor compreender a dinâmica do escoamento, tanto no conduto horizontal quanto no conduto vertical, e fornecer dados para a calibração de modelos numéricos. Considera-se que os seguintes trabalhos podem ser enquadrados nessa categoria de modelos: Wright, Lewis e Vasconcelos (2011a), Wright, Lewis e Vasconcelos (2011b), Vasconcelos e Wright (2011), Cong, Chan e Lee (2017), Muller, Wang e Vasconcelos (2017), León (2019), León, Elayeb e Tang (2019).
- d. Modelos orientados ao estudo dos transientes de pressão causados pela liberação violenta de bolsões de ar por orifícios: o aparato experimental empregado nesses estudos era composto, basicamente, por um reservatório de montante, pressurizado ou não, um conduto horizontal e algumas válvulas de abertura rápida que permitiam isolar distintos volumes de ar e de água. Usualmente, a abertura das válvulas permitia o avanço da coluna d'água sobre o volume de ar, empurrando-o contra o orifício. Trabalhos mais recentes contam, também, com variações geométricas, onde o orifício é instalado no final de um conduto vertical. Os seguintes trabalhos foram entendidos como pertencentes a esse grupo de modelos: Albertson e Andrews (1971), Zhou, Hicks e Steffler (2002a e 2002b); Lee (2005), Zhou et al. (2011), Zhou e Liu (2013), Zhou, Liu e Karney (2013), Zhou et al. (2018), Zhou et al. (2019).
- e. Modelos orientados ao estudo do escoamento à superfície livre em singularidades geométricas do sistema: modelos reduzidos de poços de visita (de passagem direta, com curvas e junções) e poços de queda foram sistematicamente desenvolvidos por diversos

grupos de pesquisa desde a década de 1990. Normalmente, os experimentos eram conduzidos, em condições de escoamento supercrítico permanente à superfície livre, pois buscavam estabelecer recomendações de dimensionamento das singularidades geométricas. Assim, os autores preocupavam-se em destacar as condições de escoamento permanente limite que levavam o estrangulamento do escoamento (*choking*), principalmente relacionadas aos efeitos das ondas de choque. Essas situações devem ser evitadas, sob pena do estabelecimento de escoamentos bifásicos pressurizados. Ressalta-se, ainda, o fato que, na maioria dos experimentos, as singularidades geométricas não foram submetidas a cenários de escoamento transiente ou a situações de pressurização dos condutos conectados às singularidades, com exceção dos trabalhos desenvolvidos por Zhu, Rajaratnam e seus associados de pesquisa. Dentre os estudos de junções e poços de visita, destacam-se os trabalhos de Hager e seus associados de pesquisa (HAGER, 1989a, HAGER, 1989b, REINAUER; HAGER, 1997, DEL GIUDICE; GISONNI; HAGER, 2000, DEL GIUDICE; HAGER, 2001, GISONNI; HAGER, 2002, GARGANO; HAGER, 2002, HAGER; GISONNI, 2005), e de Saldarriaga, Bermúdez e Rubio (2012), Saldarriaga et al. (2017), Crispino, Pfister e Gisonni (2018) e Zhao, Zhu e Rajaratnam (2006).

Esse agrupamento dos estudos experimentais constitui-se numa tentativa de organizar e sintetizar o avanço das pesquisas relacionadas aos aspectos hidráulicos dos sistemas de drenagem urbana, oferecendo um panorama amplo ao leitor. Contudo, a intenção não é fomentar um enquadramento rígido dos estudos, reduzindo a complexidade do tema, nem esgotar a discussão.

- 3) As singularidades geométricas do sistema, quando submetidas a condições de escoamento transiente, configuram uma lacuna do comportamento hidráulico dos sistemas de drenagem urbana. Sobretudo, o papel das singularidades geométricas, enquanto gatilho para a gênese dos fenômenos e instabilidades hidráulicas, permanece pouco compreendido. Assim, estudos experimentais dedicados à observação e descrição qualitativa dos fenômenos e instabilidades hidráulicas (estudos fenomenológicos) são necessários para o avanço do entendimento dos escoamentos transientes nesse tipo de estrutura hidráulica.
- 4) Os escoamentos bifásicos (ar e água) são eventos característicos e recorrentes em sistemas de drenagem urbana. Aspectos dos escoamentos bifásicos contemplados em estudos anteriores incluem avaliar a movimentação dos bolsões de ar no interior de longos trechos de condutos (estimativa da velocidade de avanço do bolsão) e a quantificação dos efeitos da rápida expulsão de quantidades apreciáveis de ar através de orifícios (sobretudo seus

efeitos em termos de transientes de pressão). Contudo, poucas investigações experimentais dedicaram-se à observação e ao entedimento dos mecanismos de aprisionamento desses bolsões de ar.

Diversos aspectos do escoamento em sistemas de drenagem urbana foram observados, descritos, desenvolvidos e aprofundados experimental e numericamente desde os estudos pioneiros das décadas de 1960 e 1970. As características hidráulicas dos ressaltos hidráulicos móveis e das ondas de choque que se estabelecem no interior dos condutos são exemplos de feições do escoamento exaustivamente investigadas e já relativamente bem compreendidas e reproduzidas. Por outro lado, a investigação das interações do escoamento ar e água e sua estreita relação com as singularidades geométricas apresenta-se como uma tendência atual dos estudos da hidráulica dos sistemas de drenagem urbana. Tal como a presente investigação, diversas pesquisas experimentais, em sistemas de drenagem urbana, foram motivadas por eventos envolvendo colapsos estruturais em sistemas de drenagem urbana de diversas cidades ao redor do mundo.

#### 4 CASO EM ESTUDO: CONDUTO FORÇADO ÁLVARO CHAVES

O sistema do Conduto Forçado Álvaro Chaves (CFAC), a maior obra de drenagem urbana de Porto Alegre<sup>2</sup>, foi implantado entre 2005 e 2008 com o objetivo de evitar alagamentos em regiões específicas da cidade, abrangendo nove bairros (cerca de 2,8 km<sup>2</sup>). Sua construção foi financiada pelo Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID), em parceria com a Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

Após um evento chuvoso intenso, ocorrido em 20 de fevereiro de 2013, um trecho do CFAC, localizado na Av. Coronel Bordini, apresentou pontos de colapso estrutural, causando a subsidência do pavimento junto às calçadas, nas proximidades da esquina com a Rua Marquês do Pombal, e o alagamento de diversas ruas localizadas em cotas inferiores. A Figura 6 reúne fotos publicadas na imprensa local logo após o evento, onde se pode notar a extensão dos danos estruturais e a quantidade de solo removido. A Figura 6 (a) apresenta uma visão geral da Rua Coronel Bordini logo após o colapso estrutural e a Figura 6 (b), (c) e (d) mostra detalhes do solo removido e da subsidência do pavimento no entorno dos automóveis estacionados próximos à calçada.

Figura 6. Fotos publicadas na imprensa local sobre o colapso estrutural do Conduto Forçado Álvaro Chaves em 20/02/2013



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Mauro Schaefer / Correio do Povo

<sup>2</sup> Informação disponível no endereço eletrônico do Departamento de Esgotos Pluviais, acessado no dia 15/08/2019. ([http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dep/default.php?reg=1&p\\_secao=89](http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dep/default.php?reg=1&p_secao=89))

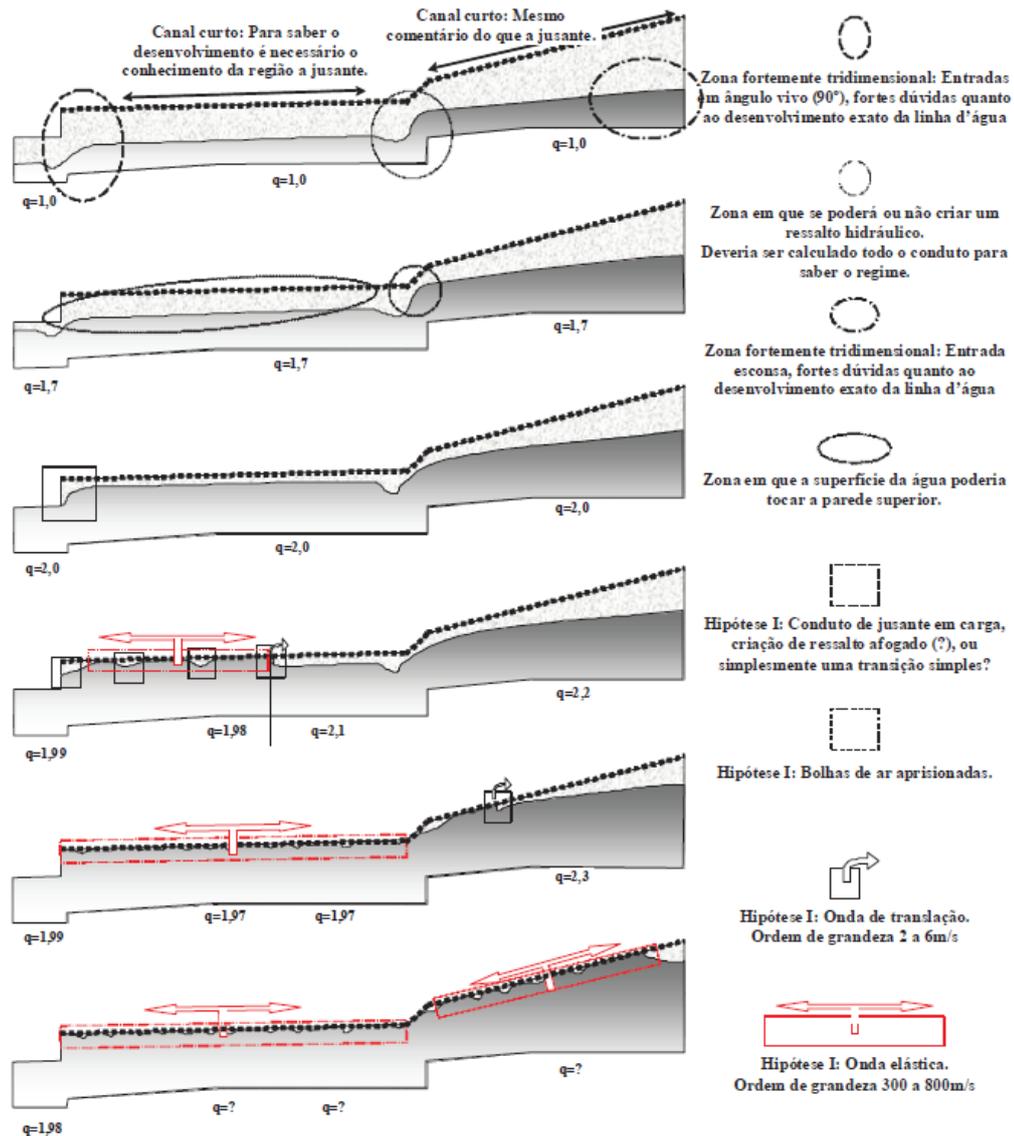
Com o objetivo de efetuar uma análise técnica desse incidente, o Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Sul (CREA-RS) reuniu uma comissão de especialistas de diversas áreas da engenharia (Hidráulica, Transientes em Conduitos Forçados, Hidrologia, Saneamento, Estruturas e Obras Urbanas). O parecer técnico emitido pela comissão de especialistas, em abril de 2013, traz informações sobre o contexto histórico da concepção do sistema, alterações de traçado e adaptações técnicas e construtivas necessárias durante o desenvolvimento das obras, características geométricas das galerias e do evento chuvoso que culminou no colapso estrutural.

Os especialistas concluíram o documento indicando que causas sistêmicas concorreram para a ruptura da estrutura, dentre as quais destacam-se: concepção não convencional (conduto forçado instalado imediatamente à jusante de um reservatório de montante, além do reaproveitamento de galerias antigas nas porções de jusante do sistema, limitando a capacidade hidráulica); introdução de elementos geométricos singulares (reduções, mudanças de direção e diâmetro, curvas não ajustadas e transições sem o alinhamento apropriado) sem a devida avaliação de seus efeitos no escoamento; redução da rigidez e resistência estrutural devido às alterações de traçado. Para maiores detalhes acerca dos possíveis encadeamentos entre as causas sistêmicas, sugere-se a leitura do Parecer Técnico.

Os critérios hidrológicos utilizados no projeto contemplaram um período de retorno de 10 anos, um tempo de duração de chuva de uma hora e um coeficiente de escoamento médio de 0,7. O evento chuvoso do dia 20 de fevereiro de 2013 foi registrado em dois locais: pluviógrafo da Hidráulica do Moinhos de Vento (64,6 mm em 45 minutos, das 15:05 às 15:50) e no 8º Distrito de Meteorologia do INMET (64,2 mm em 65 minutos, das 14:45 às 15:50). Considerando a curva IDF do 8º Distrito de Meteorologia e a chuva registrada pelo pluviógrafo da Hidráulica do Moinhos de Vento, estimou-se um período de retorno de 70 anos para o evento (CREA-RS, 2013).

Ainda, no parecer hidráulico desse documento, o Prof. Rogério Dornelles Maestri apontou que é possível o estabelecimento de ressaltos hidráulicos fixos e móveis, ondas de translação, aprisionamento e movimentação de bolsões de ar e transientes de pressão. A Figura 7 apresenta o modelo mental de um possível processo de enchimento do CFAC, onde destacam-se as singularidades geométricas do sistema, como elementos importantes nesse processo. Os experimentos realizados no modelo reduzido do CFAC, durante o mestrado da autora, confirmaram a possibilidade de aprisionamento e movimentação de bolsões de ar no interior do conduto, conforme as hipóteses colocadas pelo Prof. Maestri no Parecer Técnico do CREA-RS.

Figura 7. Enchimento do CFAC proposto no Parecer Técnico elaborado pelo CREA-RS.

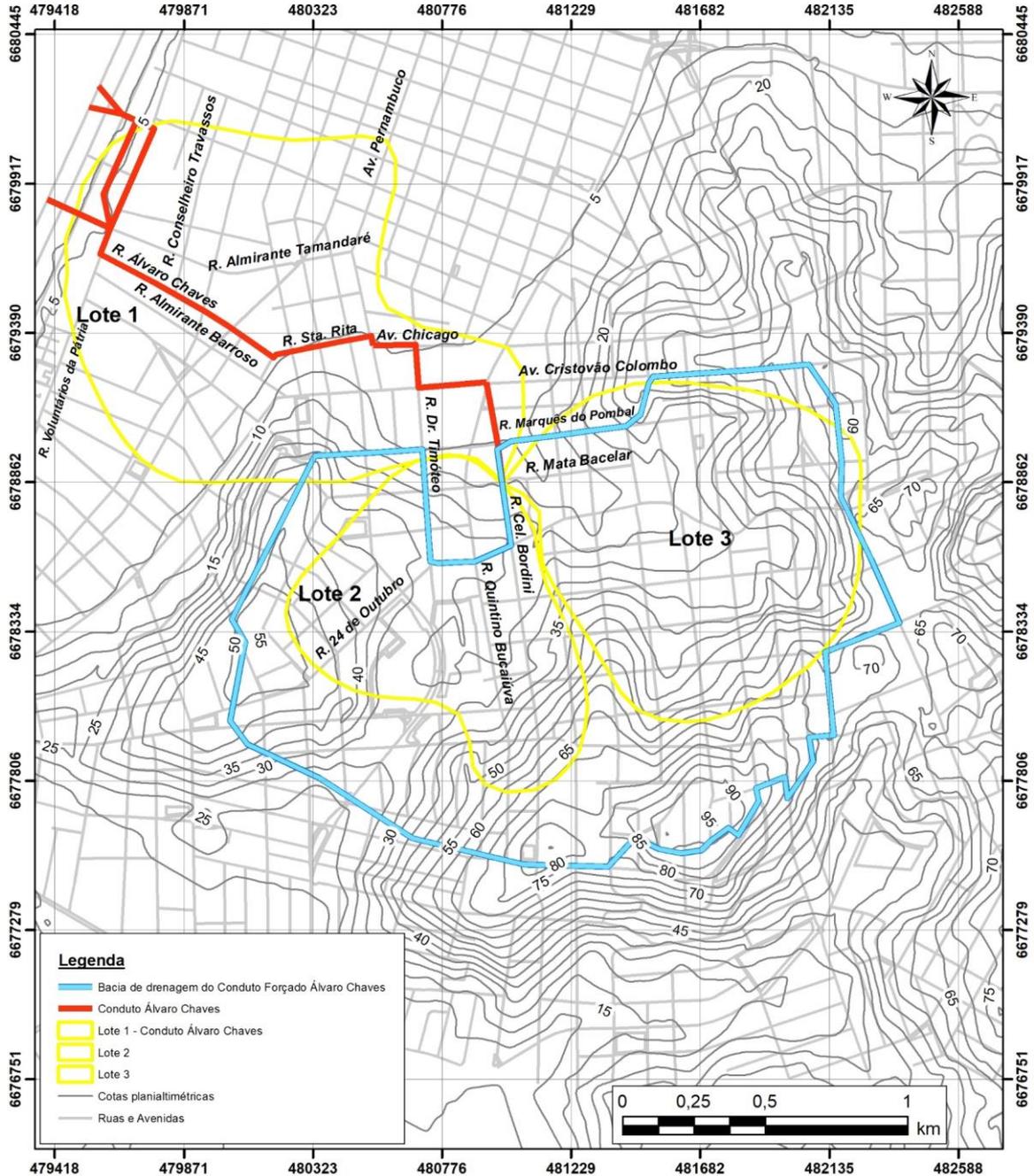


Fonte: Prof. Rogério Dornelles Maestri, CREA (2013).

Os lotes de execução da obra, denominados Lote 1 (Conduto Forçado), Lote 2 (Bacia da Goethe) e Lote 3 (Bacia da Auxiliadora), bom como a bacia de drenagem do Conduto Forçado estão indicados na Figura 8. Segundo o Parecer Técnico do CREA, a drenagem das regiões com cotas superiores aos 13 m fica a cargo do Conduto Forçado e as inferiores aos 13 m são drenadas pelo sistema Tamandaré, com bombeamento pela Casa de Bombas 3 para descarte no Rio Guaíba. O traçado do Conduto Forçado inicia-se na região de montante do Lote 1 e recebe o escoamento da bacia de contribuição através de duas entradas, uma referente às galerias do Lote 2 e outra, às galerias do Lote 3, como indicado na Figura 9. Essa região de montante é marcada pelas grandes dimensões transversais dos condutos, caracterizando o reservatório de montante mencionado anteriormente. A jusante dessa estrutura, tem-se início o

conduto forçado propriamente dito. Os pontos de danos estruturais ao sistema estão localizados próximos à singularidade geométrica que caracteriza a transição entre essas duas estruturas e o local está indicado na Figura 10.

Figura 8. Lotes de execução da obra e bacia de contribuição ao Conduto Forçado Álvaro Chaves.



Fonte: a pesquisa. Adaptado de mapas disponíveis no endereço eletrônico do Departamento de Esgotos Pluviais e de informações disponíveis no Parecer Técnico do CREA.

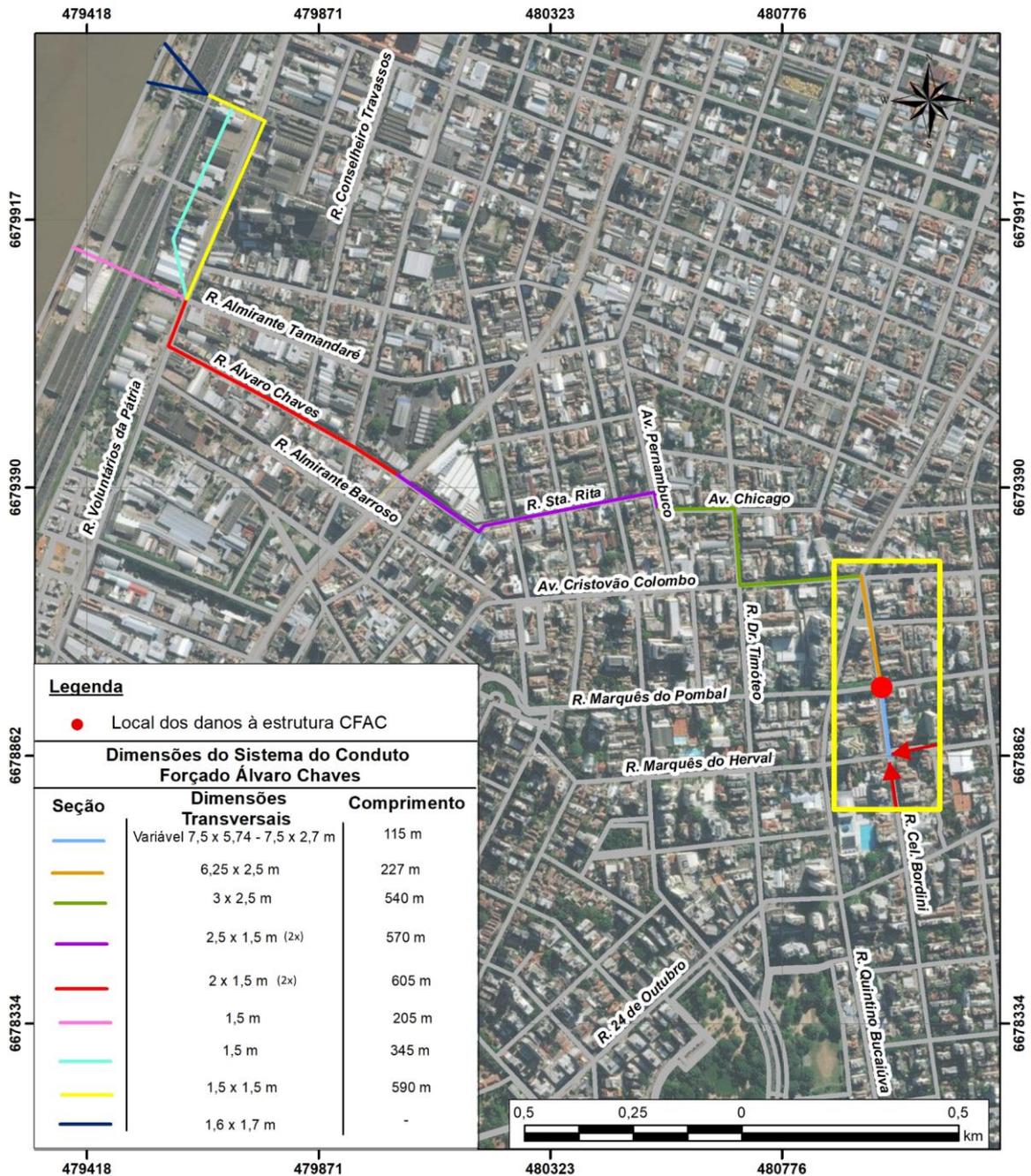
Figura 9. Detalhe das estruturas por onde as contribuições das galerias dos Lotes 2 e 3 afluem para a seção de montante do Lote 1.



Fonte: Paula Fiori / PMPA.

A Figura 10 apresenta o traçado aproximado do Conduto Forçado, desde o reservatório de montante até os três pontos de deságue no Rio Guaíba. O local do colapso estrutural está indicado e a região do sistema do CFAC, reproduzida no modelo reduzido, também está em destaque. A legenda indica as dimensões dos condutos e galerias que compõem cada um dos trechos e seus comprimentos aproximados, onde nota-se, claramente, a diminuição na seção transversal na direção de jusante. Os pontos de mudanças de dimensões da seção transversal, assim como os locais de mudança de direção dos condutos ou de declividade de fundo, compõem as singularidades geométricas presentes no sistema do CFAC. Um detalhamento das singularidades geométricas presentes no sistema e reproduzidas no modelo reduzido é apresentado no Capítulo 5 – Metodologia.

Figura 10. Traçado e dimensões das galerias CFAC



Fonte: a pesquisa. Adaptado de mapas disponíveis no endereço eletrônico do Departamento de Esgotos Pluviais e de informações disponíveis no Parecer Técnico do CREA.

Outros problemas de funcionamento do CFAC foram registrados após o colapso estrutural de fevereiro de 2013. Em outubro e novembro de 2013, o asfalto cedeu em ruas localizadas nas proximidades do ponto de rompimento de fevereiro do mesmo ano. Nesse evento, o asfalto da Rua Dr. Timóteo cedeu e formou crateras, conforme apresentado nas imagens da Figura 11.

Figura 11. Buraco que se formou na Dr. Timóteo em 28 de outubro de 2013 em dois pontos distintos



Foto: André Ávila/Correio do Povo



Foto: Paulo Nunes / Correio do Povo Memória

Tanto o evento do dia 20 de fevereiro de 2013 quanto os dos meses de outubro e novembro de 2013 aconteceram em pontos localizados na porção de montante do sistema do CFAC. Entretanto, a autora tomou conhecimento da ocorrência de eventos em pontos localizados na porção de jusante. Em 19 de novembro de 2015, na esquina da rua Álvaro Chaves com a rua Conselheiro Travassos, verificou-se o deslocamento da tampa de um poço de visita de ferro fundido com cerca de 1 m de diâmetro, culminando no alagamento da via. No dia 03 de maio de 2019, uma tampa de poço de visita foi removida na Avenida Voluntários da Pátria, entre as ruas Álvaro Chaves e Almirante Tamandaré, causando o alagamento da região. Ao contrário dos eventos ocorridos em 2013, nas porções de montante do sistema, que foram amplamente difundidos pela imprensa local, os eventos ocorridos na região de jusante do sistema do CFAC não foram noticiados. A autora tomou conhecimento dos eventos nas porções de jusante através de vídeos compartilhados nas redes sociais, bem como a partir de informações obtidas junto a moradores e trabalhadores dos estabelecimentos comerciais da região.

Como indicado na Figura 10, o sistema do CFAC deságua no Rio Guaíba em três pontos distintos. Informações disponíveis no endereço eletrônico da Prefeitura Municipal de Porto Alegre<sup>3</sup>, indicam que a média histórica dos níveis do Rio Guaíba oscila entre 0,5 e 1 m ao longo do ano, com maiores níveis registrados nos meses de inverno. Durante a cheia histórica de 1941, o nível do Rio Guaíba atingiu 4,75 m, causando o alagamento de diversos bairros da cidade. Nos eventos de cheia de 2015 e 2016, o nível registrado foi de 2,94 m e 2,65 m, respectivamente. Em eventos de cheia, as águas do Rio Guaíba podem avançar para o interior do sistema do CFAC, podendo afetar o escoamento e o comportamento hidráulico no interior do sistema. Segundo informações apresentadas no Parecer Técnico do CREA, o efeito da

<sup>3</sup> Endereço eletrônico da Prefeitura Municipal de Porto Alegre, acessado em 19/08/2019 (<https://alfa.portoalegre.rs.gov.br/smsg/noticias/guaiba-super>)a-nivel-de-alerta-para-enchente)

variação do nível do Rio Guaíba no escoamento no CFAC foi avaliado em estudos prévios à implementação do sistema. Esses estudos consideraram três cenários de níveis do Rio Guaíba (1 m, 2 m e 3 m) e indicaram que poderiam ocorrer situações em que a linha piezométrica estivesse acima da cota do terreno no trecho 25, indicado no Parecer Técnico como trecho da rua Coronel Bordini na altura da rua Mata Bacelar (região do reservatório de montante).

O sistema do Conduto Forçado Álvaro Chaves apresenta características geométricas *sui generis*, distintas das configurações geométricas de sistemas de drenagem urbana usualmente representadas em modelos físicos. Nesse sentido, justificou-se a construção de um modelo físico geometricamente bem detalhado da região onde se verificaram os danos estruturais em fevereiro de 2013, visando ao avanço da compreensão do escoamento que se estabelece nessa estrutura hidráulica única.

## 5 METODOLOGIA

A simulação física em modelo hidráulico em escala reduzida constituiu a base da presente investigação. O aparato experimental, os procedimentos empregados durante a realização dos ensaios, as condições testadas e os procedimentos empregados no tratamento de dados são apresentados neste capítulo. Desenvolveu-se, também, um modelo numérico baseado na teoria da coluna rígida, visando à representação de determinadas feições do comportamento hidráulico observado no modelo. O modelo analítico e as equações governantes são igualmente apresentadas neste capítulo.

### 5.1 Aparato experimental

O aparato experimental utilizado nesta investigação está instalado no Pavilhão Fluvial do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O modelo físico em escala reduzida reproduz a região onde ocorreram os danos à estrutura do sistema de drenagem urbana durante o evento citado no Capítulo 4, incluindo extensas porções a montante e a jusante desse ponto. A escala de redução geométrica adotada é 1:15 e o Número de Froude foi adotado como critério de semelhança para a estimativa de vazões. Placas de acrílico transparente de 10 mm foram utilizadas na construção, para permitir a visualização do escoamento.

A Figura 12 é uma representação esquemática do aparato experimental e a Figura 13 especifica as características geométricas dos Trechos A, B, C e D, os quais compõem a região em destaque na Figura 10. O Trecho A apresenta uma redução não usual na área da seção transversal na direção de jusante. O Trecho B é um conduto de seção transversal retangular e representa o início do conduto forçado propriamente dito. A região dos danos estruturais corresponde à singularidade geométrica localizada entre os Trechos A e B, a qual é caracterizada por um desnível geométrico abrupto, tanto na base quanto no topo do conduto. Uma rampa foi ajustada no desnível geométrico presente na base do conduto. Essa singularidade geométrica está indicada na Figura 12 como rampa, e assim será referida ao longo do texto.

O Trecho C apresenta a mesma dimensão transversal do Trecho B, porém o mesmo está localizado em uma cota inferior. Um segundo desnível geométrico abrupto, tanto na base quanto no topo do conduto, conecta os Trechos B e C e constitui a segunda singularidade geométrica do sistema representada no modelo. Na Figura 12, esta singularidade geométrica está indicada como degrau e assim será referida no texto. Finalmente, o Trecho D apresenta dimensões transversais reduzidas em relação aos trechos de montante e compõe a região mais

a jusante do sistema do CFAC representada no modelo. Conectando os Trechos C e D, há uma curva de 90° em ângulos vivos com redução da seção transversal.

O reservatório de nível constante é abastecido com água armazenada em um reservatório subterrâneo (700m<sup>3</sup>) por um sistema de bombeamento e recirculação. A água escoar, por gravidade, do reservatório de nível constante para o interior do modelo por dois condutos afluentes. Os condutos afluentes 1 e 2 são tubos de PVC de 85mm e 110mm, respectivamente. Ambos são equipados com medidores de vazão eletromagnéticos (SITRANS FM MAGFLO MAG 5100 W, DN80 e DN100) e registros gaveta. No conduto afluente 2 há, ainda, um registro esfera adicional.

Durante a realização do ensaio, o conduto afluente 1 era usado para ajustar o regime permanente inicial. O conduto afluente 2 era utilizado para a admissão da vazão adicional através da abertura manual do registro esfera. As vazões máximas admitidas pelos condutos afluentes 1 e 2 variavam de 18 a 20 l/s e de 28 a 30 l/s, respectivamente. Essa configuração de condutos afluentes e registros foi selecionada com o objetivo de reproduzir a propagação de uma vazão adicional de montante para jusante, ocasionando o enchimento e pressurização do sistema.

Na extremidade de jusante, um conjunto de quatro orifícios (três de 50 mm e um de 85 mm) compõe o sistema descarga de vazões do modelo. Ao permanecerem abertos ou fechados, os orifícios permitem o estabelecimento de uma ampla variedade de vazões, garantindo diferentes condições de escoamento no interior do modelo. Como mencionado na apresentação do Caso em Estudo, o comportamento hidráulico do sistema do CFAC pode ser condicionado pelo nível do rio Guaíba, uma vez que o sistema do CFAC deságua nesse corpo d'água. Além disso, os trechos do sistema do CFAC localizados a jusante da porção reproduzida no modelo são extensos e com grande quantidade de singularidades geométricas, as quais afetam igualmente o escoamento no interior do sistema. Por isso, optou-se por simular diferentes condições de jusante, a fim de reproduzir qualitativamente os efeitos de jusante presentes no sistema do CFAC. O estabelecimento de uma correlação exata entre as cotas do Rio Guaíba, o escoamento no trecho não representado no modelo físico e as condições de jusante do modelo não se constituiu objeto do presente estudo. Tal tarefa demandaria o cálculo do escoamento no interior do sistema do CFAC do Rio Guaíba até o final do trecho reproduzido no modelo, tanto em regime permanente quanto em regime transiente.

Figura 12. Esboço do aparato experimental

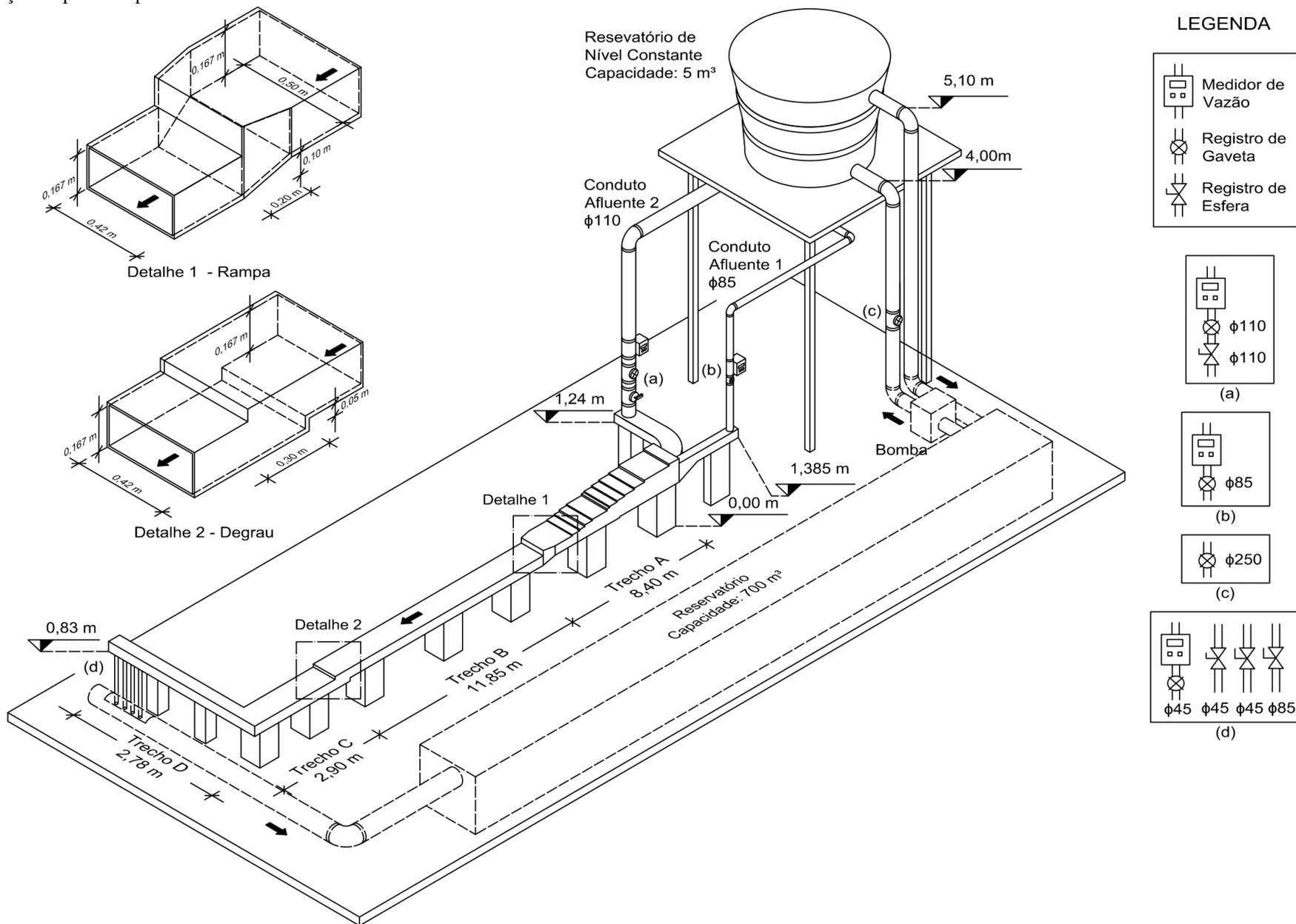
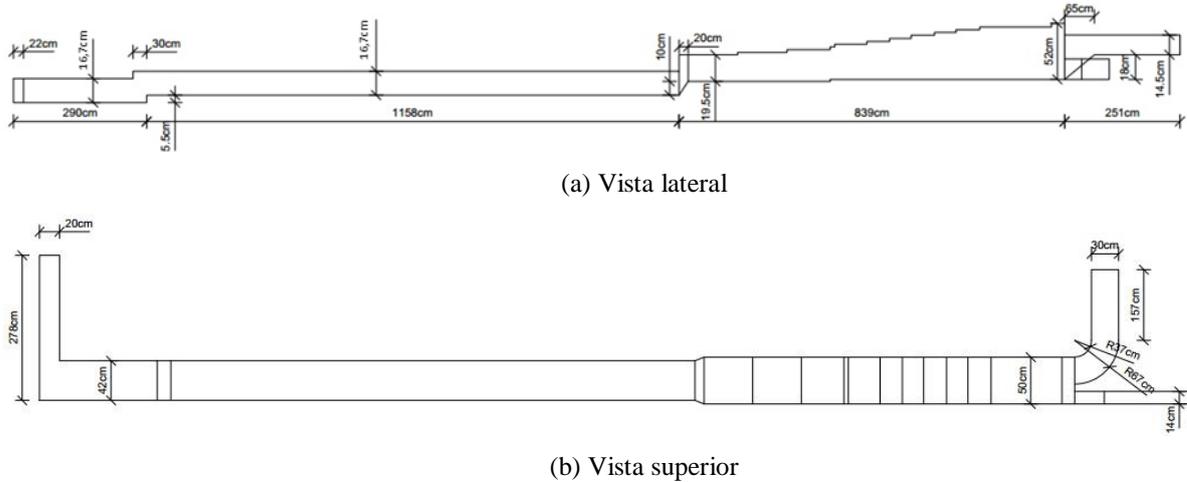


Figura 13. Detalhes geométricos do modelo reduzido.



Fonte: Kaiber da Silva (2015).

Transdutores de pressão piezoresistivos foram instalados em pontos específicos do modelo. Suas posições e distâncias estão indicadas na Figura 14. O transdutor de pressão TP08 está a 3,62m a jusante do transdutor TPAr07. O transdutor de pressão TPAr01 está localizado, na cobertura do modelo, na extremidade de montante. Os transdutores de pressão são da marca Sitron (modelo SP21) com range de pressões de -0,2 bar a 0,2 bar (TPAr01 e TPAr02) e de -0,5 bar a 0,5 bar (demais transdutores) e ambos com precisão de 0,25%. A frequência de aquisição de dados foi de 100Hz em todos os experimentos.

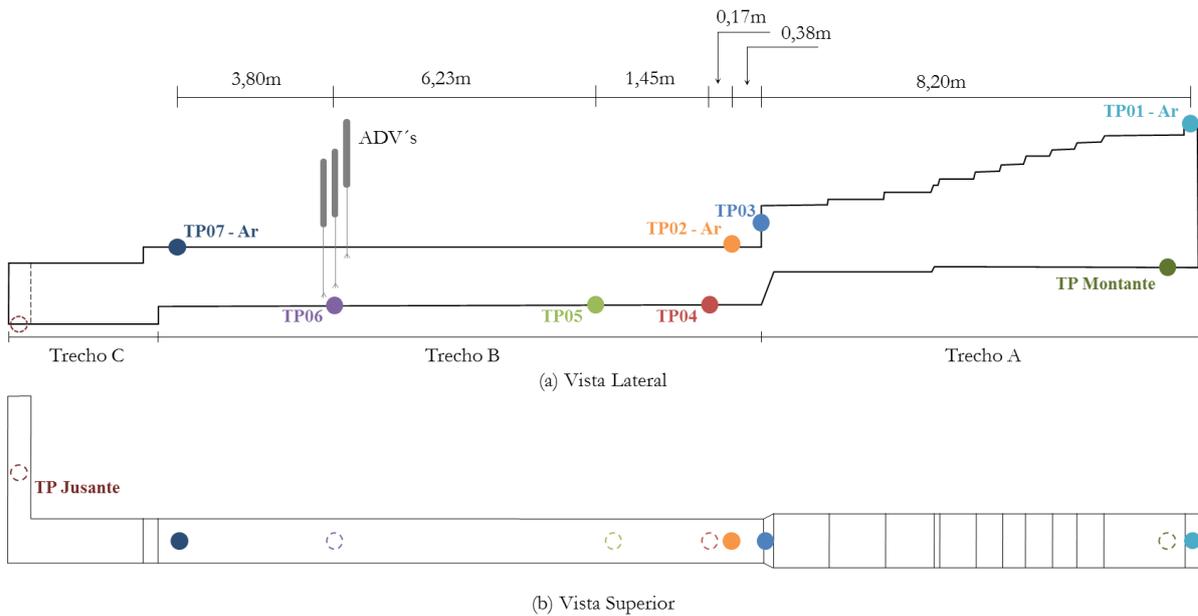
O módulo de leitura e registro de dados *FieldLogger* da marca *Novus* foi utilizado para a coleta dos dados oriundos dos transdutores de pressão e dos medidores de vazão eletromagnéticos. O software próprio do *FieldLogger*, instalado em um computador, realizava a conversão do sinal de corrente elétrica para centímetros de coluna de água.

A calibração dos transdutores de pressão, realizada no início de cada dia de ensaios, baseava-se na variação dos níveis de água dentro do modelo. Para cada nível estabilizado, procedia-se a leitura dos dados durante cerca de dois minutos.

A velocidade do escoamento foi medida com três velocímetros acústicos doppler (*ADV* - Vetrino Nortek) com taxas de aquisição de 100Hz. Os *ADV*'s foram instalados de modo que os volumes de controle estivessem situados a 0,5 cm, 1,5 cm e 8,3 cm da base do modelo.

Cinco câmeras filmadoras foram instaladas ao longo do Trecho B a fim de registrar imagens do ensaio para posterior análise. Todas as câmeras registram imagens a 30fps, mas com diferentes resoluções (resolução 4K: dois iPads Pro, um iPhone 7 Plus, uma câmera Nikon D5600; resolução 1920 x 1080: uma câmera Nikon D5000 ).

Figura 14. Localização dos transdutores de pressão e dos ADV's.



Fonte: a pesquisa.

## 5.2 Condições e procedimentos experimentais

O procedimento experimental consistiu nas etapas apresentadas a seguir.

- Estabelecimento do escoamento em regime permanente, através do conduto afluente 1, com a vazão sendo regulada por um registro gaveta de 85mm.
- O ensaio era iniciado com a abertura manual do registro esfera de 110mm, instalado no conduto afluente 2, permitindo a entrada de uma vazão adicional maior. Essa etapa visava representar a propagação de uma frente de escoamento transiente, de montante para jusante.
- O processo de enchimento constituiu-se basicamente por uma frente de enchimento que se propagava de montante para jusante e, em seguida, por um ressalto hidráulico (ou onda de choque) que se deslocava de jusante para montante. O ensaio era finalizado quando o ressalto hidráulico que se propagava de jusante para montante alcançava a seção de montante do modelo.

As variáveis experimentais testadas incluíram:

- Condições de jusante: quatro orifícios instalados na extremidade de jusante (três de 50mm e um de 85mm), possibilitando o ajuste de quatro vazões máximas, escoadas em regime permanente, com os Trechos B, C e D em carga:
  - 1 registro de 50mm: 5 l/s;
  - 2 registros de 50mm: 10 l/s;
  - 3 registros de 50mm: 14 l/s;

- 3 registros de 50mm e 1 registros de 85mm: 27 l/s.
- Nível inicial do escoamento d'água: tomando a cota da base do modelo, no trecho de jusante, como referência para o estabelecimento da profundidade inicial do escoamento, cinco níveis iniciais foram testados durante os ensaios:
  - Nível inicial 1: 0,08 – 0,09 m;
  - Nível inicial 2: 0,10 – 0,11 m;
  - Nível inicial 3: 0,18 m;
  - Nível inicial 4: 0,28 m;
  - Nível inicial 5: 0,36 m.

Nota-se que, devido aos desníveis geométricos na base do modelo, o nível inicial do escoamento, em cada ponto ao longo da extensão do modelo, é distinto do nível inicial sobre a base do modelo no trecho de jusante, tomado como referência;

- Condições de ventilação do modelo: quatro condições de ventilação do modelo foram testadas (ventilação livre, 25,4 mm, 12,7 mm, 6,35 mm). A de ventilação livre foi estabelecida removendo a placa de acrílico do topo do modelo na extremidade de montante do Trecho A. A placa removida possui área de 0,142 m<sup>2</sup>, superior à da seção transversal dos trechos de jusante (0,070 m<sup>2</sup> nos Trechos B e C e 0,033 m<sup>2</sup> no Trecho D), garantindo, assim, condições de ventilação no modelo.

A combinação dos cinco níveis iniciais e das quatro condições de jusante levou ao estabelecimento de 20 cenários experimentais. Em cada um deles, os ensaios foram definidos pela variação da condição de ventilação do modelo, resultando em 64 diferentes tipos de ensaios. A Tabela 1 apresenta os cenários experimentais, os ensaios realizados em cada um dos deles e a indicação dos níveis iniciais. A nomenclatura desses cenários segue a seguinte convenção: N(\*)J(\*\*), onde N(\*) indica o nível d'água inicial e J(\*\*) indica as vazões máximas escoadas, em regime permanente, com o conduto a seção plena nos Trechos B, C e D. Seguindo a mesma lógica, a nomenclatura dos ensaios inclui, ainda, a indicação das condições de ventilação: N(\*)J(\*\*)V(\*\*\*), onde V(\*\*\*) indica a condição de ventilação (livre ou o tamanho do orifício empregado). Os ensaios foram repetidos ao menos duas vezes, sendo que alguns ensaios com ventilação livre (N(1)J(5)V(VL), N(2)J(5)V(VL), N(3)J(5)V(VL), N(1)J(10)V(VL), N(2)J(10)V(VL), N(3)J(10)V(VL), N(1)J(14)V(VL), N(2)J(14)V(VL), N(3)J(14)V(VL), N(1)J(27)V(VL), N(2)J(27)V(VL), N(3)J(27)V(VL)) foram repetidos até a quatro vezes. Os experimentos foram realizados em três momentos distintos: abril de 2018, março de 2019 e maio de 2019.

Tabela 1. Cenários experimentais testados e faixa de variação das variáveis experimentais.

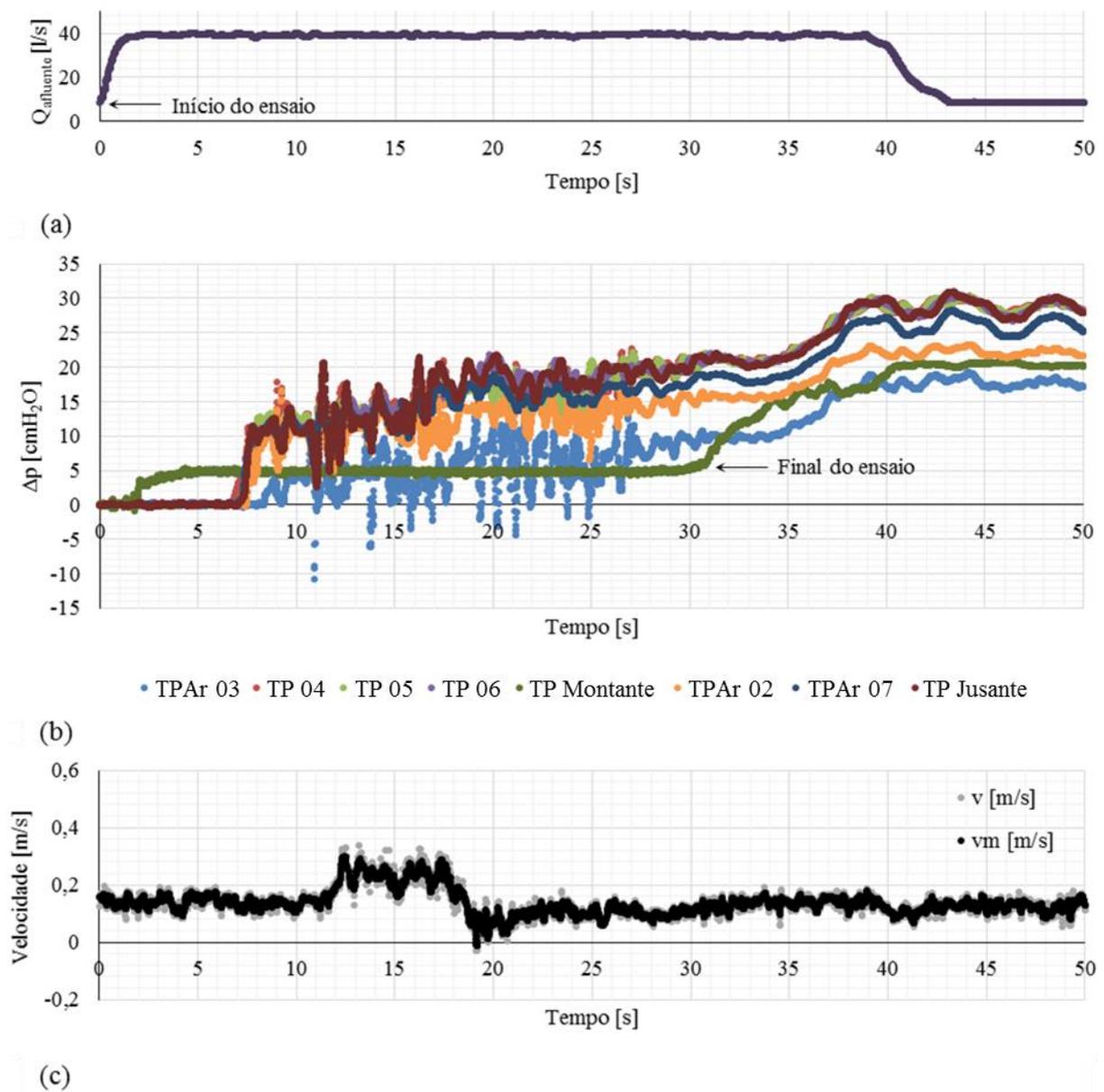
		Nível de água inicial				
		Nível de água 1 Profundidade inicial: 0,08 – 0,09 m	Nível de água 2 Profundidade inicial: 0,10 – 0,11 m	Nível de água 3 Profundidade inicial: 0,18 m	Nível de água 4 Profundidade inicial: 0,28 m	Nível de água 5 Profundidade inicial: 0,36 m
Condições de Jusante	1 x 50 mm Vazão máxima escoada a seção plena: 5 l/s	<b>Cenário Experimental: N(1)J(5)</b> Vazão inicial: 3,7 l/s Ventilação livre: N(1)J(5)V(VL)	<b>Cenário experimental: N(2)J(5)</b> Vazão inicial: 3,8 l/s Ventilação livre: N(2)J(5)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(2)J(5)V(25,4) Orifício 6,35 mm: N(2)J(5)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(3)J(5)</b> Vazão inicial: 4,4 l/s Ventilação livre: N(3)J(5)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(3)J(5)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(3)J(5)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(3)J(5)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(4)J(5)</b> Vazão inicial: 4,7 l/s Ventilação livre: N(4)J(5)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(4)J(5)V(25,4) Ensaio 7: 12,7 mm: N(4)J(5)V(12,7) Ensaio 8: 6,35 mm: N(4)J(5)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(5)J(5)</b> Vazão inicial: 4,9 l/s Ventilação livre N(5)J(5)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(5)J(5)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(5)J(5)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(5)J(5)V(6,35)
	2 x 50 mm Vazão máxima escoada a seção plena: 10 l/s	<b>Cenário experimental: N(1)J(10)</b> Vazão inicial: 6,6 l/s Ventilação livre: N(1)J(10)V(VL)	<b>Cenário experimental: N(2)J(10)</b> Vazão inicial: 7,9 l/s Ventilação livre: N(2)J(10)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(2)J(10)V(25,4) Orifício 6,35 mm: N(2)J(10)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(3)J(10)</b> Vazão inicial: 8,4 l/s Ventilação livre: N(3)J(10)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(3)J(10)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(3)J(10)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(3)J(10)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(4)J(10)</b> Vazão inicial: 8,9 l/s Ventilação livre: N(4)J(10)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(4)J(10)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(4)J(10)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(4)J(10)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(5)J(10)</b> Vazão inicial: 9,2 l/s Ventilação livre: N(5)J(10)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(5)J(10)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(5)J(10)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(5)J(10)V(6,35)
	3 x 50 mm Vazão máxima escoada a seção plena: 14 l/s	<b>Cenário experimental: N(1)J(14)</b> Vazão inicial: 7,6 l/s Ventilação livre: N(1)J(14)V(VL)	<b>Cenário experimental: N(2)J(14)</b> Vazão inicial: 10,1 l/s Ventilação livre: N(2)J(14)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(2)J(14)V(25,4) Orifício 6,35 mm: N(2)J(14)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(3)J(14)</b> Vazão inicial: 12,1 l/s Ventilação livre: N(3)J(14)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(3)J(14)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(3)J(14)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(3)J(14)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(4)J(14)</b> Vazão inicial: 12,8 l/s Ventilação livre: N(4)J(14)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(4)J(14)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(4)J(14)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(4)J(14)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(5)J(14)</b> Vazão inicial: 13,1 l/s Ventilação livre: N(5)J(14)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(5)J(14)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(5)J(14)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(5)J(14)V(6,35)
	3 x 50 mm 1 x 85 mm Vazão máxima escoada a seção plena: 27 l/s	<b>Cenário experimental: N(1)J(27)</b> Vazão inicial: 7,65 l/s Ventilação livre: N(1)J(27)V(VL)	<b>Cenário experimental: N(2)J(27)</b> Vazão inicial: 10,2 l/s Ventilação livre: N(2)J(27)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(2)J(27)V(25,4) Orifício 6,35 mm: N(2)J(27)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(3)J(27)</b> Vazão inicial: 15,6 l/s Ventilação livre: N(3)J(27)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(3)J(27)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(3)J(27)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(3)J(27)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(4)J(27)</b> Vazão inicial: 21,1 l/s Ventilação livre: N(4)J(27)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(4)J(27)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(4)J(27)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(4)J(27)V(6,35)	<b>Cenário experimental: N(5)J(27)</b> Vazão inicial: 25 l/s Ventilação livre: N(5)J(27)V(VL) Orifício 25,4 mm: N(5)J(27)V(25,4) Orifício 12,7 mm: N(5)J(27)V(12,7) Orifício 6,35 mm: N(5)J(27)V(6,35)

Convenção empregada na nomenclatura dos ensaios: N(\*)J(\*\*)V(\*\*\*), onde N(\*) indica o nível de água inicial e J(\*\*) indica as vazões máximas escoadas, em regime permanente, como conduto a seção plena nos Trechos B, C e D; V(\*\*\*) indica a condição de ventilação (livre ou tamanho do orifício empregado).

### 5.3 Metodologia de análise de dados

A Figura 15 apresenta os dados de vazão afluyente, diferença entre a pressão registrada, durante o ensaio, e a pressão em regime permanente e velocidade. A análise dos dados compreende o início do ensaio (marcado pelo o aumento abrupto na vazão afluyente, instante no qual o tempo é zerado) e o final do ensaio (marcado pela chegada do ressalto hidráulico, que se propaga de jusante para montante, ao transdutor de pressão instalado na base do modelo, na extremidade de montante).

Figura 15. Dados de vazão afluyente, pressão e velocidade do escoamento após tratamento preliminar.



Além da leitura instantânea da velocidade medida pelo ADV, é apresentada uma média móvel centrada com janela de 7 pontos. Seguindo sugestão do fabricante do equipamento, somente leituras de velocidade com correlação superior a 90% foram consideradas nas análises

dos dados. A correlação é um valor (de 0 a 100 %) reportado nos arquivos de dados assim como os dados de velocidade, sendo considerada uma medida indicativa da qualidade do sinal de leitura do ADV (NORTEK, 2018)

A identificação dos mecanismos de aprisionamento do ar e a movimentação dos bolsões de ar ao longo do Trecho B, além da passagem dos bolsões pelas singularidades, foi realizada considerando somente os ensaios de ventilação livre. Os demais foram utilizados para avaliar o efeito da restrição da ventilação na pressurização global do sistema.

A metodologia de análise dos dados baseou-se nas seguintes etapas:

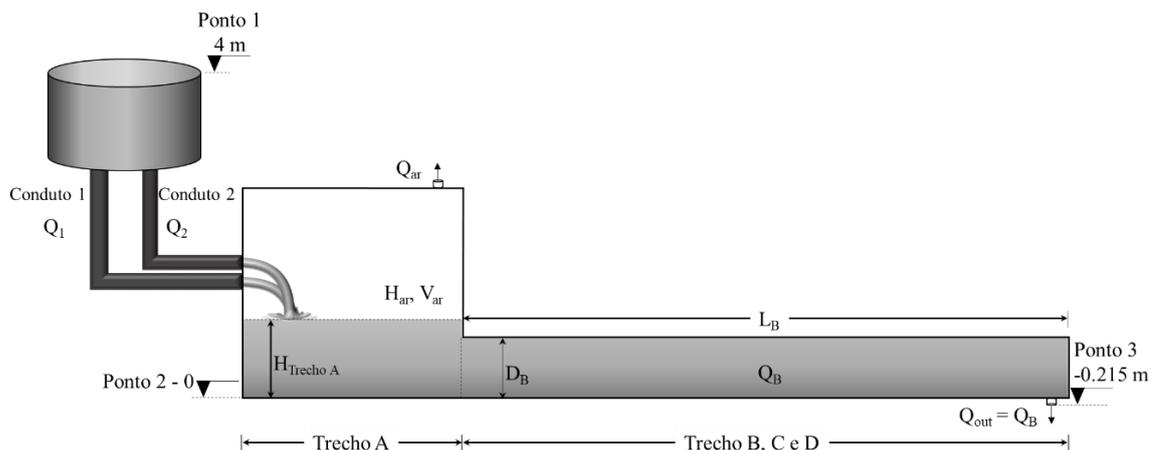
- avaliação das imagens de vídeo previamente editadas, visando à identificação dos fenômenos hidráulicos de interesse;
- avaliação dos dados de pressão, visando identificar padrões de variação de pressão e associá-los aos fenômenos hidráulicos identificados nos vídeos;
- avaliação dos dados de velocidade, buscando perceber os efeitos dos fenômenos hidráulicos e do padrão de variação da pressão observado no transdutor de pressão TP06.

#### 5.4 Avaliação analítica através de Modelo de Coluna Rígida

Adaptou-se um modelo de coluna rígida com o objetivo de descrever, numericamente, os efeitos do acúmulo e pressurização do ar no trecho de montante do modelo, junto ao topo. As vazões afluentes e efluentes, bem como o processo de pressurização do ar foram representados por um sistema de equações diferenciais ordinárias, sendo que uma simplificação na geometria do sistema foi introduzida para o desenvolvimento do modelo. Além disso, o modelo não considera situações nas quais ocorram transições entre o escoamento à superfície livre e o pressurizado.

A Figura 16 é uma representação esquemática dos elementos geométricos considerados na análise.

Figura 16. Esboço do modelo conceitual desenvolvido na avaliação numérica.



A variação no nível d'água no reservatório A deve satisfazer a equação da continuidade:

$$A_A \frac{dH_A}{dt} = Q_1 + Q_2 - Q_B \quad 8$$

Onde:  $A_A$ : área da base do reservatório A [ $m^2$ ]

$H_A$ : nível de água no reservatório A [m]

$Q_1$ : vazão escoada pelo conduto afluente 1 [ $m^3/s$ ]

$Q_2$ : vazão escoada pelo conduto afluente 2 [ $m^3/s$ ]

$Q_B$ : vazão escoada no Trecho B/C/D [ $m^3/s$ ]

A abordagem de coluna rígida foi utilizada para atualizar as vazões nos condutos afluentes (1 e 2) e a vazão escoada no Trecho B, C e D. A variação nas vazões nos condutos afluentes 1 e 2 é dada por:

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{gA_1}{L_1} \left[ H_1 - (H_A + H_{ar}) - \left( f \frac{L_1}{A_1} + \sum K_{s,1} \right) \frac{Q_1 |Q_1|}{2gA_1^2} \right] \quad 9$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = \frac{gA_2}{L_2} \left[ H_1 - (H_A + H_{air}) - \left( f \frac{L_2}{A_2} + \sum K_{s,2} \right) \frac{Q_2 |Q_2|}{2gA_2^2} \right] \quad 10$$

Onde:  $Q_1, Q_2$ : vazões escoadas pelos condutos afluentes 1 e 2 [ $m^3/s$ ]

$A_1, A_2$ : área da seção transversal dos condutos afluentes [ $m^2$ ]

$L_2$ : comprimentos dos condutos afluentes 1 e 2 [m]

$H_1$ : cota do Ponto 1, em relação à base do conduto [m]

$H_{ar}$ : pressão do ar no interior do reservatório A [m]

$K_{s,1}, K_{s,2}$ : coeficiente de perda de carga singular

$f$ : fator de perda de carga

A equação de momento para a coluna d'água no trecho B é dada por:

$$\frac{dQ_B}{dt} = \frac{gA_B}{L_B} \left[ H_A + H_{ar} - H_8 - \left( f \frac{L_B}{A_B} + \sum K_{s,B} \right) \frac{Q_B |Q_B|}{2gA_B^2} \right] \quad 11$$

Onde:  $Q_B$ : vazão escoada no Trecho B [ $m^3 s^{-1}$ ]

$A_B$ : área da seção transversal do conduto B [ $m^2$ ]

$L_B$ : comprimento do trecho B [m]

$H_8$ : carga hidráulica na saída do reservatório

$K_{s,B}$ : coeficiente de perda de carga singular

A carga hidráulica, na saída do conduto, foi calculada utilizando uma equação que relaciona a vazão e a carga hidráulica calibrada com medidas experimentais de pressão e velocidade. A vazão no Trecho B, C e D é equivalente à vazão efluente e é estimada por:

$$Q_{out} = Q_B = A_d \sqrt{2gH_{jusante}} \quad 12$$

Onde:  $Q_{out}$ : vazão efluente ao Trecho B [m<sup>3</sup>/s]

$A_d$ : área da seção transversal do orifício de jusante [m<sup>2</sup>]

As variações temporais na pressão do ar podem ser descritas pela equação de energia da fase ar, assumindo a lei dos gases ideais (ZHOU; HICKS; STEFFLER, 2002b):

$$\frac{dH_{ar}^*}{dt} = k \frac{H_{ar}^*}{V_A} \frac{dV_A}{dt} - k \frac{H_{ar}^*}{V_A} C_d Y A_{orif} \sqrt{2g \frac{\rho_w}{\rho_a} H_{ar}} \quad 13$$

Onde:  $H_{ar}^*$ : pressão absoluta do ar [m]

$V_A$ : volume do ar no reservatório A [m<sup>3</sup>]

$k$ : expoente politrópico

$C_d$ : coeficiente de descarga

$Y$ : fator de expansão

$A_{orif}$ : área transversal do orifício de saída de ar [m<sup>2</sup>]

$\rho_w, \rho_a$ : massa específica da água e do ar, respectivamente

O fator de expansão ( $Y$ ) é definido como apresentado por Zhou, Hicks e Steffler (2002b):

$$Y = \sqrt{\frac{k}{k-1} \left(\frac{H_b^*}{H_{air}^*}\right)^{2/k} \frac{1 - \left(\frac{H_b^*}{H_{air}^*}\right)^{(k-1)/k}}{1 - \frac{H_b^*}{H_{air}^*}}} \quad 14$$

Onde:  $H_b^*$ : pressão absoluta inicial do bolsão de ar [m]

As equações diferenciais ordinárias descrevendo vazões e a pressão do ar foram resolvidas aplicando um esquema Runge-Kutta de quarta ordem. Destaca-se que o modelo de coluna rígida, bem como os resultados oriundos de sua aplicação, estão relatados, também, em Kaiber da Silva et al. (2018).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados coletados durante a realização dos experimentos permitiram o estabelecimento de três conjuntos de resultados:

- 1) mecanismos de aprisionamento de ar;
- 2) cinemática das feições do escoamento;
- 3) efeitos da restrição da ventilação dos pontos altos do sistema no processo de pressurização do escoamento.

Os fenômenos hidráulicos que ocorrem no interior do modelo se estabelecem de forma bastante rápida. Inicialmente, o processo de enchimento do modelo do CFAC é caracterizado e, em seguida, os vários aspectos que o compõem são detalhados tendo em vista os resultados obtidos.

### 6.1 Descrição geral do processo de enchimento do modelo do CFAC

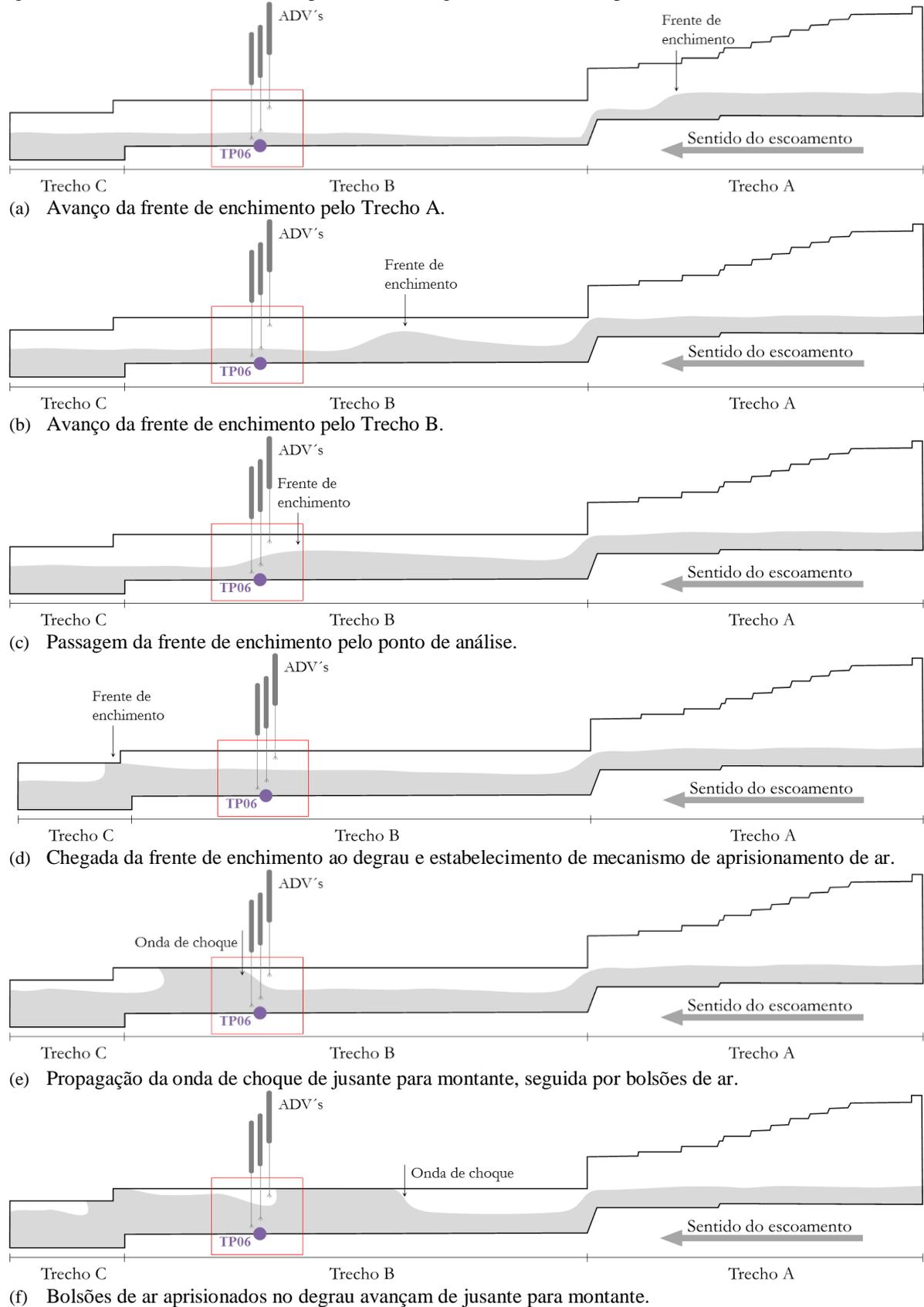
O processo de enchimento do modelo do CFAC é apresentado considerando duas situações. A primeira situação faz referência aos cenários experimentais N(1)J(5), N(2)J(5), N(1)J(10), N(2)J(10), N(1)J(14), N(2)J(14), N(1)J(27), N(2)J(27), cenários de nível d'água baixo no Trecho B, onde o degrau é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Na segunda situação, representativa dos cenários experimentais N(3)J(5), N(3)J(10), N(3)J(14), N(3)J(27), tem-se a rampa como local de aprisionamento de ar. Preferencialmente, o ensaio N(2)J(5)V(VL) é utilizado como exemplo representativo da primeira situação e o ensaio N(3)J(10)V(VL), como exemplo da segunda situação. Entretanto, sempre que houver necessidade de explicações complementares, outros ensaios são apresentados.

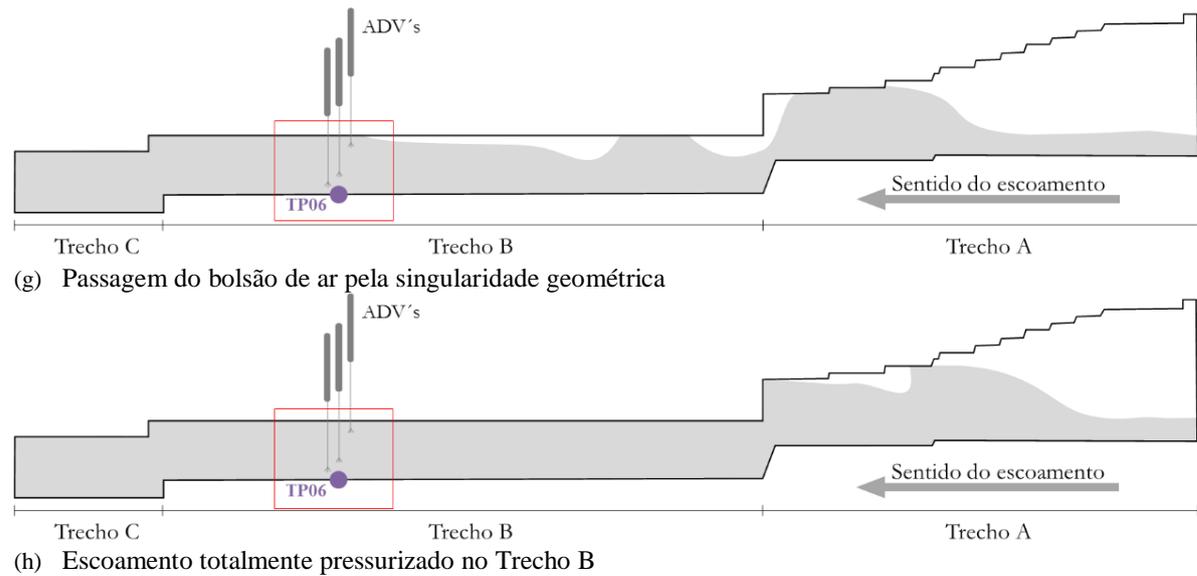
A Figura 17 ilustra os principais eventos que marcam o enchimento rápido do modelo considerando o degrau como local de aprisionamento de ar. Com o início do ensaio, a frente de enchimento avança pelos Trechos A e B (Figura 17 (a) e (b)), passa pelo ponto de análise (Figura 17 (c)), alcança o degrau (Figura 17 (d)), onde ocorre o estabelecimento de um mecanismo de aprisionamento de ar e a pressurização do ar localizado a jusante do local de aprisionamento.

Instantes após o aprisionamento de ar, a onda de choque avança de jusante para montante, pressurizando o escoamento no ponto de análise (Figura 17 (e)). Os bolsões de ar, aprisionados a jusante do degrau, propagam-se a montante, passando pelo ponto de análise (Figura 17 (f)). O primeiro bolsão alcança a rampa e passa por ela (Figura 17 (g)). Após todos os bolsões de ar passarem pela rampa, a seção transversal é completamente preenchida pelo

escoamento (Figura 17 (h)). O ponto de análise, local onde estavam instalados os ADV's e o transdutor de pressão TP06, estava situado em uma região intermediária do Trecho B.

Figura 17. Processo de enchimento rápido, tendo o degrau como local de aprisionamento de ar



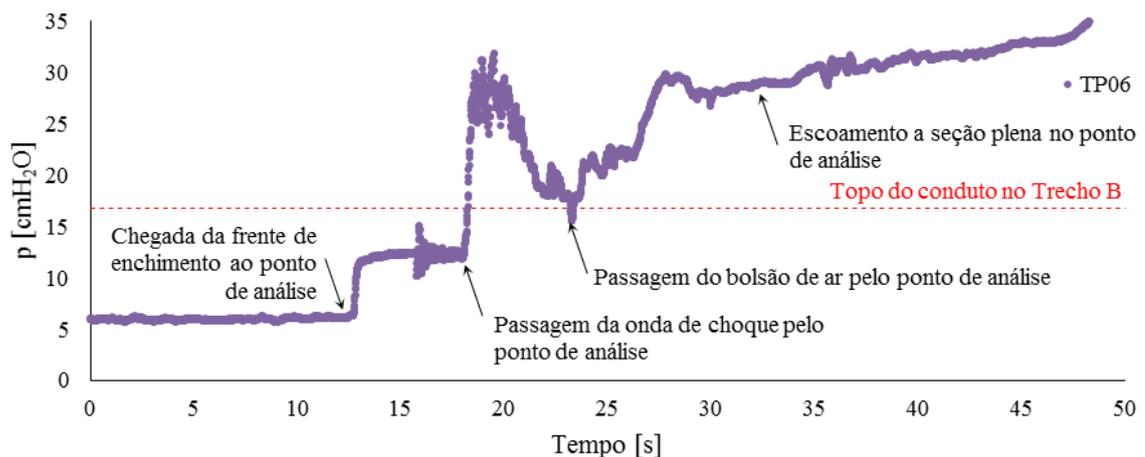


A Figura 18 apresenta os registros de pressão e velocidade no ponto de análise, referentes ao ensaio N(2)J(5)V(VL). Nos itens que seguem, esses registros são interpretados, a fim de apontar os eventos destacados na Figura 17:

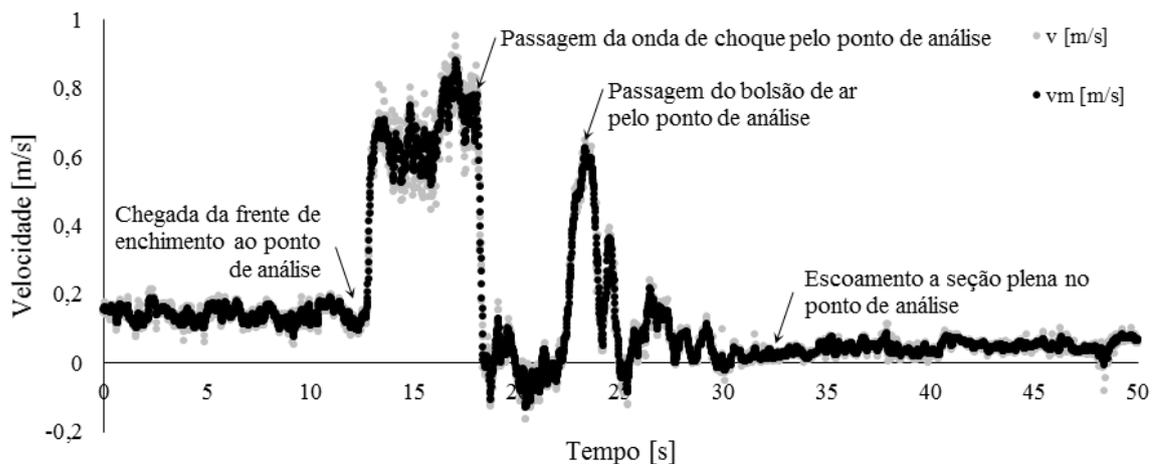
- estabelecimento do escoamento permanente: o ensaio iniciou-se em condições de escoamento permanente. Para o ensaio exemplificado (N(2)J(5)V(VL)), a profundidade do escoamento no ponto de análise era de cerca de 6 cm e a velocidade média era de aproximadamente 0,17 m/s. Como apontado na Seção 5.2, devido aos desníveis geométricos na base do modelo, o nível inicial do escoamento, no ponto de análise, é distinto do nível inicial sobre a base do modelo, no trecho de jusante, tomado como referência;
- chegada da frente de enchimento ao ponto de análise: tanto os registros de pressão quanto os de velocidade sofreram um incremento abrupto. A celeridade da frente de enchimento é abordada na Seção 6.3.1 em termos experimentais e analíticos;
- chegada da frente de enchimento ao degrau ((Figura 17 (d)) causou o estabelecimento de um mecanismo de aprisionamento de ar nesse ponto e a pressurização dos trechos de jusante. Os mecanismos de aprisionamento de ar observados no degrau são detalhados nas Seções 6.2.1.2 e 6.2.2.1;
- passagem da onda de choque no ponto de análise: causou um aumento de pressão de aproximadamente 15,1 cmH<sub>2</sub>O em 0,37 s. No mesmo intervalo, a variação de velocidade foi de -0,83 m/s<sup>1</sup>. Na Seção 6.3, os resultados experimentais da celeridade da onda de choque e variação de carga piezométrica são comparados com estimativas teóricas derivadas da equação de conservação de massa e de quantidade de movimento;

- avanço do bolsão de ar: a passagem do bolsão de ar pelo ponto de análise provocou um incremento pronunciado no valor da velocidade do escoamento, de  $-0,01$  m/s para  $0,62$  m/s. Ao maior valor de velocidade registrado corresponde o menor valor de pressão do período;
- passagem dos bolsões pela rampa: pulsos de pressão foram gerados quando os bolsões de ar se movimentaram através da rampa (Figura 17 (g)). Esses efeitos ficam mais evidentes na apresentação do próximo processo de enchimento, pois, no ensaio N(2)J(5)V(VL) os pulsos de pressão não foram capturados pelo TP06. O processo de passagem dos bolsões de ar pela singularidade é caracterizado na Seção 6.3.3;
- escoamento totalmente pressurizado no Trecho B: não se observaram mais oscilações apreciáveis de pressão e velocidade.

Figura 18. Registros de velocidade e pressão do ensaio N(2)J(5)V(VL)



(a) Registros de pressão do Ensaio N(2)J(5)V(VL)

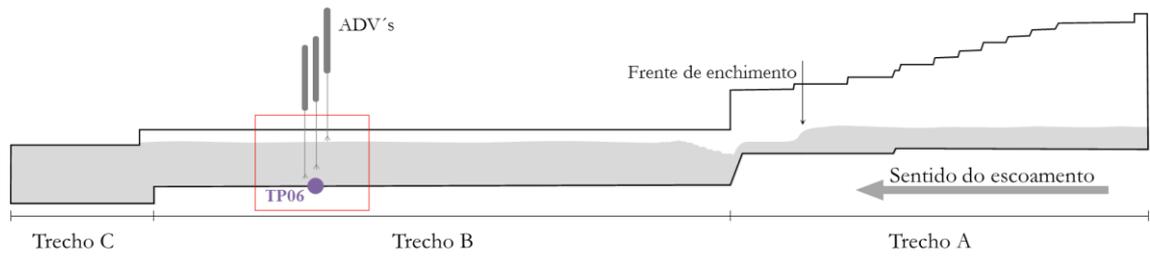


(b) Registros de velocidade do Ensaio N(2)J(5)V(VL)

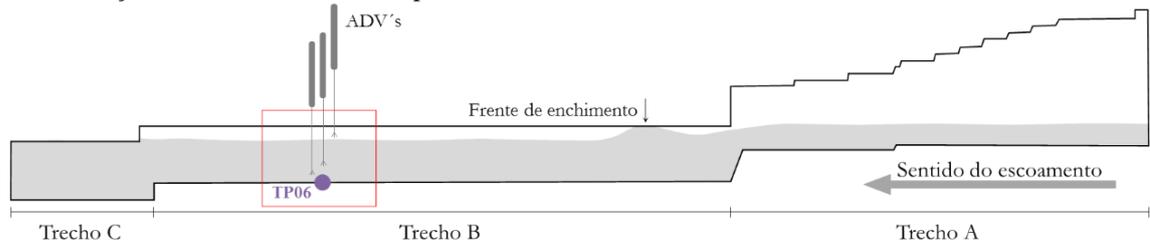
A Figura 19 ilustra os principais eventos que marcam o enchimento rápido do modelo, considerando a rampa como local de aprisionamento de ar. A Figura 19 (a) mostra o avanço da

frente de enchimento no Trecho A. A Figura 19 (b) indica o estabelecimento de um mecanismo de aprisionamento de ar. A Figura 19 (c) indica o avanço da frente de enchimento pelo Trecho B; o avanço de jusante para montante do bolsão anteriormente aprisionado; a propagação, também de jusante para montante, da onda de choque. Tanto a chegada da frente de enchimento ao ponto de análise quanto a passagem de um bolsão de ar pela singularidade geométrica estão indicadas na Figura 19 (d). A Figura 19 (e) indica o instante em que a água alcança, suavemente, o topo do conduto no ponto de análise. Após todo o ar aprisionado passar pela rampa, o escoamento de água ocupa plenamente a seção transversal ao longo dos Trechos B, C e D (Figura 19 (f)).

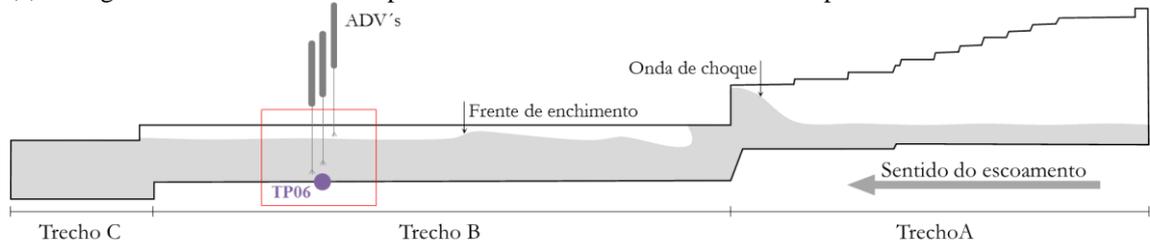
Figura 19. Processo de enchimento considerando o aprisionamento de ar na rampa.



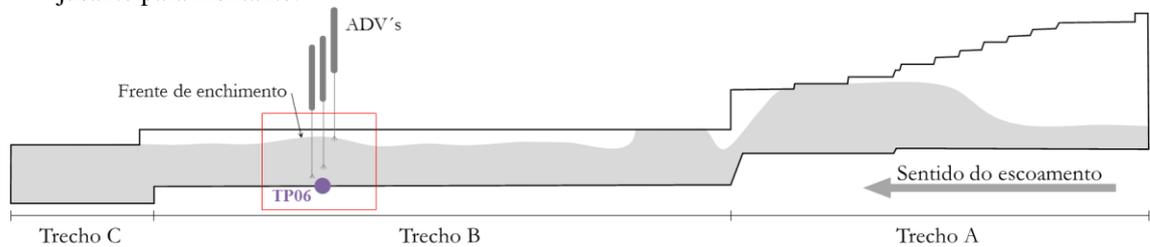
(a) Avanço da frente de enchimento pelo Trecho A.



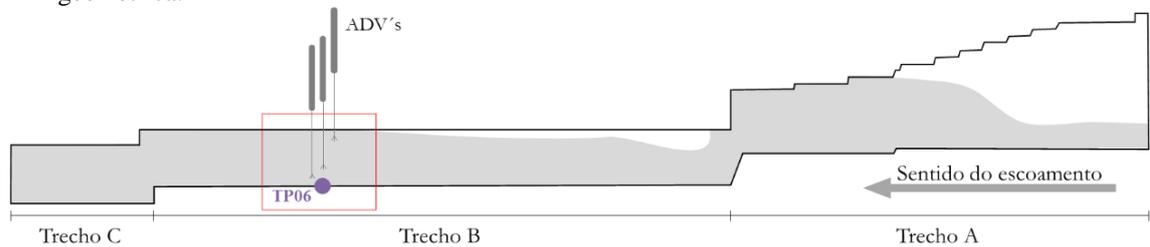
(b) Chegada do bolsão de ar à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar.



(c) Avanço da frente de enchimento de montante para jusante e do bolsão de ar e da onda de choque de jusante para montante.



(d) Chegada da frente de enchimento ao ponto de análise e passagem dos bolsões de ar pela singularidade geométrica.



(e) Escoamento ocupa totalmente a seção transversal do conduto no ponto de análise.

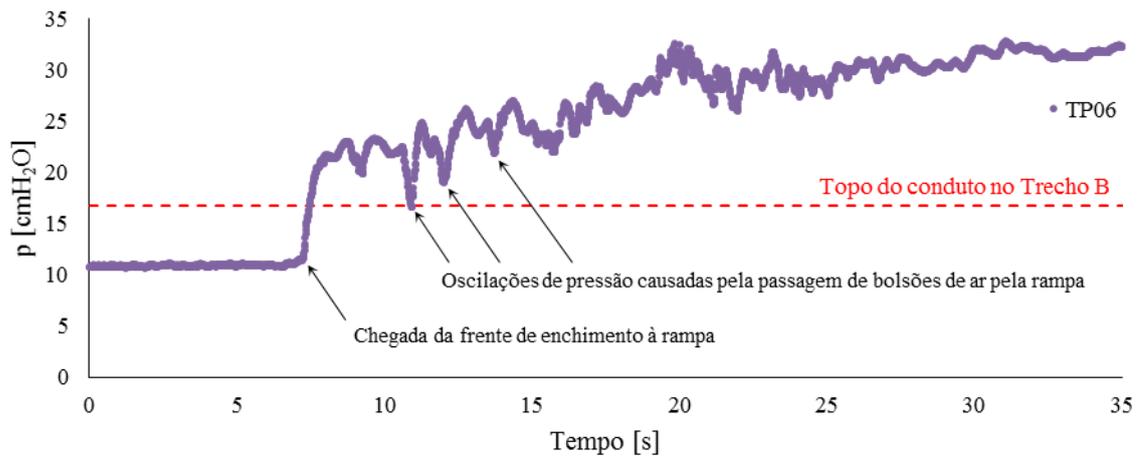


(f) Escoamento de água ocupando a seção transversal ao longo de toda a porção a jusante da rampa.

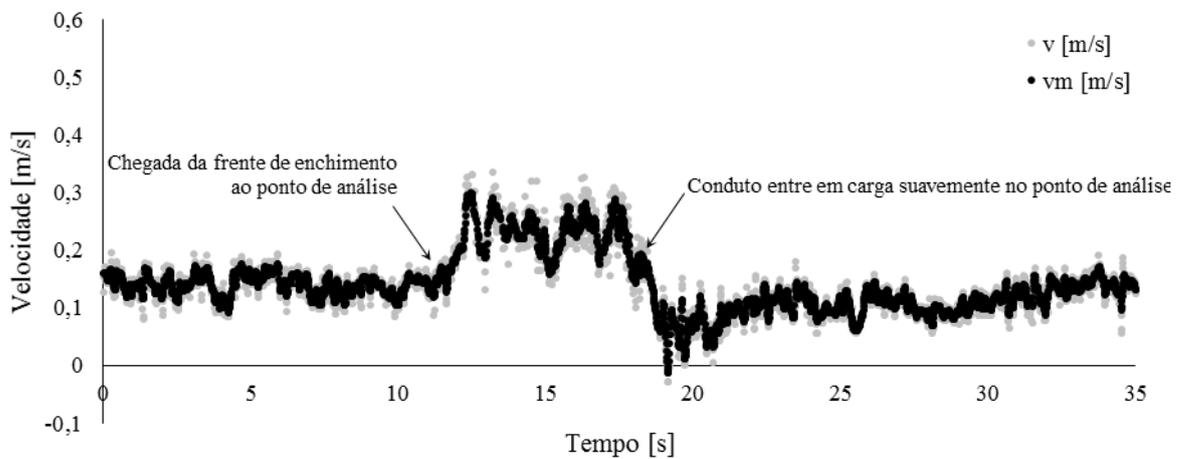
Os registros de pressão e velocidade do ensaio N(3)J(10)V(VL) (Figura 20) são avaliados conforme as etapas indicadas na Figura 19:

- estabelecimento do escoamento permanente: o ensaio iniciou-se em condições de escoamento permanente. Para o ensaio exemplificado (N(3)J(10)V(VL)), a profundidade do escoamento no, ponto de análise, era de cerca de 12 cm e a velocidade média era de aproximadamente 0,14 m/s. Como apontado na Seção 5.2 e comentado anteriormente, devido aos desníveis geométricos na base do modelo, o nível inicial do escoamento no ponto de análise é distinto do nível inicial sobre a base do modelo no trecho de jusante tomado como referência;
- chegada da frente de enchimento à rampa – a frente de enchimento alcançou a rampa, aprisionou e pressurizou o ar a jusante, refletindo-se no registro de pressão do transdutor de pressão TP06 (Figura 20 (a)). O estabelecimento dos mecanismos de aprisionamento na rampa e seus efeitos, em termos de pressurização do escoamento, são abordados na Seção 6.2.1.1 e 6.2.2.2;
- chegada da frente de enchimento ao ponto de análise (Figura 19 (d)) – provocou um incremento na velocidade (Figura 20 (b)), entretanto, variações de pressão não são claramente identificáveis na Figura 20 (a). A velocidade média no intervalo entre a passagem da frente de enchimento e a entrada em carga do conduto foi de 0,23 m/s;
- alívio de pressão devido à passagem dos bolsões de ar – as três grandes oscilações negativas de pressão, apontadas na Figura 20 (a), são reflexo da passagem dos bolsões de ar na rampa, observadas nos vídeos (Figura 19 (d)). A movimentação dos bolsões de ar pela rampa é tratada na Seção 6.3.3;
- água ocupando toda a seção transversal – decréscimo no valor da velocidade, devido ao incremento abrupto do perímetro molhado e aumento da seção molhada.

Figura 20. Registros de pressão e velocidade do ensaio N(3)J(10)V(VL)



(a) Registros de pressão do Ensaio N(3)J(10)V(VL)



(b) Registros de velocidade do Ensaio N(3)J(10)V(VL)

As feições e características mais marcantes do comportamento hidráulico observado no modelo do CFAC são exemplificados utilizando os processos de enchimento das duas situações apresentadas. Nas próximas seções, essas características são detalhadas e, quando possível, comparadas com estimativas analíticas ou aportes teóricos pertinentes.

## 6.2 Mecanismos de aprisionamento de ar decorrentes das singularidades do CFAC

Os cenários experimentais testados proporcionaram a identificação de três mecanismos de aprisionamento de ar:

- estabelecimento de interface de pressurização (*IP*);
- colisão da frente de enchimento com as singularidades geométricas do modelo (*IFE*);
- aprisionamento devido à ventilação insuficiente (*VENT*).

Na literatura consultada, não foram encontrados registros dos dois primeiros mecanismos. Esta seção apresenta os principais estágios de desenvolvimento desses dois primeiros mecanismos de aprisionamento de ar, as condições do escoamento que os originam e os reflexos de cada um dos mecanismos nos registros de pressão medidos pelos transdutores de pressão. O aprisionamento de ar, devido à ventilação inadequada, já foi anteriormente observado por Vasconcelos e Wright (2006) e seus efeitos no processo de pressurização são apresentados na Seção 6.4.

#### 6.2.1 Aprisionamento de bolsões de ar: estabelecimento de Interface de Pressurização (IP)

O estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar denominado interface de pressurização (IP) está relacionado à chegada do escoamento transiente (frente de enchimento) aos pontos onde as singularidades geométricas provocam alterações nas variáveis do escoamento (profundidade, velocidade e pressão), mesmo considerando as condições de regime permanente. Para os cenários experimentais N(3)J(10), N(3)J(14) e N(3)J(27), a singularidade geométrica entre os trechos A e B (uma rampa na base do conduto, um estreitamento lateral e um degrau acentuado no topo do conduto) condicionou o estabelecimento de um ressalto hidráulico, alterando dramaticamente as variáveis do escoamento, criando condições para a ocorrência do mecanismo IP.

O desnível da base do modelo, no degrau, impõe um aumento na profundidade do escoamento na região e uma diminuição da velocidade. Nessa singularidade, há também um degrau no topo do modelo. O mecanismo IP foi observado nas proximidades do degrau nos cenários experimentais N(1)J(5), N(1)J(10) e N(1)J(14).

Inicialmente, é apresentada uma explicação conceitual do mecanismo, tendo a rampa como local de aprisionamento para, em seguida, exemplificá-lo, utilizando os registros de pressão e os vídeos do ensaio N(3)J(10)V(VL) e do ensaio N(1)J(10)V(VL).

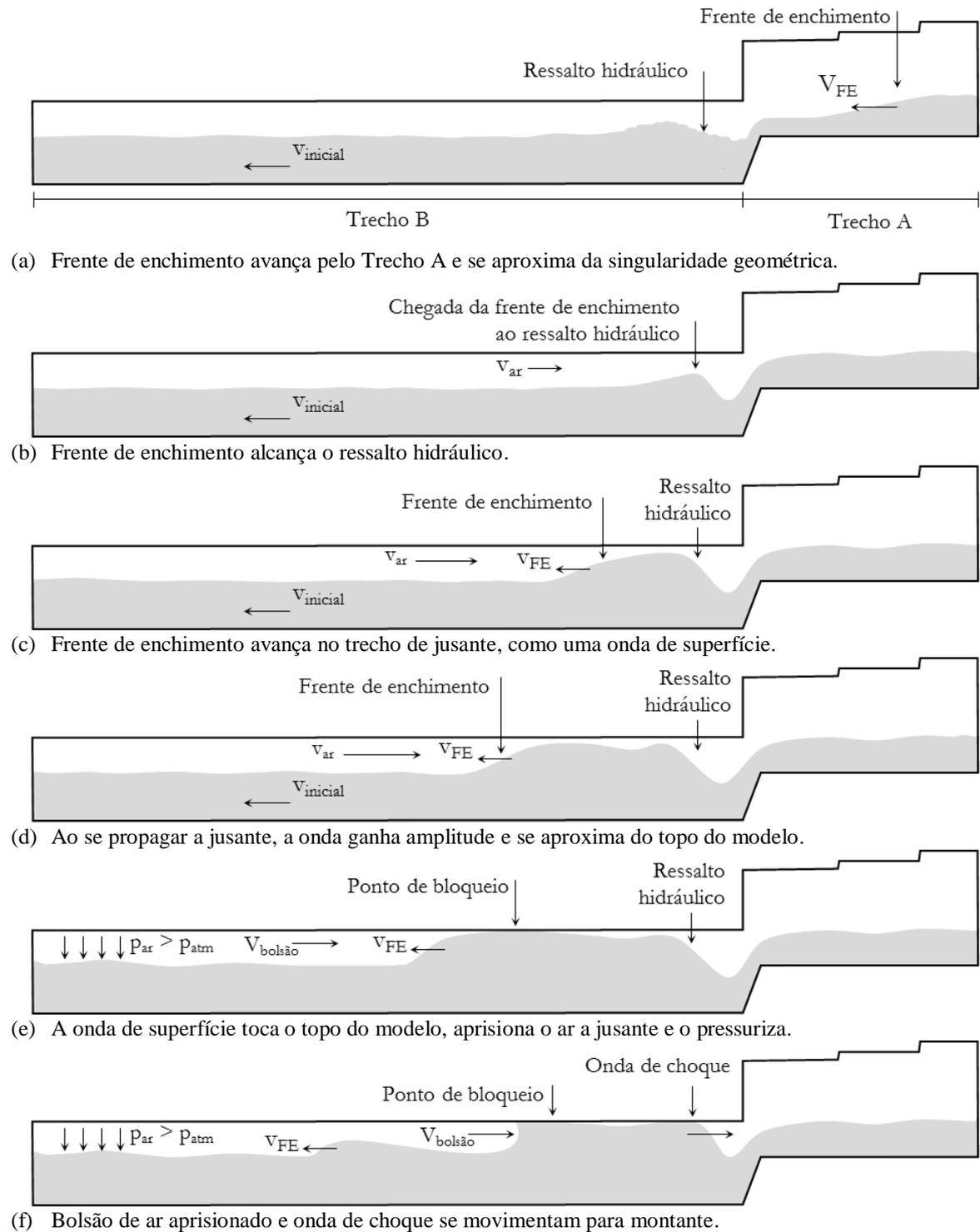
A Figura 21 apresenta as etapas de desenvolvimento do mecanismo interface de pressurização IP:

- com o início do ensaio, a frente de enchimento avançou no trecho a montante da singularidade geométrica (Figura 21 (a)). Esse fez com que o ar, que inicialmente ocupava o volume acima do escoamento d'água, começasse a escoar para o exterior do modelo. Nos ensaios realizados com ventilação livre, a abertura no topo do modelo na extremidade de montante era o único local por onde era possível a saída de ar, conforme

descrito na Seção 5.2. Assim, estabelece-se um escoamento de ar de jusante para montante;

- a frente de enchimento alcançou, interagiu com o ressalto hidráulico (Figura 21 (b)) e avançou no trecho a jusante da singularidade como uma onda de superfície. Na Figura 21 (c) e (d) observa-se que a chegada do escoamento transiente à singularidade provocou um aumento local da profundidade do ressalto hidráulico previamente existente. Além disso, a amplitude da onda da frente de enchimento também aumentou na medida que se propagou no trecho de jusante. Esse aumento da profundidade do escoamento causou um estreitamento local da seção transversal, forçando o aumento da velocidade do escoamento do ar;
- quando a amplitude da frente de enchimento (ou de alguma perturbação causada por ela) aumentou suficientemente, a água tocou o topo do modelo e bloqueou a passagem do ar, aprisionando-o e formando o primeiro bolsão de ar (Figura 21 (e)). O ar a jusante do ponto de bloqueio experimentou uma rápida pressurização, assim que a água atingiu o topo do conduto e bloqueou sua passagem. O incremento da pressão do ar é percebido em todos os transdutores de pressão a jusante do ponto de bloqueio, tanto nos transdutores que medem somente a pressão do ar quanto nos transdutores que medem a pressão do escoamento d'água. Registros de pressão que atestam esse fato são apresentados nas Seções 6.2.1.1, 6.2.1.2;
- tão logo o ar era aprisionado, o bolsão formado passava a se deslocar de jusante para montante, bem como o ressalto hidráulico inicial se converteu em uma onda de choque;
- o aumento da velocidade relativa entre o ar e a água pode condicionar o estabelecimento da instabilidade do escoamento cisalhante – shear flow instability, reconhecidamente o principal mecanismo envolvido no estabelecimento do escoamento do tipo *slug* (TAITEL; DUKLER, 1976; DUKLER; TAITEL, 1977; TAITEL; DUKLER, 1977; ISSA; KEMPF, 2003). Assim, o mecanismo interface de pressurização pode resultar da sobreposição de duas instabilidades: uma “macro” instabilidade, resultante da propagação da frente de enchimento, e uma “micro” instabilidade causada pelo aumento da velocidade relativa entre os escoamento de ar e água.

Figura 21. Principais etapas de desenvolvimento do mecanismo Interface de Pressurização

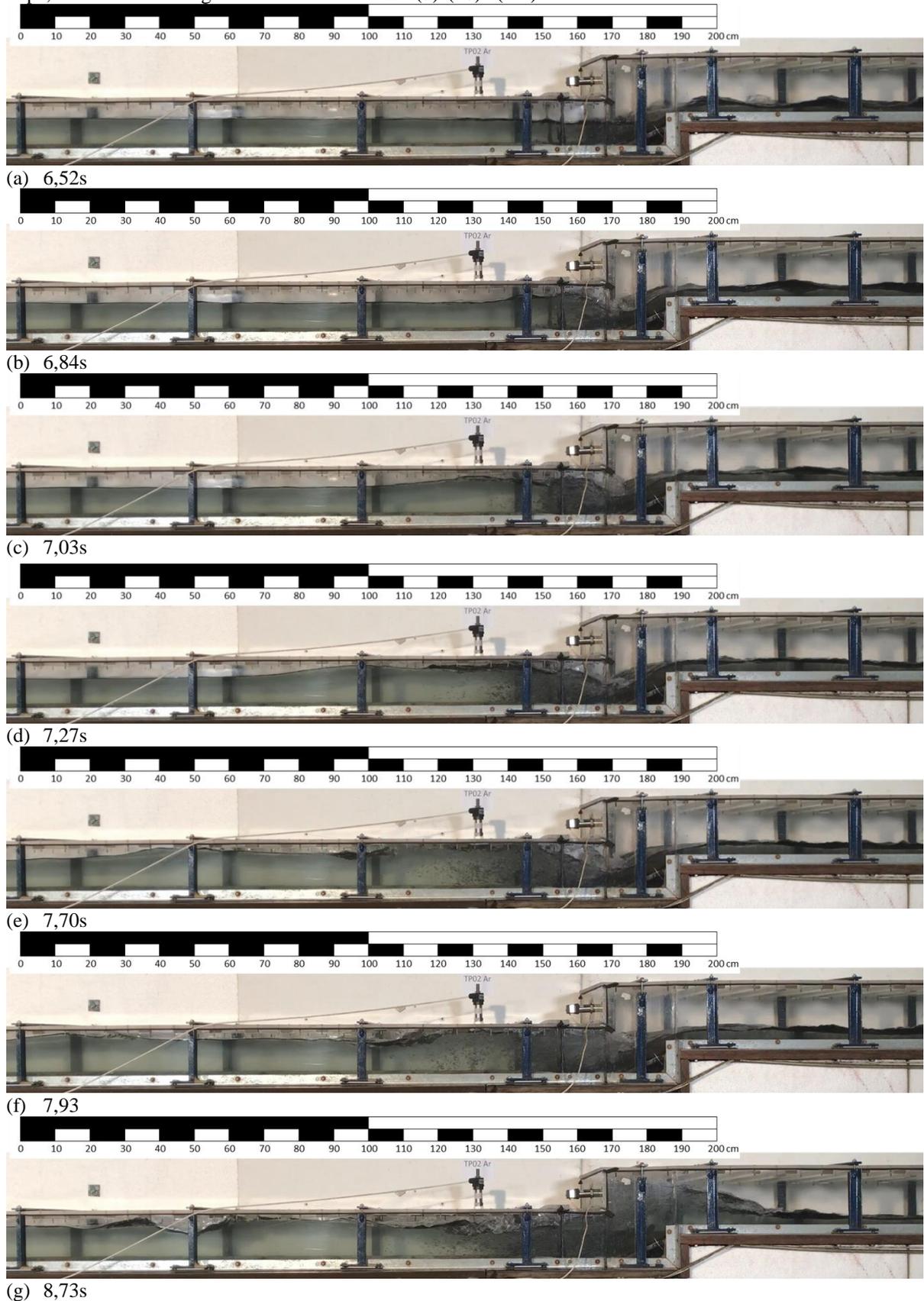


#### 6.2.1.1 Interface de Pressurização na rampa

Os principais estágios de desenvolvimento do mecanismo de aprisionamento de ar Interface de Pressurização na rampa são apresentados nos itens que seguem, tomando o ensaio N(3)J(10)V(VL) como exemplo do estabelecimento do mecanismo.

- a Figura 22 (a) mostra o ressalto hidráulico inicial e a frente de enchimento prestes a chegar à rampa;
- ao chegar à rampa, a frente de enchimento atingiu o ressalto hidráulico (Figura 22 (b) e avançou no Trecho B, na forma de uma onda de superfície (Figura 22 (b) e (c));
- quando a amplitude da onda foi tal que alcançou o topo do modelo, o escoamento de ar foi bloqueado e o bolsão de ar, aprisionado. A Figura 22 (d) indica o instante em que o escoamento alcançou o topo do modelo. No momento em que o bolsão de ar foi aprisionado, houve um aumento de pressão a jusante do ponto de bloqueio, evidente nos registros de pressão. Dados experimentais de pressão referentes a esse tipo de mecanismo são apresentados ainda nesta seção;
- simultaneamente, o ressalto e o bolsão de ar aprisionados moveram-se na direção de montante (Figura 22 (e), (f) e (g));
- na Figura 22 (e), (f) e (g) também se nota a formação de um segundo bolsão de ar a jusante do primeiro bolsão, devido ao avanço da frente de enchimento.

Figura 22. Etapas de desenvolvimento do mecanismo de aprisionamento de ar Interface de Pressurização (IP) na rampa, considerando imagens relativas ao ensaio N(3)J(10)V(VL).



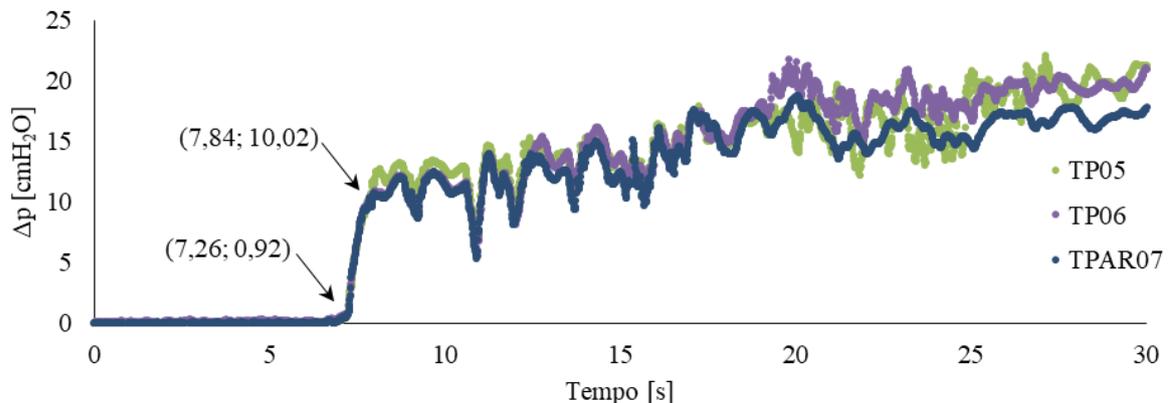
O estabelecimento desse mecanismo de aprisionamento de ar é um processo rápido. Para as situações testadas, o tempo necessário para o desenvolvimento de cada um dos estágios varia principalmente em função das condições de jusante. Os estágios compreendidos entre a Figura 22 (b), (c) e (d) ocorreram em cerca de 0,43 s para esse cenário experimental.

A Figura 23 apresenta séries temporais completas de pressão do ensaio indicado acima (N(3)J(10)V(VL)). A presente análise se concentra nos instantes iniciais do ensaio (intervalo 5 – 10 s), que confirmam a rápida pressurização das porções a jusante do ponto onde o escoamento toca o topo do conduto. A localização dos transdutores de pressão TP05, TP06 e TPAr07 está indicada na Figura 23 (a). O acréscimo abrupto nos registros de pressão, indicado na Figura 23 (b), reflete o momento em que o escoamento tocou a cobertura do modelo. Nesse instante, os transdutores de pressão TP05, e TP06 e TPAr07 apresentaram um acréscimo abrupto, consequência do aprisionamento do ar localizado a jusante do ponto de aprisionamento. A variação de pressão do ar registrado pelo transdutor de pressão TPAr07, durante esse processo, foi de 9,1 cmH<sub>2</sub>O e ocorreu em 0,58 s. Observa-se, ainda, que os registros de variação de pressão dos transdutores TP05 e TP06, localizados na base do conduto, acompanham o transdutor TPAr07.

Figura 23. Registros de pressão considerando o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização (IP), no ensaio N(3)J(10)V(VL).



(a) Localização dos transdutores de pressão e local de análise do vídeo.

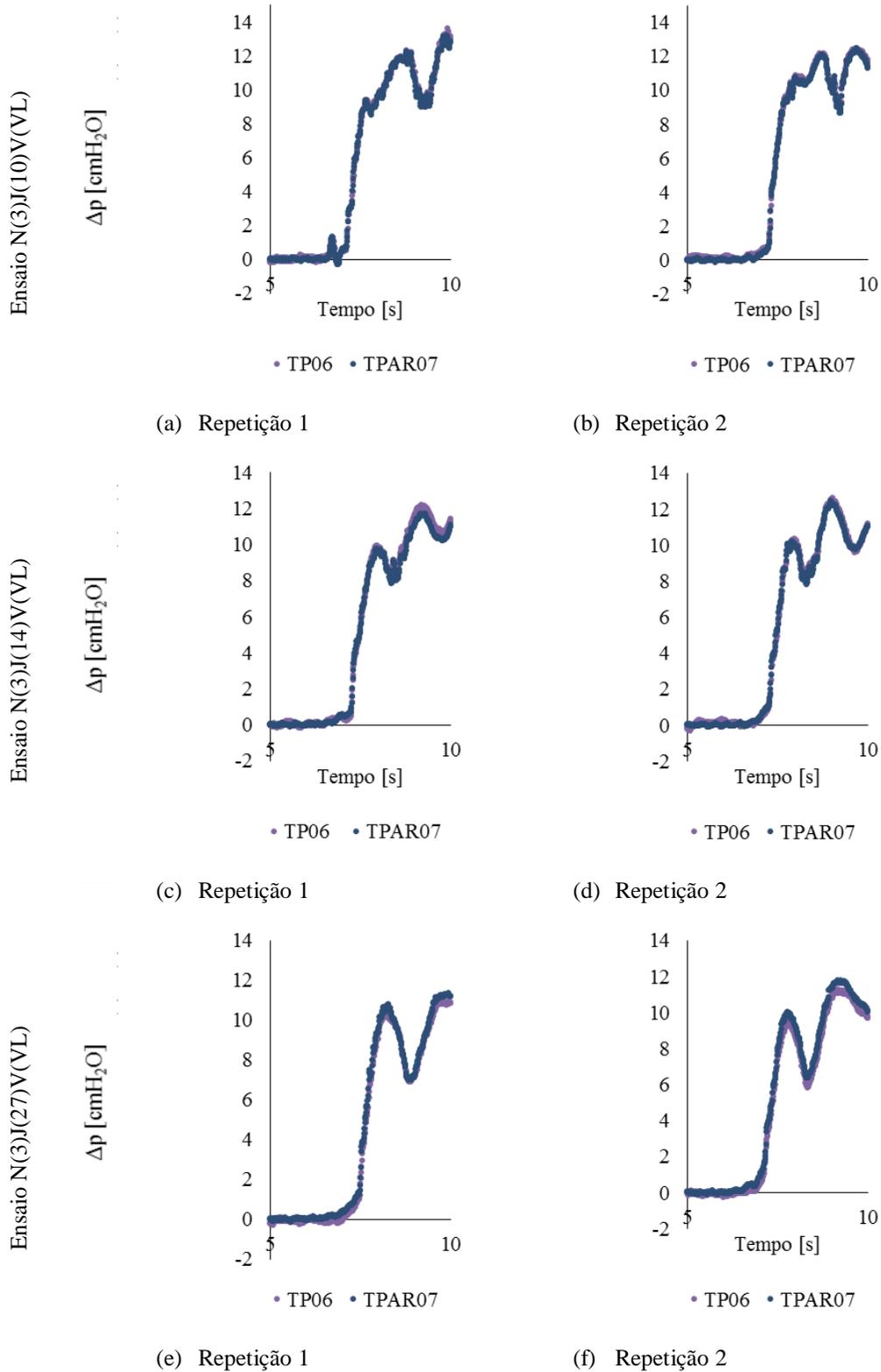


(b) Ensaio N(3)J(10)V(VL)

Além do ensaio N(3)J(10)V(VL), verificou-se o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização na rampa para os ensaios N(3)J(14)V(VL) e N(3)J(27)V(VL). A

Figura 24 apresenta um detalhe temporal (entre 5 e 10 s) nos registros de pressão dos transdutores de pressão TP06 e TPAr07 para duas repetições desses ensaios.

Figura 24. Pressurização do ar no momento do aprisionamento pelo mecanismo Interface de Pressurização (IP), registrado nos transdutores de pressão TP06 e TPAr07 para os ensaios N(3)J(10)V(VL), N(3)J(14)V(VL) e N(3)J(27)V(VL).



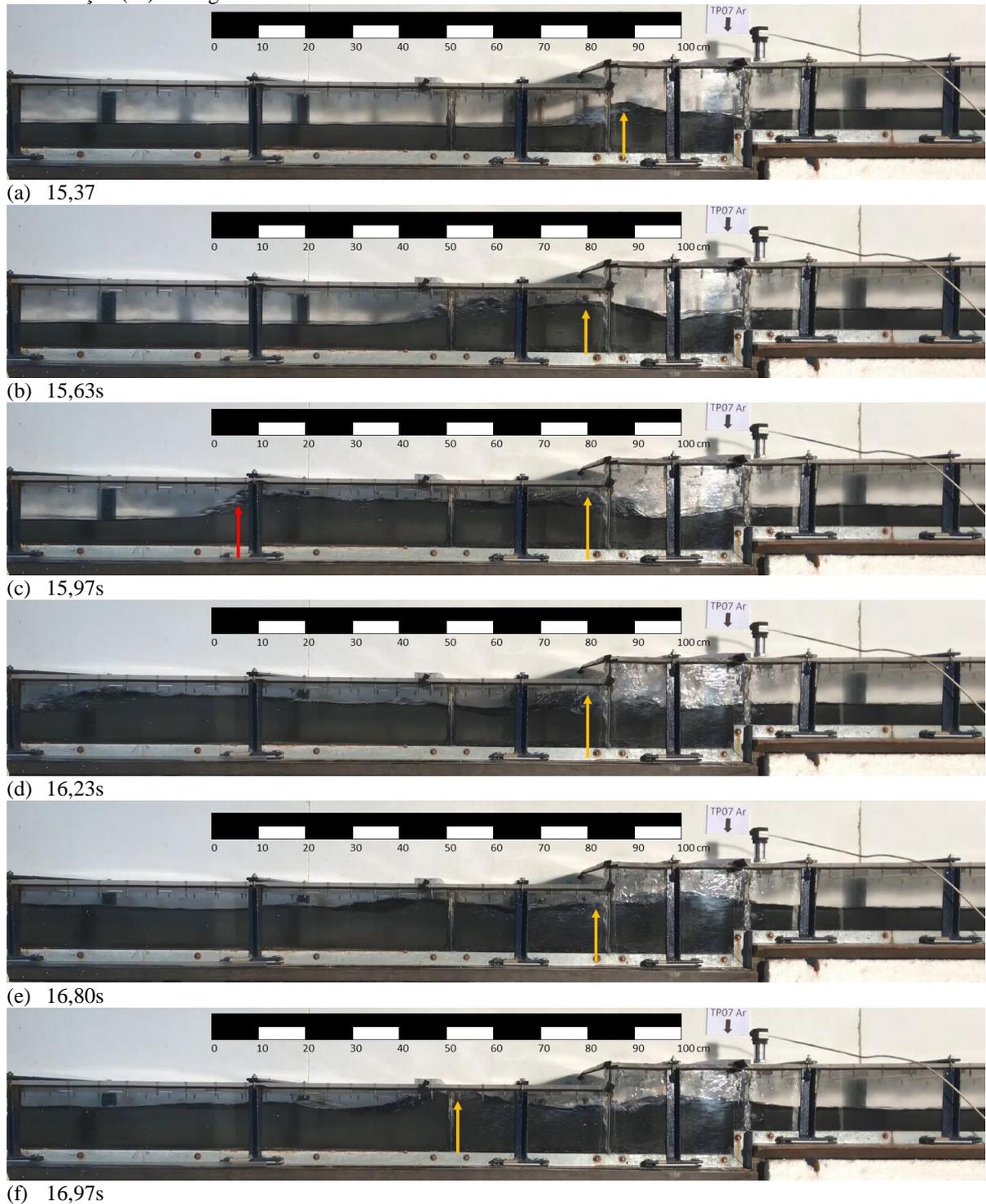
Repetições dos ensaios N(3)J(10)V(VL), N(3)J(14)V(VL) e N(3)J(27)V(VL) são apresentadas na Figura 24 (a) e (b); (c) e (d) e (e) e (f), respectivamente. Em todos esses registros, observa-se um padrão de variação de pressão bem nítido, confirmando que o incremento de pressão em decorrência da pressurização do ar que segue o estabelecimento do mecanismo de aprisionamento Interface de Pressurização é um evento recorrente no modelo, sendo registrado para diferentes condições de jusante.

#### 6.2.1.2 Interface de pressurização no degrau

O mecanismo de aprisionamento de ar Interface de Pressurização (IP) foi igualmente observado no degrau nos cenários experimentais N(1)J(5), N(1)J(10) e N(1)J(14). Os principais estágios de desenvolvimento desse mecanismo de aprisionamento de ar são apresentados a seguir, tomando como exemplo o ensaio N(1)J(5)V(VL):

- a seta amarela, na Figura 25 (a), indica a chegada da frente de enchimento ao degrau, criando um de ressalto hidráulico. As Figura 25 (b) indica o aumento no nível do ressalto hidráulico. Após formação desse ressalto, a frente de enchimento seguiu avançando no trecho C (seta vermelha nas Figura 25 (c));
- na Figura 25 (d), o ressalto hidráulico atingiu o topo do modelo, aprisionando e pressurizando o ar localizado a jusante;
- por alguns instantes, o ar foi expelido através do ponto de bloqueio, devido ao aumento de pressão (Figura 25 (d)), até que o nível do ressalto hidráulico diminui, criando condições para o restabelecimento do escoamento à superfície (Figura 25 (e)). O processo de aprisionamento de ar reiniciou devido às ondas que se propagaram para jusante (Figura 25 (f));

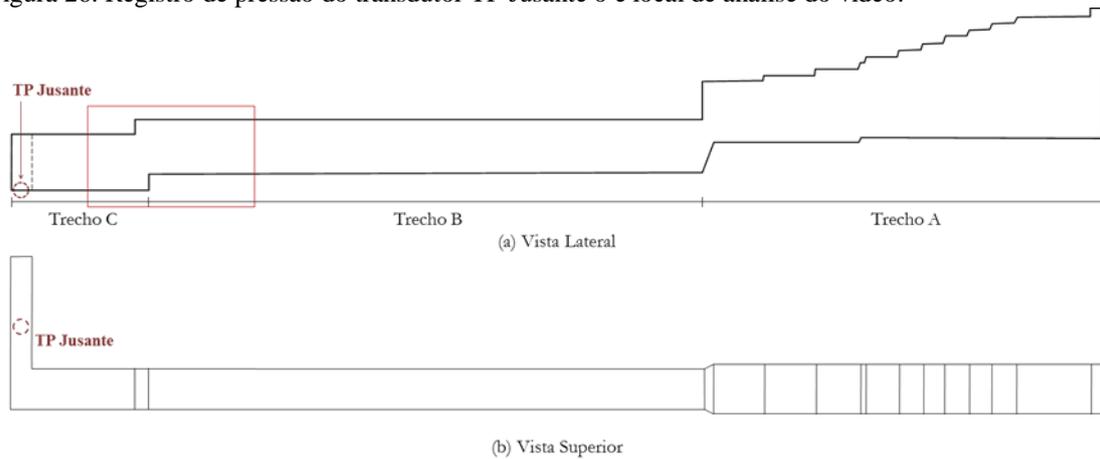
Figura 25. Etapas de desenvolvimento do mecanismo de aprisionamento de ar Estabelecimento Interface de Pressurização (IP) no degrau.



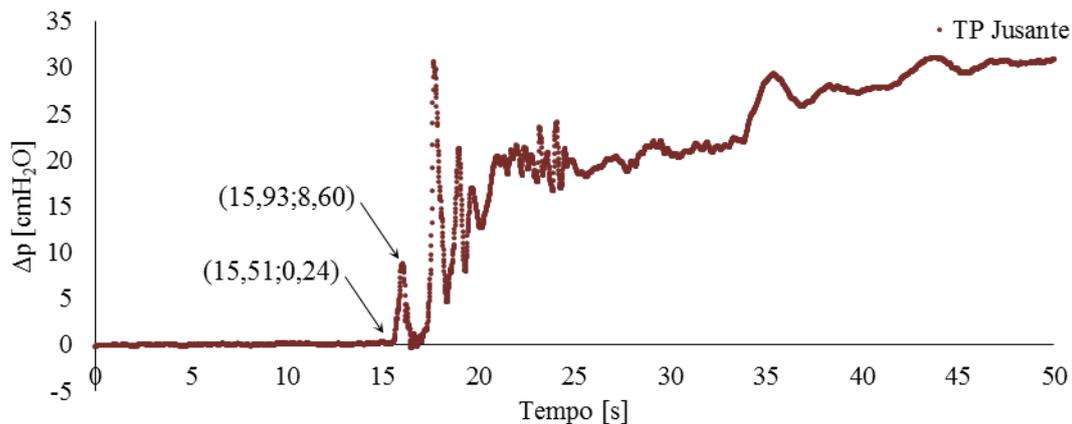
Como não havia transdutores de pressão instalados no topo do modelo a jusante do degrau, os efeitos da pressurização do ar são qualitativamente avaliados, através do transdutor de pressão TP Jusante (Figura 26 (b)), o qual localiza-se na base do modelo, a jusante da curva de 90° com redução da largura (Figura 26 (a)).

O primeiro pico de pressão (Figura 26 (b)) é reflexo do aprisionamento de ar. Nesse ensaio, como houve o restabelecimento momentâneo do escoamento à superfície livre (Figura 25 (e)), a pressão no escoamento caiu ao nível inicial. As origens das oscilações de pressão observadas na Figura 26 após o restabelecimento do escoamento à superfície livre, não foram claramente captadas pela instrumentação nesse ensaio.

Figura 26. Registro de pressão do transdutor TP Jusante o e local de análise do vídeo.



(a) Localização do transdutor de pressão e local de análise do vídeo.



(b) Registros de pressão do transdutor TP Jusante

### 6.2.2 Aprisionamento de bolsões de ar: impacto da frente de enchimento com singularidades geométricas do topo do conduto

Em determinados cenários, observou-se a colisão da frente de enchimento com os desníveis geométricos do topo do modelo. Esse segundo mecanismo de ar foi denominado Impacto da Frente de Enchimento (IFE). A colisão do escoamento d'água causa o aprisionamento do ar localizado a jusante desses pontos e a sua rápida pressurização.

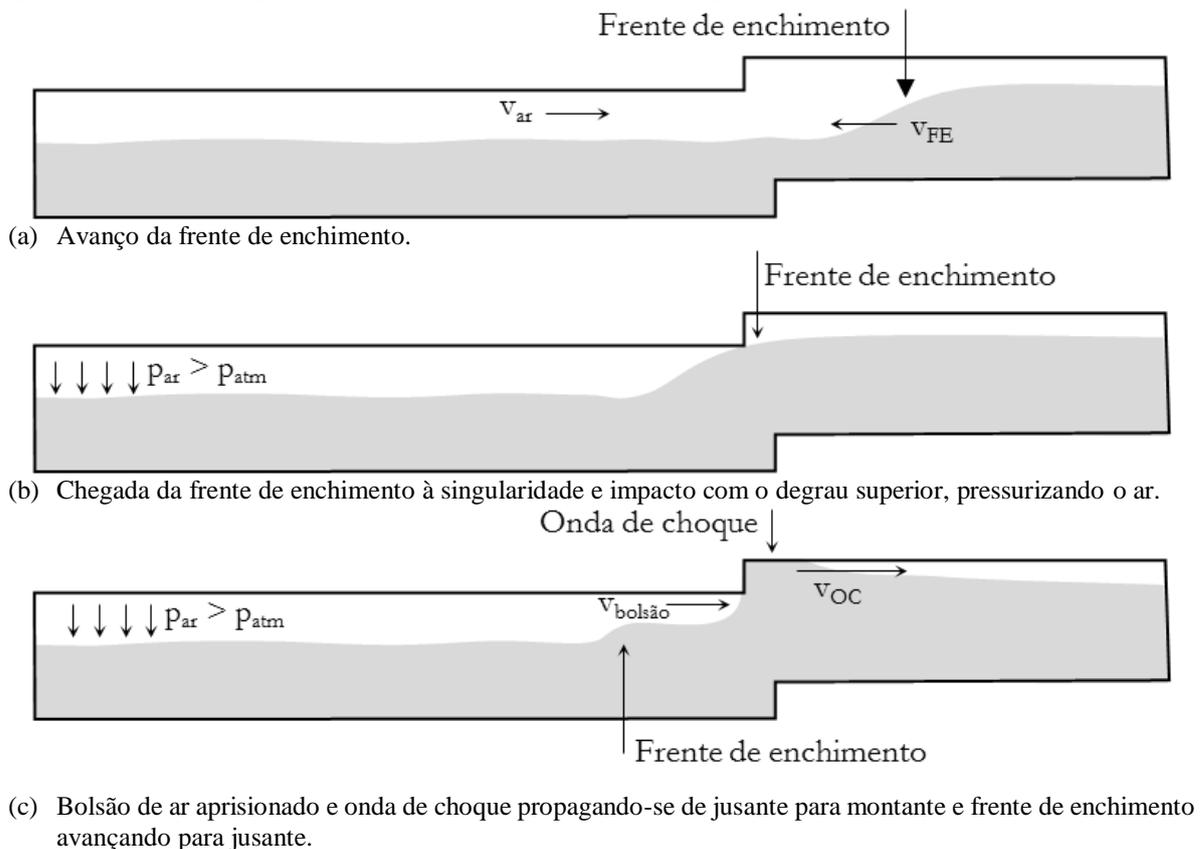
Assim como ocorreu com o mecanismo Interface de Pressurização, uma explicação conceitual do mecanismo Impacto da Frente de Enchimento é apresentada e, em seguida, os exemplos dos ensaios N(2)J(5)V(VL) e N(3)J(5)V(VL). O degrau é o local de aprisionamento

de ar para a apresentação desse mecanismo, pois aí se apresenta mais claramente definido do que na rampa.

Os eventos que resultam no aprisionamento de ar, devido ao mecanismo *IFE*, está indicada na Figura 27 e envolve as seguintes etapas:

- com o início do ensaio, a frente de enchimento avançava no trecho a montante da singularidade geométrica (Figura 27 (a)). Como colocado na descrição do mecanismo Interface de Pressurização, a abertura na cobertura do modelo, na extremidade de montante, era a única saída disponível para que o ar escoasse para o exterior do modelo. Assim, quando a vazão adicional era admitida, estabelecia-se um escoamento de ar no sentido contrário do escoamento d'água;
- a frente de enchimento alcançava a singularidade geométrica e colidia com o degrau presente no topo do modelo (Figura 27 (b)). Nesse instante, o primeiro bolsão de ar era aprisionado e o ar a jusante era pressurizado;
- a frente de enchimento avançava no trecho a jusante da singularidade, como uma onda de superfície. Já o bolsão de ar e a onda de choque avançavam de jusante para montante (Figura 27 (c));

Figura 27. Principais etapas de desenvolvimento do mecanismo Impacto da Frente de Enchimento (IFE)

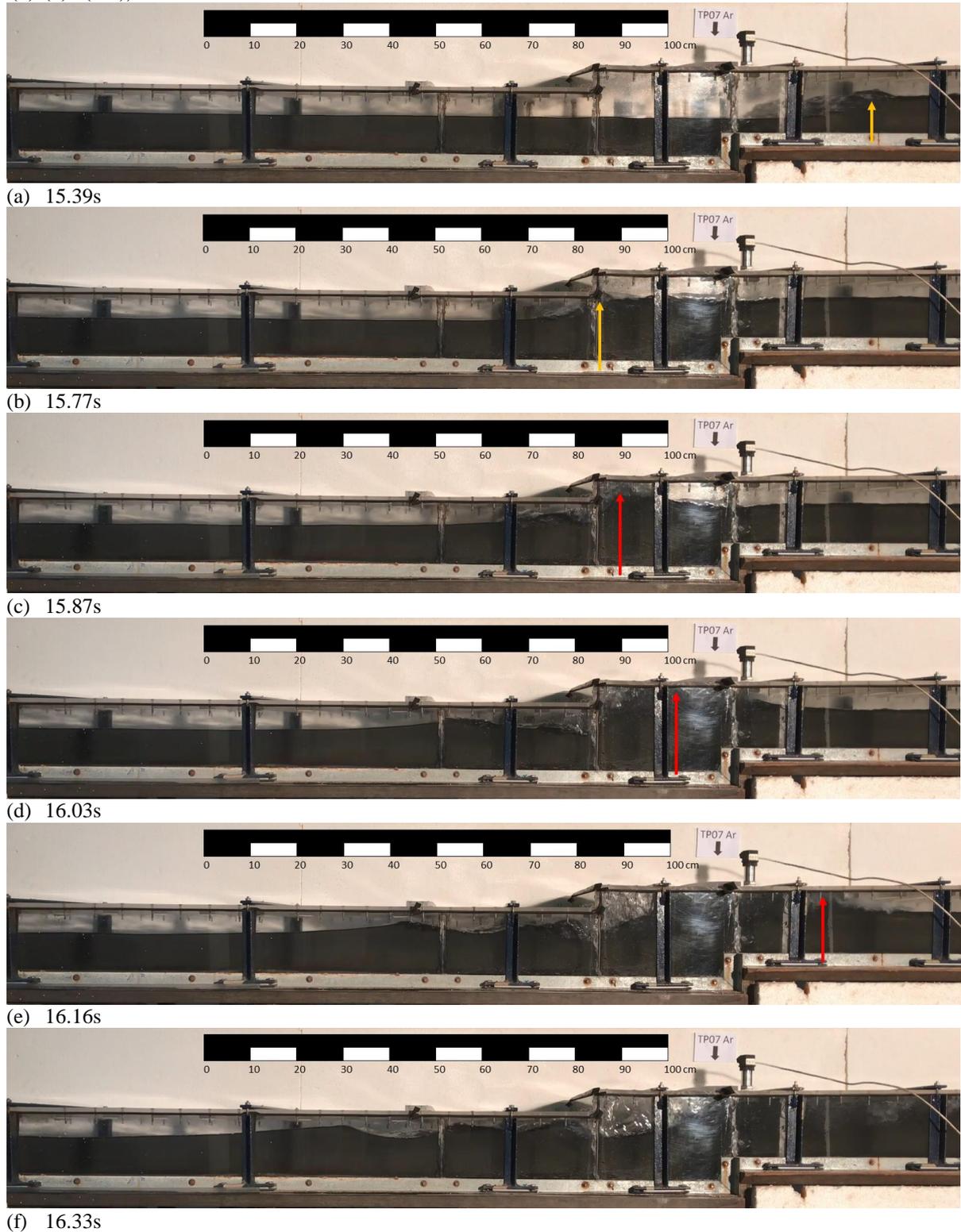


### 6.2.2.1 Impacto da Frente de Enchimento (IFE) no degrau

O mecanismo de aprisionamento de ar IFE foi observado nos cenários experimentais N(2)J(5), N(2)J(10) e N(2)J(14) no degrau. Os estágios de desenvolvimento desse mecanismo são apresentados a seguir, considerando o ensaio N(2)J(5)V(VL):

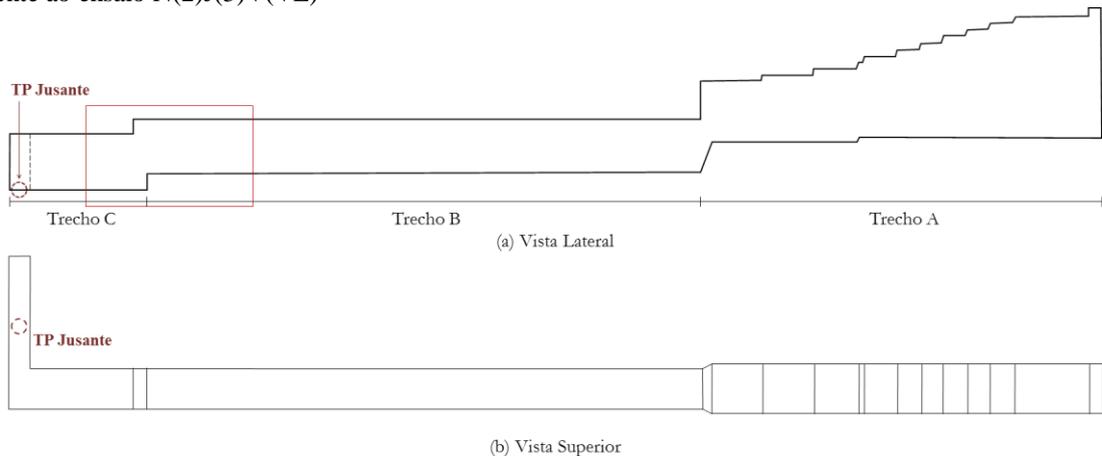
- a seta amarela, na Figura 28 (a), indica a aproximação da frente de enchimento ao degrau e a Figura 28 (b), o instante em que a frente de enchimento colidiu com a parede vertical superior do conduto no degrau;
- assim que a onda de enchimento colidiu com a parede vertical, uma onda de choque se formou e começou a avançar de jusante para montante (Figura 28 (c), (d) e (e));
- na Figura 28 (d) e (e), percebe-se, também, a movimentação do bolsão de ar logo após o avanço da onda de choque;
- na Figura 28 (d), (e) e (f), observa-se a intensa geração de ondas, as quais avançavam e poderiam ser o gatilho para o aprisionamento de outros bolsões de ar mais a jusante.

Figura 28. Eventos que marcam o estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE no degrau (Ensaio N(2)J(5)V(VL)).

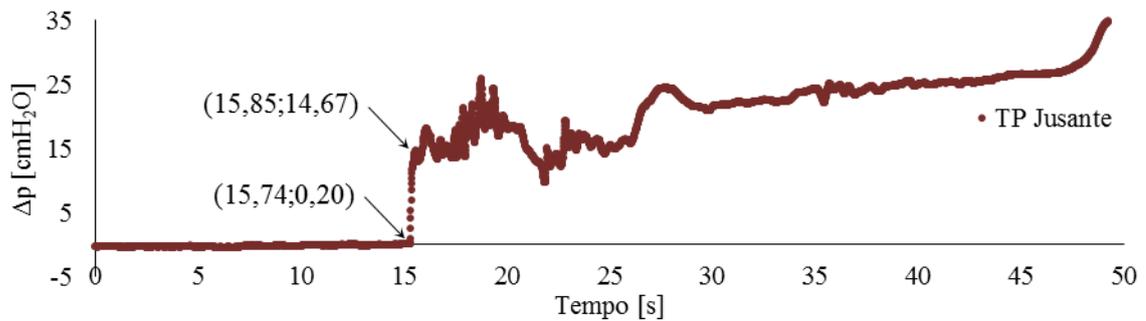


A variação de pressão registrada no transdutor TP Jusante com o estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE é de cerca de  $14,50 \text{ cmH}_2\text{O}$  em apenas  $0,11 \text{ s}$  (Figura 29 (b)). A localização do transdutor TP Jusante e o local de aprisionamento de ar estão indicados na Figura 29 (a).

Figura 29. Local do aprisionamento de ar (análise do vídeo) e registro de pressão do transdutor de pressão TP08 referente ao ensaio N(2)J(5)V(VL)



(a) Localização do transdutor de pressão e local do estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar.



(b) Registro de pressão no transdutor de pressão TP Jusante.

A comparação da Figura 29 (b) e da Figura 26 (b) sugere que o estabelecimento do mecanismo IFE, no degrau, é mais severo do que o mecanismo IP em termos da pressurização do sistema na porção a jusante do local de aprisionamento.

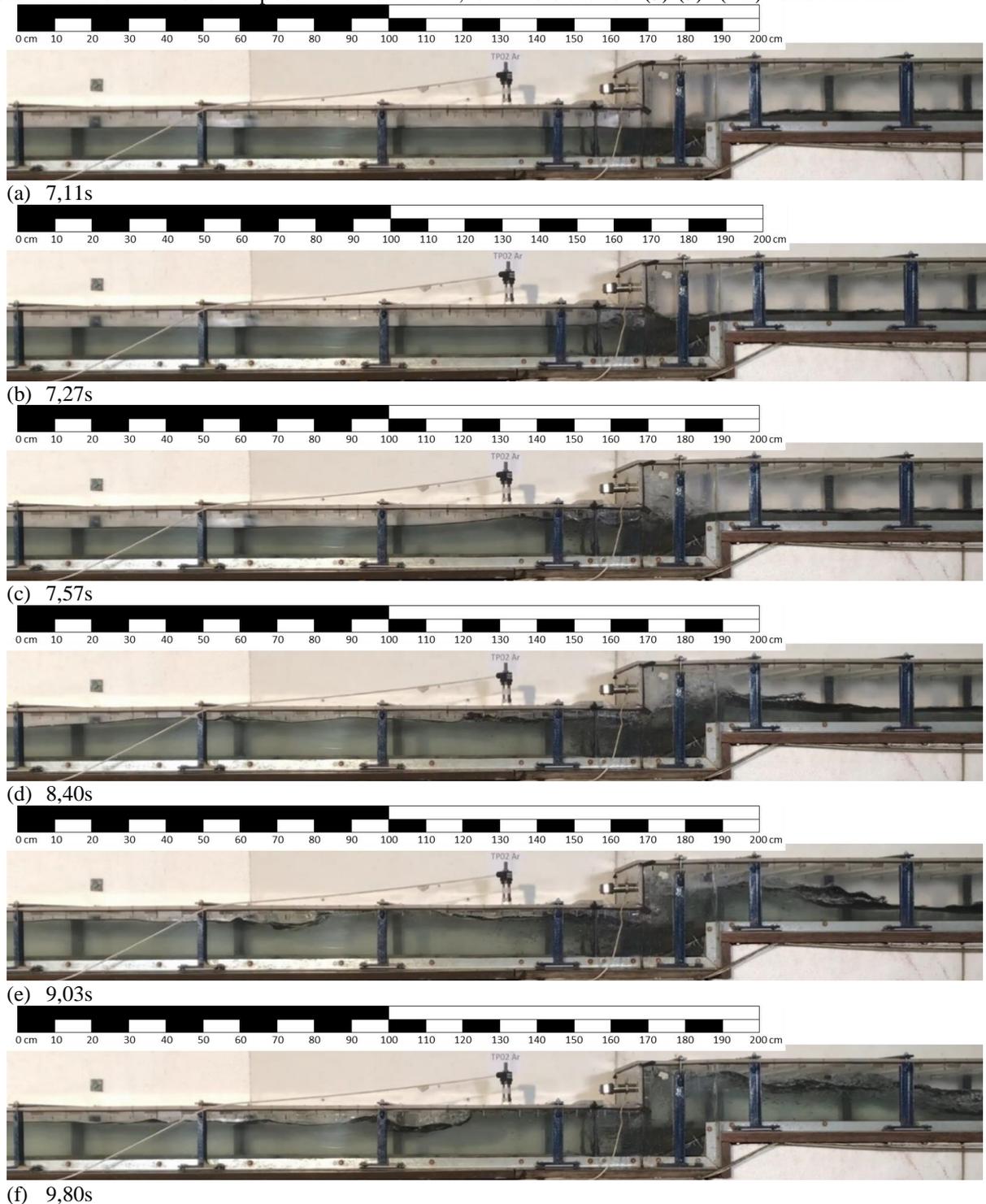
#### 6.2.2.2 Impacto da Frente de Enchimento (IFE) na rampa

O mecanismo Impacto da Frente de Enchimento foi observado, na rampa, somente no cenário N(3)J(5), o qual é caracterizado pela baixa vazão inicial. O estabelecimento desse mecanismo na rampa não é tão claro e evidente como no degrau. Inclusive, logo após a ocorrência desse mecanismo, verificou-se, também, a ocorrência do mecanismo *IP*. A sequência de eventos que caracterizam esse mecanismo é apresentada a seguir, considerando as imagens do N(3)J(5)V(VL), apresentadas na Figura 30:

- chegada da frente de enchimento à rampa (Figura 30 (a) e o momento da colisão dessa frente de enchimento com o degrau no topo do modelo (Figura 30 (b));
- avanço da frente de enchimento ao longo do Trecho B, na forma de uma onda de superfície, logo após colidir com o topo do modelo (Figura 30 (c), (d), (e), (f) e (g));
- nota-se, claramente, na Figura 30 (d), a mesma formação de ondas a jusante que se detecta no início do mecanismo *IP*;

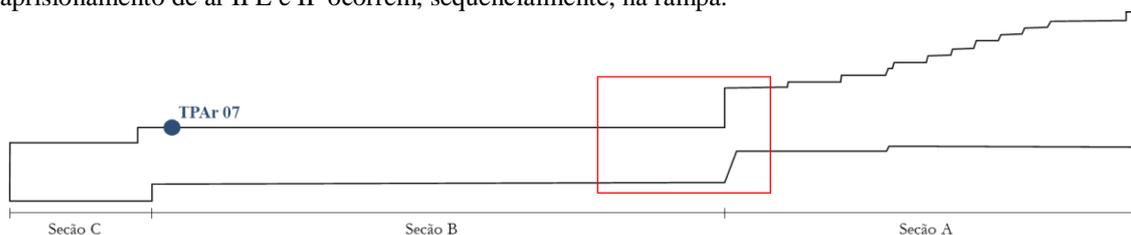
- a Figura 30 (h) mostra o momento da ocorrência do mecanismo *IP*, em que a onda de superfície toca o topo do modelo e aprisiona um novo bolsão de ar, pressurizando o ar localizado a jusante desse ponto;
- a partir do instante do aprisionamento, o bolsão de ar passava a avançar na direção oposta ao escoamento d'água, de jusante para montante (Figura 30 (i), (j) e (k));

Figura 30. Eventos que marcam o estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE, seguido pela ocorrência do mecanismo de aprisionamento de ar IP, tomando o ensaio N(3)J(5)V(VL) como referência.

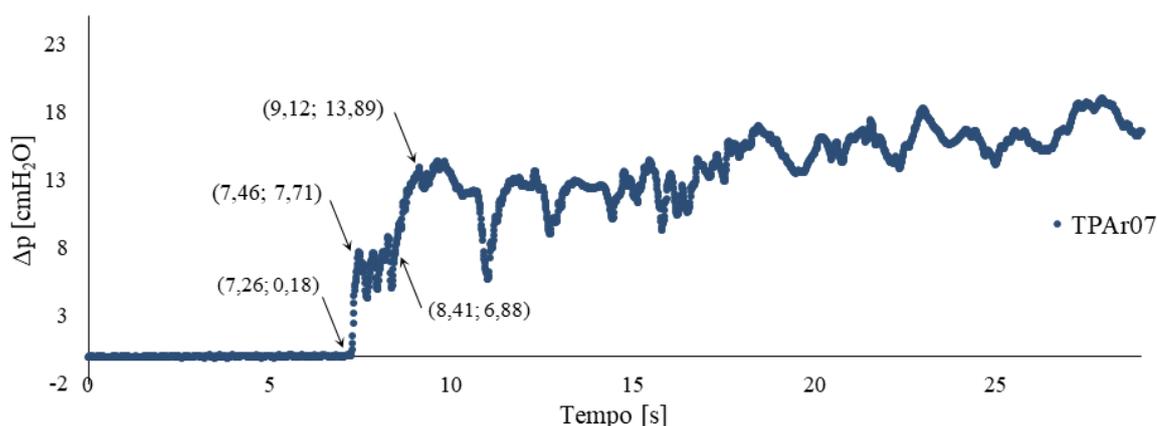


O desenvolvimento desses dois mecanismos de aprisionamento de ar marca os registros de pressão. A Figura 31 (b) apresenta os registros de pressão do transdutor de pressão TPAr07 N(3)J(5)V(VL), instalado no modelo, tal como indicado na Figura 31 (a). A variação de pressão causada pelo mecanismo IFE, indicado na Figura 31 (b) entre os instantes 7,26 s e 7,46 s, é de cerca de 7,6 cmH<sub>2</sub>O. Na sequência, o estabelecimento do mecanismo IP causa uma pressurização adicional de cerca de 7 cmH<sub>2</sub>O em 0,71 s.

Figura 31. Local do aprisionamento de ar (análise do vídeo) e registros de pressão de ensaios onde os mecanismos de aprisionamento de ar IFE e IP ocorrem, sequencialmente, na rampa.



(a) Localização do transdutor de pressão e local do estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar.



(b) Registro de pressão no transdutor de pressão TPAr07

Em outros ensaios realizados no aparato (KAIBER DA SILVA, 2015), observou-se que as ondas formadas no Trecho B, por influência do escoamento na rampa, criavam o mecanismo de IFE no degrau, mesmo para baixas vazões e enchimento lento.

Optou-se por colocar os mecanismos *IFE*, na rampa e no degrau, com a mesma classificação, pois o incremento de pressão, nessas duas situações, apresenta grandes semelhanças. Entretanto, a geometria do mecanismo na rampa não é tão evidente como no degrau.

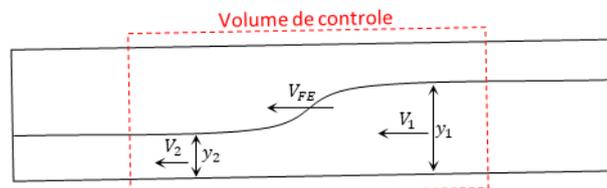
### 6.3 Cinemática das feições do escoamento do CFAC

As características cinemáticas dos eventos destacados na descrição geral do processo de enchimento (Seção 6.1) são detalhadas aqui. Os resultados experimentais para a celeridade da frente de enchimento e da onda de choque, bem como do aumento da carga piezométrica, devido

ao avanço da onda de choque são apresentados e comparados com estimativas teóricas. As oscilações de pressão causadas, devido à passagem dos bolsões de ar pela rampa são igualmente apresentadas.

### 6.3.1 Caracterização da frente de enchimento e da onda de choque

O processo de enchimento, considerando o degrau como local de aprisionamento de ar, foi apresentado na Seção 6.1. Nessa situação, a frente de enchimento propagava-se ao longo de toda a extensão do Trecho B, passando pelo local de medição de velocidades do escoamento. Considerando o volume de controle, a celeridade da frente de enchimento, propagando-se a jusante, é estimada por:



$$(V_{FE} - V_1)A_1 = (V_{FE} - V_2)A_2$$

Onde:  $V_{FE}$ : celeridade da frente de enchimento [m/s]

$V_1$ : velocidade do escoamento após a passagem da frente de enchimento [m/s]

$y_1$ : profundidade do escoamento após a passagem da frente de enchimento [m]

$V_2$ : velocidade inicial do escoamento [m/s]

$y_2$ : profundidade inicial do escoamento [m]

A Tabela 2 apresenta uma comparação entre as celeridades calculadas e medidas da frente de enchimento para os ensaios relativos ao nível inicial 2 com ventilação livre (cenários experimentais N(2)J(5), N(2)J(10), N(2)J(14) e N(2)J(27)). As velocidades do escoamento foram medidas, no modelo físico, com o auxílio do ADV. As áreas da seção transversal do escoamento foram estimadas a partir das imagens de vídeo e a celeridade da frente de enchimento foi medida considerando o avanço da frente de enchimento entre os transdutores TP05 e TP06.

Tabela 2. Celeridades da frente de enchimento calculada e medida

	$y_1$ [m]	$V_1$ [m/s]	$y_2$ [m]	$V_2$ [m/s]	$V_{FE\ cal}$ [m/s]	$V_{FE\ med}$ [m/s]
Ensaio N(2)J(5)V(VL)	0,11	0,68	0,064	0,17	1,37	1,45
Ensaio N(2)J(10)V(VL)	0,095	0,8	0,055	0,33	1,44	1,59
Ensaio N(2)J(14)V(VL)	0,085	0,75	0,056	0,36	1,50	1,64

Ainda considerando a mesma situação de enchimento, uma onda de choque se propagava de jusante para montante após o aprisionamento de ar no degrau. Considerando, agora, o volume de controle na onda de choque que se propaga de jusante para montante, a equação da continuidade quando aplicada na região da onda de choque, resulta:

$$(V_{OC} + V_1)A_1 = (V_{OC} + V_2)A_2$$

Onde:  $V_{OC}$ : celeridade da onda de choque [m/s]

$V_1$ : velocidade do escoamento à superfície livre [m/s]

$A_1$ : área da seção transversal do escoamento à superfície livre [m<sup>2</sup>]

$V_2$ : velocidade do escoamento na região pressurizada [m/s]

$A_2$ : área da seção transversal do conduto [m<sup>2</sup>]

Rearranjando os termos:

$$V_{OC} = \frac{A_1V_1 - A_2V_2}{A_2 - A_1} \quad (15)$$

A conservação da quantidade de movimento, através da onda de choque se propagando a montante, resulta em:

$$\gamma(y_1A_1) + pA_2 - \gamma A_2 \left( \frac{D}{2} + Z \right) = \rho A_1 (V_1 + V_{OC})(V_2 - V_1) \quad (16)$$

Onde:  $\gamma$ : peso específico da água [N/m<sup>3</sup>]

$\rho$ : massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>]

$y_1$ : profundidade do centróide na região de escoamento à superfície livre [m]

$D$ : altura do conduto no Trecho B [m]

$p$ : pressão do ar à frente da onda de choque [N/m<sup>2</sup>]

$Z$ : carga piezométrica na região pressurizada pelo ressalto hidráulico [m]

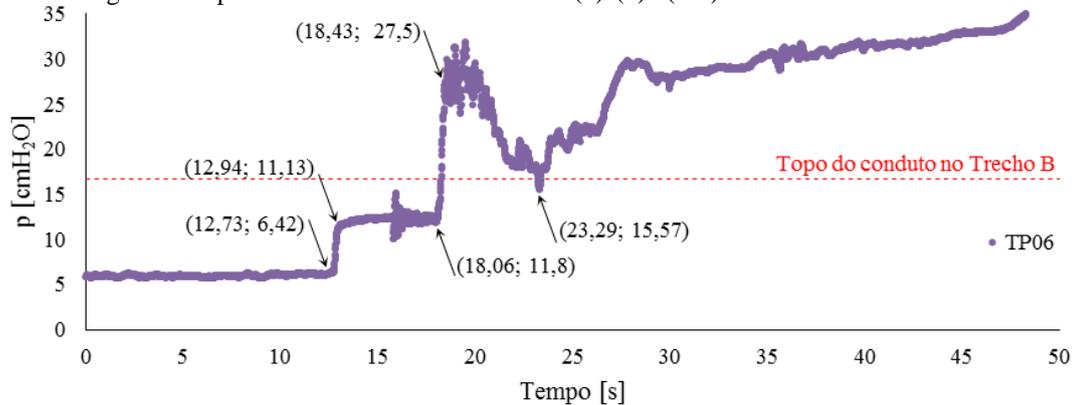
A carga piezométrica na região pressurizada do ressalto hidráulico é determinada substituindo (15) em (16):

$$Z = \frac{y_1A_1}{A_2} - \frac{D}{2} + \frac{A_1(V_1 - V_2)^2}{g(A_2 - A_1)} \quad (17)$$

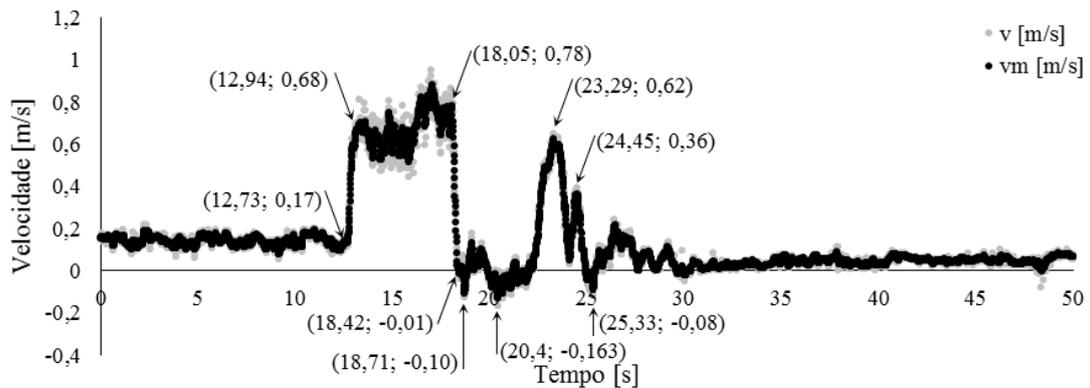
A dedução dessas equações está de acordo com as equações apresentadas em outros trabalhos (HAMAM; MCCORQUODALE, 1982; LI; MCCORQUODALE, 1999; VASCONCELOS; WRIGHT, 2009). Os ensaios avaliados foram realizados em condições de ventilação livre, por isso a pressurização do ar à frente da onda de choque não foi considerada.

Para o ensaio N(2)J(5)V(VL), considerando uma velocidade de  $-0,01$  m/s na região pressurizada do ressalto hidráulico, o valor calculado de  $Z$  é  $0,11$  m e o valor calculado para a celeridade da onda de choque é  $1,91$  m/s. Na Figura 32,  $Z$  corresponde ao aumento de pressão acima do topo do conduto. A passagem da onda de choque promove grandes oscilações de pressão e velocidade, por isso, para fins comparativos, buscou-se o valor do primeiro pico de pressão, apontado na Figura 32 (a), no instante  $18,43$  s, e sendo  $27,5$  cmH<sub>2</sub>O. Nesse caso,  $Z$  equivale a  $10,8$  cmH<sub>2</sub>O. A análise das imagens indica uma celeridade da onda de choque estimada em  $1,75$  m/s.

Figura 32. Registros de pressão e velocidade do ensaio N(2)J(5)V(VL).



(a) Registros de pressão do Ensaio N(2)J(5)V(VL)



(b) Registros de velocidade do Ensaio N(2)J(5)V(VL)

A Tabela 3 apresenta a comparação entre os valores experimentais e calculados da celeridade da onda de choque e da carga piezométrica sobre o topo do conduto para alguns ensaios.

Tabela 3. Comparação entre os valores de celeridade da onda de choque e da carga piezométrica sobre o topo do conduto.

	$V_{OC\ exp}$ [m/s]	$V_{OC\ calc}$ [m/s]	$Z_{exp}$ [m]	$Z_{calc}$ [m]
Ensaio N(1)J(5)V(VL)	1,09	1,13	0,029	0,03
Ensaio N(1)J(10)V(VL)	1,03	1,18	0,032	0,04
Ensaio N(1)J(14)V(VL)	0,88	1,23	0,043	0,04
Ensaio N(2)J(5)V(VL)	1,75	1,91	0,107	0,11
Ensaio N(2)J(10)V(VL)	1,21	1,39	0,067	0,06
Ensaio N(2)J(14)V(VL)	1,13	1,47	0,049	0,07

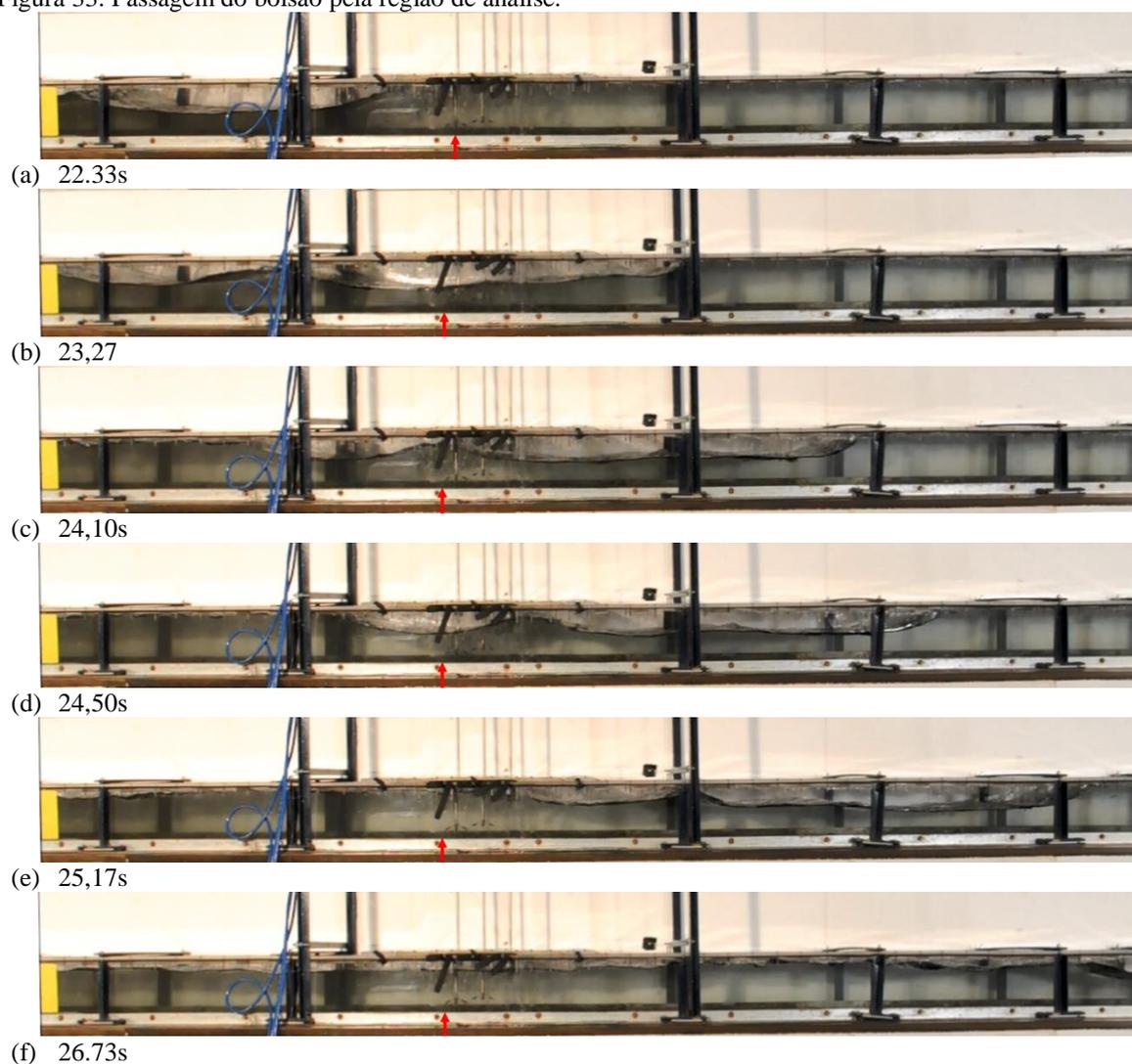
Os valores das variáveis utilizadas nos cálculos são apresentados no Apêndice deste trabalho.

### 6.3.2 Caracterização dos bolsões de ar

A movimentação dos bolsões de ar influencia a velocidade e a pressão do escoamento. Para o Ensaio N(2)J(5)V(VL), os picos de velocidade (Figura 32 (b)) registrados nos instantes 23,29 s, 24,12 s, 24,45 s e 25,33 s resultaram da passagem do bolsão de ar pelo ponto de análise e sugerem que a velocidade do escoamento sob o bolsão depende fortemente da forma do bolsão, conforme fica aparente nas imagens da Figura 33.

Enquanto a passagem da parte mais espessa do bolsão pelo ADV (indicado na Figura 33 (b) com a seta vermelha) coincidiu com a maior velocidade registrada (instante 23,29 s da Figura 32 (b)), a passagem da parte mais fina do bolsão (Figura 33 (c)) refletiu-se na diminuição momentânea da velocidade (24,12 s da Figura 32 (b)). Como o bolsão de ar voltou a espessar-se (Figura 33 (d)), a velocidade aumentou novamente (24,45 s da Figura 32 (b)). Velocidades negativas foram novamente registradas (25,33 s da Figura 32 (b)) quando o escoamento d'água ocupou momentaneamente toda a seção transversal no ponto de análise (Figura 33 (e)). Aproximadamente a partir do instante 35 s, o escoamento de água passou a ocupar, definitivamente, toda a seção transversal no ponto de análise. No intervalo de tempo entre os instantes 25 s e 35 s, ainda havia uma camada de ar entre a superfície d'água e o topo do conduto, como observa-se na Figura 33 (f), fazendo com que a velocidade voltasse a aumentar e oscilasse quando o escoamento d'água, ocasionalmente, tocasse o topo do conduto.

Figura 33. Passagem do bolsão pela região de análise.



Para o Ensaio N(2)J(5)V(VL), a celeridade da borda frontal do bolsão de ar foi estimada levando-se em conta os vídeos do ponto de análise e foi de 0,66 m/s. Considerando a altura do modelo no Trecho B (0,167 m), a celeridade calculada, através da equação proposta por Benjamin (1968) ( $\sqrt{gH}$ ), resulta em uma celeridade de 1,28 m/s. Também, observou-se que nesse ensaio a celeridade da borda frontal do bolsão é similar à velocidade máxima do escoamento causada pela passagem do bolsão de ar, 0,62 m/s na Figura 32 (b). A Tabela 4 apresenta os valores experimentais da celeridade dos bolsões de ar, analisados em quatro pontos ao longo do Trecho B, conforme Figura 34.

Figura 34. Distribuição das câmeras ao longo do Trecho B.

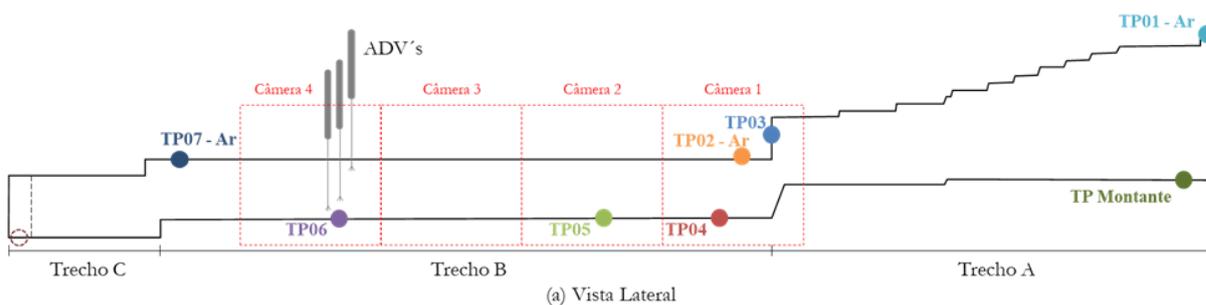


Tabela 4. Celeridades dos bolsões de ar ao se propagarem ao longo do Trecho B.

	$V_{bolsão\ exp.}$ [m/s]	$V_{bolsão\ exp.}$ [m/s]	$V_{bolsão\ exp.}$ [m/s]	$V_{bolsão\ exp.}$ [m/s]	$V_{max.\ esco.}$ [m/s]
	Câmera 1	Câmera 2	Câmera 3	Câmera 4	
Ensaio N(1)J(5)V(VL) – Repetição 1	0,71	0,67	0,69	0,7	0,41
Ensaio N(1)J(5)V(VL) – Repetição 2	0,65	0,61	0,61	0,71	0,50
Ensaio N(1)J(10)V(VL) – Repetição 1	0,68	0,56	0,57	0,59	-
Ensaio N(1)J(10)V(VL) – Repetição 2	0,73	0,58	0,56	0,6	0,50
Ensaio N(1)J(10)V(VL) – Repetição 3	0,71	0,56	0,55	0,61	0,50
Ensaio N(1)J(10)V(VL) – Repetição 4	0,74	0,57	0,56	0,62	0,50
Ensaio N(1)J(14)V(VL) – Repetição 1	0,61	0,5	0,51	0,54	0,60
Ensaio N(1)J(14)V(VL) – Repetição 2	0,68	0,5	0,53	0,54	0,60
Ensaio N(2)J(5)V(VL) – Repetição 1	0,65	0,61	0,6	0,66	0,62
Ensaio N(2)J(10)V(VL) – Repetição 1	0,63	0,58	0,56	0,60	0,61
Ensaio N(2)J(14)V(VL) – Repetição 1	0,58	0,51	0,51	0,56	0,48

### 6.3.3 Passagem dos bolsões de ar pela singularidade geométrica

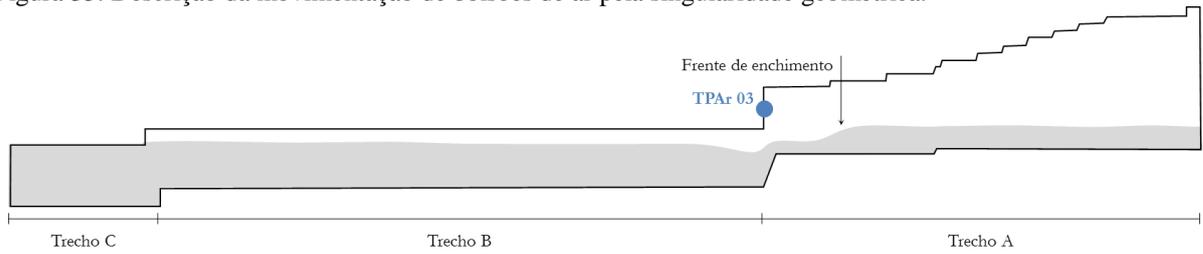
Os resultados apresentados, na Seção 6.3.2, indicam fortes alterações, tanto nos registros de velocidade quanto nos de pressão, devido à movimentação do ar ao longo de um trecho de seção transversal contínua. A presente seção apresenta evidências experimentais de oscilações de pressão relativas à passagem do bolsão de ar pelas singularidades geométricas.

Considerando os registros dos transdutores de pressão instalados nas proximidades da rampa e as imagens dos vídeos de cada ensaio, buscou-se identificar um padrão de variação da pressão em algum dos transdutores que pudesse sinalizar a ocorrência da passagem do bolsão de ar por essa singularidade geométrica. O transdutor de pressão TPAr03, instalado na parede vertical superior, apresentou registros bem distintos dos demais transdutores e revelou um padrão de oscilação de pressão entendido como representativo do evento em questão.

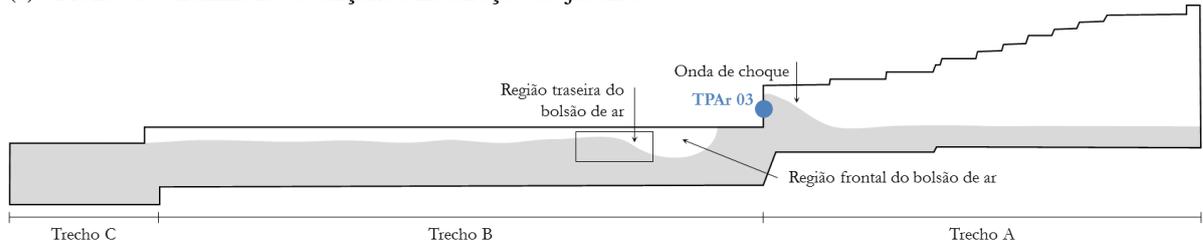
A aproximação e passagem de bolsões de ar pela rampa são apresentadas considerando que o aprisionamento de ar ocorria nesse mesmo ponto. Quando o ensaio era iniciado e a vazão adicional admitida, uma frente de enchimento avançava pelo Trecho A (Figura 35 (a)). A chegada dessa frente à rampa desencadeava o estabelecimento de um dos mecanismos de aprisionamento de ar na rampa, IP ou IFE, apresentados nas Seções 6.2.1.1 e 6.2.2.2

respectivamente. Uma vez aprisionado, o bolsão de ar avançava de jusante para montante, assim como a onda de choque (Figura 35 (b)). A forma do bolsão de ar (Figura 35 (b) e (c)) assemelha-se às cavidades de ar estudadas por Baines e Wilkinson (1986) e Baines (1991): uma parte frontal mais espessa seguida de uma região traseira onde ocorre uma rápida mudança de profundidade e uma camada mais fina com superfície da água quase horizontal. Ao avançar na direção de montante, o bolsão de ar se movimentava pela singularidade geométrica (Figura 35 (d)). A ascensão do bolsão de ar, ao longo da parede vertical superior que compõe a singularidade geométrica, induzia a um rápido alívio de pressão na região, conseqüentemente, o nível de água abaixo da parte frontal do bolsão tendia a aumentar. Assim, por uma questão de manutenção da continuidade, assumiu-se que a velocidade do escoamento nesse local diminuía. Nessa situação, a celeridade da seção traseira passava a ser maior que a da seção frontal, resultando em um fenômeno similar ao empolamento de ondas. Caso a altura fosse suficiente para tocar o teto do modelo, um novo bolsão de ar era aprisionado (Figura 35 (d) e (e)). Esse novo bolsão passava, então, a propagar-se na direção de montante, reiniciando o processo até que todo o ar retido no Trecho B escoasse para montante. O processo descrito deve ser confirmado com medições locais de velocidades em torno da singularidade geométrica.

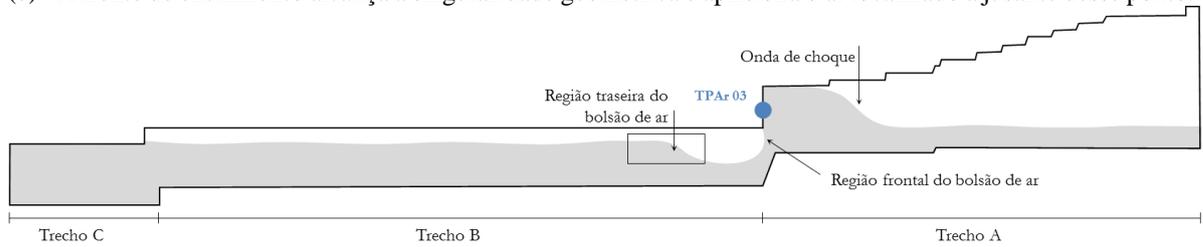
Figura 35. Descrição da movimentação de bolsões de ar pela singularidade geométrica.



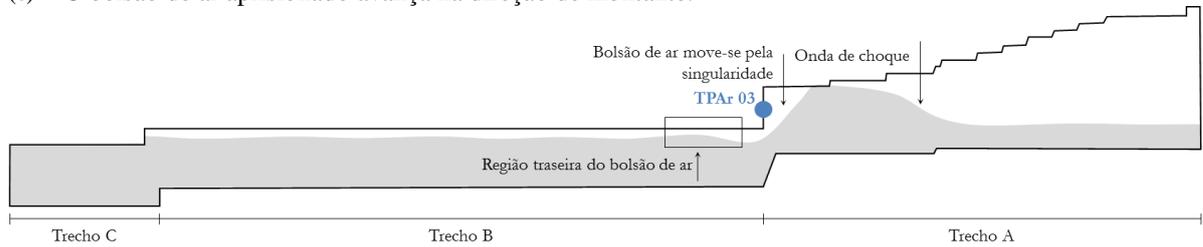
(a) Frente de enchimento avançando na direção de jusante.



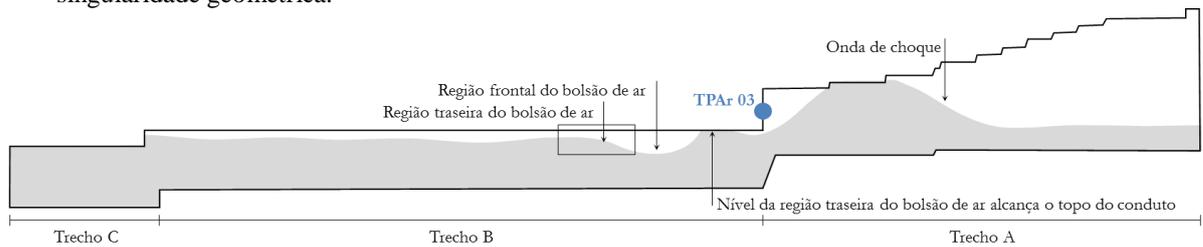
(b) A frente de enchimento alcança a singularidade geométrica e aprisiona o ar localizado a jusante desse ponto.



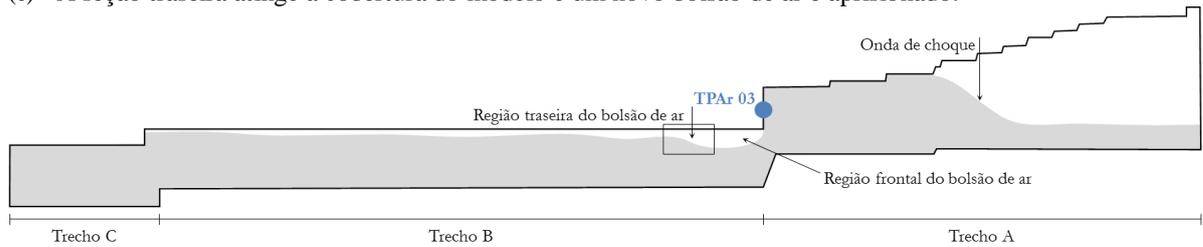
(c) O bolsão de ar aprisionado avança na direção de montante.



(d) Aumento da profundidade da seção traseira enquanto a parte frontal do bolsão de ar avança pela singularidade geométrica.



(e) A seção traseira atinge a cobertura do modelo e um novo bolsão de ar é aprisionado.



(f) O novo bolsão de ar avança na direção da singularidade geométrica, reiniciando o processo.

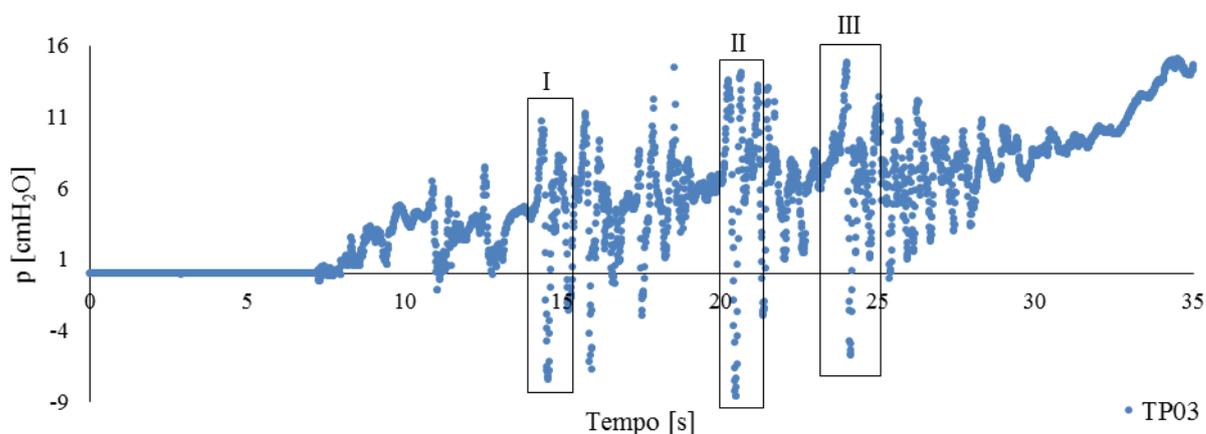
O processo ilustrado na Figura 35 pode ser igualmente observado na sequência de imagens da Figura 36, onde a região traseira do bolsão de ar está indicada com a seta amarela. Quando o bolsão ascendia pela parede vertical superior, o nível d'água, na região do estreitamento, aumentava (Figura 36 (b) e (c)) e atingia o topo do conduto Figura 36 (d) e (e)), aprisionando o ar e novamente pressurizando-o.

Figura 36. Avanço e passagem do bolsão de ar pela parede vertical superior do modelo.



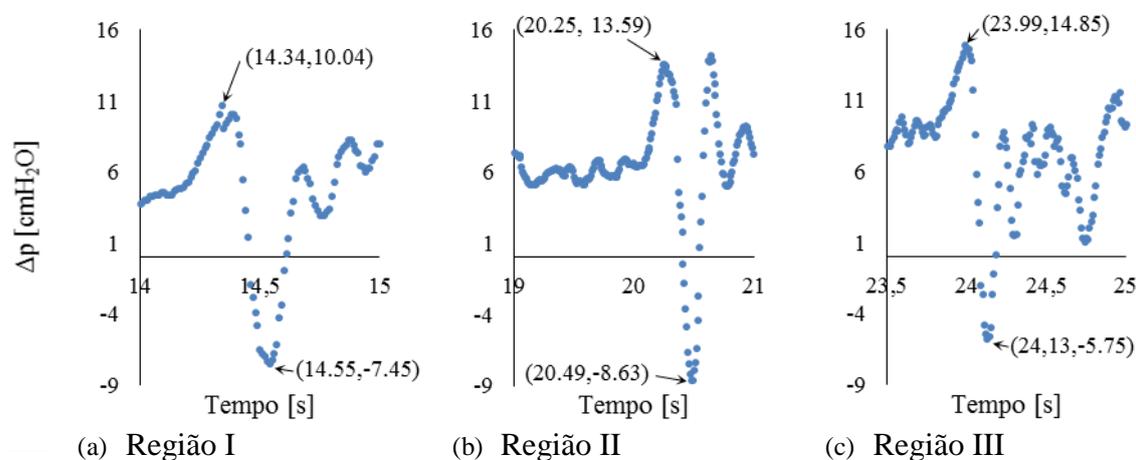
A análise dos vídeos capturados durante os experimentos, combinados com a avaliação dos registros de pressão, permitiu a identificação de um padrão de oscilação de pressões relacionado à aproximação e passagem do bolsão pela singularidade geométrica. A Figura 37 apresenta os registros de pressão do transdutor de pressão TPA03, referente ao ensaio N(3)J(5)V(VL). As oscilações de pressão destacadas nas regiões I, II e III foram escolhidas, pois a movimentação dos bolsões de ar que as originou foi facilmente reconhecida na análise dos vídeos.

Figura 37. Transientes de pressão causados pelo avanço de bolsões de ar aprisionados na rampa, N(3)J(5)V(VL).



As regiões I, II e III, destacadas na Figura 37, são apresentadas em detalhes na Figura 38 (a), (b) e (c). Inicialmente, observa-se um ligeiro aumento da pressão e, em seguida, uma diminuição brusca. A oscilação de pressão que ocorre entre os instantes 20 e 21 s (região II), anteriormente ilustrada com a sequência temporal de imagens apresentadas na Figura 36, está bem definida e é tomada como exemplo de análise. Na Figura 38(b), observa-se um incremento nos registros de pressão, a partir do instante 20 s, na medida em que o bolsão de ar se aproxima da soleira da parede vertical superior (Figura 36 (b), (c) e (d)). Esse efeito é similar ao efeito de de uma redução da seção transversal causada por um estreitamento. A diminuição acentuada da pressão, observada na Figura 38(b), a partir dos 20,25 s, está relacionada à ascensão do bolsão de ar ao longo da parede vertical. Esse decréscimo de pressão tem cerca de 22,22 cmH<sub>2</sub>O, não sendo negligenciável. A altura do modelo, nesse ponto, é de cerca de 16,5 cm.

Figura 38. Detalhe da passagem dos bolsões pela rampa considerando os registros do transdutor TPAr03, N(3)J(5)V(VL).



Guardadas as devidas diferenças nos aparatos e procedimentos experimentais, o processo de fragmentação do bolsão de ar observado nos experimentos assemelha-se ao processo de vedação de cavidades descrito por Baines (1991), denominado de *gulping*. Nas situações experimentais testadas por Baines, a comporta parcialmente aberta funcionava como um vertedor e a altura do escoamento sobre o vertedor aumentava enquanto, o ressalto hidráulico que se propagava a montante desacelerava. No fenômeno observado nos experimentos e aqui detalhado, o incremento na profundidade do escoamento, na seção traseira, também estava relacionado à redução da velocidade do escoamento sob a parte frontal do bolsão de ar, na medida em que o mesmo de ar ascendia na parede vertical superior.

#### 6.4 Efeitos da restrição da ventilação dos pontos altos do sistema

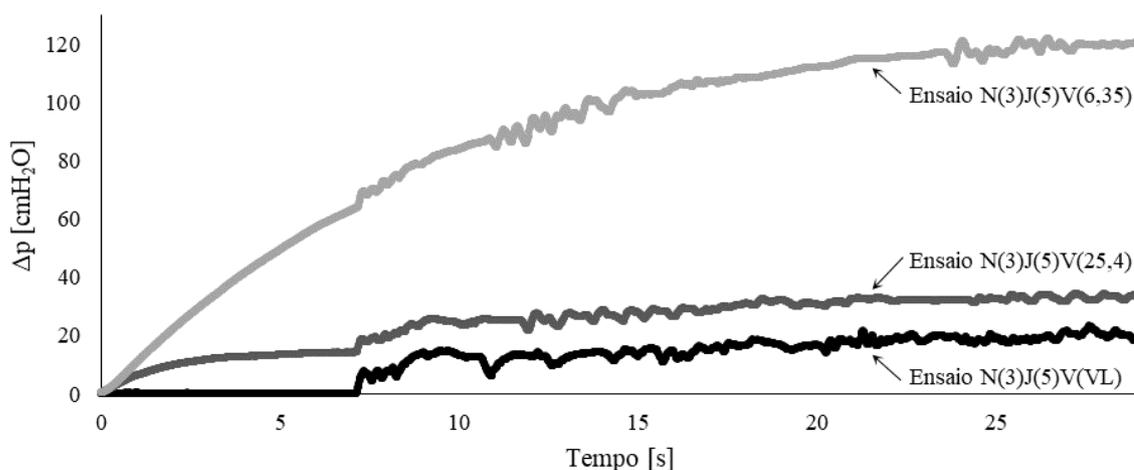
O mecanismo de aprisionamento de ar VENT, detalhado em Vasconcelos e Wright (2006), foi observado durante os experimentos com restrição da ventilação. Resultados experimentais e uma avaliação analítica baseada na teoria da coluna rígida sobre os efeitos desse mecanismo na pressurização global do sistema são apresentados a seguir.

##### 6.4.1 Resultados experimentais

Com o início do ensaio e o avanço da frente de enchimento de montante para jusante, o ar escoava sobre o escoamento d'água, na direção oposta, de jusante para montante. Nas condições de ventilação livre, todo o ar fluía para o exterior do modelo através da abertura de  $0.1425 \text{ m}^2$  no topo do modelo na extremidade de montante. Nos ensaios com condições de ventilação restritas, a cobertura foi recolocada e a única passagem para o ar era por um orifício. Assim, parte do ar escoava pelo orifício e outra parte acumulava-se e era pressurizado.

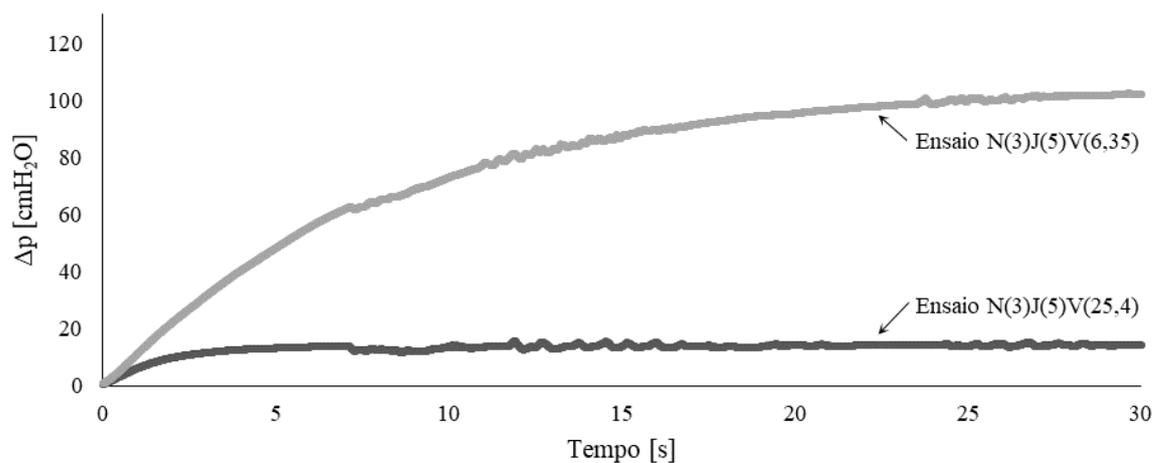
Os registros do transdutor de pressão TP06 dos ensaios do cenário experimental N(3)J(5) (ensaio N(3)J(5)V(VL) - ventilação livre, ensaio N(3)J(5)V(25,4) - orifício de 25,4 mm e ensaio N(3)J(5)V(6,35) - orifício 6,35 mm), apresentados na Figura 39, revelaram os efeitos da pressurização dos grandes volumes de ar acumulados junto ao topo do modelo ao se restringirem as condições de ventilação. Enquanto a variação de pressão foi de cerca de 20 cmH<sub>2</sub>O, ao final do ensaio N(3)J(5)V(VL), no ensaio N(3)J(5)V(25,4) foi de cerca de 35 cmH<sub>2</sub>O e no ensaio N(3)J(5)V(6,35) foi de aproximadamente 120 cmH<sub>2</sub>O.

Figura 39. Pressurização do ar devido à restrição das condições de ventilação registrada pelo transdutor de pressão TP06.



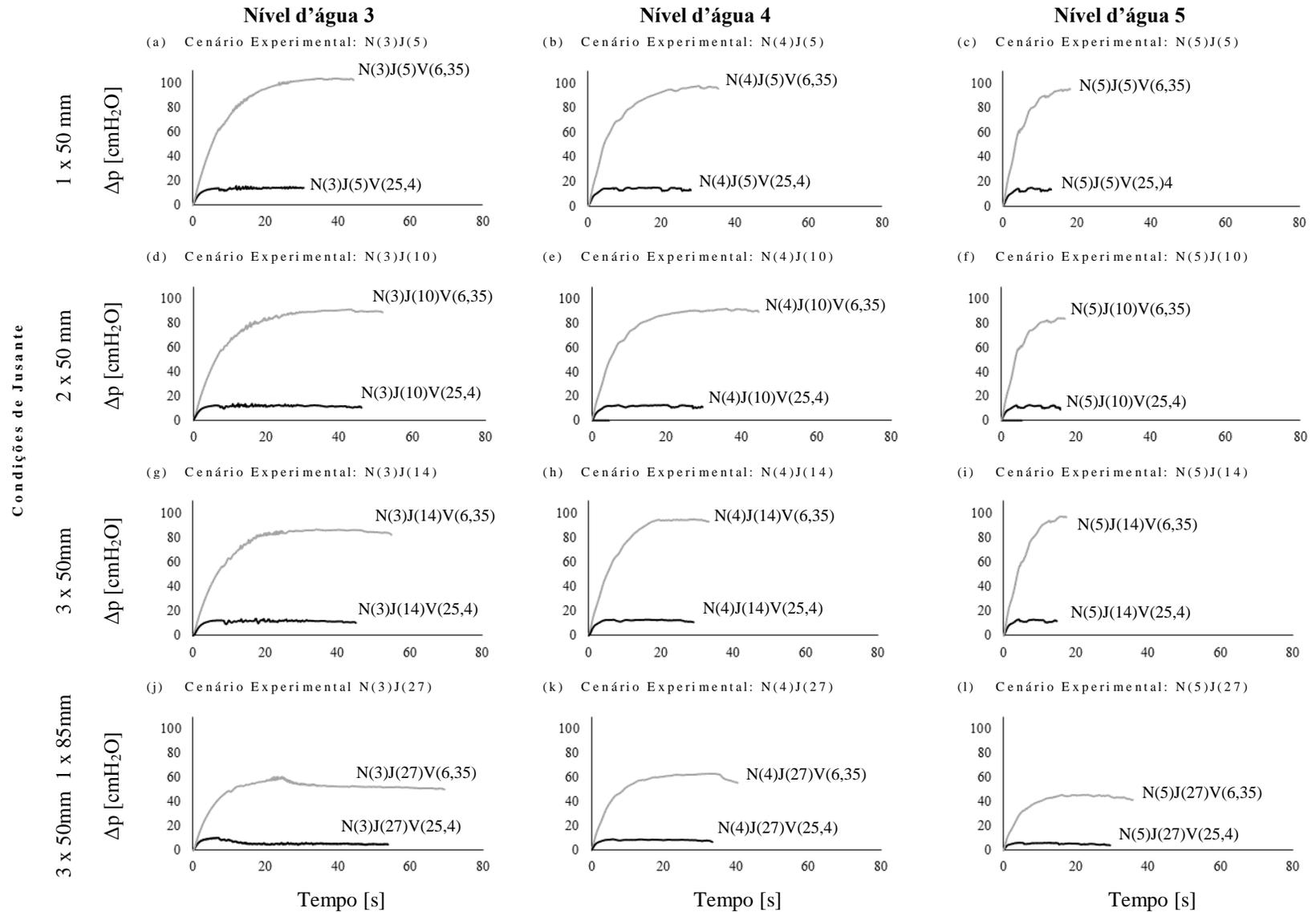
No ensaio com condições de ventilação livre (N(3)J(5)V(VL)), o incremento de pressão registrado pelo transdutor de pressão TP06 deveu-se ao aumento da coluna de água sobre esse ponto durante o experimento. Já os incrementos de pressão registrados pelo transdutor TP06, nos experimentos realizados com condições de ventilação restritas (ensaio N(3)J(5)V(25,4) e ensaio N(3)J(5)V(6,35)), refletiram os efeitos combinados do aumento da coluna de água sobre o ponto e da pressurização do ar acumulado junto ao topo do conduto. Nos experimentos realizados com condições de ventilação restritas, havia um transdutor de pressão (TPAr 01) instalado na mesma placa de cobertura da extremidade de montante do modelo onde o orifício estava instalado. A Figura 40 apresenta o aumento de pressão do ar registrado pelo TPAr 01, no interior do modelo, em função da restrição da ventilação. No ensaio N(3)J(5)V(25,4) o aumento de pressão foi de 14,5 cmH<sub>2</sub>O e, no ensaio N(3)J(5)V(6,35), de 101 cmH<sub>2</sub>O.

Figura 40. Variação da pressão do ar devido à restrição de ventilação.



Observa-se, ainda, que ambos os registros de pressão apresentaram um padrão de variação similar: um incremento inicial acentuado, seguido de uma tendência à estabilização. Esse padrão de variação foi observado em todos os experimentos onde restringiu-se a ventilação do modelo. A Figura 41 apresenta as variações de pressão do ar para os ensaios correspondentes aos níveis d'água 3, 4 e 5, com ventilação de 25,4mm e 6,35mm.

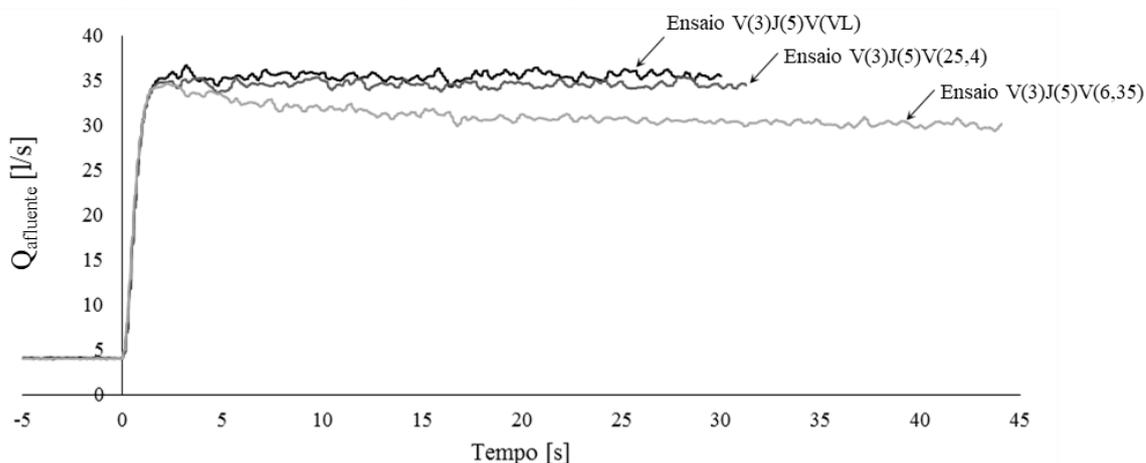
Figura 41. Pressurização do ar devido à restrição de ventilação registradas pelo transdutor de pressão TPAr 01.



Além de indicar os efeitos da restrição da ventilação entre diferentes ensaios considerando o mesmo cenário experimental, a Figura 41 permite a avaliação dos efeitos da variação do nível inicial d'água e das condições de jusante. Para a condição de jusante mais restrita, as Figura 41 (a), (b) e (c) indicam que não há alteração significativa nas variações de pressão entre ensaios correspondentes (ensaio N(3)J(5)V(6,35), ensaio N(4)J(5)V(6,35) e ensaio N(5)J(5)V(6,35), por exemplo). As variações de pressão registradas entre ensaios correspondentes, considerando as outras condições de jusante, seguem a mesma tendência.

A pressurização do ar impacta as vazões afluentes ao sistema. A Figura 42 indica a diminuição da vazão afluente em função do aumento da pressurização do ar no Trecho A. Essa alteração é quase imperceptível, quando se passa de um ensaio de ventilação plena (ensaio N(3)J(5)V(VL)) para um ensaio de ventilação restrita com orifício de 25,4mm (ensaio N(3)J(5)V(25,4)). Entretanto, esse efeito torna-se bem evidente, quando se passa do ensaio com orifício de 25,4mm (ensaio N(3)J(5)V(25,4)) para o ensaio com orifício de 6,35mm (ensaio N(3)J(5)V(6,35)), refletindo-se, também, na duração do experimento.

Figura 42. Variação da vazão afluente em função da pressurização



A tendência de variação das vazões afluentes observadas no cenário experimental N(3)J(5) também é observada nos outros cenários experimentais.

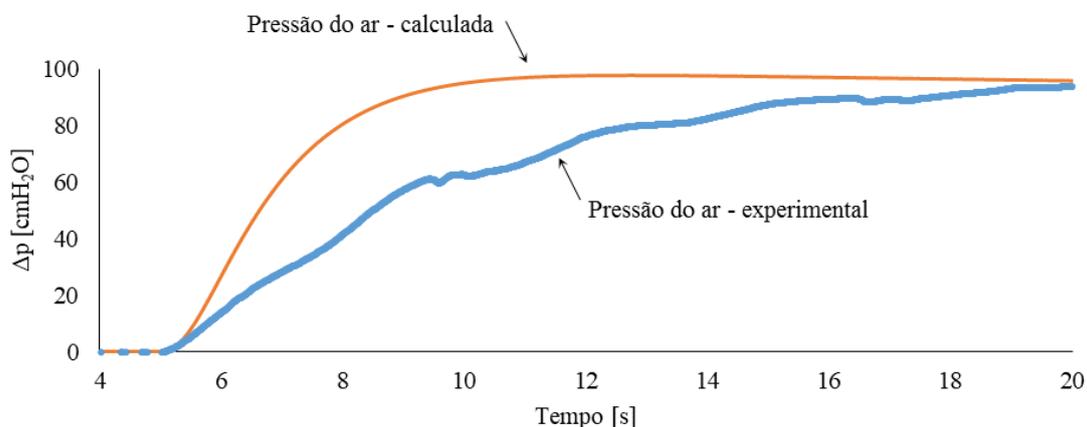
#### 6.4.2 Resultados do modelo de Coluna Rígida

Resultados experimentais foram comparados com as previsões do modelo de coluna rígida apresentado no Capítulo 5. Essa comparação buscou investigar a capacidade de um modelo baseado na Teoria da Coluna Rígida representar certas características do escoamento transiente bifásico em um sistema de drenagem urbana com características geométricas não

usuais, sem considerar a transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado.

A Figura 43 apresenta a comparação entre os resultados experimentais e as previsões numéricas para a pressurização do ar. Os resultados experimentais utilizados, para fins de comparação, dizem respeito ao ensaio N(4)J(5)V(6,35). Em situações como essa, o processo de pressurização do sistema se dava sem a ocorrência da transição entre o escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado (nem tampouco o estabelecimento de mecanismos de aprisionamento de ar), dado o nível d'água inicial mais elevado. Após o início do ensaio, a pressão do ar estimada pelo modelo de coluna rígida aumenta abruptamente, até que atinge a pressão estável observada nos resultados experimentais, a qual aumenta gradualmente.

Figura 43. Comparação de registros experimentais e valores calculados para a pressurização do ar.



Como apresentado na Seção 6.4.1, a pressurização do ar afeta as vazões afluentes ao sistema e o modelo de coluna rígida foi capaz de capturar e reproduzir esse aspecto do processo de pressurização. A Figura 44 apresenta a comparação entre as vazões calculadas e medidas para os condutos afluentes 1 e 2. O pico de vazão afluente é bem estimado pelo modelo de coluna rígida, embora o pico calculado esteja um pouco antecipado em relação ao medido. Os valores medidos e calculados concordam bem até o instante 12s, quando a vazão calculada passa a ser superestimada em 5,7%, considerando os dados entre os instantes 13 e 20s. A queda sutil na vazão do conduto afluente 1 é bem representada pela vazão afluente calculada e apresentada em detalhes na Figura 44.

Figura 44. Comparação dos registros experimentais e os valores calculados para a variação da vazão afluyente.

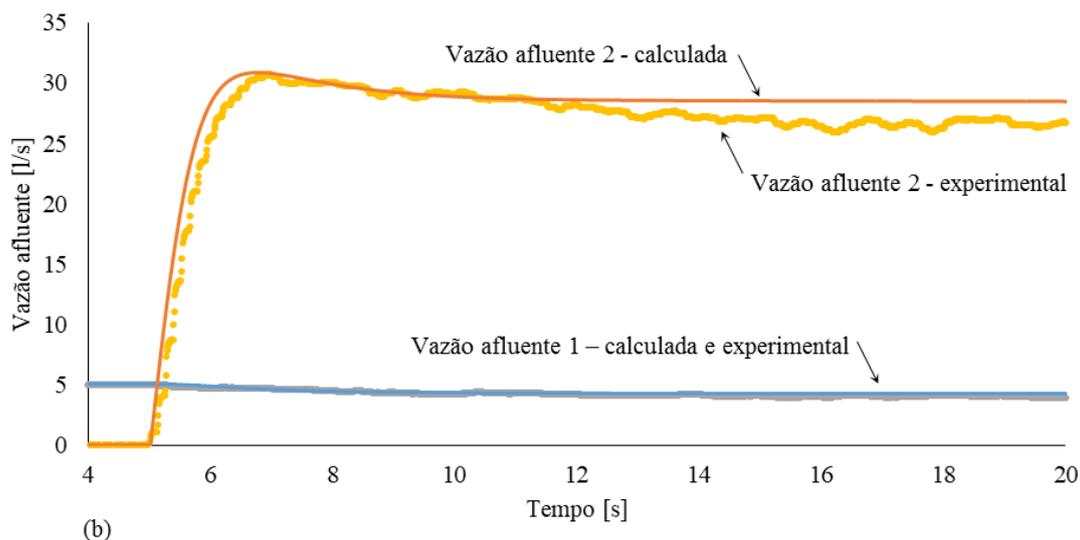
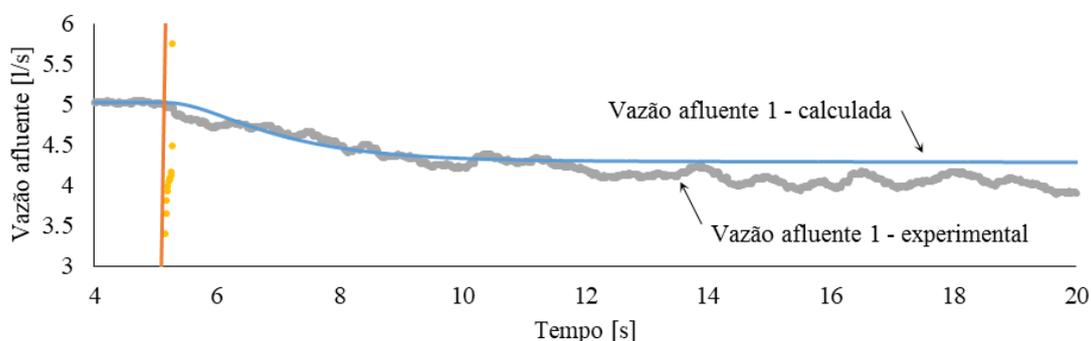


Figura 45. Detalhe das vazões afluentes 1 medida e calculada.



Ressalta-se que o modelo de coluna rígida apresentado foi elaborado visando à representação específica dos efeitos da pressurização do sistema, devido ao acúmulo e pressurização do ar junto ao topo do modelo, consequência da imposição de restrições nas condições de ventilação. O estabelecimento dos mecanismos de aprisionamento de ar, durante a transição do escoamento à superfície livre e o escoamento pressurizado, é outra situação experimental em que se observou a pressurização de quantidades significativas de ar. Essa feição do comportamento hidráulico não é representada pelo modelo baseado na teoria da coluna rígida adotado.

## 6.5 Considerações gerais sobre os resultados

Características das instalações físicas do aparato experimental utilizado e do procedimento experimental adotado no desenvolvimento da presente investigação impõem certas restrições à interpretação de seus resultados, a saber:

- vazões afluentes ao sistema – considerando o sistema de alimentação do modelo (conjunto bomba, reservatório de nível constante e condutos afluentes), a vazão máxima admitida no modelo físico foi de aproximadamente 50 l/s. Tomando como referência o evento de fevereiro de 2013 e considerando a escala de redução geométrica do modelo e o Número de Froude como critério de semelhança para a determinação de vazões, a vazão a ser escoada no modelo correspondente foi estimada em 90 l/s (KAIBER DA SILVA, 2015). Assim, a faixa de vazões efetivamente empregada nos ensaios, no modelo físico, foi limitada e inferior à vazão tomada como referência;
- condições de jusante: distintas condições de jusante foram simuladas através do conjunto de válvulas instaladas na extremidade de jusante do modelo, representando várias condições de nível inicial e vazão máxima drenada pelo modelo. Optou-se por esse procedimento, pois não há condições de jusante pré-definidas no sistema do Conduto Forçado Álvaro Chaves, uma vez que não há correlação entre os níveis do Rio Guaíba e os hidrogramas de cheia que podem ocorrer na bacia do sistema do CFAC. À essa incerteza, soma-se, ainda, a não simulação física de toda a extensão do conduto, ou seja, o trecho a jusante da região reproduzida até o deságue no Rio Guaíba. Esse procedimento experimental foi adotado, pois simulações prévias, com diferentes níveis e vazões, revelaram a formação das mesmas estruturas hidráulicas (ressalto hidráulico, aprisionamento de bolsões de ar, ondas de superfície);
- elasticidade e rugosidade das paredes e vinculação do modelo físico: as características do material utilizado na construção do modelo (placas de acrílico) e a vinculação do modelo (não enterrado) impõem limites às interpretações dos resultados gerados pela simulação física, sobretudo os relacionados aos transientes de pressão. Os fenômenos hidráulicos dependentes das características elásticas do modelo e de seus modos de vinculação não foram escalonados, sob o risco de incorrer em valores subestimados. Cabe salientar que não foi objetivo deste estudo, com a metodologia de ensaios delineada, estabelecer uma escala de redução adequada para os transientes de pressão. Os fenômenos à superfície livre, por outro lado, podem ser facilmente quantificados e, se necessário, escalonados considerando o Número de Froude como critério de semelhança. Essa opção cautelosa, entretanto, não invalida as observações experimentais relativas ao estabelecimento dos fenômenos hidráulicos, nem tampouco as consequências dos mesmos na alteração das variáveis que descrevem o escoamento;

- cenários experimentais: o aparato experimental permite a definição de uma vasta gama de condições experimentais, através da combinação das variáveis experimentais (condição de jusante, nível inicial, vazão de pico e condições de ventilação). Dados os limites de execução de um trabalho de doutorado e partindo dos resultados e das principais conclusões apresentadas em Kaiber da Silva (2015), optou-se pela definição de cenários experimentais que proporcionassem o estabelecimento e a potencialização de alguns fenômenos hidráulicos observados (mecanismos de aprisionamento de ar, movimentação de bolsões de ar, pressurização do sistema);

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões gerais

A pesquisa apresentou evidências experimentais que destacam o relevante papel das singularidades geométricas no comportamento hidráulico de sistemas de drenagem urbana, com especial atenção às interações entre os escoamentos de ar e água. Os resultados e conclusões deste trabalho são retomados e destacados a seguir.

- 1) Mecanismos de aprisionamento de ar: dois mecanismos de aprisionamento de ar ainda não relatados na literatura foram identificados *Interface de Pressurização (IP)* e *Impacto da Frente de Enchimento (IFE)*, os quais estão relacionados à presença de singularidades geométricas (“Rampa” e “Degrau”). A chegada da frente de enchimento às singularidades geométricas é o gatilho para o estabelecimento do mecanismo *Interface de Pressurização (IP)*. A passagem da frente de enchimento pelas singularidades geométricas estudadas provoca a formação de ondas na superfície do escoamento que, ao se propagarem a jusante, podem ganhar amplitude e alcançar o topo do modelo, bloqueando a passagem do ar e pressurizando-o. A isso, podem somar-se as instabilidades do escoamento cisalhante (shear-flow instabilities), geradas pela diferença de velocidades, em sentidos opostos, do escoamento do ar e da água. O mecanismo *Impacto da Frente de Enchimento (IFE)* foi observado no degrau, de forma bem clara e definida, e de uma forma não tão evidente na rampa. O gatilho para o estabelecimento desse mecanismo de aprisionamento de ar é a colisão frontal da frente de enchimento com os contornos sólidos superiores da singularidade geométrica, ocasionando a pressurização do escoamento a jusante. Apesar de parecer um mecanismo de aprisionamento de ar evidente, não há registro do mesmo na literatura consultada. Sua identificação chama atenção para a necessidade de concordâncias e bons alinhamentos geométricos também nos contornos superiores dos condutos. Como consequência do estabelecimento de ambos os mecanismos de aprisionamento de ar (*IP* e *IFE*), observou-se um rápido processo de pressurização do ar localizado a jusante do ponto de bloqueio. A ocorrência do mecanismo IFE no degrau causou a mais notável variação de pressão: cerca de 14,5 cmH<sub>2</sub>O em 0,1 s. Considerando a recorrência desses fenômenos em ambas as singularidades geométricas analisadas, sugere-se que a presença das singularidades geométricas nos sistemas de drenagem urbana crie condições para o estabelecimento de importantes mecanismos de aprisionamento de ar. A identificação dos mecanismos de aprisionamento de ar (*IP* e *IFE*) e sua estreita relação com as singularidades sugerem, com relação à concepção e ao dimensionamento de sistemas de drenagem urbana, que tanto a

geratriz inferior como a superior dos condutos devem seguir formas geométricas canônicas (concordâncias e alinhamentos) preconizadas na literatura, de modo a evitar o estabelecimento dos mecanismos de aprisionamento de bolsões de ar.

- 2) A avaliação e quantificação do escoamento permitiu o estudo de feições cinemáticas dos fenômenos. Os valores de celeridade da frente de enchimento e da onda de choque, bem como da sobrecarga causada pelo avanço da onda de choque estão de acordo com as previsões teóricas. A celeridade dos bolsões de ar, avaliada em quatro pontos distintos, é similar ao valor máximo da velocidade do escoamento durante a passagem do bolsão de ar.
- 3) A movimentação dos bolsões de ar pela singularidade geométrica provoca pulsos e transientes de pressão, cuja magnitude é da ordem da altura do modelo nesse ponto.
- 4) A avaliação da pressurização do ar, em pontos altos do modelo, revela a sensibilidade do comportamento hidráulico dos sistemas de drenagem urbana em relação ao diâmetro do orifício empregado no sistema de ventilação. Nos ensaios realizados em condições de ventilação plena, onde o ar fluía livremente para o exterior do modelo, o aumento de pressão do escoamento de água ocorria devido ao avanço da frente de enchimento e o consequente aumento da coluna d'água no ponto. Em condições de ventilação restritas, o escoamento de ar passava por um rápido processo de pressurização e acumulava-se nos pontos altos da seção de montante do modelo, resultando na pressurização completa do sistema. As características gerais do enchimento e da pressurização do ar observadas experimentalmente foram satisfatoriamente bem reproduzidas por um modelo de coluna rígida, desenvolvido considerando a complexidade geométrica do sistema.

Os resultados e conclusões experimentais resumidos acima atendem aos objetivos específicos colocados no Capítulo 2. Do exposto, verifica-se que as singularidades geométricas são elementos capazes de possibilitar e favorecer a gênese e amplificação de diversos fenômenos hidráulicos que podem interferir no comportamento hidráulico do sistema. Apesar da relevância das características geométricas do sistema ser apontada por diversos trabalhos anteriores, o modelo físico utilizado nesta investigação experimental é pioneiro na reprodução da complexidade geométrica de sistemas de drenagem reais.

Além da reprodução da complexidade geométrica, o procedimento experimental empregado, no qual o processo de enchimento rápido ocorreu devido à abertura manual de um registro esfera de montante e não envolveu manobras bruscas dos registros de jusante, também difere dos procedimentos experimentais aplicados na maior parte dos estudos experimentais similares. A modelagem física de um sistema de drenagem urbana real (no caso, o Conduto

Forçado Alvaro Chaves – CFAC) produziu mecanismos de geração de transientes capazes de ocorrer, naturalmente, em condutos de drenagem correntes.

Assim, o aparato e o procedimento experimental adotados permitiram perceber que os transientes hidráulicos, em sistemas de drenagem urbana, podem ocorrer por simples variações de geometria do conduto, não sendo necessária a existência de manobras bruscas, como no caso de transientes em condutos forçados (Golpe de Aríete).

## **7.2 Recomendações para trabalhos futuros**

Os esforços de pesquisa devem ser direcionados ao estudo das condições que propiciam o estabelecimento dos mecanismos de aprisionamento de bolsões de ar. Assim, visando à continuidade das investigações no modelo do CFAC, algumas recomendações para trabalhos futuros são apresentadas:

- Implantar e testar, no modelo físico de conjunto, alternativas de design para as singularidades geométricas com o objetivo de mitigar seus efeitos nos mecanismos de aprisionamento de ar, verificando as alterações provocadas no escoamento (pressão, velocidades e instabilidades). Caso haja alterações, estudar essas alternativas em modelo de detalhe;
- Investigar experimentalmente, o efeito das ondas de superfície e demais instabilidades nos mecanismos de aprisionamento de ar, considerando vazões de pico menores;
- Montar instalações físicas específicas, que operem respeitando as escalas de semelhança de Froude e de Mach, a fim de estudar a interação entre a onda de superfície e a onda do transiente;
- Testar a aplicabilidade do número de Verdenikov ou análogo, relacionado a previsão de instabilidades na superfície do escoamento, à instalação em operação;

## REFERÊNCIAS

- ALBERTSON, M.; ANDREWS, J. Transients Caused by Air Release. In: TULLIS, J. (Ed.). . **Control of Flow in Closed Conduits**. Fort Collins, CO: [s.n.]. p. 315–340.
- BAINES, W. D. Air Cavities as Gravity Currents on Slope. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 117, n. 12, p. 1600–1615, 1991.
- BAINES, W. D.; WILKINSON, D. L. The motion of large air bubbles in ducts of moderate slope. **Journal of Hydraulic Research**, v. 25, n. 3, p. 157–170, 1986.
- BENJAMIN, T. B. Gravity currents and related phenomena. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 31, n. 02, p. 209–248, 1968.
- CAPART, H.; SILLEN, X.; ZECH, Y. Numerical and experimental water transients in sewer pipes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 35, n. 5, p. 659–672, 1997.
- CARDLE, J. A.; SONG, C. C. S. Mathematical Modeling of Unsteady Flow in Storm Sewers. **International Journal of Engineering Fluid Mechanics**, v. 1, n. 4, p. 495–518, 1988.
- CARDLE, J. A.; SONG, C. C. S.; YUAN, M. Measurements of Mixed Transient Flows. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 2, p. 169–182, 1989.
- CHOSIE, C. D.; HATCHER, T. M.; VASCONCELOS, J. G. Experimental and Numerical Investigation on the Motion of Discrete Air Pockets in Pressurized Water Flows. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 140, n. 8, p. 1–12, 2014.
- CONG, J.; CHAN, S. N.; LEE, J. H. W. Geyser Formation by Release of Entrapped Air from Horizontal Pipe into Vertical Shaft. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 143, n. 9, p. 04017039, 2017.
- CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO RIO GRANDE DO SUL. **Parecer Técnico sobre a Ruptura do Conduto Forçado Álvaro Chaves**. Porto Alegre. 2013.
- CRISPINO, G.; PFISTER, M.; GISONNI, C. Supercritical flow in junction manholes under invert- and obvert-aligned set-ups. **Journal of Hydraulic Research**, v. 1686, 2018.
- DEL GIUDICE, G.; GISONNI, C.; HAGER, W. H. Supercritical Flow in Bend Manhole. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 126, n. 1, p. 48–56, 2000.
- DEL GIUDICE, G.; HAGER, W. H. Supercritical Flow in 45° Junction Manhole. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 127, n. 2, p. 100–108, 2001.
- FALVEY, H. T. **Air-Water Flow in Hydraulic Structures**. USBR Engineering Monograph, No. 41, Denver, Colorado, 1980.
- FERRERI, G. B.; CIRAOLO, G.; RE, C. L. Storm sewer pressurization transient – an

- experimental investigation. **Journal of Hydraulic Research**, v. 52, n. 5, p. 666–675, 2014a.
- FERRERI, G. B.; CIRAOLO, G.; RE, C. L. Flow hydraulic characteristics determining the occurrence of either smooth or abrupt sewer pressurization. **Journal of Hydraulic Research**, v. 52, n. 5, p. 676–683, 2014b.
- GARGANO, R.; HAGER, W. H. Supercritical Flow across Sewer Manholes. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 11, p. 1014–1017, 2002.
- GISONNI, C.; HAGER, W. H. Supercritical flow in manholes with a bend extension. **Experiments in Fluids**, v. 32, n. 3, p. 357–365, 2002.
- GUO, Q.; SONG, C. C. S. Surging in Urban Storm Drainage Systems. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 116, n. 12, p. 1523–1537, 1990.
- GUO, Q.; SONG, C. C. S. Dropshaft Hydrodynamics under Transient Conditions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 117, n. 8, p. 1042, 1991.
- HAGER, W. H. Transitional Flow In Channel Junctions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 2, p. 243–259, 1989a.
- HAGER, W. H. Supercritical Flow In Channel Junctions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 115, n. 5, p. 595–616, 1989b.
- HAGER, W. H.; GISONNI, C. Supercritical flow in sewer manholes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 43, n. 6, p. 660–667, 2005.
- HAMAM, M. A.; MCCORQUODALE, J. A. Transient conditions in the transition from gravity to surcharged sewer flow. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 9, n. 2, p. 189–197, 1982.
- ISSA, R. I.; KEMPF, M. H. W. Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model. **International Journal of Multiphase Flow**, v. 29, n. 1, p. 69–95, 2003.
- KAIBER DA SILVA, J. **Identificação de instabilidades hidráulicas em sistemas de drenagem urbana - Investigação experimental do Conduto Forçado Álvaro Chaves**. 2015. Dissertação, Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2015.
- KAIBER DA SILVA, J. et al. The influence of air pressurization in stormwater systems flows: experimental and numerical assessment. In: **13th International Conference on Pressure Surges, 2018**, Bordeaux, França. **Anais**. 2018.
- LAUCLAN, C. S. et al. **Air in Pipelines - A Literature Review**. Wallingford: HR Wallingford. 2005. Relatório (SR649).
- LEE, N. H. **Effect of pressurization and expulsion of entrapped air in pipelines**. 2005.

- 149f. Tese, Doctor of Philosophy. School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta, 2005.
- LEON, A. S. Mechanisms that lead to violent geysers in vertical shafts. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 295–306, 2019.
- LEON, A. S.; ELAYEB, I. S.; TANG, Y. An experimental study on violent geysers in vertical pipes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 283–294, 2019.
- LI, J.; MCCORQUODALE, A. Modeling Mixed Flow in Storm Sewers. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 125, p. 1170–1180, 1999.
- MARTIN, C. S. Air entrainment. In: CHAUDHRY, M. H.; YEVJEVICH, V. (Eds.). **Closed Conduit Flow**. Littleton, CO: Water Resources Publications, 1981.
- MULLER, K. Z.; WANG, J.; VASCONCELOS, J. G. Water Displacement in Shafts and Geysering Created by Uncontrolled Air Pocket Releases. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 143, n. 10, p. 1–13, 2017.
- NORTEK, The Comprehensive Manual for Velocimeters: Vector, Vectrino, Vectrino Profiler. Disponível em: <https://support.nortekgroup.com/hc/en-us/articles/360029839351-The-Comprehensive-Manual-Velocimeters>. Acesso 15 de set. 2019.
- POTHOF, I. W. M.; CLEMENS, F. H. L. R. On elongated air pockets in downward sloping pipes. **Journal of Hydraulic Research**, v. 48, n. 4, p. 499–503, 2010.
- POZOS-ESTRADA, O. et al. Air entrapped in gravity pipeline systems. **Journal of Hydraulic Research**, v. 48, n. 3, p. 338–347, 2010.
- POZOS-ESTRADA, O. et al. Failure of a drainage tunnel caused by an entrapped air pocket. **Urban Water Journal**, v. 12, n. 6, p. 446–454, 2015.
- REINAUER, R.; HAGER, W. H. Supercritical Bend Flow. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 123, n. 3, p. 208–218, 1997.
- ROUHANI, S. Z.; SOHAL, M. S. Two-phase flow patterns: A review of research results. **Progress in Nuclear Energy**, v. 11, n. 3, p. 219–259, 1983.
- SALDARRIAGA, J. et al. Symmetric junction manholes under supercritical flow conditions. **Journal of Hydraulic Research**, v. 55, n. 1, p. 135–142, 2017.
- SALDARRIAGA, J.; BERMÚDEZ, N.; RUBIO, D. P. Hydraulic behaviour of junction manholes under supercritical flow conditions. **Journal of Hydraulic Research**, v. 50, n. 6, p. 631–636, 2012.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. **A.I.Ch.E Journal**, v. 3, p. 47–55, 1976.
- TAITEL, Y.; DUKLER, A. E. Gas-Liquid Flow in Horizontal and Near Horizontal Pipes.

**International Journal of Multiphase Flow**, v. 3, p. 585–596, 1977.

TRAJKOVIC, B. et al. Investigation of transition from free surface to pressurized flow in a circular pipe. **Water Science and Technology**, v. 39, n. 9, p. 105–112, 1999.

TRINDADE, B. C.; VASCONCELOS, J. G. Experimental investigations on air pressurization in pipelines undergoing rapid filling. In: **World Environmental and Water Resources Congress: Crossing Boundaries, 2012**, Albuquerque, NM. **Anais**. 2012.

TRINDADE, B. C.; VASCONCELOS, J. G. Modeling of Water Pipeline Filling Events Accounting for Air Phase Interactions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, p. 921–934, 2013.

VASCONCELOS, J. G. **Dynamic Approach To the Description of Flow Regime Transition in Stormwater**. 2005. 386 f. Tese, Doctor in Philosophy (Environmental Engineering), University of Michigan. Ann Arbour, 2005.

VASCONCELOS, J. G.; LEITE, G. M. Pressure Surges Following Sudden Air Pocket Entrapment in Stormwater Tunnels. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 138, p. 1081–1089, 2012.

VASCONCELOS, J. G.; WRIGHT, S. J. Experimental Investigation of Surges in a Stormwater Storage Tunnel. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 131, p. 853–861, 2005.

VASCONCELOS, J. G.; WRIGHT, S. J. Mechanisms for Air pocket Entrapment in Stormwater Storage Tunnels. In: **World Environmental and Water Resource Congress, 2006**, Omaha, NE. **Anais**. 2006.

VASCONCELOS, J. G.; WRIGHT, S. J. Investigation of rapid filling of poorly ventilated stormwater storage tunnels. **Journal of Hydraulic Research**, v. 47, n. 5, p. 547–558, 2009.

VASCONCELOS, Jose Goes; WRIGHT, S. J. Geysering Generated by Large Air Pockets Released through Water-Filled Ventilation Shafts. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 5, p. 543–555, 2011.

VASCONCELOS, J. G.; WRIGHT, S. J.; ROE, P. L. Improved Simulation of Flow Regime Transition in Sewers: Two-Component Pressure Approach. **Journal of Hydraulic Engineering**, 2006.

WIGGERT, D. C. Transient flow in free-surface, pressurized systems. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 98, n. 1, 1972.

WILKINSON, D. L. Motion of air cavities in long horizontal ducts. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 118, p. 109–122, 1982.

WRIGHT, S. J. et al. Flow regime transition mechanisms in rapidly filling stormwater storage tunnels. **Environmental Fluid Mechanics**, v. 8, n. 5–6, p. 605–616, 2008.

- WRIGHT, S. J.; LEWIS, J. W.; VASCONCELOS, J. G. Physical processes resulting in geyser in rapidly filling stormwater tunnels. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 137, n. 3, p. 199–202, 2011a.
- WRIGHT, S. J.; LEWIS, J. W.; VASCONCELOS, J. G. Geysering in Rapidly Filling Storm-Water Tunnels. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 1, p. 112–115, 2011b.
- WYLIE, E. B.; STREETER, V. **Fluid transients**. New York: McGraw Hill, 1978.
- YEN, B. C. **Hydraulic Instabilities of Storm Sewer Flows**. Int. Conf. on Urban Drainage. **Anais**. University of Southampton, Southampton, U.K.: 1978
- ZHAO, C.-H.; ZHU, D. Z.; RAJARATNAM, N. Experimental Study of Surcharged Flow at Combining Sewer Junctions. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 132, n. 12, p. 1259–1271, 2006.
- ZHOU, F.; HICKS, F. E.; STEFFLER, P. M. Observations of Air–Water Interaction in a Rapidly Filling Horizontal Pipe. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 6, p. 635–639, 2002a.
- ZHOU, F.; HICKS, F.; STEFFLER, P. Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 128, n. 6, p. 625–634, 2002b.
- ZHOU, L. et al. Influence of Entrapped Air Pockets on Hydraulic Transients in Water Pipelines. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, p. 1686–1692, 2011.
- ZHOU, L. et al. Dynamic Behavior of Entrapped Air Pocket in a Water Filling Pipeline. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 144, n. 8, 2018.
- ZHOU, L. et al. Rapid air expulsion through an orifice in a vertical water pipe. **Journal of Hydraulic Research**, v. 57, n. 3, p. 307–317, 2019.
- ZHOU, L.; LIU, D. Experimental investigation of entrapped air pocket in a partially full water pipe. **Journal of Hydraulic Research**, v. 51, n. 4, p. 469–474, 2013.
- ZHOU, L.; LIU, D.; KARNEY, B. W. Investigation of Hydraulic Transients of Two Entrapped Air Pockets in a Water Pipeline. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 139, p. 949–959, 2013.

## APÊNDICE

Informações experimentais adicionais, relativas aos ensaios realizados no modelo físico do Conduto Forçado Álvaro Chaves, são apresentadas. Esses ensaios embasaram os resultados e discussões apresentados na tese.

Inicialmente, apresenta-se uma tabela-resumo (Tabela 5) com os valores experimentais das variáveis vazão, nível e velocidade do escoamento em momentos representativos dos ensaios. Os valores de nível e velocidade do escoamento são relativos ao ponto onde estão instalados os ADV's e o transdutor de pressão TP06. Em seguida, gráficos com as séries temporais de vazão, pressão e velocidade para cada ensaio são apresentados, assim como sequências temporais de fotos extraídas dos vídeos realizados durante os ensaios em momentos de interesse. Os ensaios estão agrupados de acordo com o nível inicial do escoamento, conforme indicado na Figura 46.

Figura 46. Níveis iniciais do escoamento.

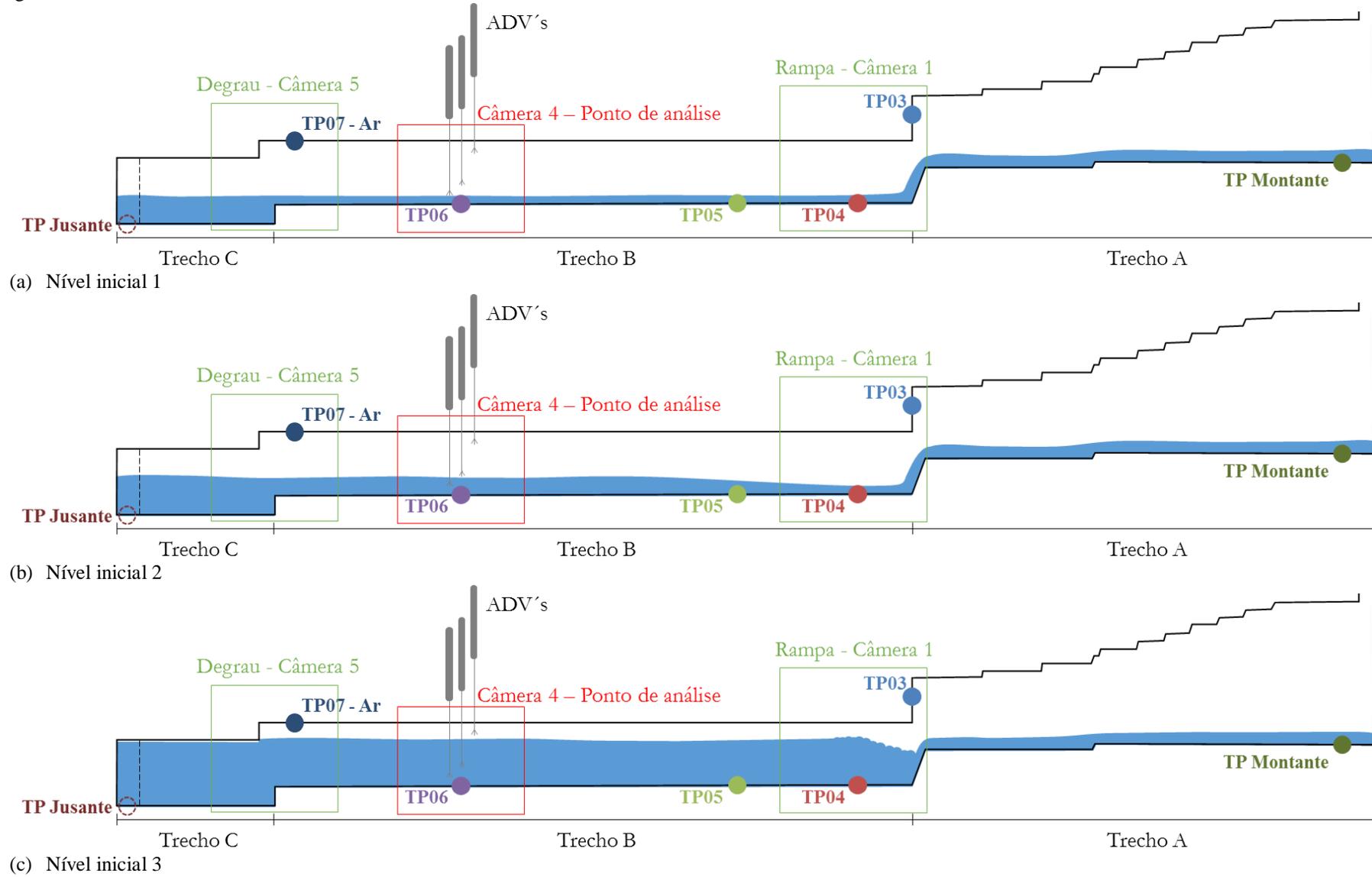


Tabela 5. Tabela resumo dos valores de vazão, nível e velocidade de momentos de interesse durante os ensaios.

Ensaio	Vazões [l/s]			Nível do escoamento [cm]			Z <sup>7</sup>	Velocidade do escoamento [m/s]			
	Inicial <sup>1</sup>	Pico <sup>2</sup>	Máxima <sup>3</sup>	Inicial <sup>4</sup>	Intermediária <sub>1</sub> <sup>5</sup>	Intermediária <sub>2</sub> <sup>6</sup>		Inicial <sup>8</sup>	Intermediária <sub>1</sub> <sup>9</sup>	Intermediária <sub>2</sub> <sup>10</sup>	Final <sup>11</sup>
Ensaio N(1)J(5)V(VL)	3,7	34,5	5,0	3,5	7,9	9,6	2,9	-	0,80	0,78	-0,03
Ensaio N(1)J(10)V(VL)	6,6	36,2	10,0	4,1	8,3	10,6	3,2	-	0,77	0,76	0,05
Ensaio N(1)J(14)V(VL)	7,6	38,2	14,0	4,5	8,8	10,4	4,3	-	0,90	0,76	0,01
Ensaio N(1)J(27)V(VL)	7,7	38,5	27,0	4,1	8,6	10,0	3,1	-	0,76	0,85	0,07
Ensaio N(2)J(5)V(VL)	3,8	35,3	5,0	6,4	11,1	11,8	10,7	0,17	0,68	0,78	-0,01
Ensaio N(2)J(10)V(VL)	7,9	39,4	10,0	5,5	9,5	10,9	6,7	0,33	0,80	0,79	0,03
Ensaio N(2)J(14)V(VL)	10,1	40,5	14,0	5,6	8,5	10,5	4,9	0,36	0,75	0,79	-0,05

<sup>1</sup> Vazão inicial;

<sup>2</sup> Vazão de pico;

<sup>3</sup> Vazão máxima escoada;

<sup>4</sup> Nível do escoamento sobre o transdutor de pressão TP06;

<sup>5</sup> Nível do escoamento no transdutor de pressão TP06 logo após a passagem da frente de enchimento;

<sup>6</sup> Nível do escoamento antes do avanço da onda de choque;

<sup>7</sup> Carga piezométrica sobre o topo do conduto logo após o avanço da onda de choque;

<sup>8</sup> Velocidade média antes da passagem da frente de enchimento;

<sup>9</sup> Velocidade média logo após a passagem da frente de enchimento;

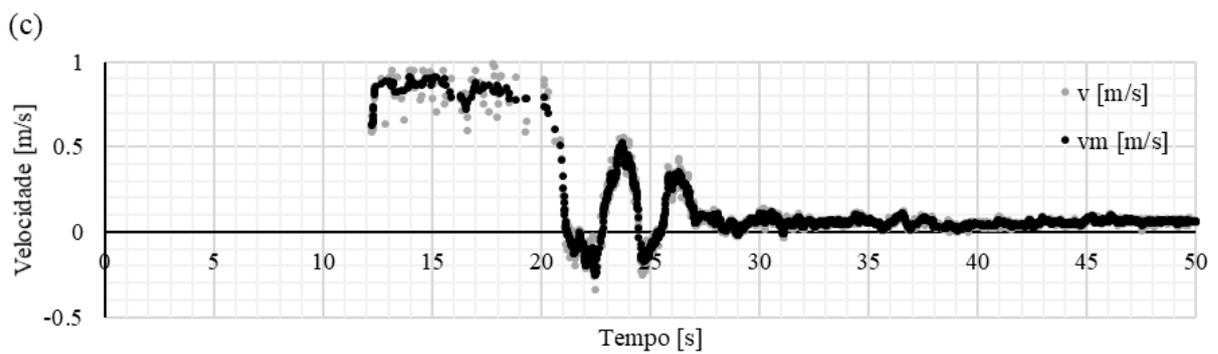
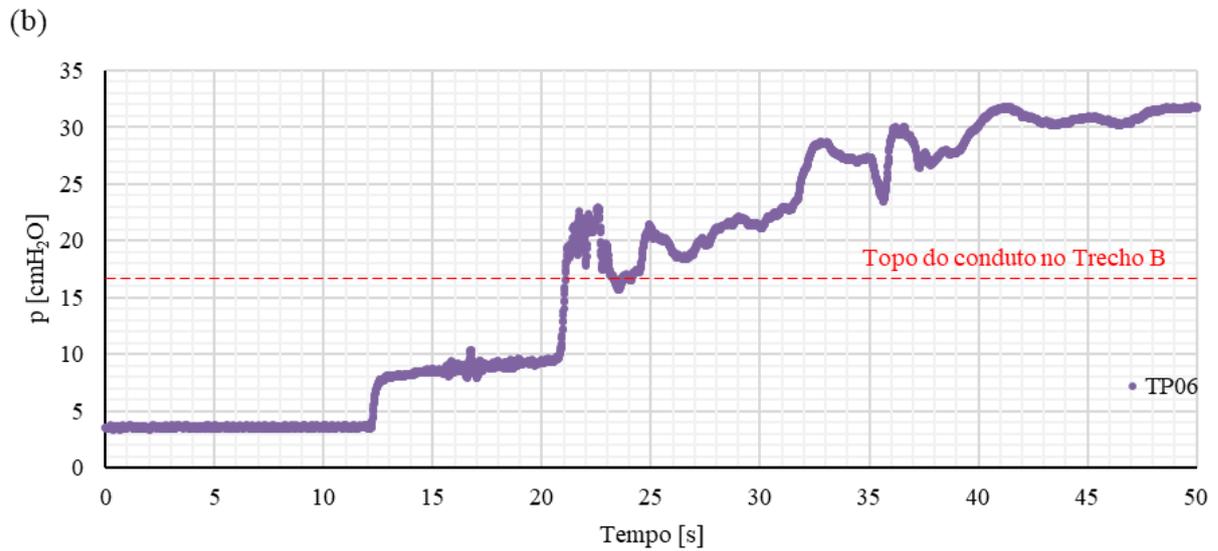
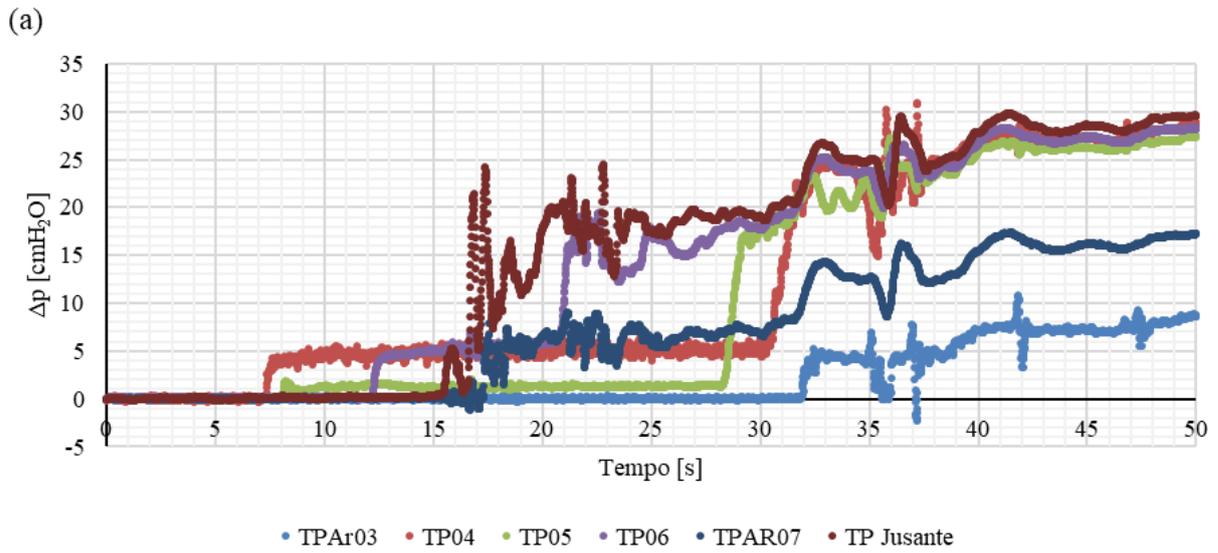
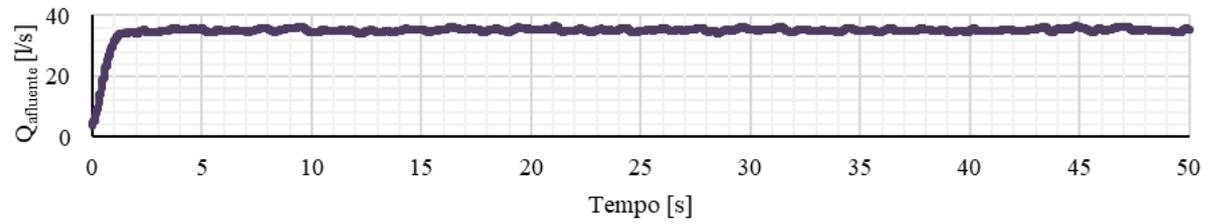
<sup>10</sup> Velocidade média antes do avanço da onda de choque;

<sup>11</sup> Velocidade média logo após o avanço da onda de choque;

**Ensaio N(1)J(5)V(VL)**

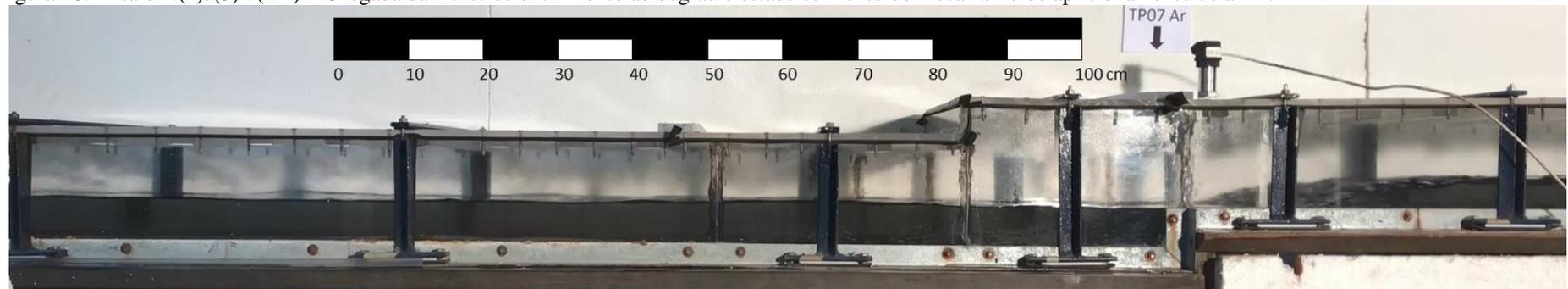
A Figura 47 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade durante o Ensaio N(1)J(5)V(VL). Nesse ensaio, o degrau é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 48 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização e a passagem de um bolsão de ar pelo degrau. A Figura 49 apresenta o avanço da onda de choque e a passagem de bolsões de ar pela rampa.

Figura 47. Ensaio N(1)J(5)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

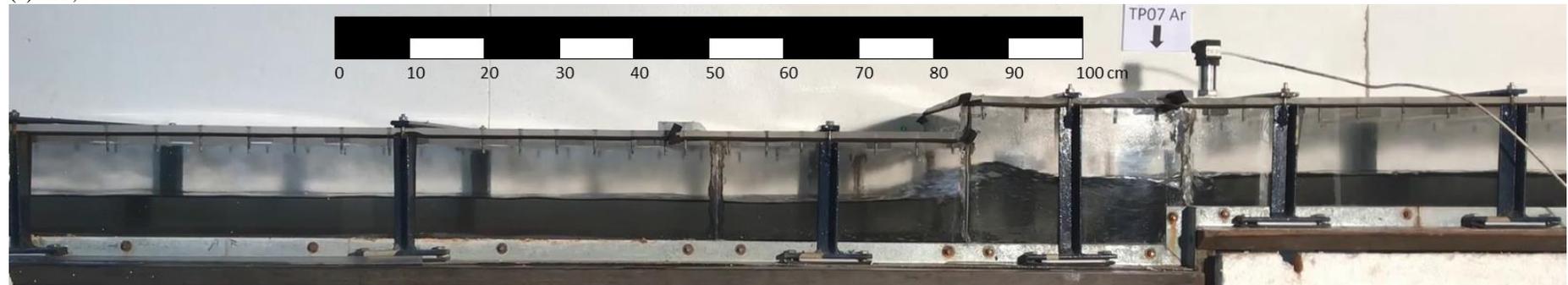


(d)

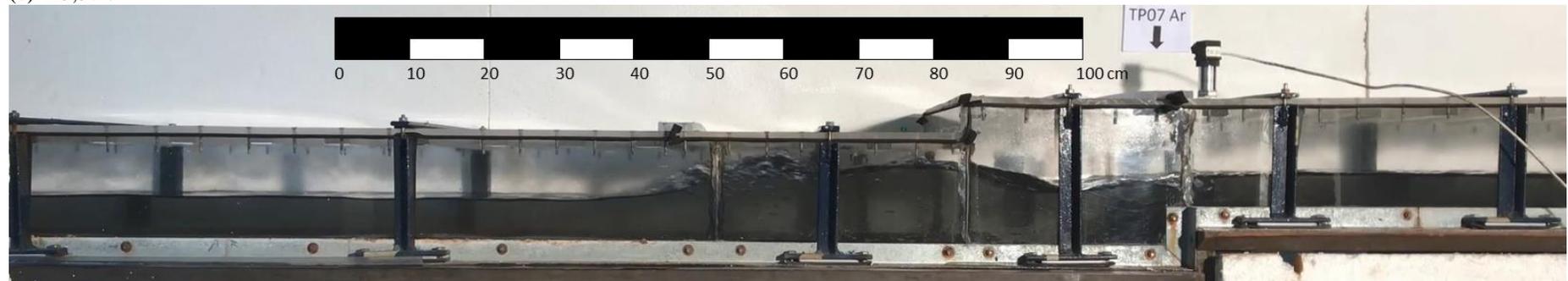
Figura 48. Ensaio N(1)J(5)V(VL) – Chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP.



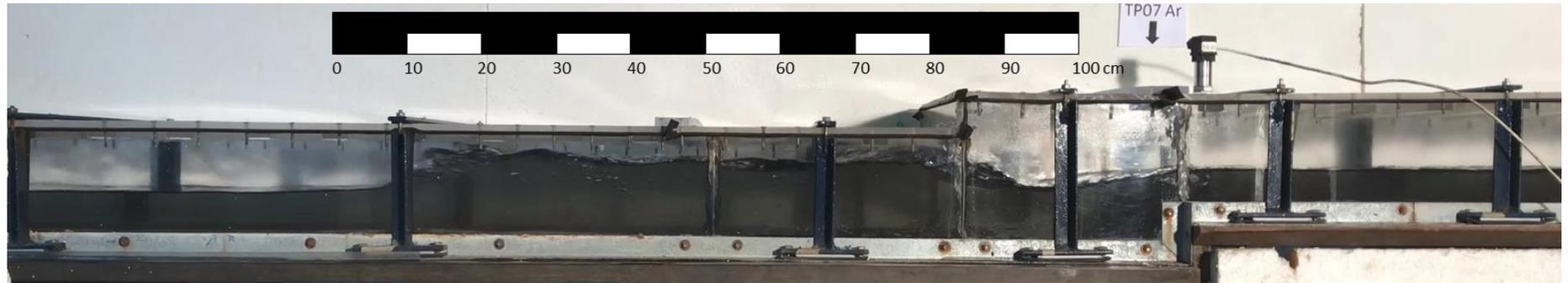
(a) 15,00 s



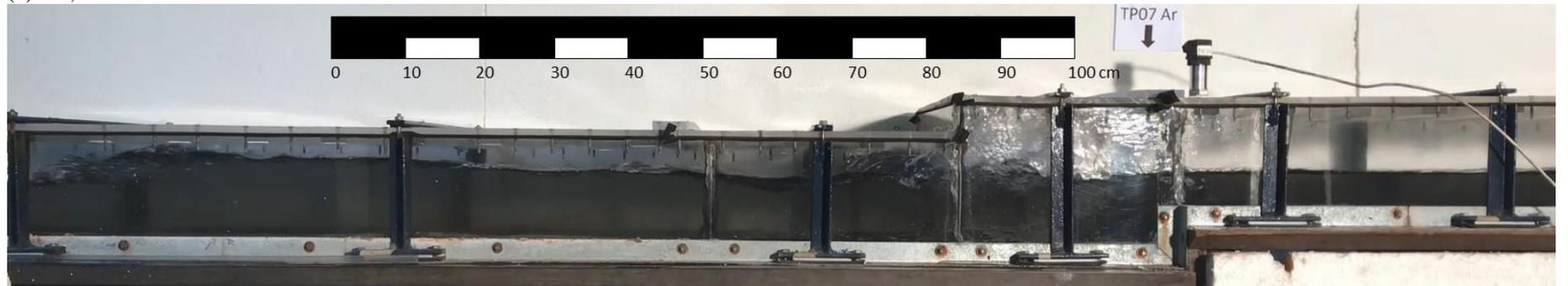
(b) 15,37 s



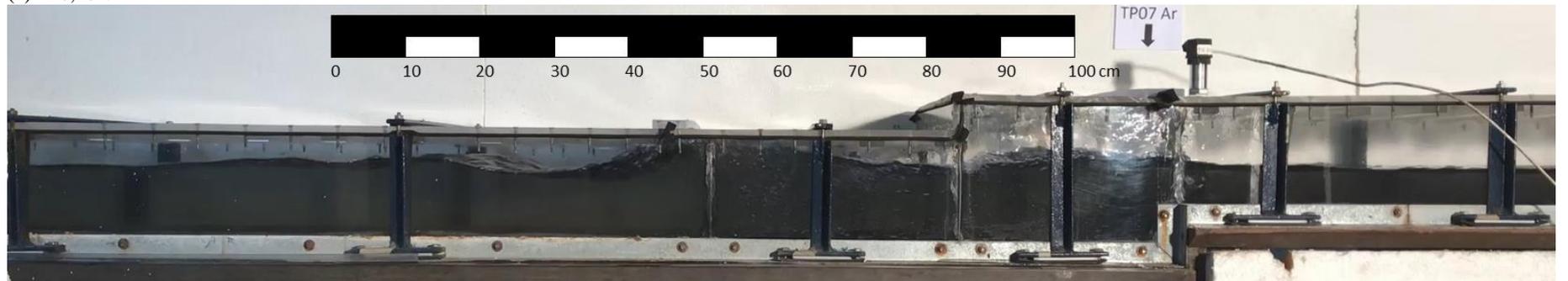
(c) 15,63 s



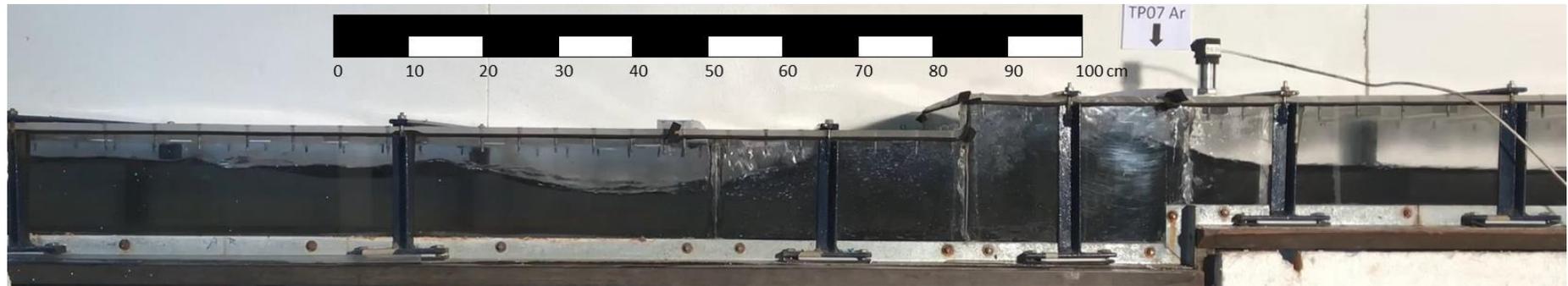
(d) 15,97 s



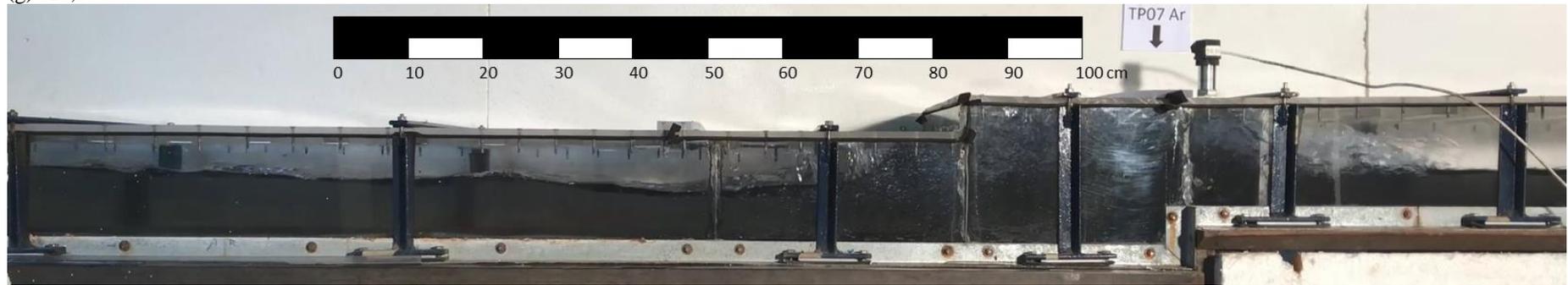
(e) 16,23 s



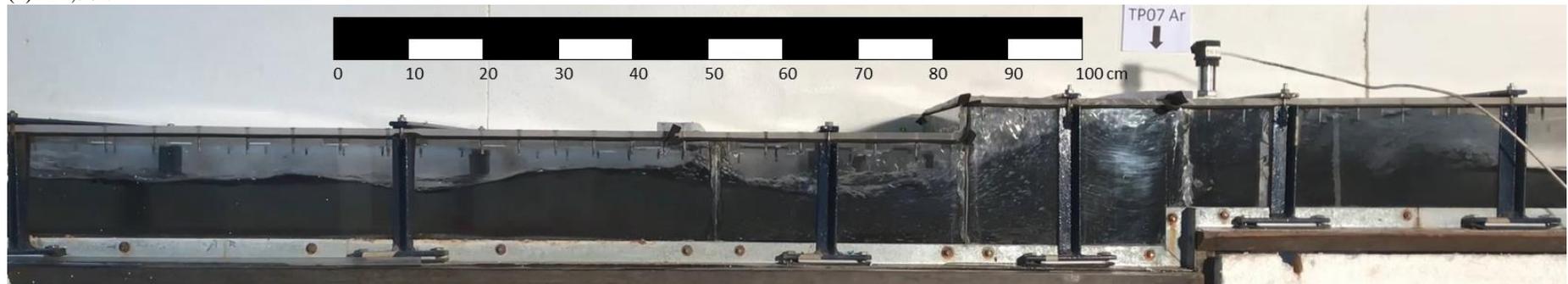
(f) 17,00 s



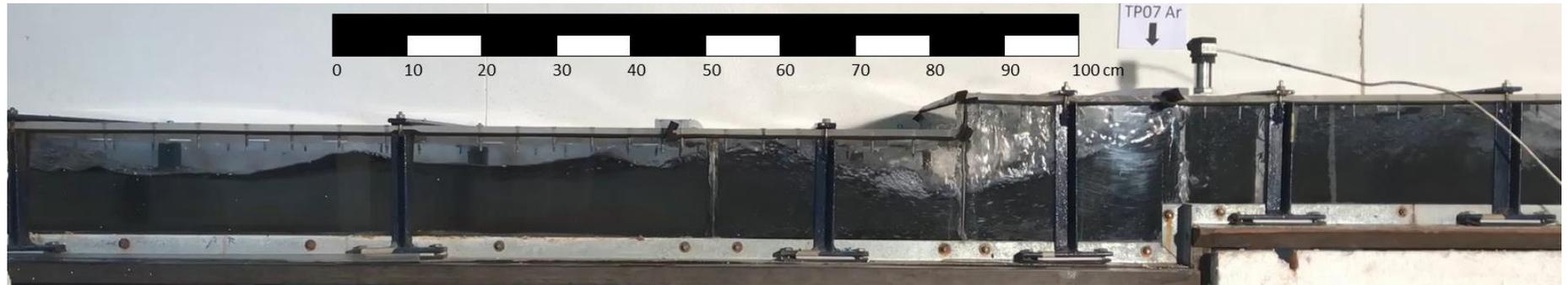
(g) 17,30 s



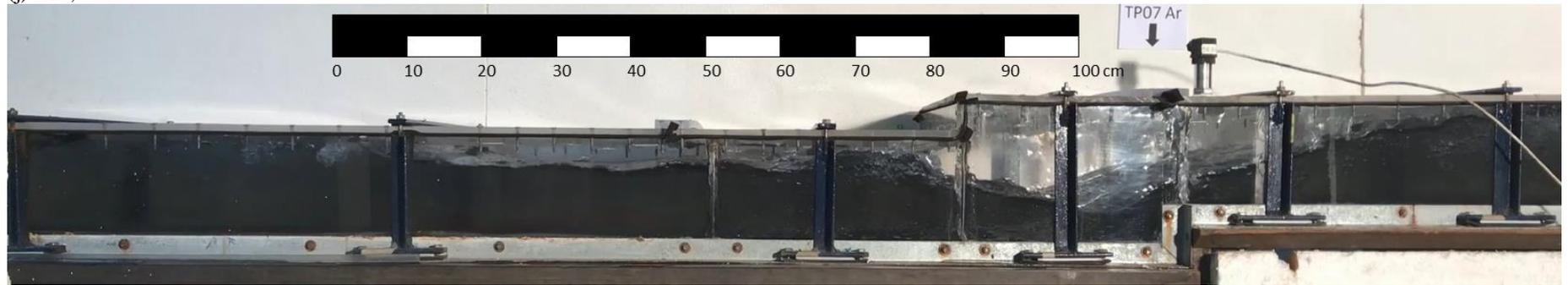
(h) 17,50 s



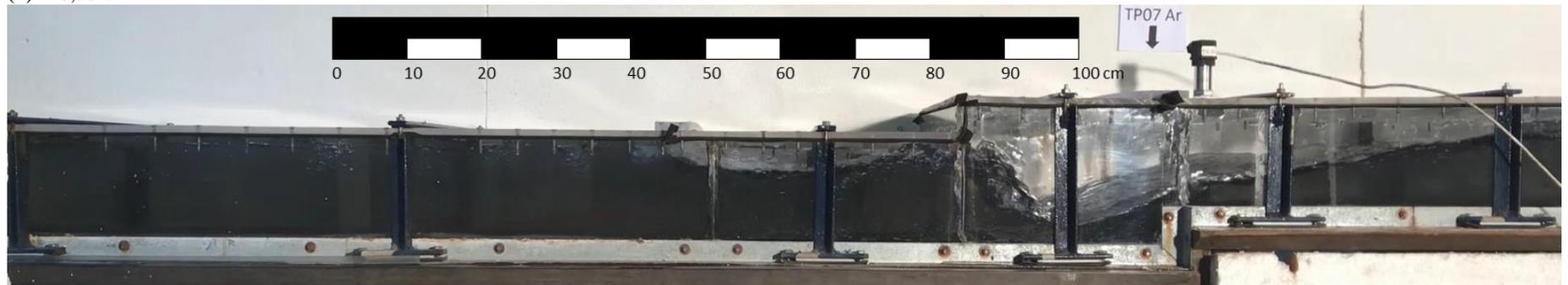
(i) 17,83 s



(j) 18,00 s

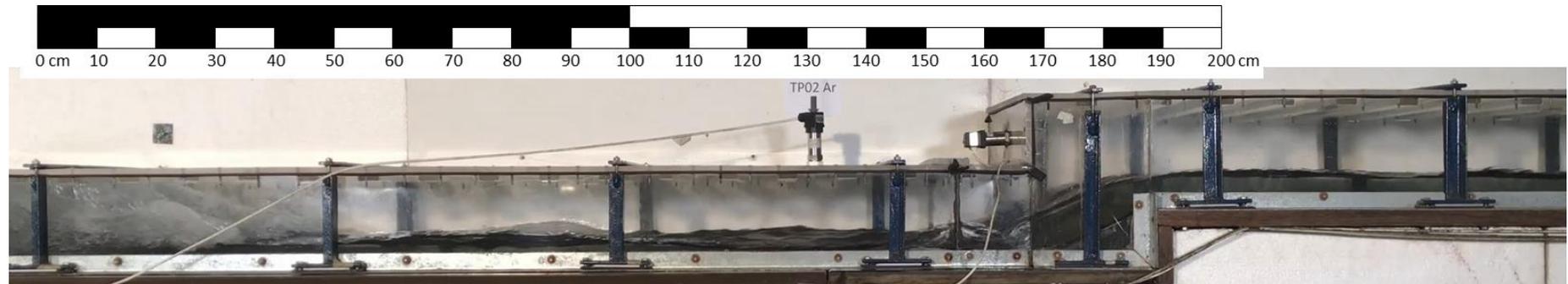


(k) 18,53 s

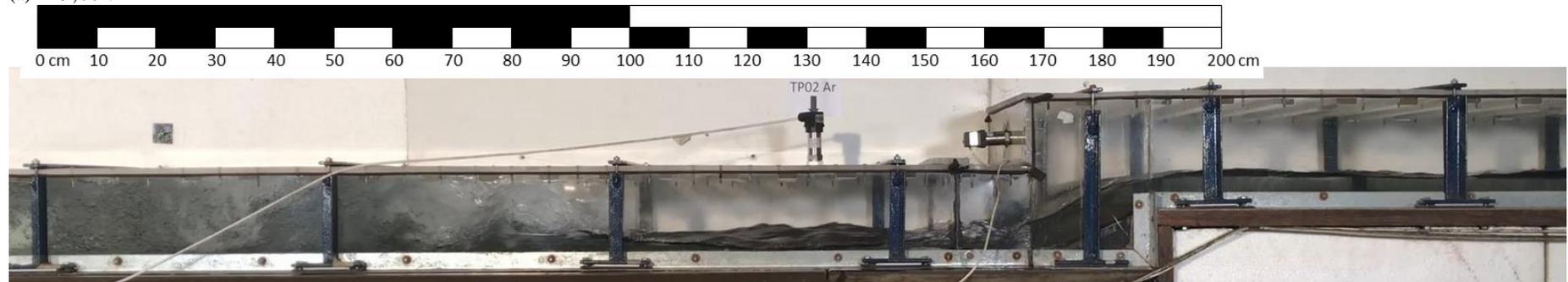


(l) 18,80 s

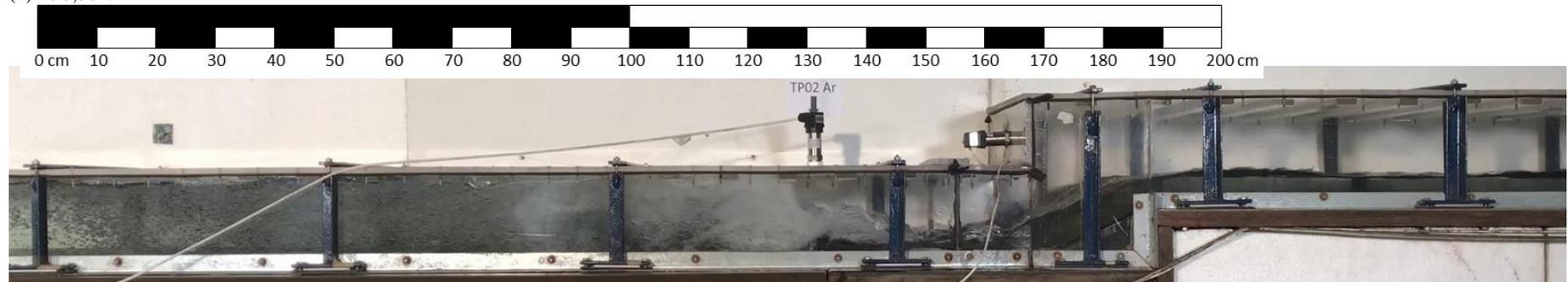
Figura 49. Ensaio N(1)J(5)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa.



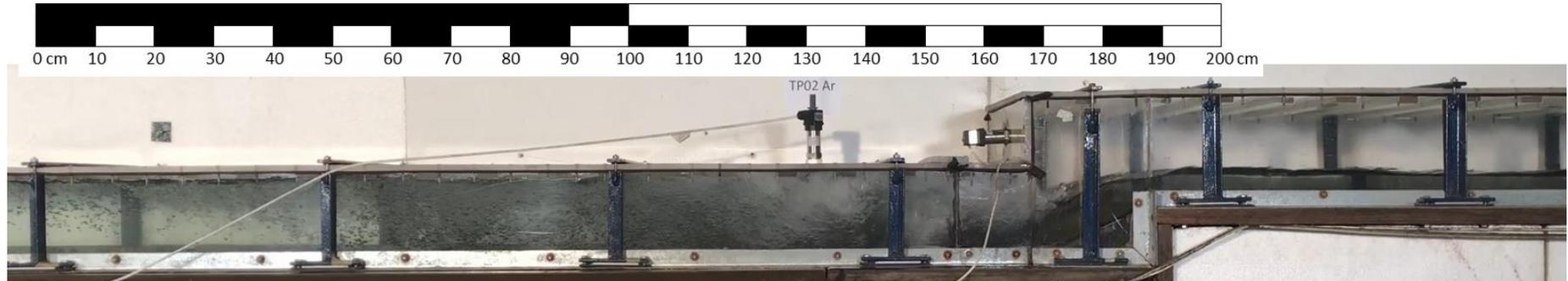
(a) 29,60 s



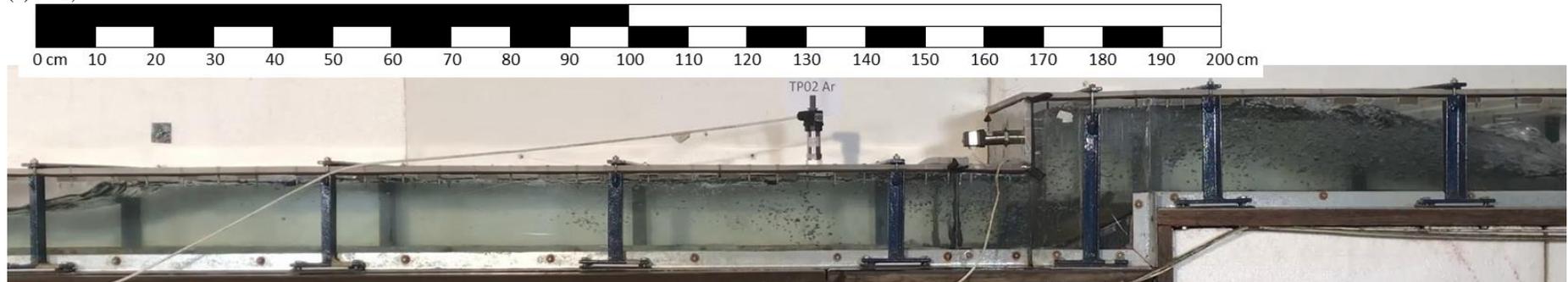
(b) 30,53 s



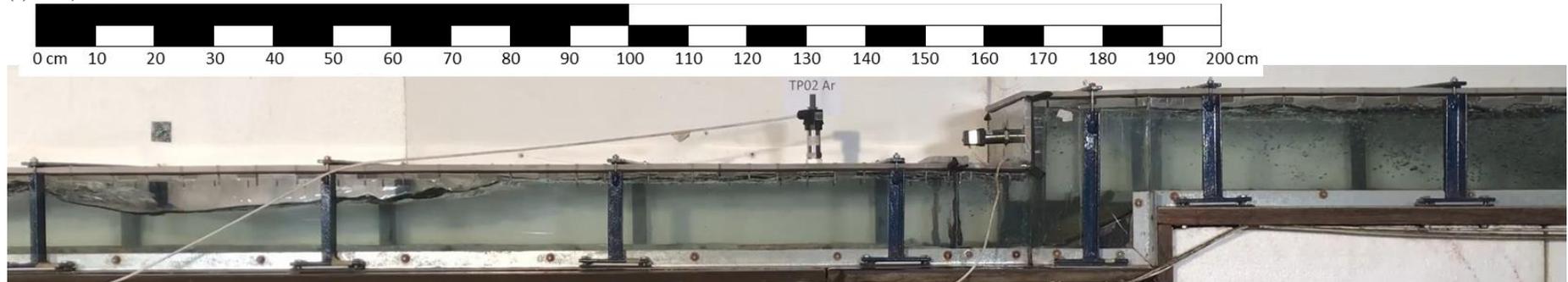
(c) 31,17 s



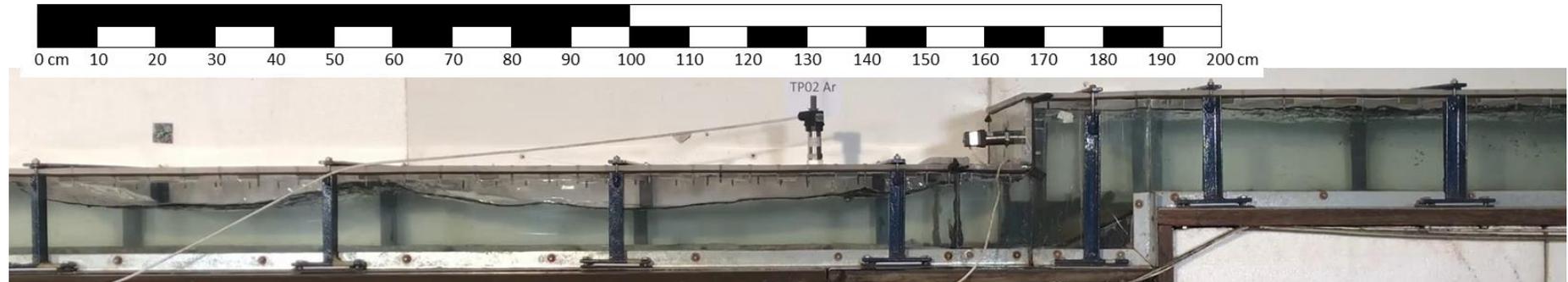
(d) 31,80 s



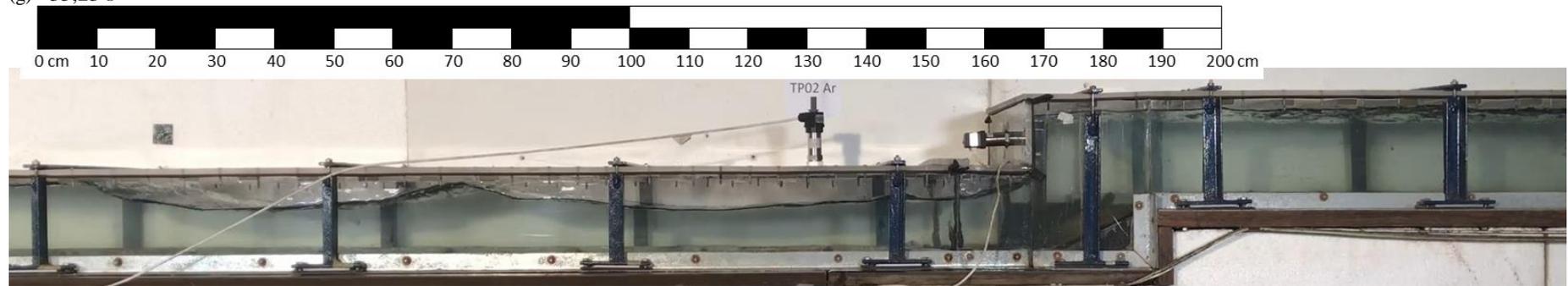
(e) 33,47 s



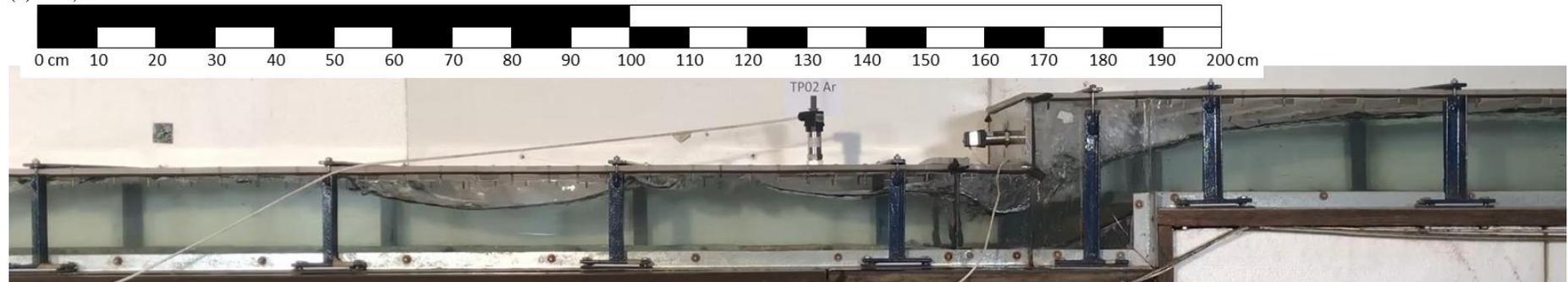
(f) 34,23 s



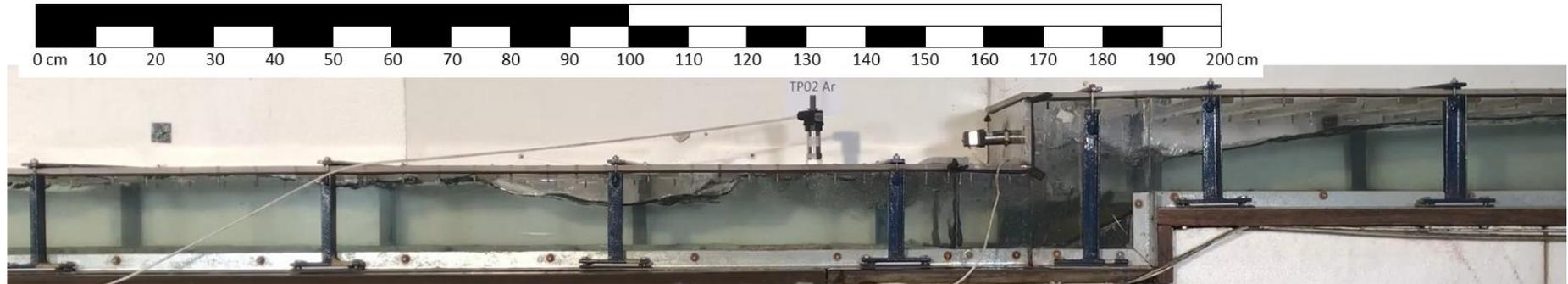
(g) 35,23 s



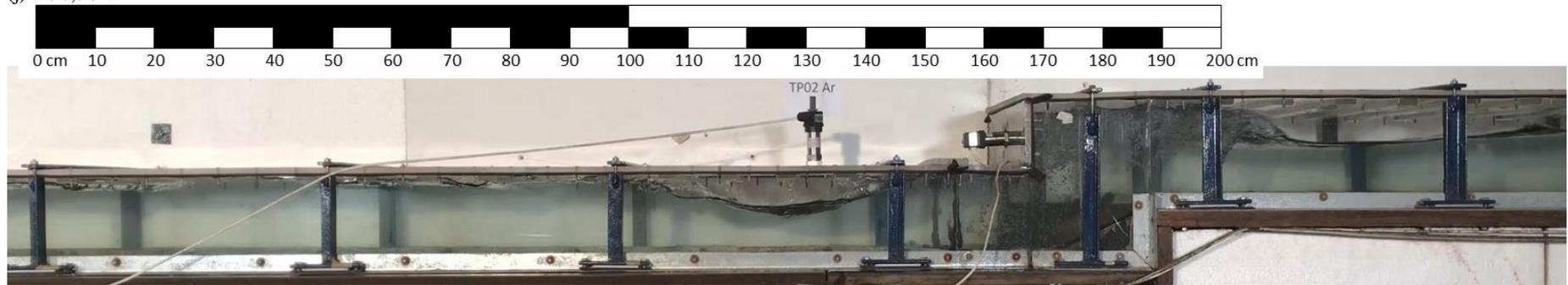
(h) 35,46 s



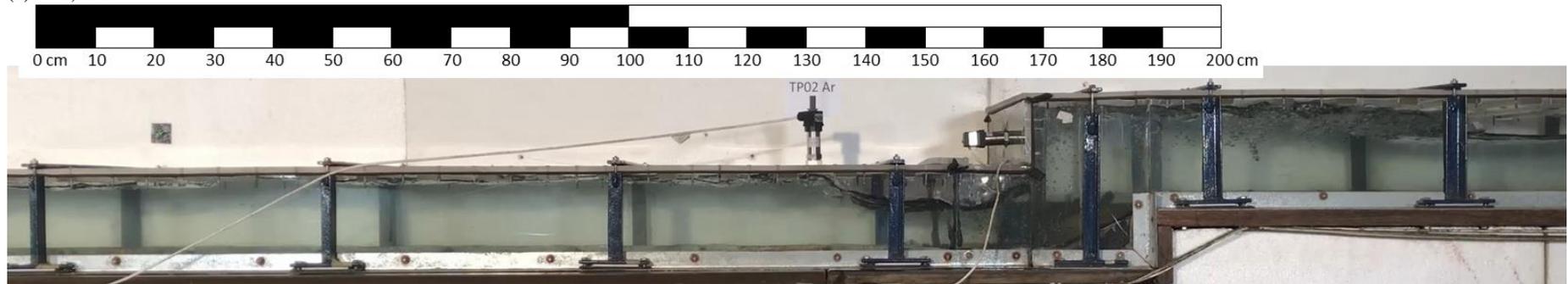
(i) 36,02 s



(j) 36,38 s



(k) 36,83 s



(l) 37,27 s

**Ensaio N(1)J(10)V(VL)**

A Figura 50 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(1)J(10)V(VL). Nesse ensaio, o degrau é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 51 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização e a passagem de um bolsão de ar pelo degrau. A Figura 52 apresenta o avanço da onda de choque e a passagem de bolsões de ar pela rampa.

Figura 50. Ensaio N(1)J(10)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

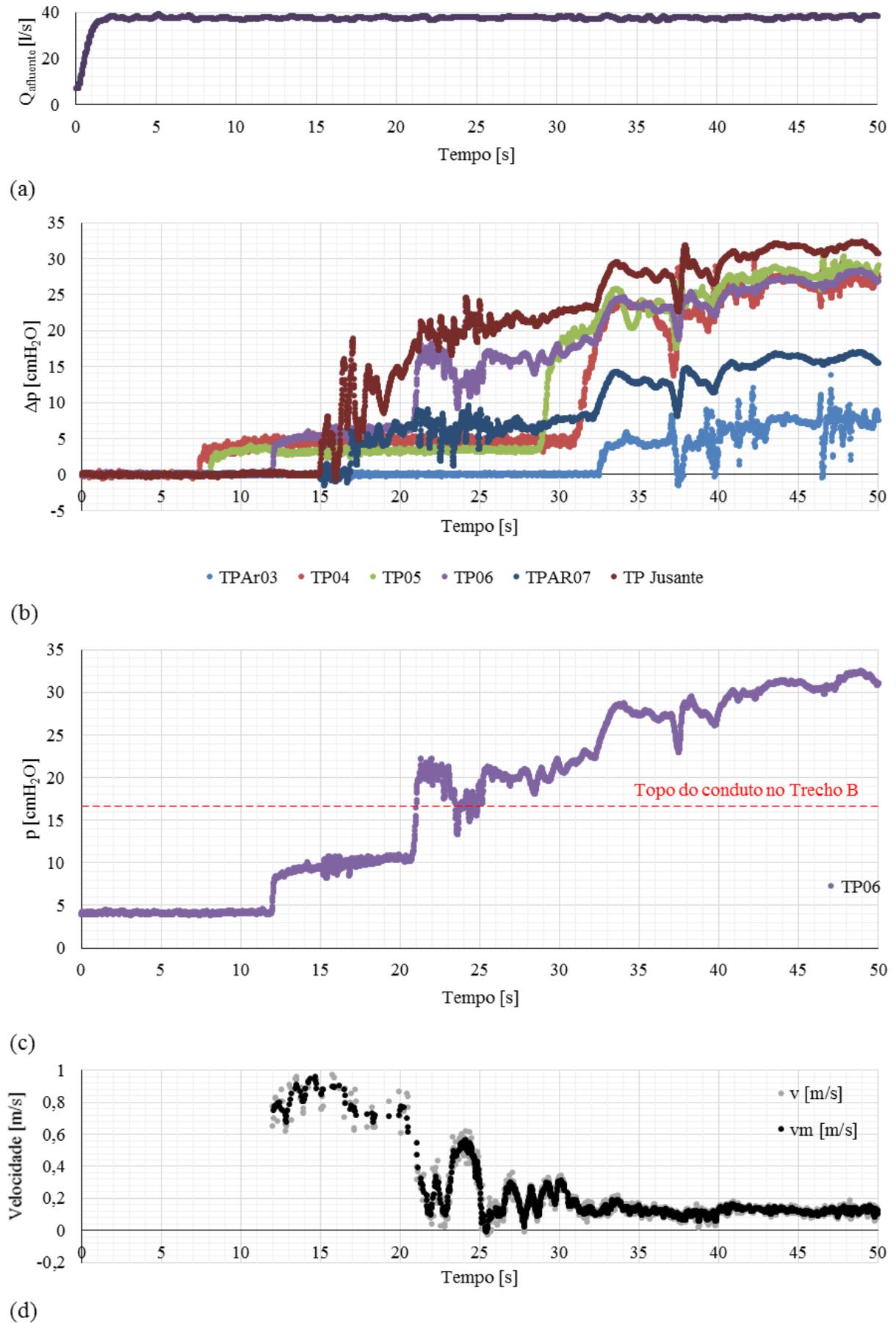
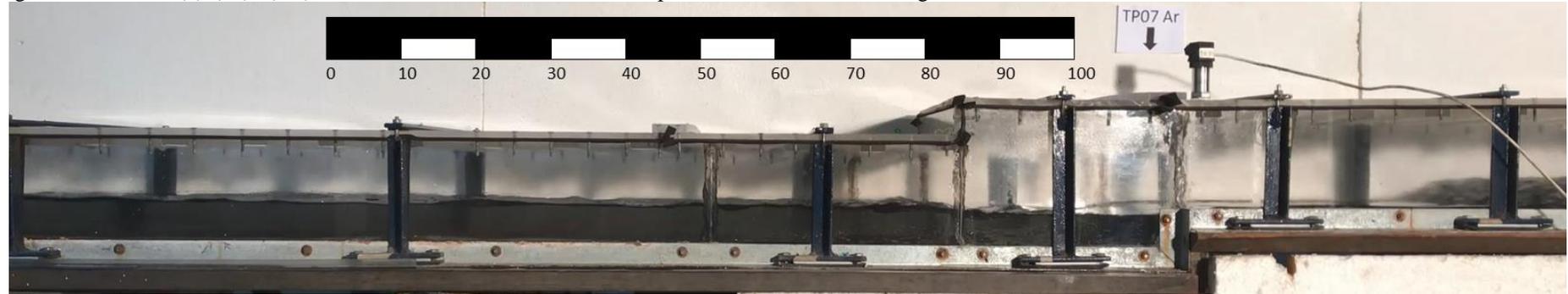
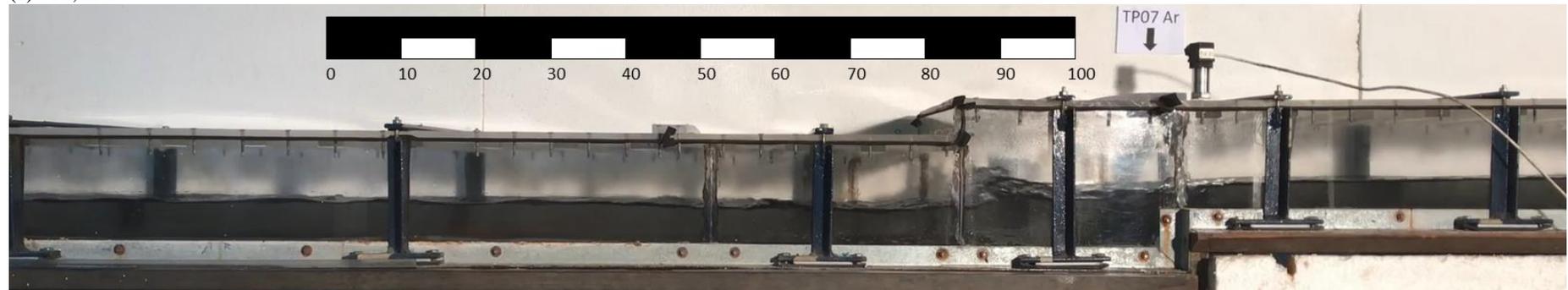


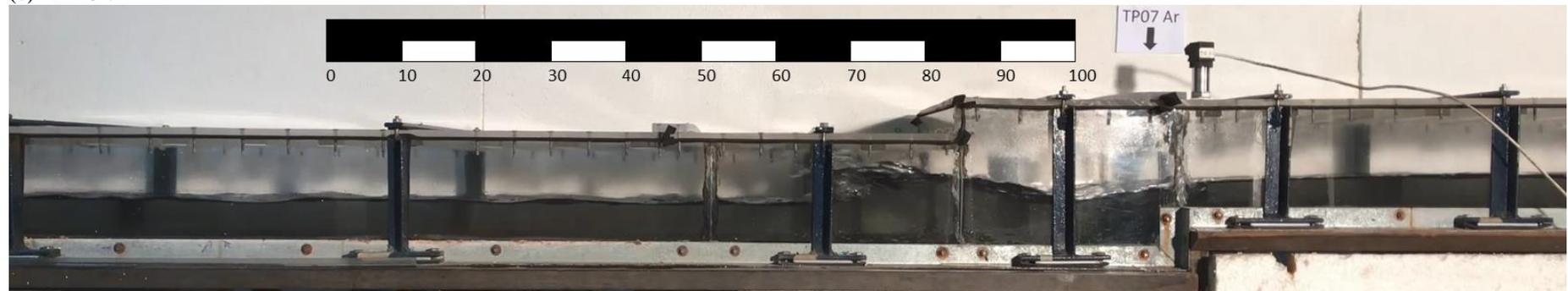
Figura 51. Ensaio N(1)J(10)V(VL) - Estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP no degrau.



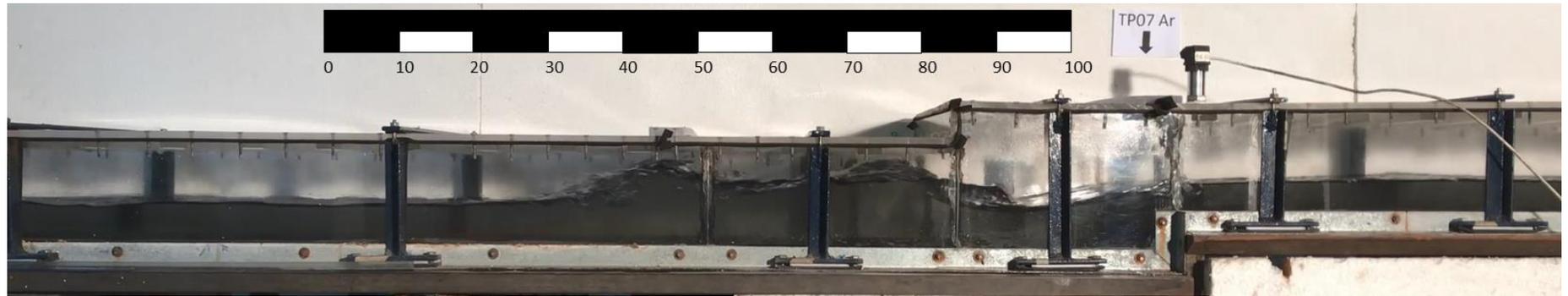
(a) 13,94 s



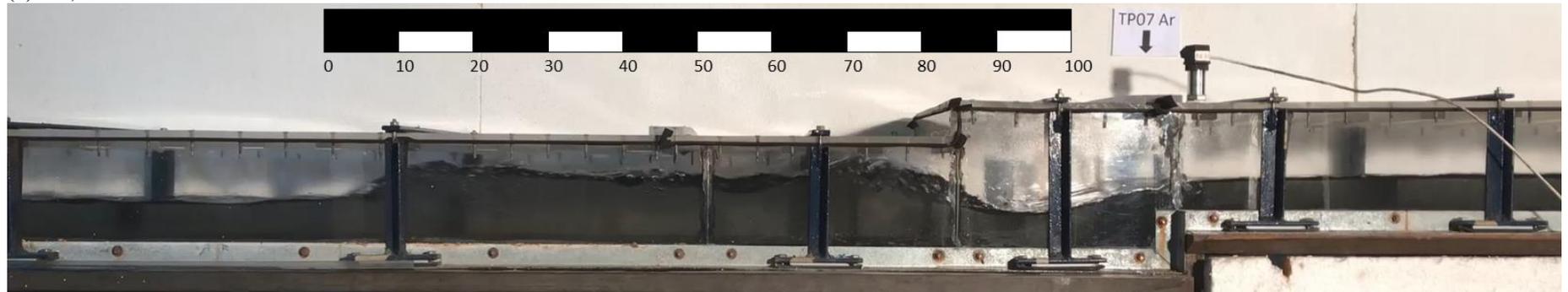
(b) 14,43 s



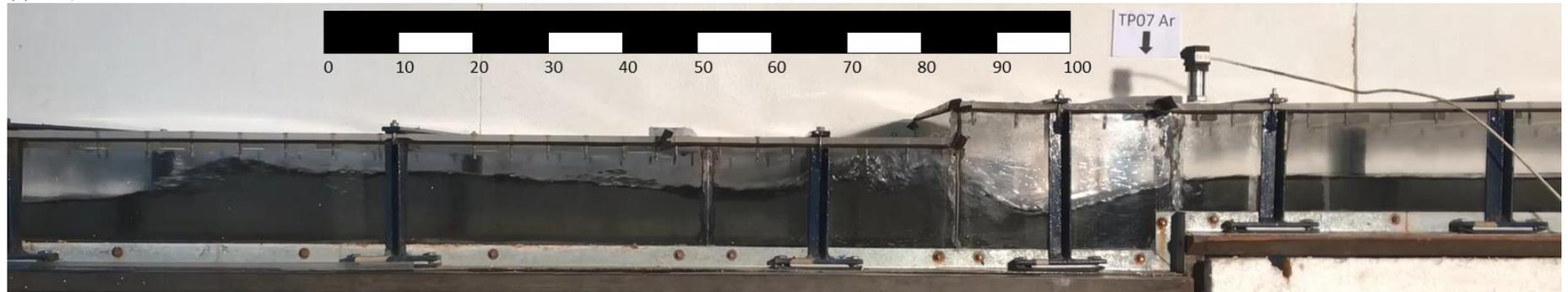
(c) 14,55 s



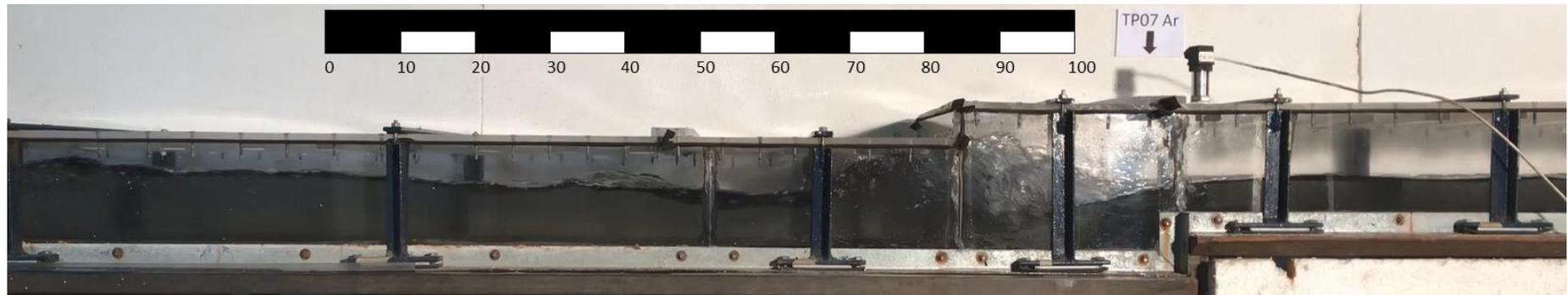
(d) 14,80 s



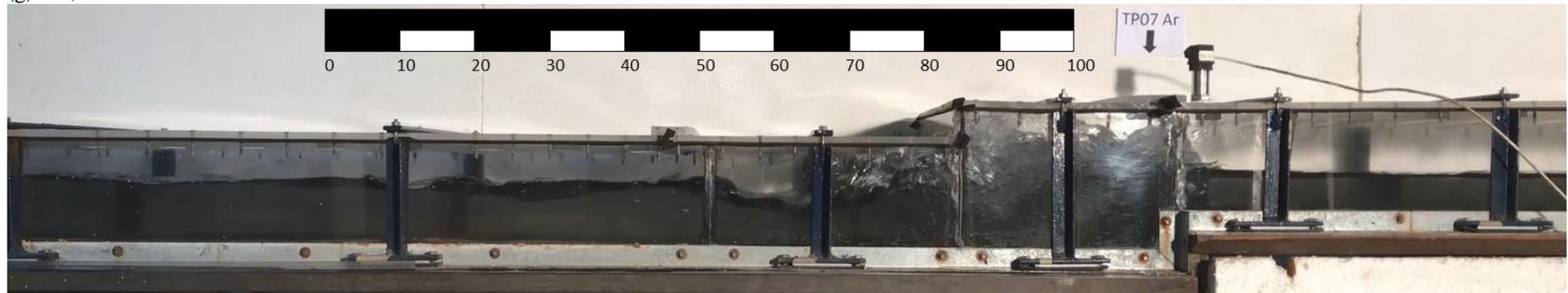
(e) 14,99 s



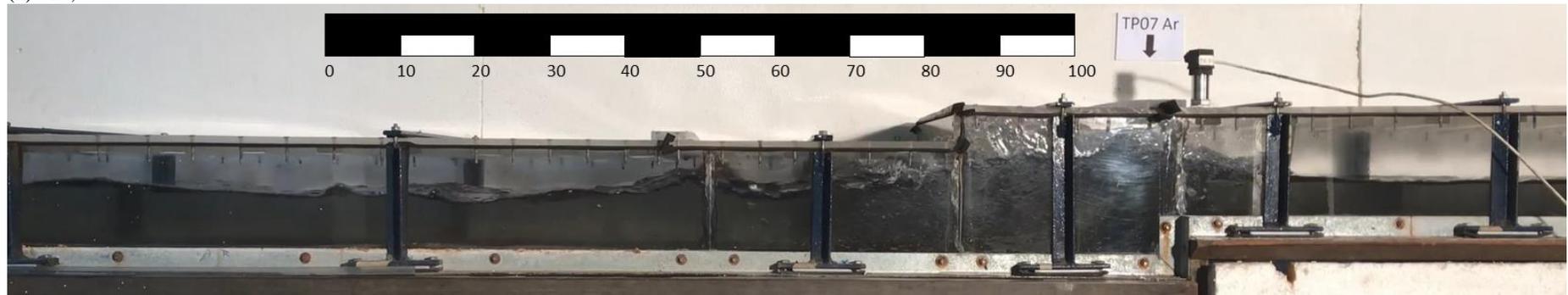
(f) 15,20 s



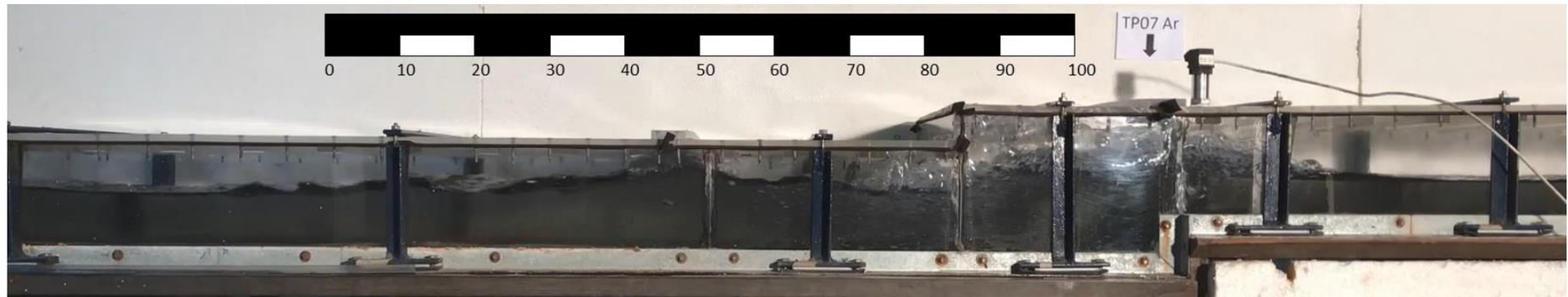
(g) 15,37 s



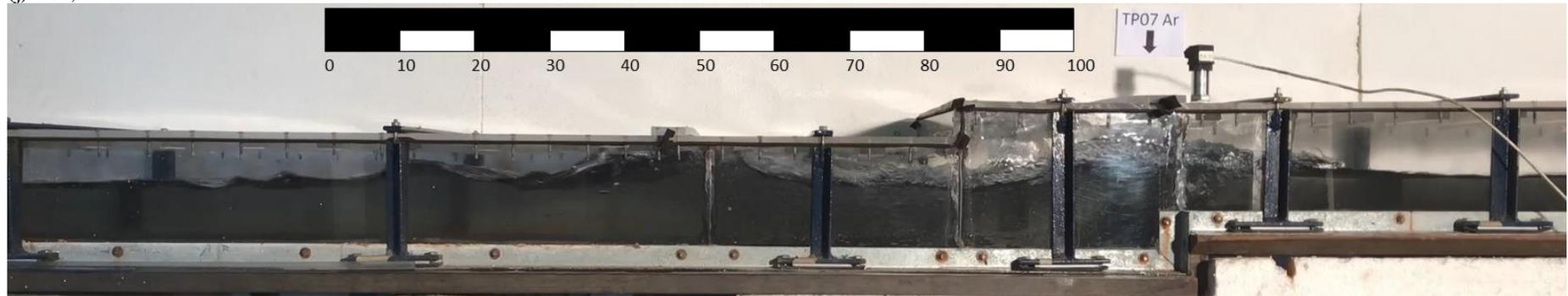
(h) 15,70 s



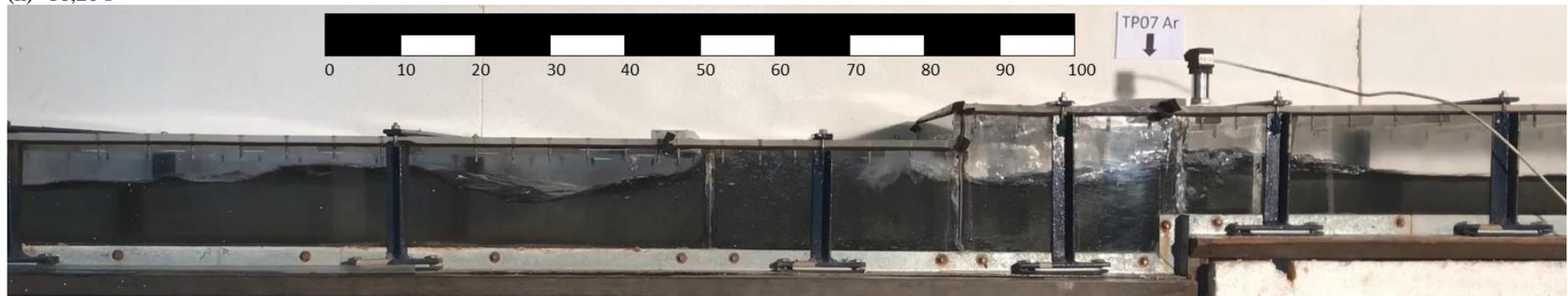
(i) 15,90 s



(j) 16,06 s

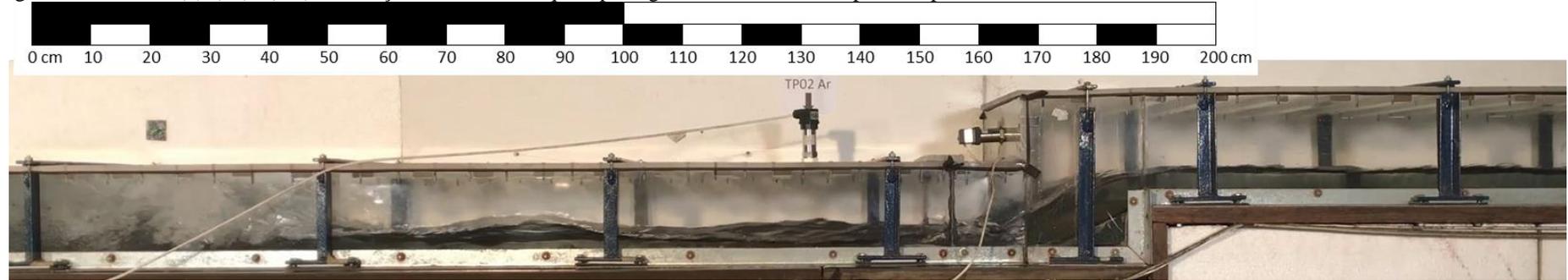


(k) 16,20 s

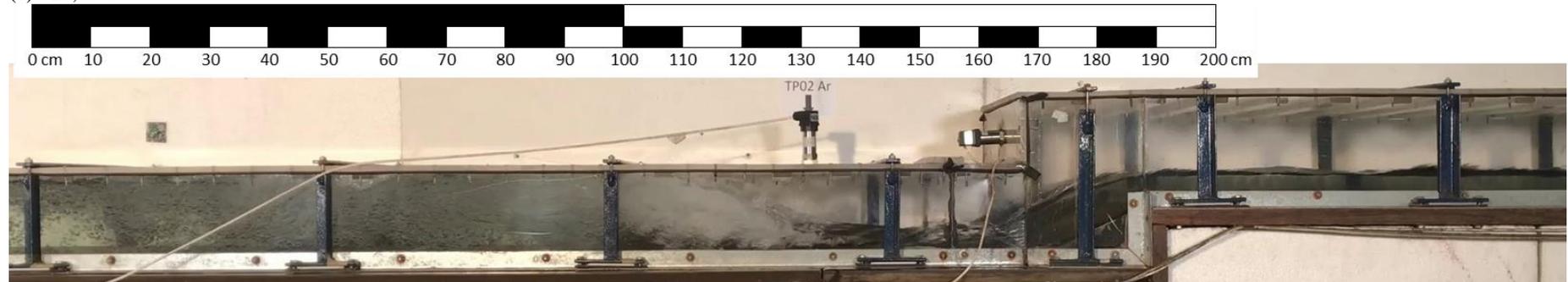


(l) 16,32 s

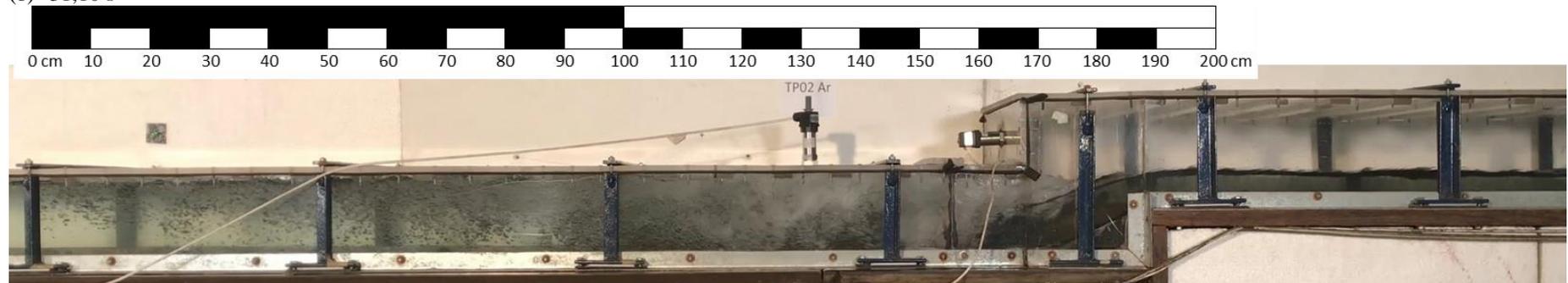
Figura 52. Ensaio N(1)J(10)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem dos bolsões de ar pela rampa



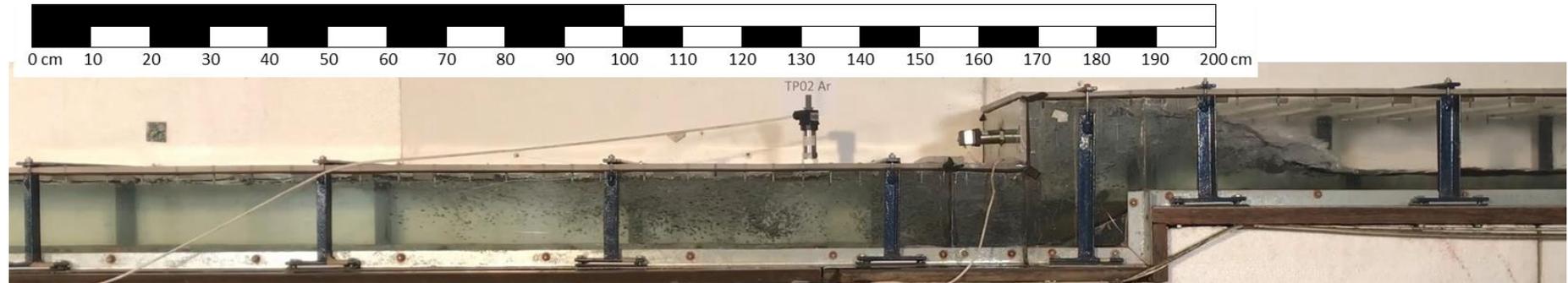
(a) 29,69 s



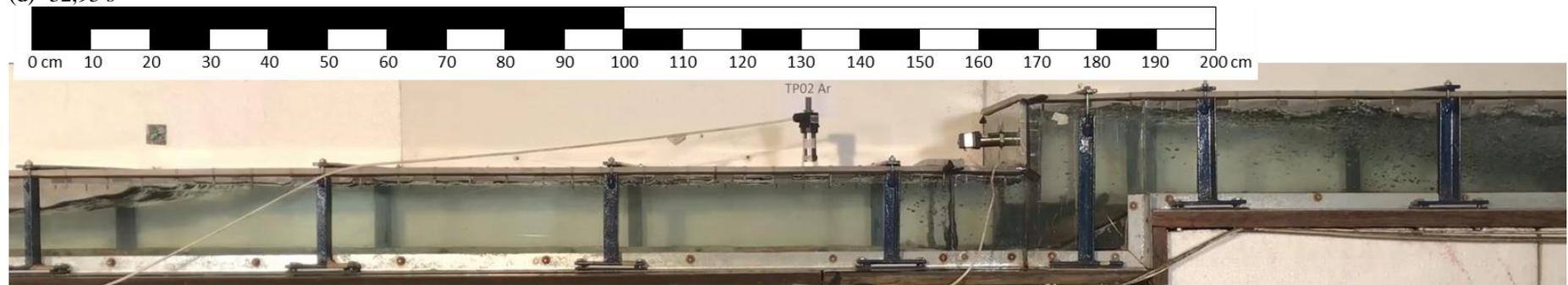
(b) 31,10 s



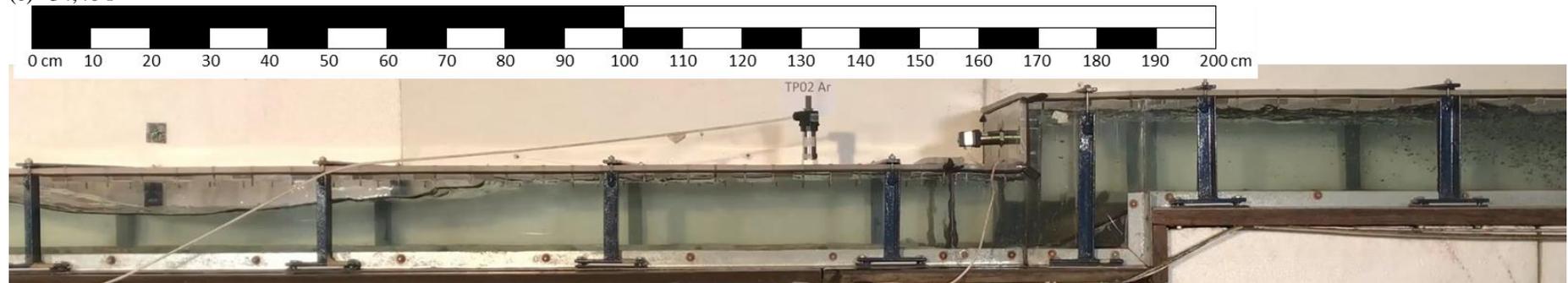
(c) 31,90 s



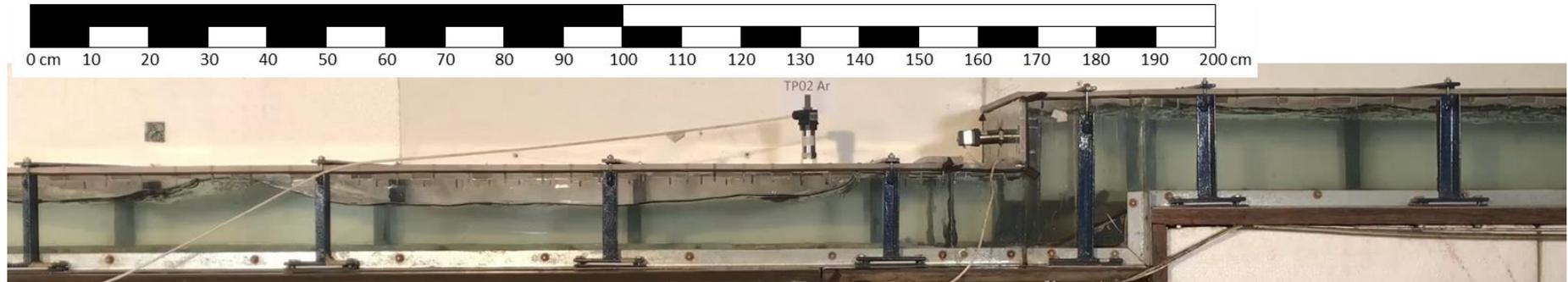
(d) 32,93 s



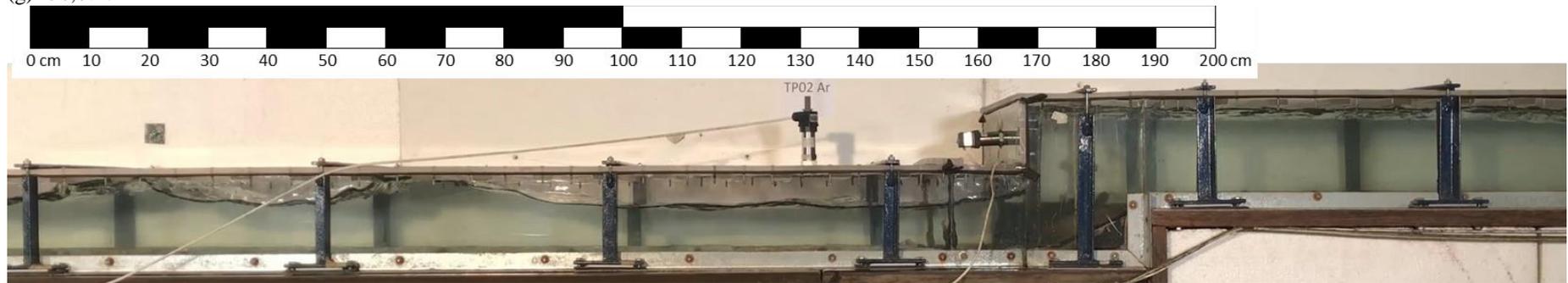
(e) 34,40 s



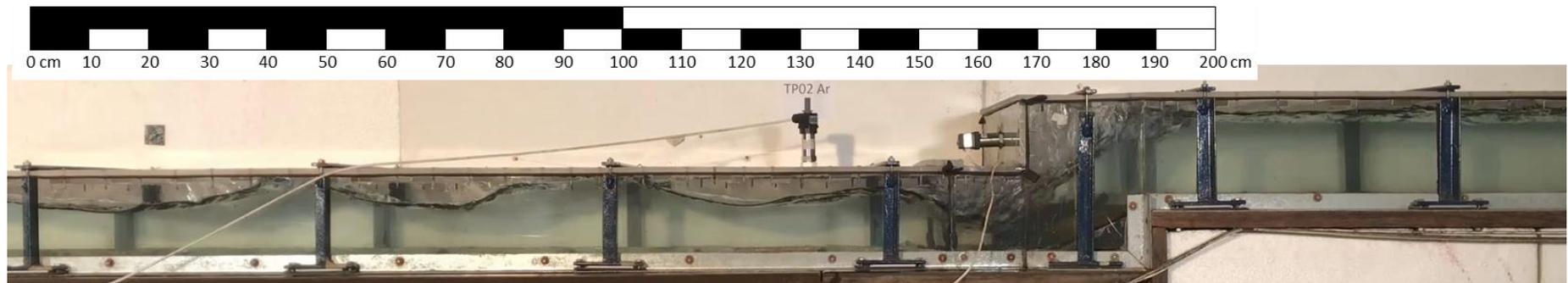
(f) 35,13 s



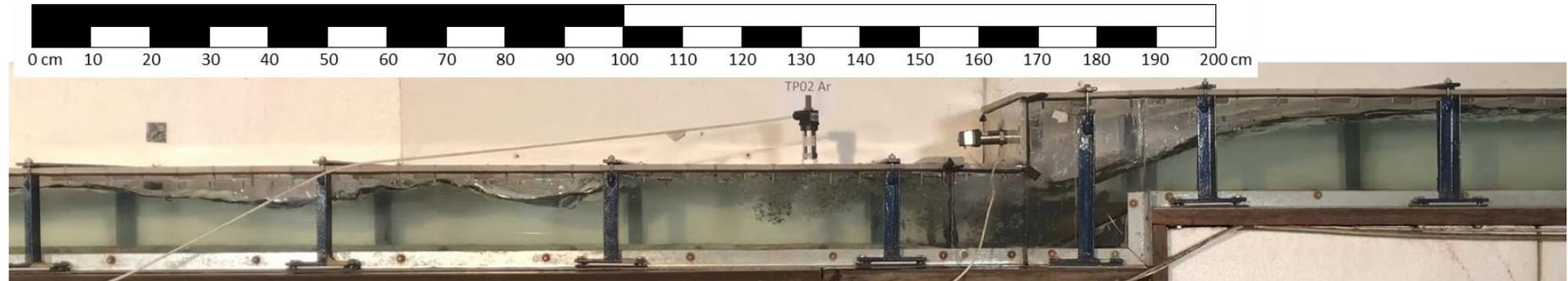
(g) 36,07 s



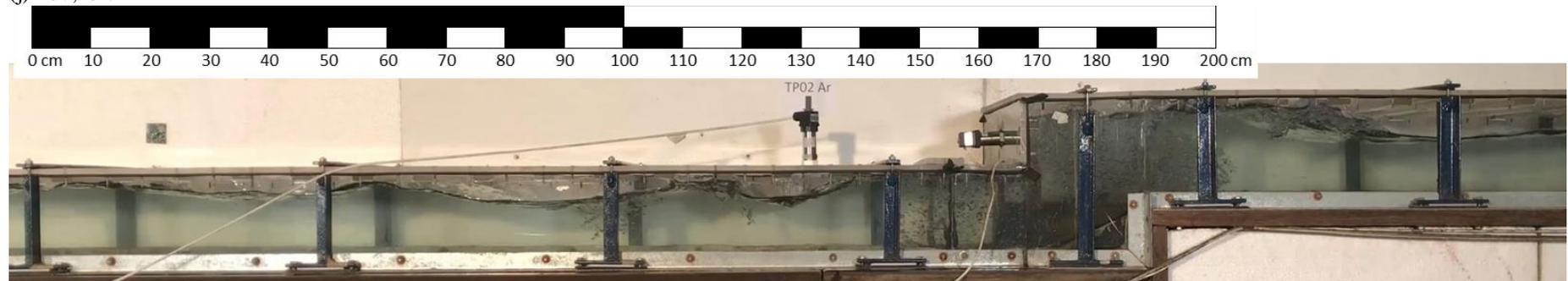
(h) 36,63 s



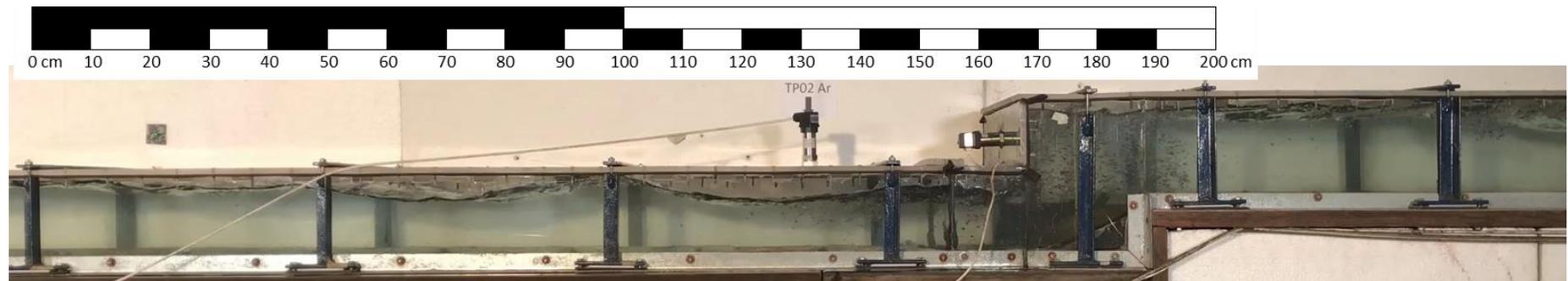
(i) 37,07 s



(j) 37,43 s



(k) 38,37 s



(l) 39,00 s

**Ensaio N(1)J(14)V(VL)**

A Figura 53 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(1)J(14)V(VL). Nesse ensaio, o degrau é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 54 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização e a passagem de um bolsão de ar pelo degrau. A Figura 55 apresenta o avanço da onda de choque e a passagem de bolsões de ar pela rampa.

Figura 53. Ensaio N(1)J(14)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

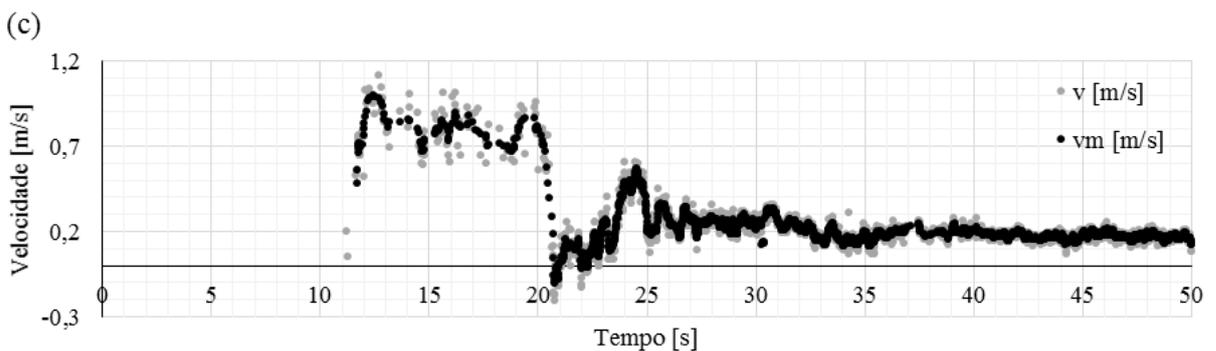
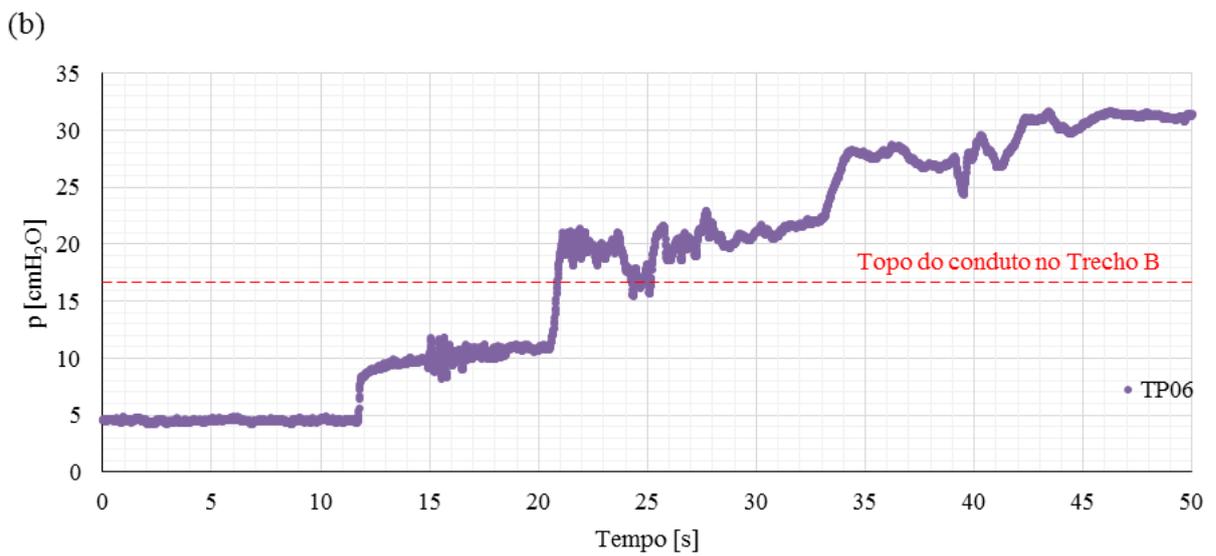
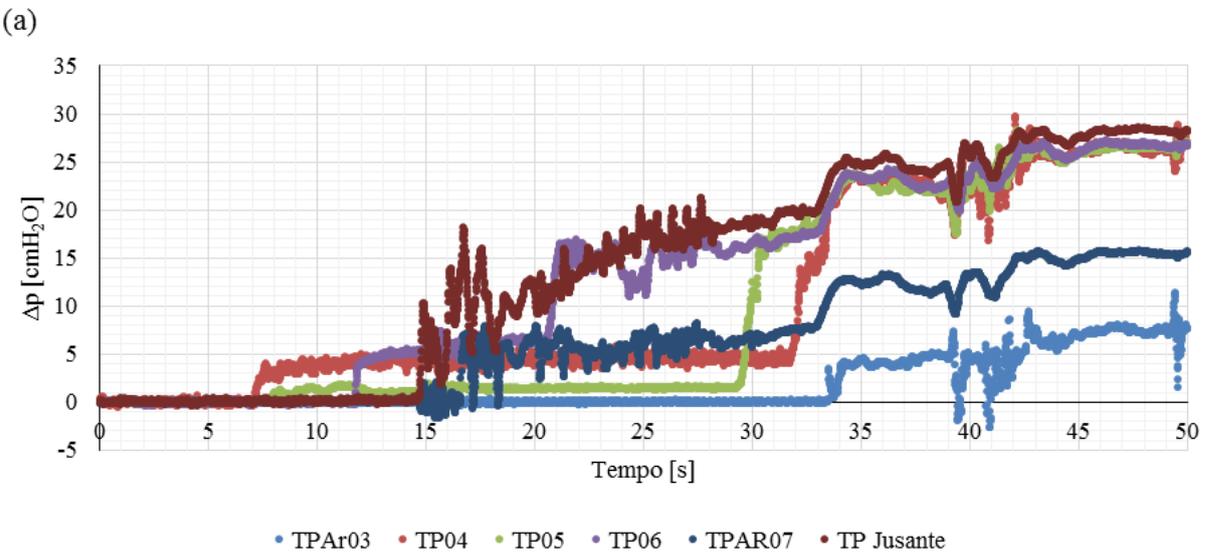
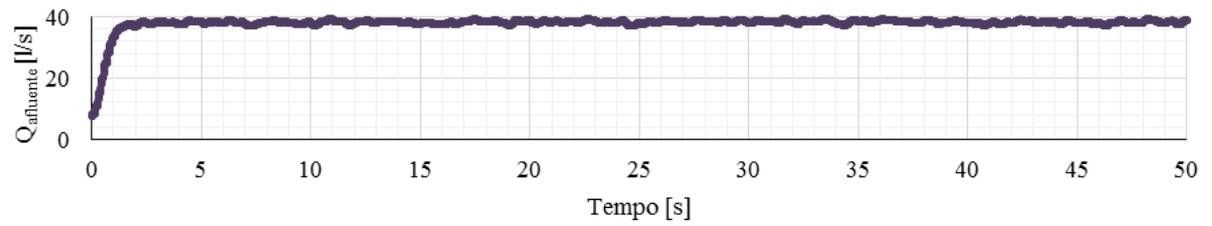
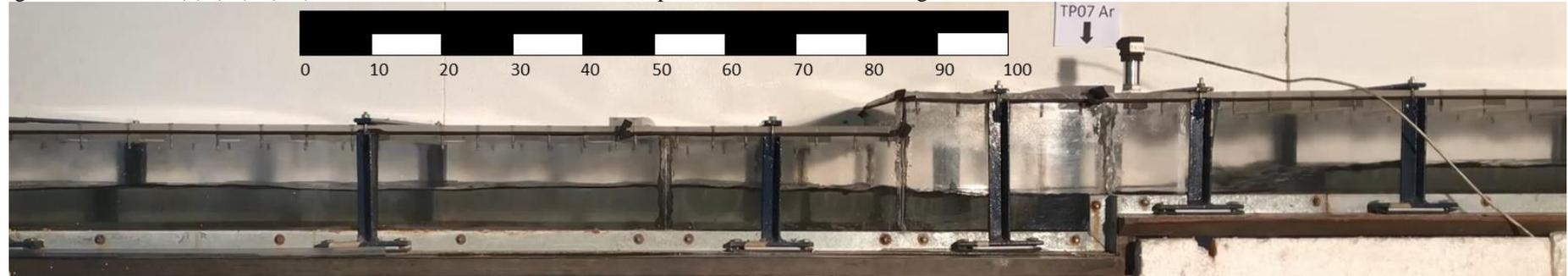
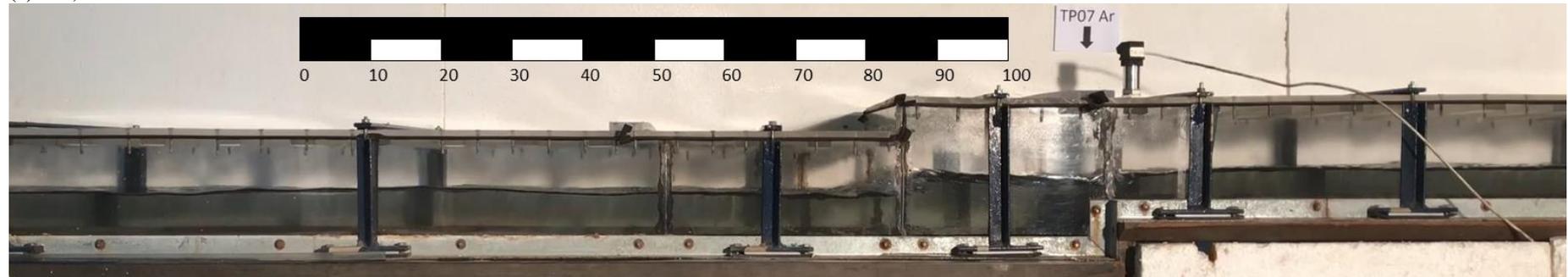


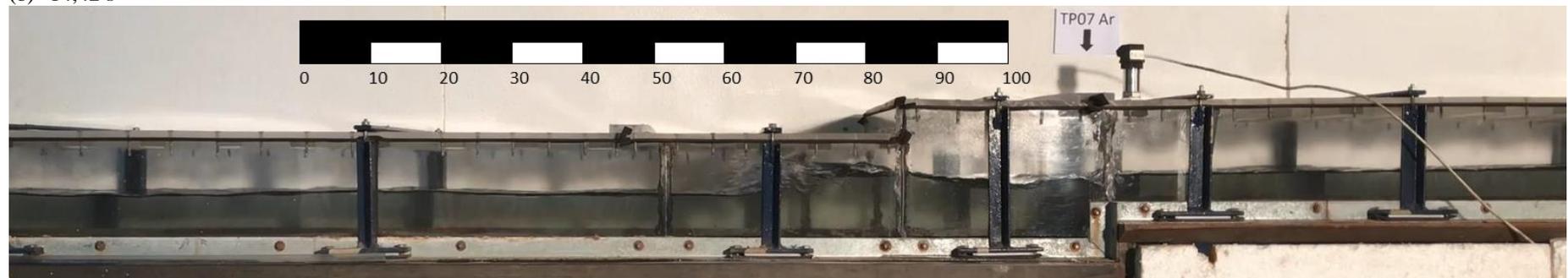
Figura 54. Ensaio N(1)J(14)V(VL) - Estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP no degrau



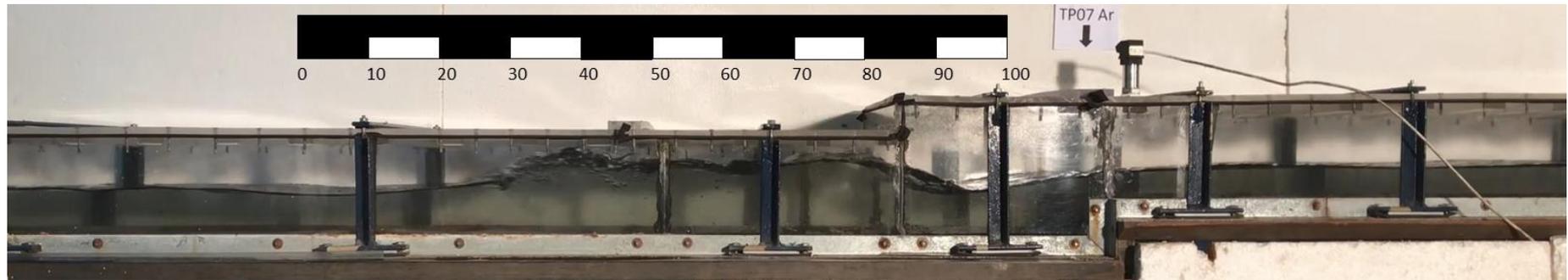
(a) 14,05 s



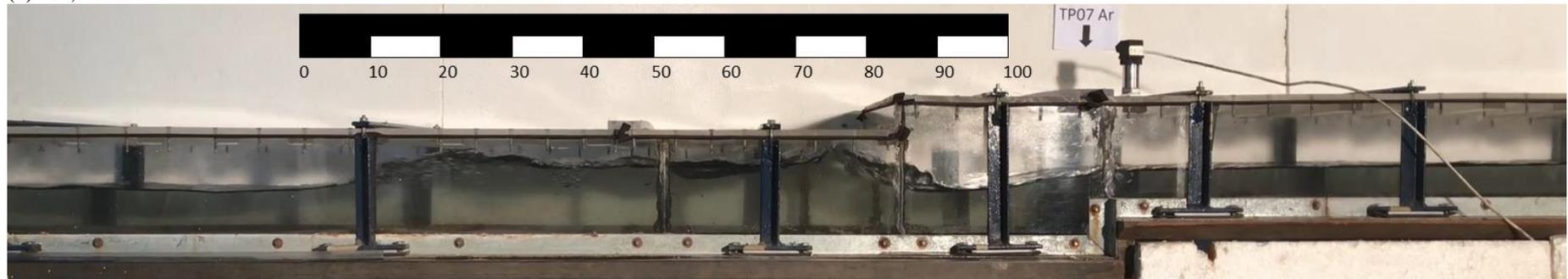
(b) 14,42 s



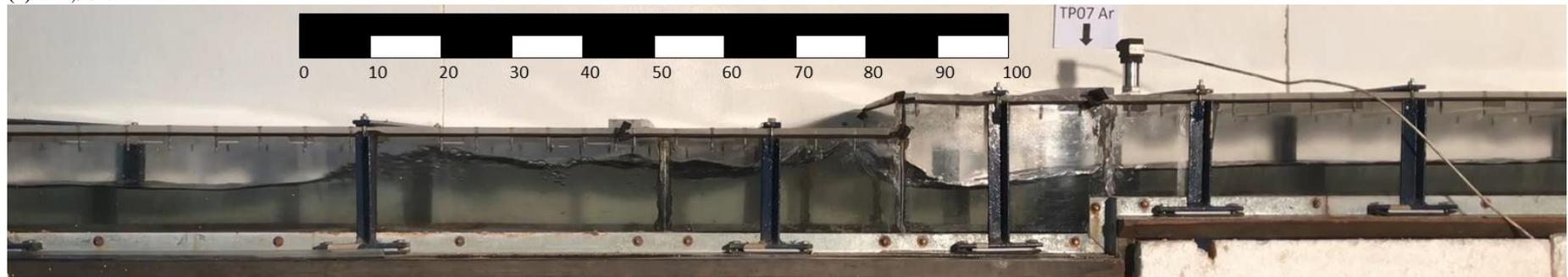
(c) 14,53 s



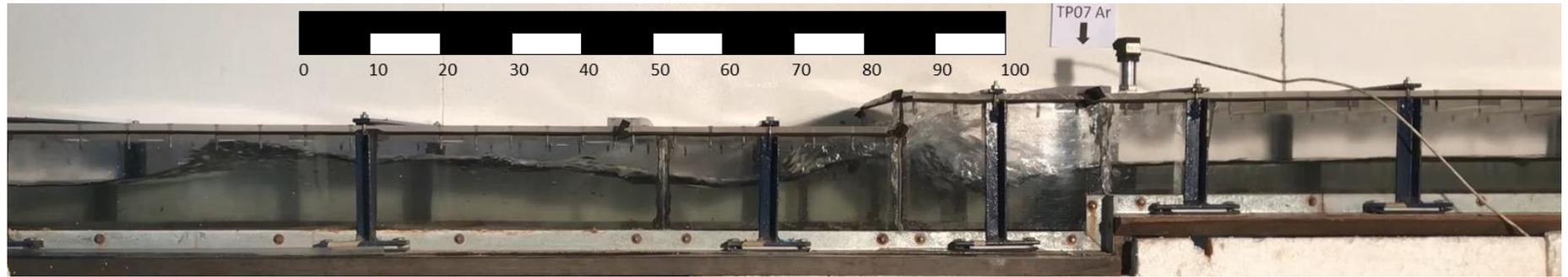
(d) 14,77 s



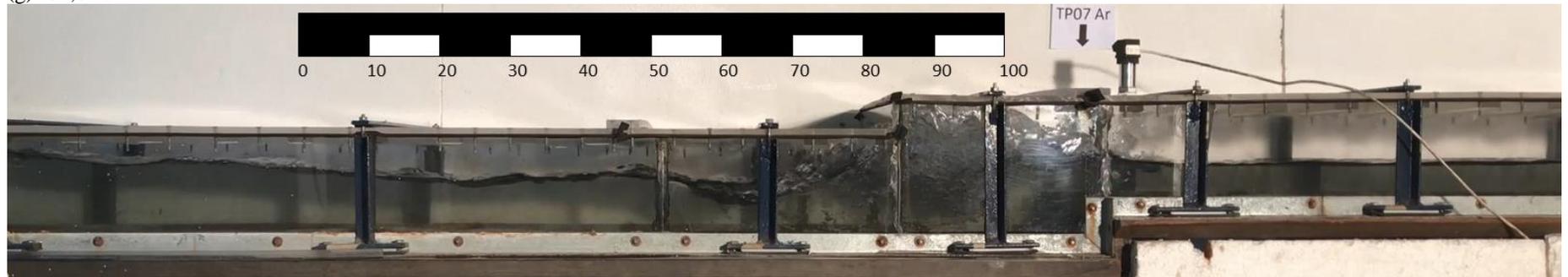
(e) 14,93 s



(f) 14,97 s

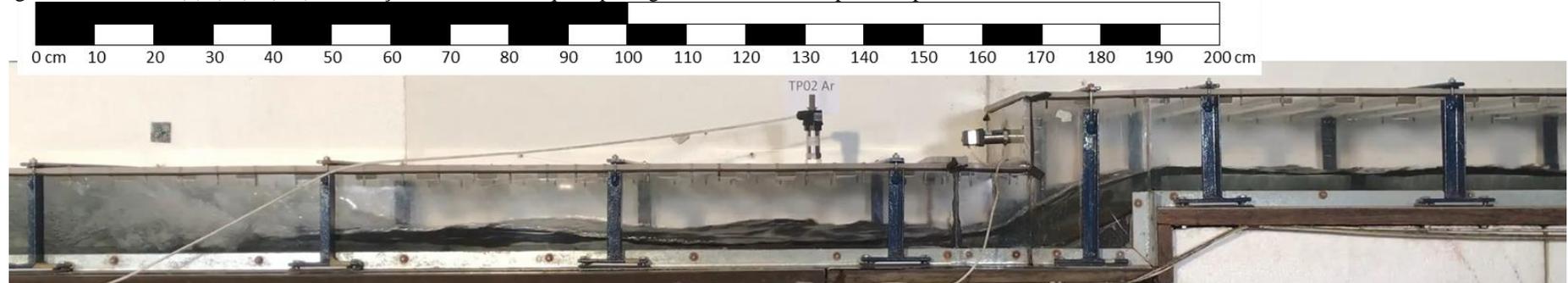


(g) 15,13 s

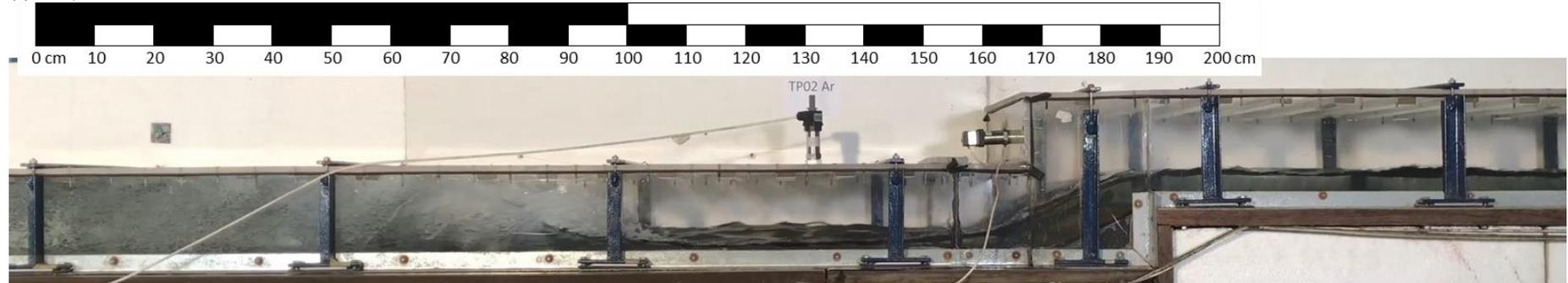


(h) 15,40 s

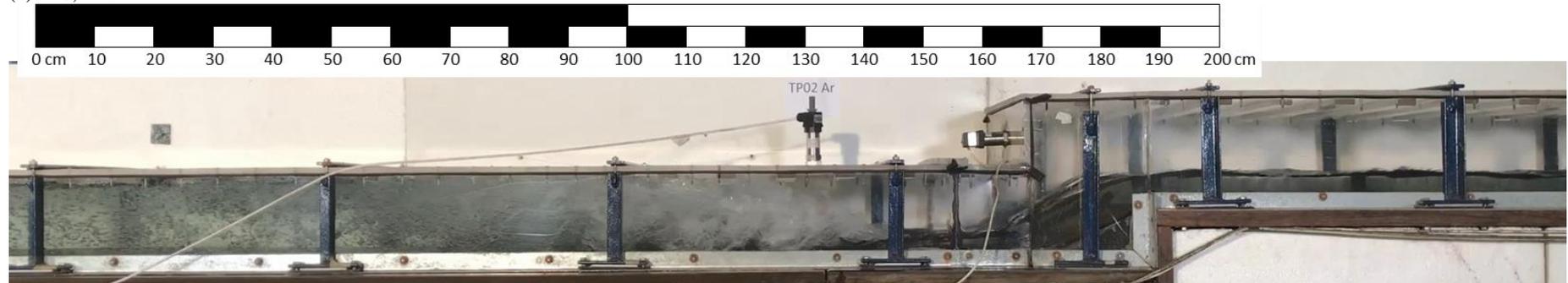
Figura 55. Ensaio N(1)J(14)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa.



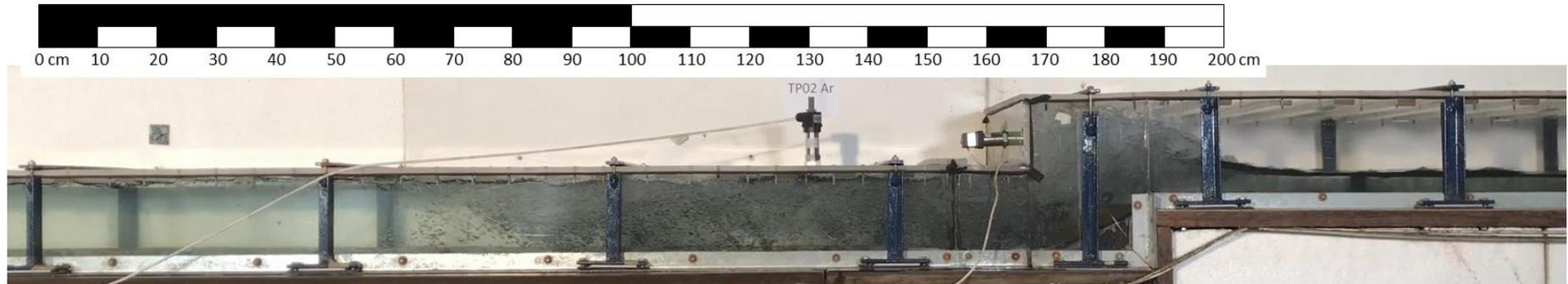
(a) 30,56 s



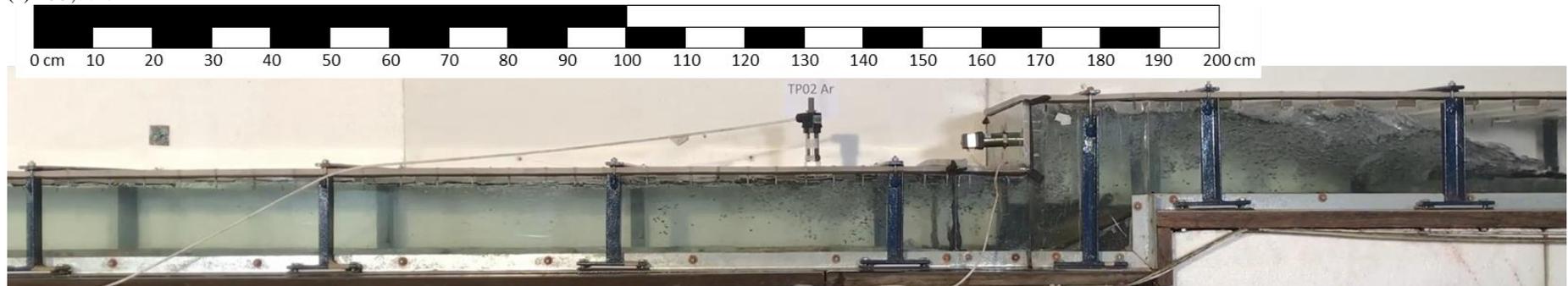
(b) 31,50 s



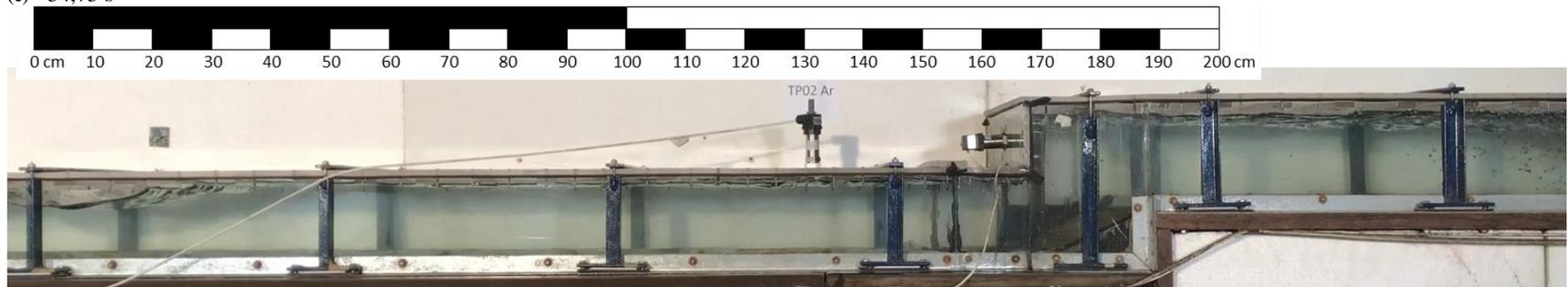
(c) 32,13 s



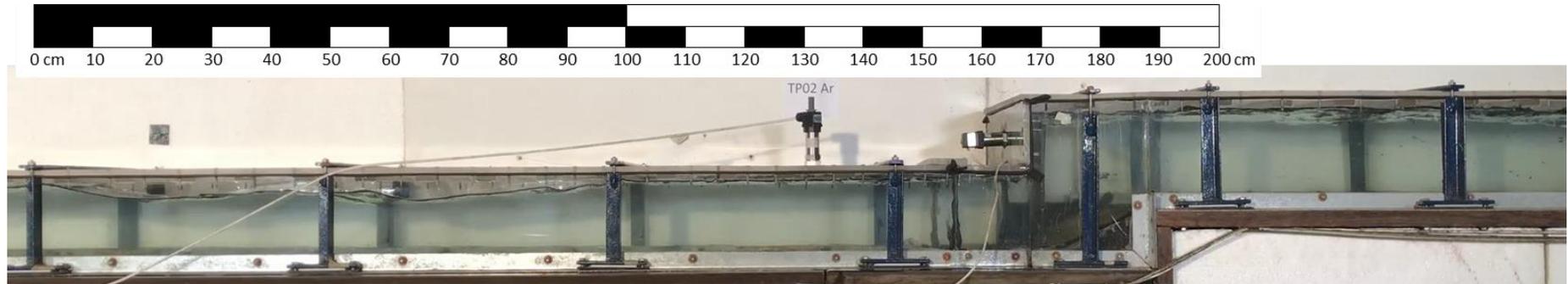
(d) 33,77 s



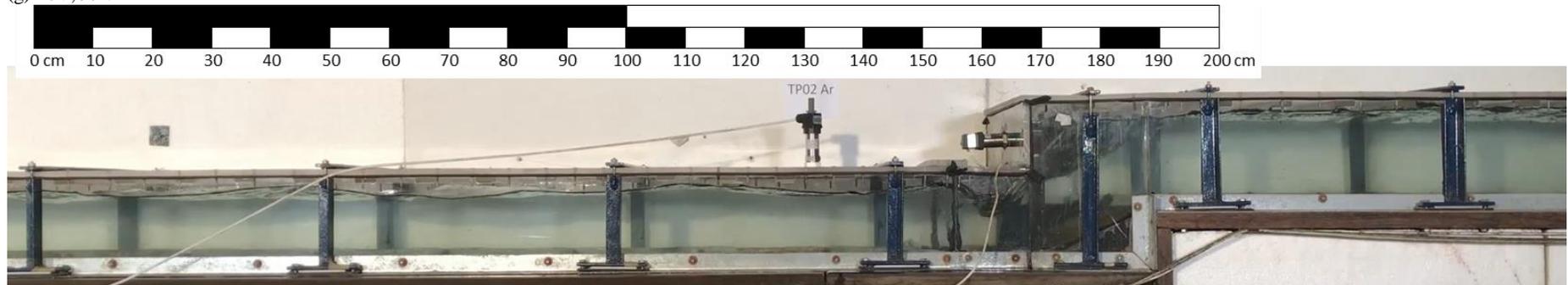
(e) 34,73 s



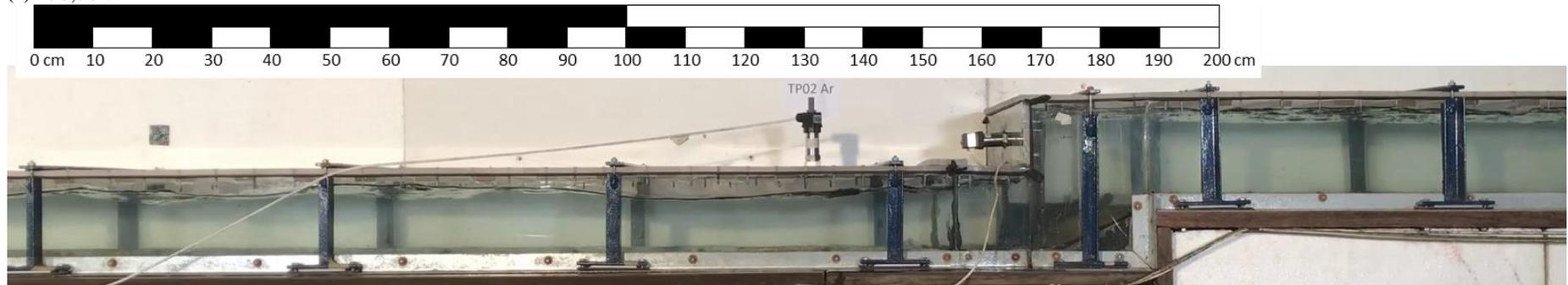
(f) 36,73 s



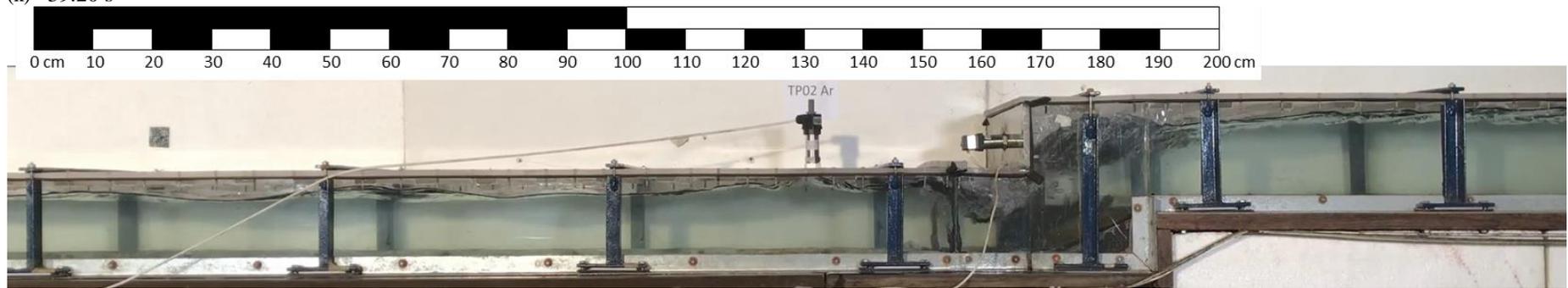
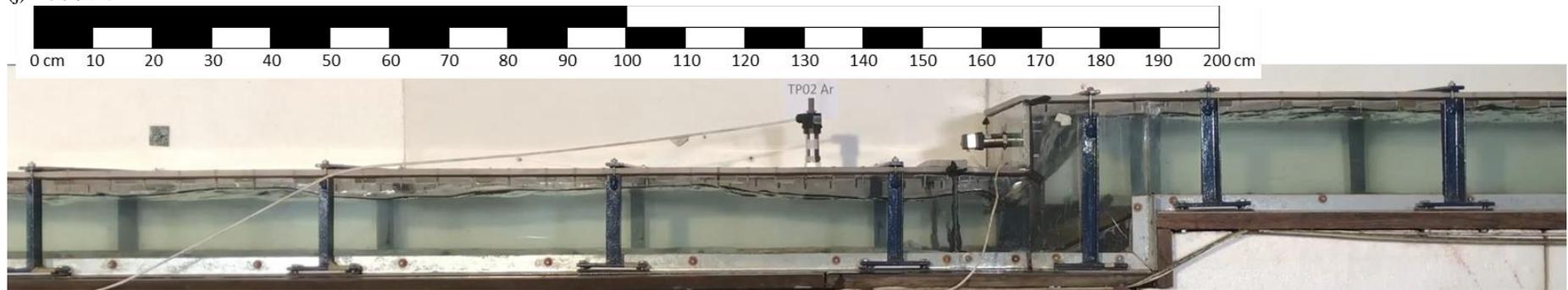
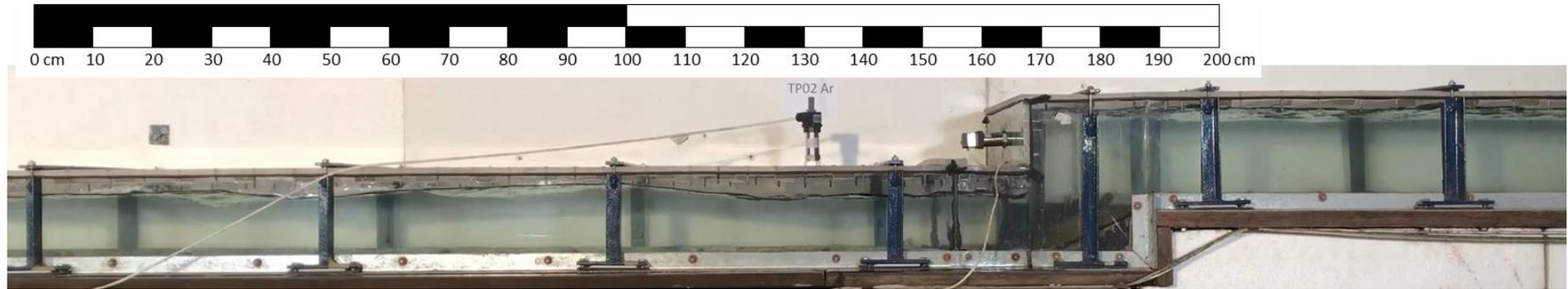
(g) 37,80 s

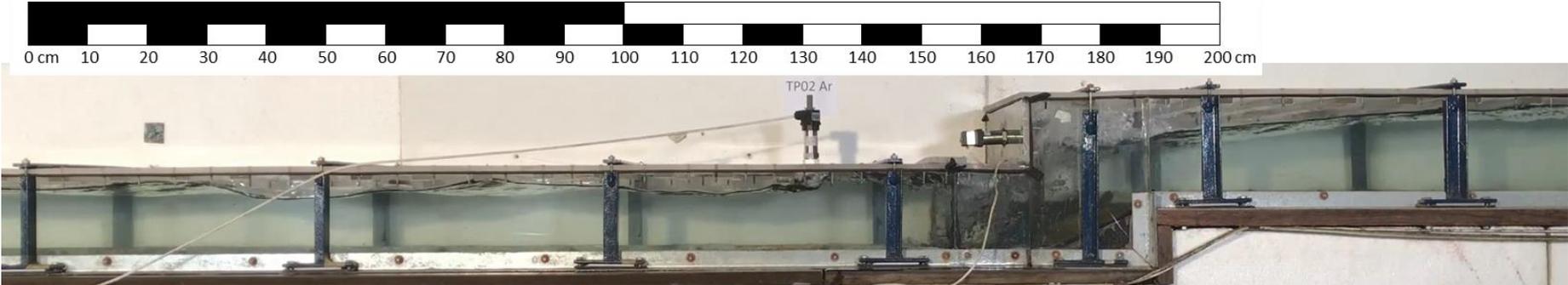


(h) 38,30 s



(i) 38.70 s



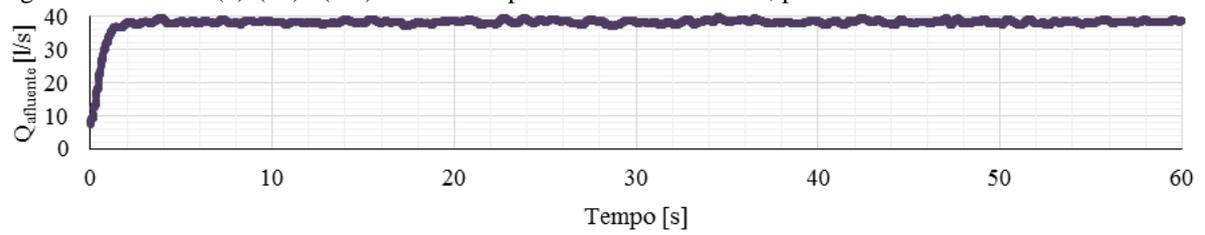


(m) 39.80 s

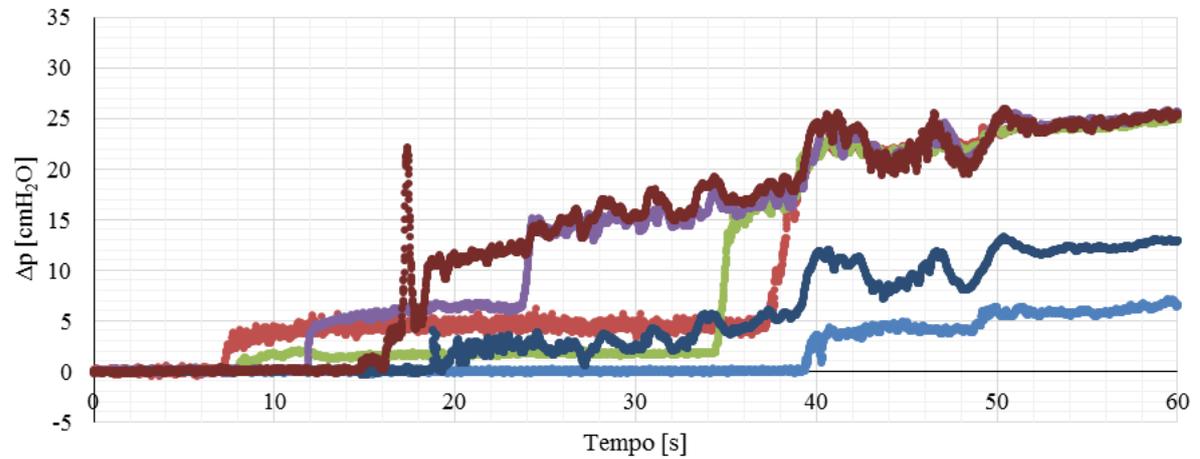
**Ensaio N(1)J(27)V(VL)**

A Figura 56 apresenta os dados de vazão afluente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(1)J(27)V(VL). Nesse ensaio, nenhum mecanismo de aprisionamento de ar estabeleceu-se no degrau com a chegada da frente de enchimento. A Figura 57 indica a chegada da frente de enchimento e a entrada em carga do trecho de jusante sem o aprisionamento de bolsões de ar. A Figura 58 apresenta o avanço da onda de choque pela rampa.

Figura 56. Ensaio N(1)J(27)V(VL) - Séries temporais de vazão afluyente, pressão e velocidade.

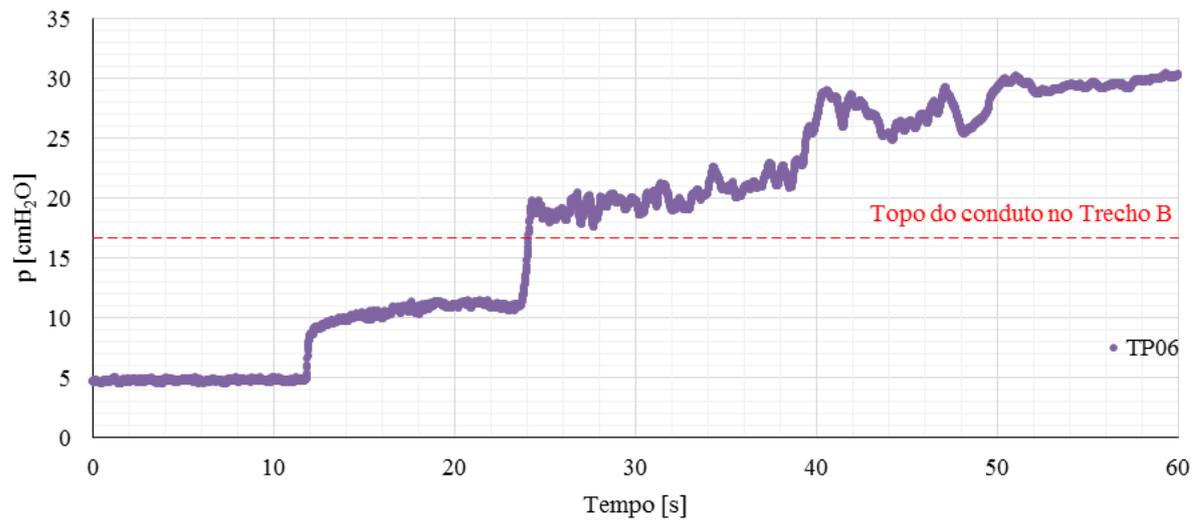


(a)

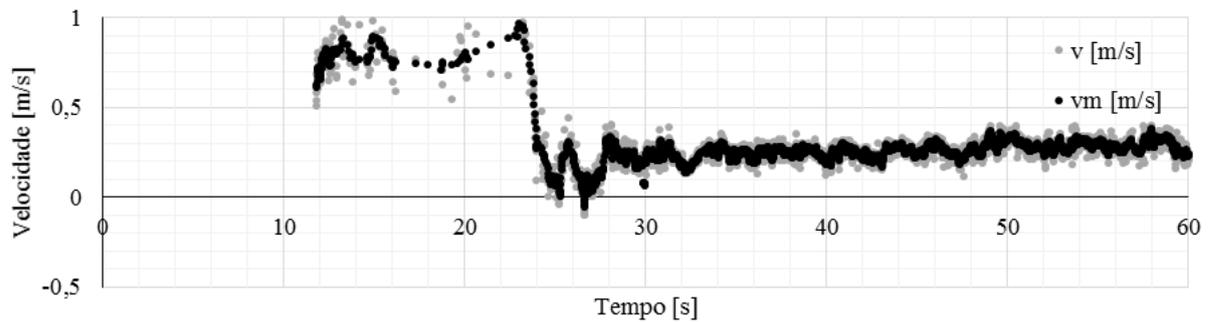


• TPAr03 • TP04 • TP05 • TP06 • TPAr07 • TP Jusante

(b)

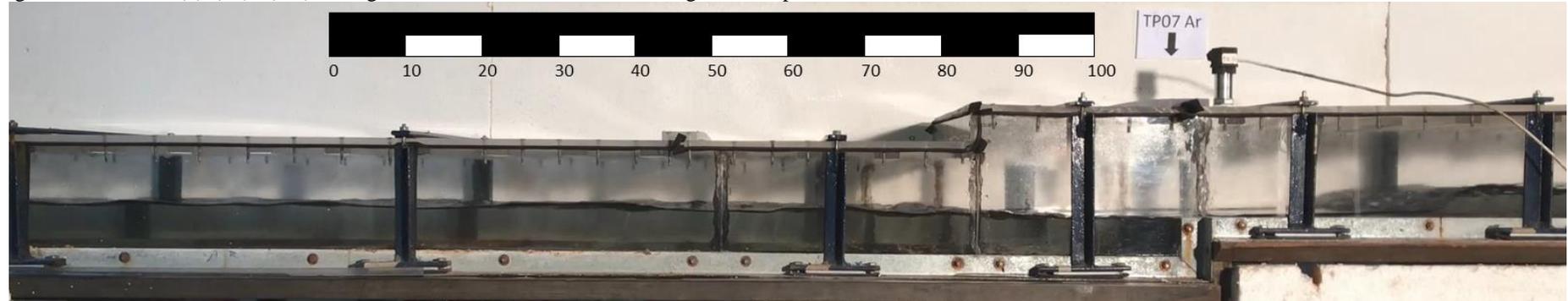


(c)

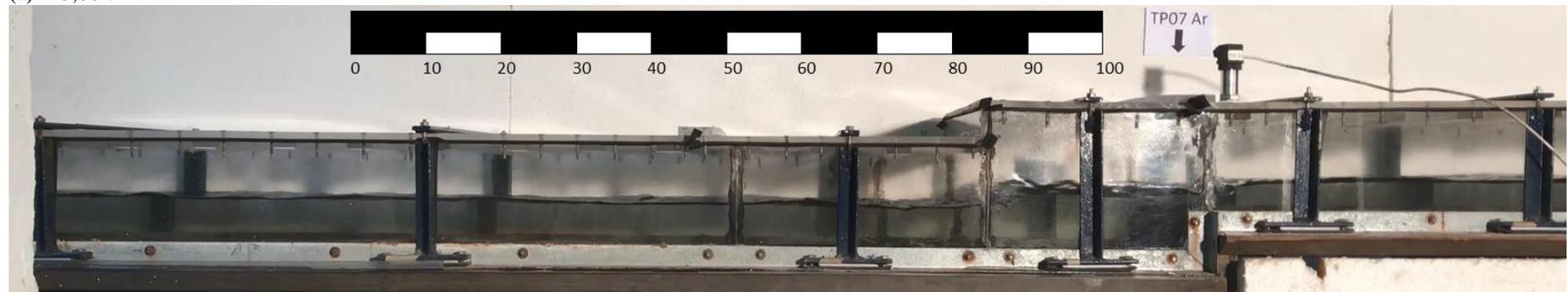


(d)

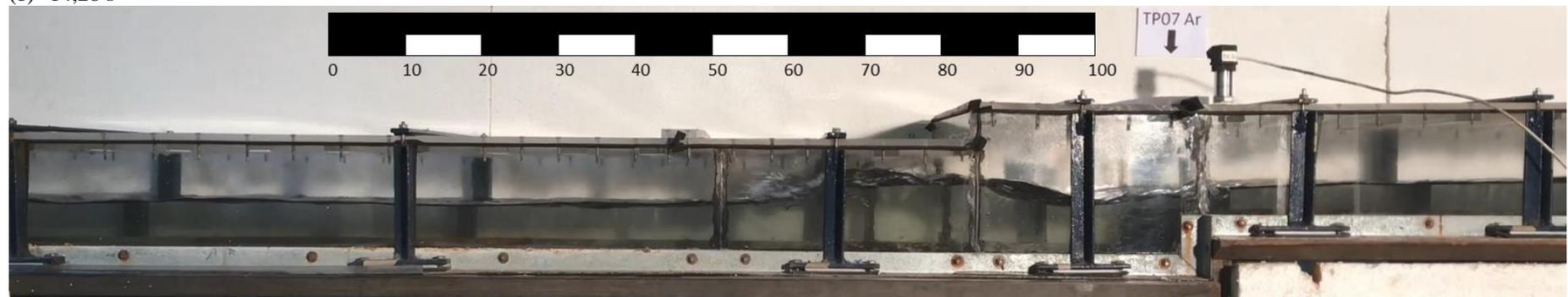
Figura 57. Ensaio N(1)J(27)V(VL) - Chegada da frente de enchimento ao degrau sem aprisionamento de bolsões de ar.



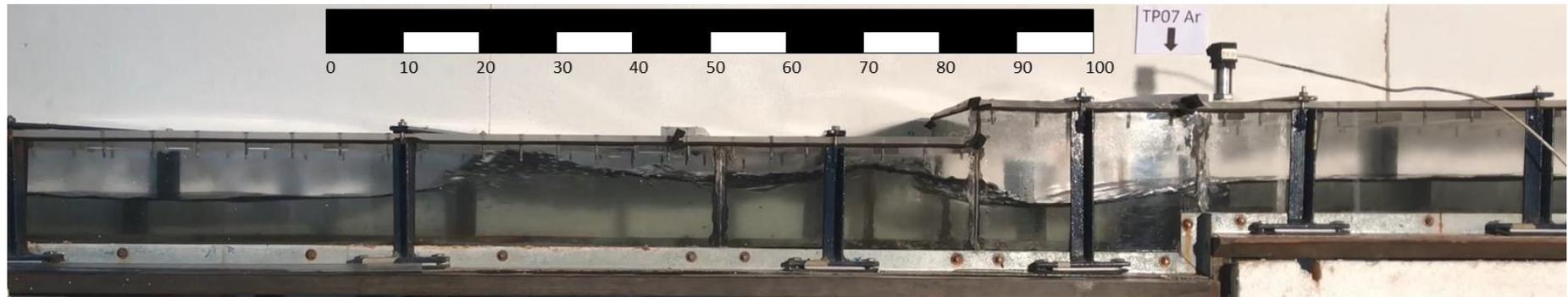
(a) 13,88 s



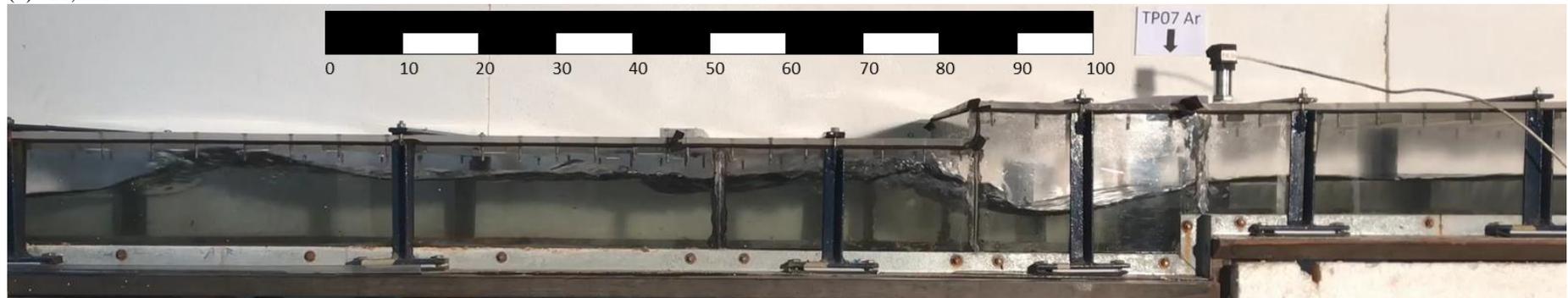
(b) 14,28 s



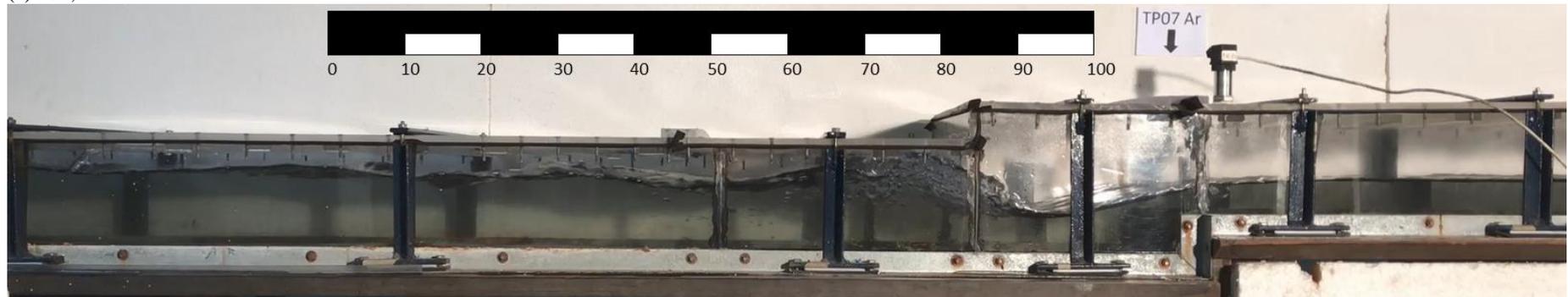
(c) 14,47 s



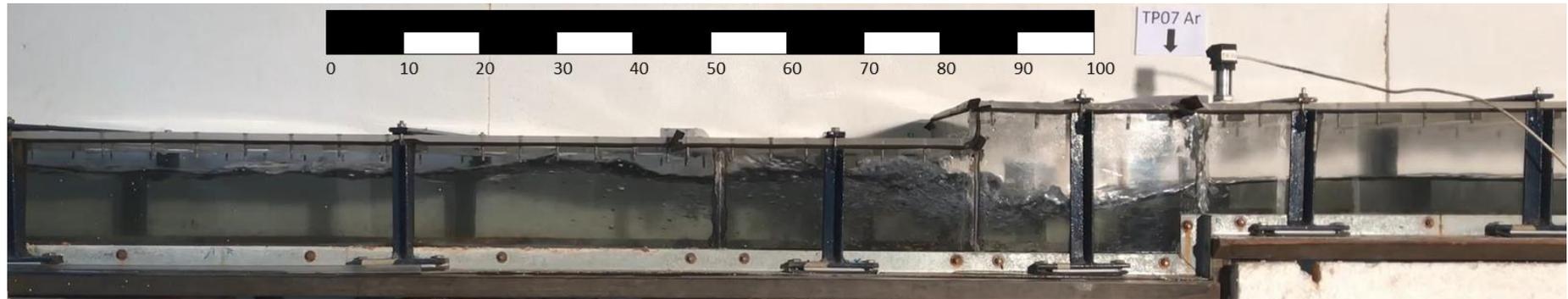
(d) 14,80 s



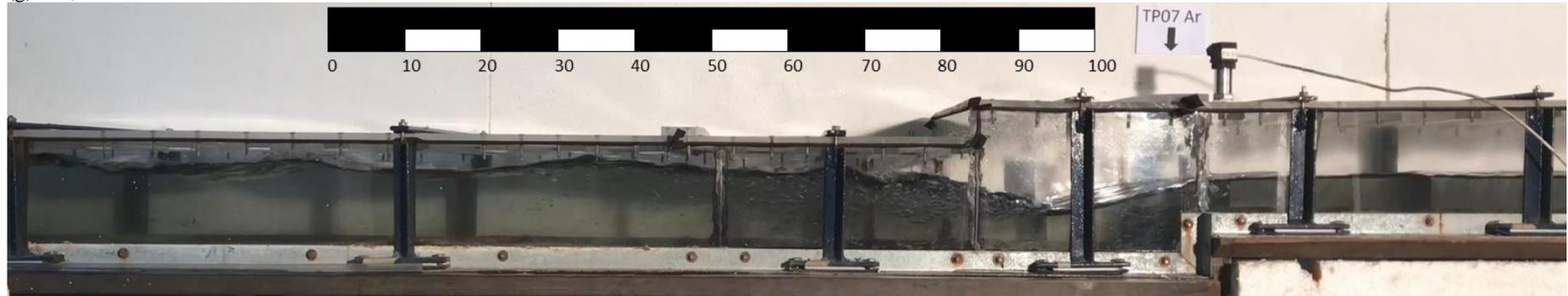
(e) 15,07 s



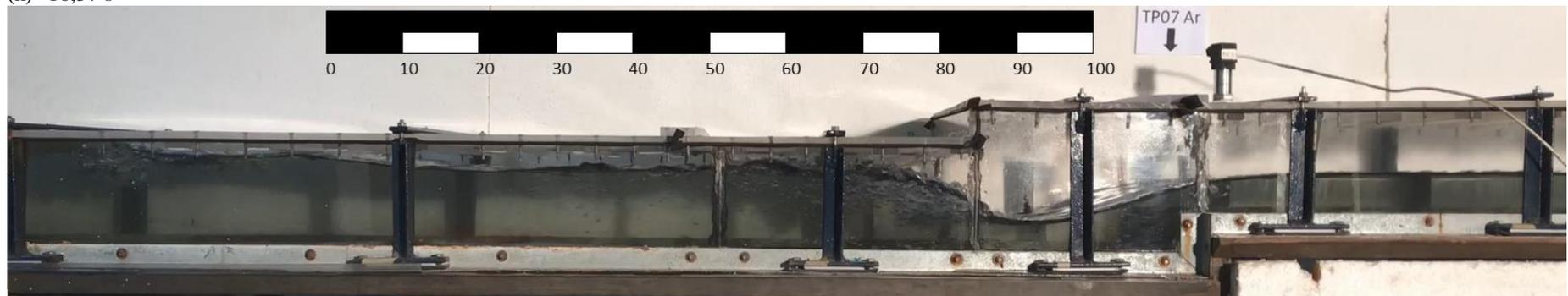
(f) 15,33 s



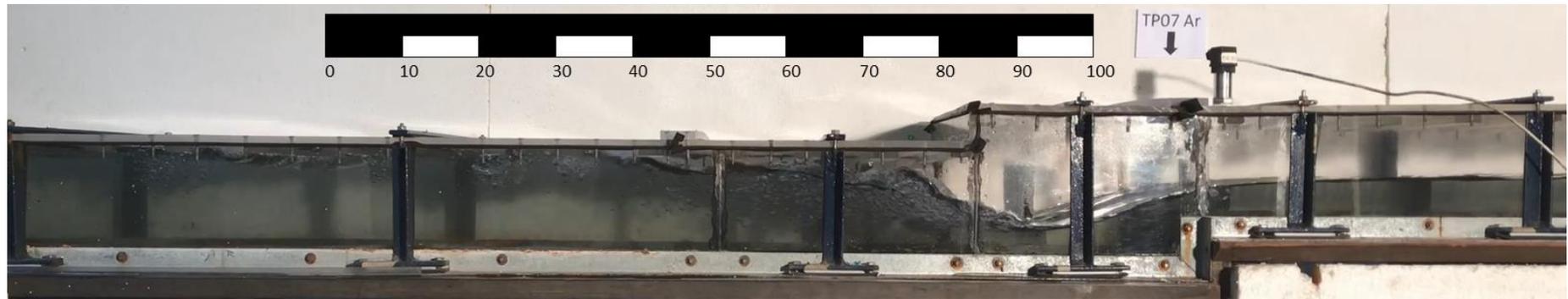
(g) 15,93 s



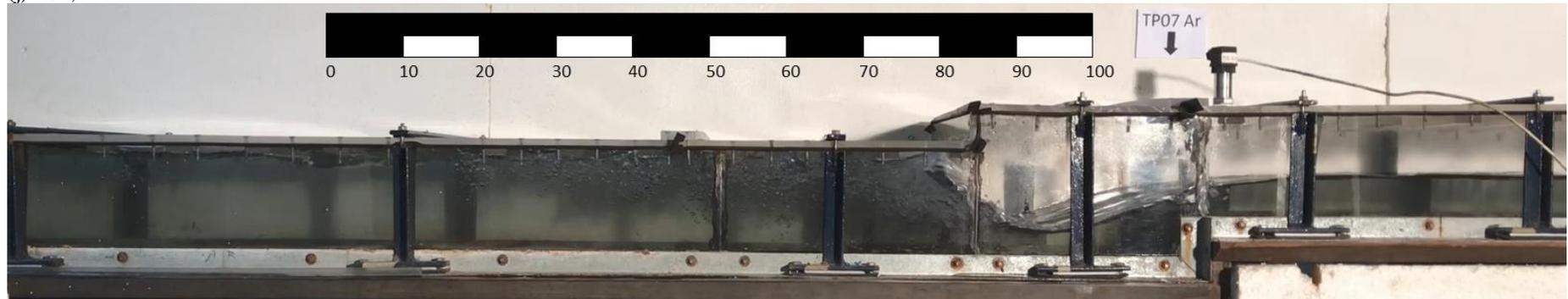
(h) 16,57 s



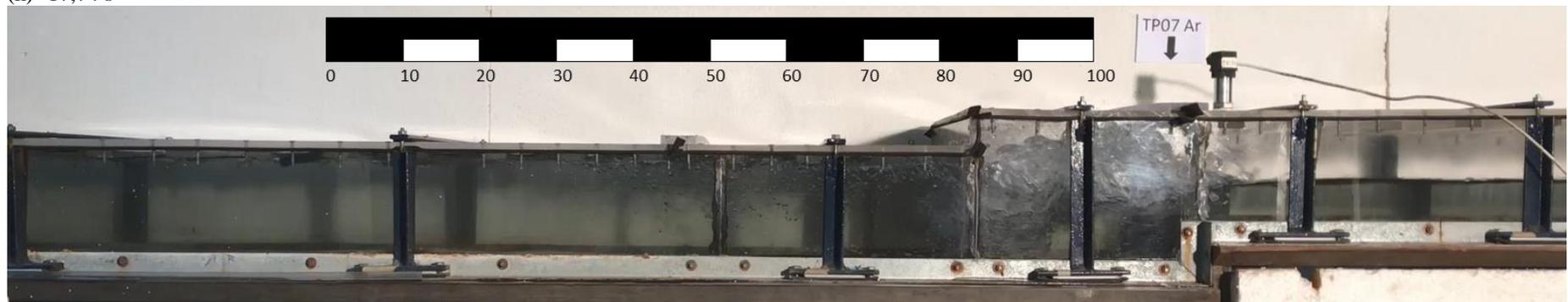
(i) 17,13 s



(j) 17,50 s

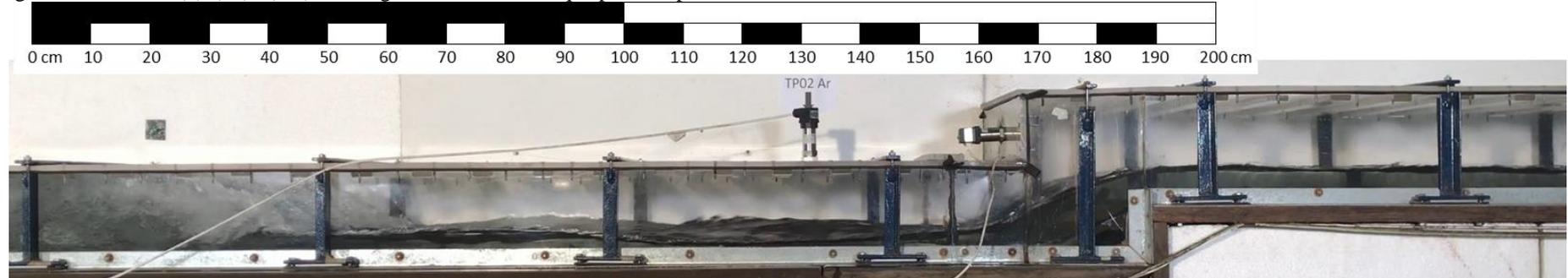


(k) 17,74 s

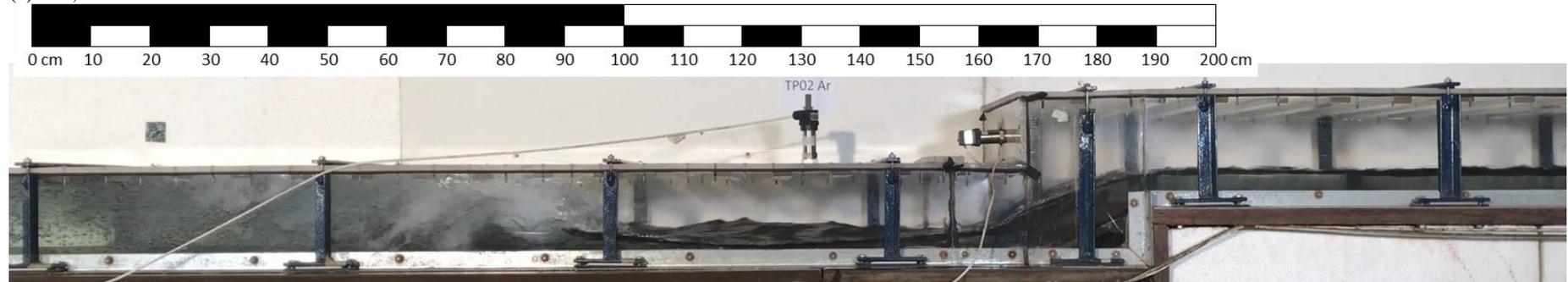


(l) 18,07 s

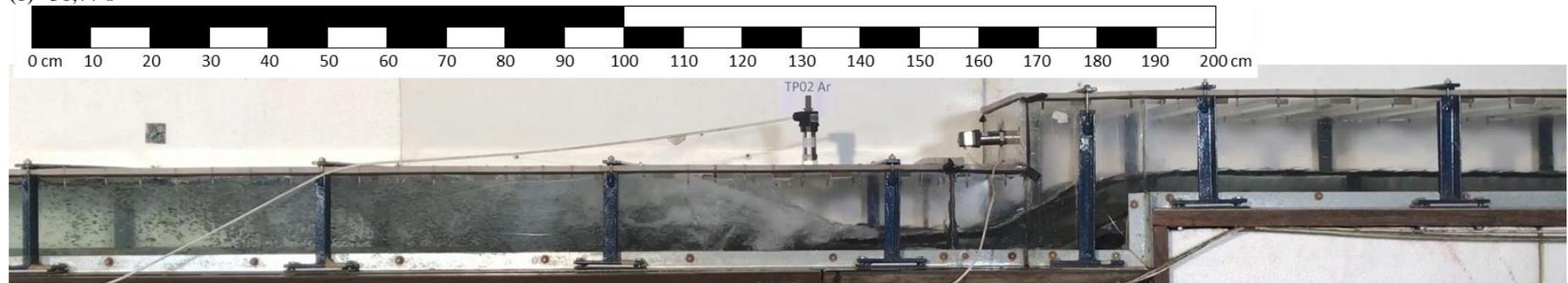
Figura 58. Ensaio N(1)J(27)V(VL) - Passagem da onda de choque pela rampa



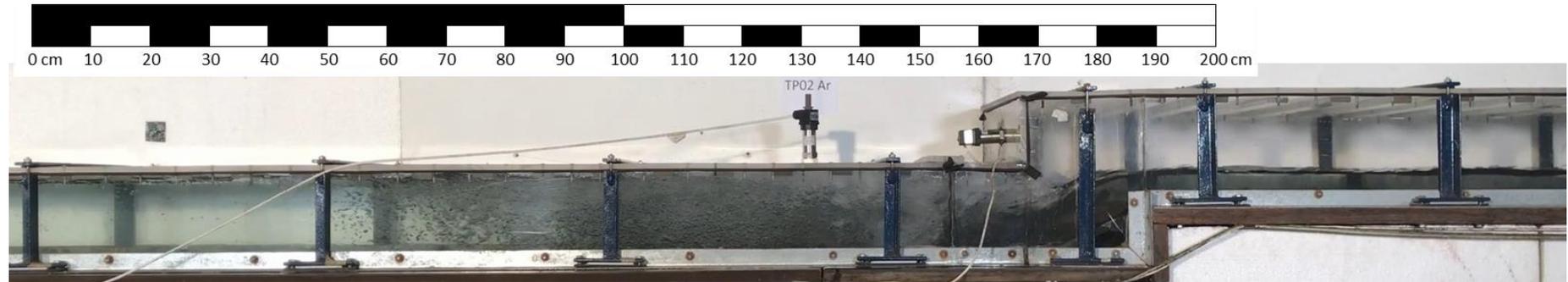
(a) 35,77 s



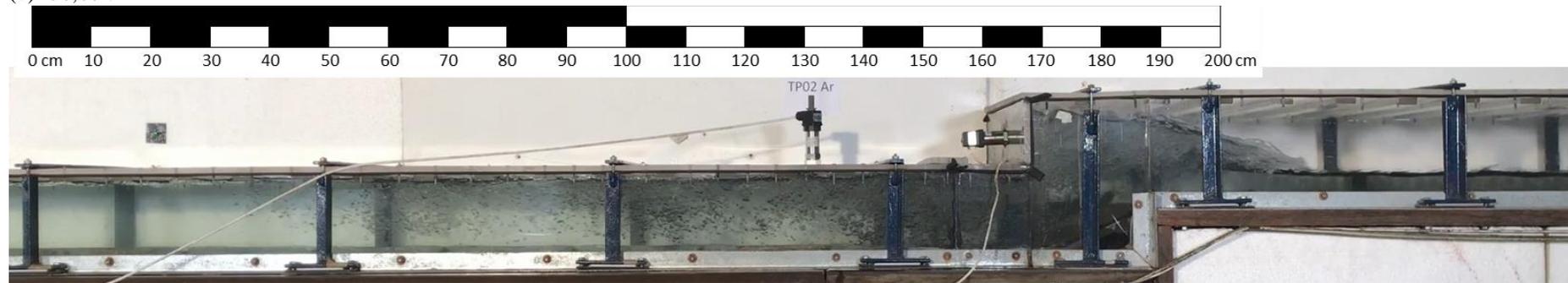
(b) 36,77 s



(c) 37,60 s



(d) 38,60 s



(e) 39,60 s

**Ensaio N(2)J(5)V(VL)**

A Figura 59 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(2)J(5)V(VL). Nesse ensaio, o degrau é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 60 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Impacto da Frente de Enchimento e a passagem de um bolsão de ar pelo degrau. A Figura 61 apresenta o avanço da onda de choque e a passagem do primeiro bolsão de ar pela rampa.

Figura 59. Ensaio N(2)J(5)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

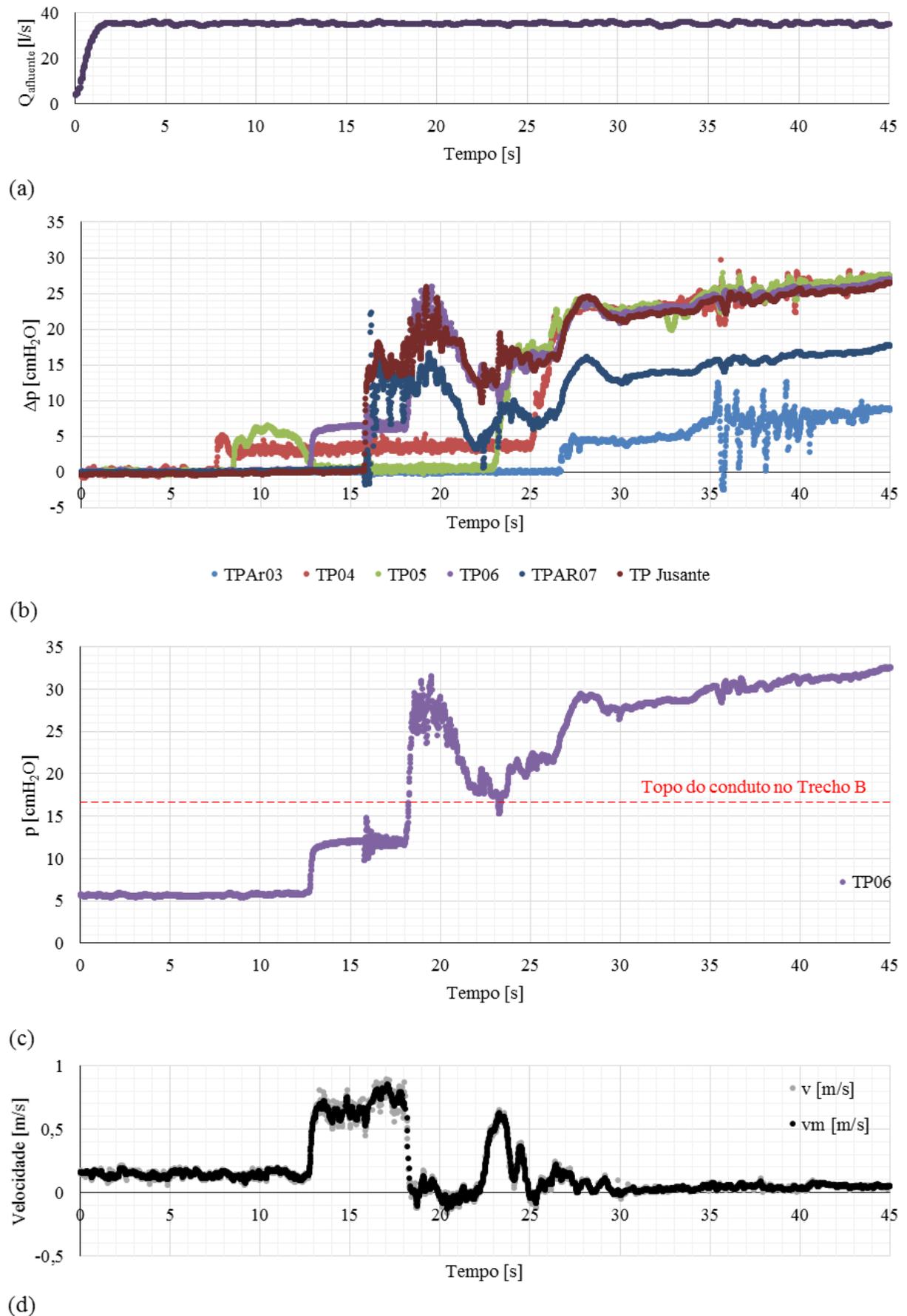
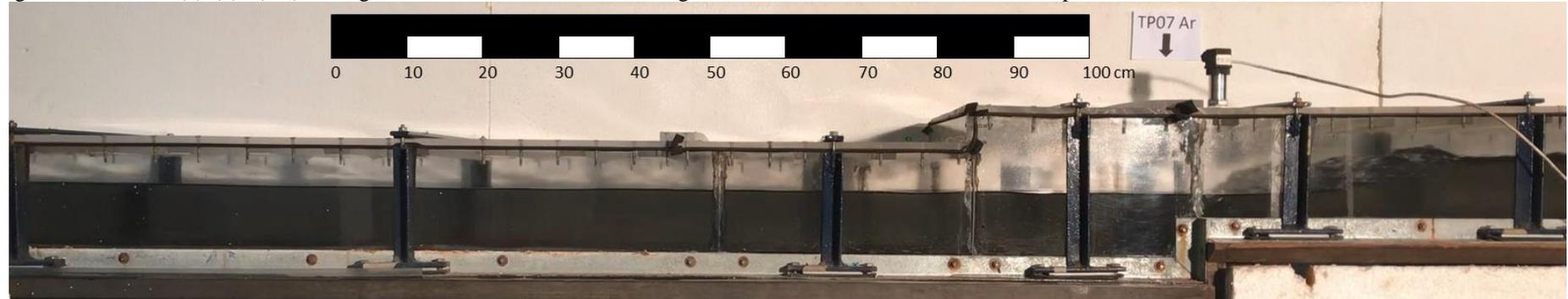
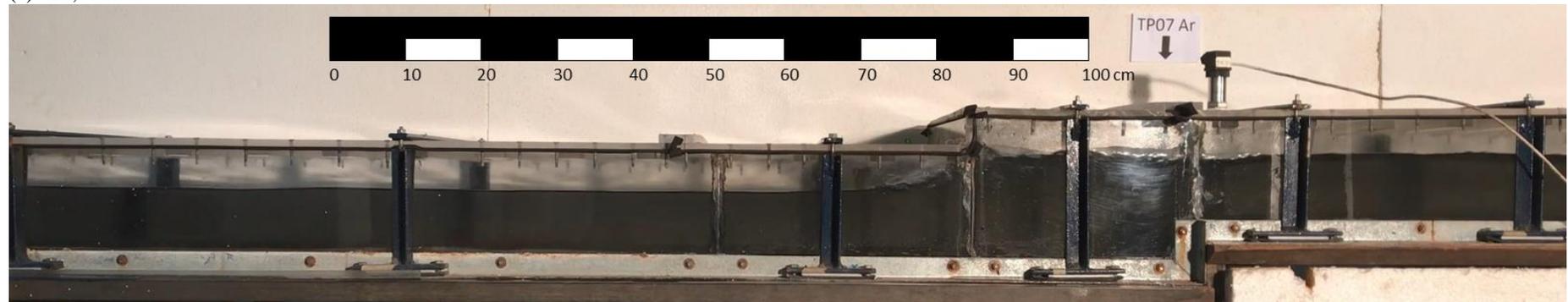


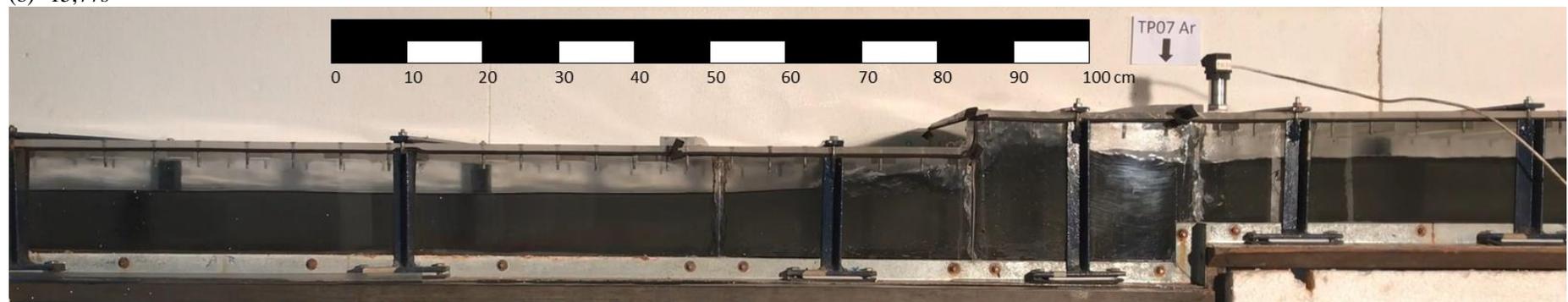
Figura 60. Ensaio N(2)J(5)V(VL) – Chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE.



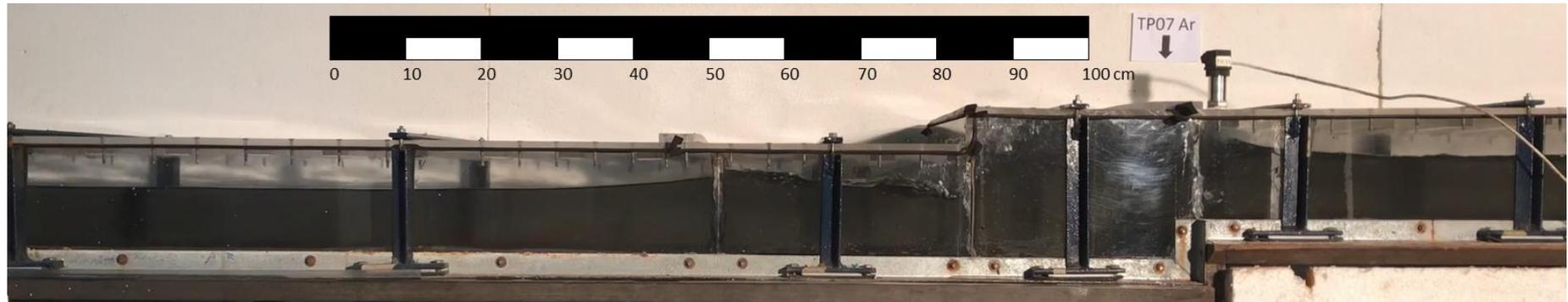
(a) 15,39s



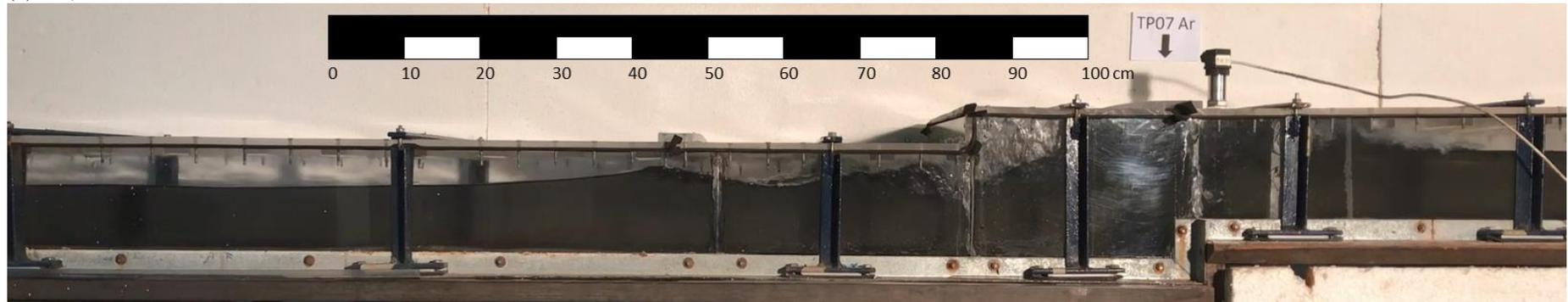
(b) 15,77s



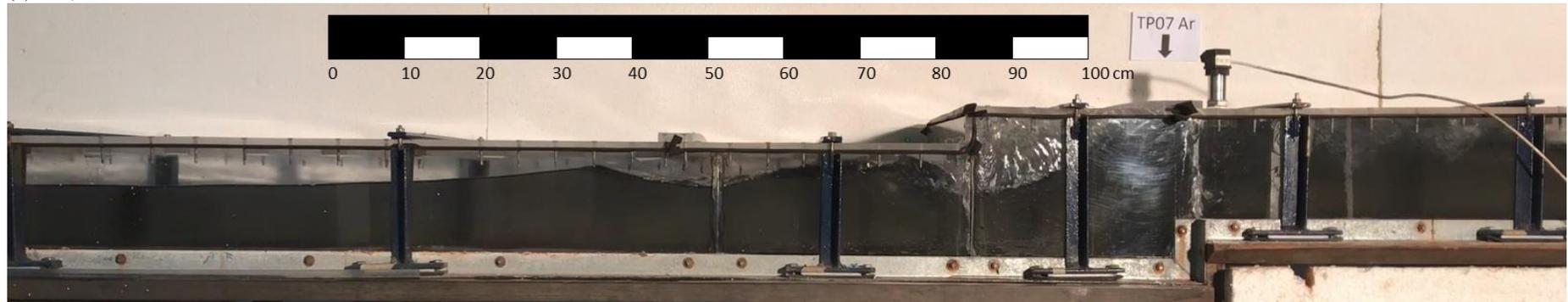
(c) 15,87s



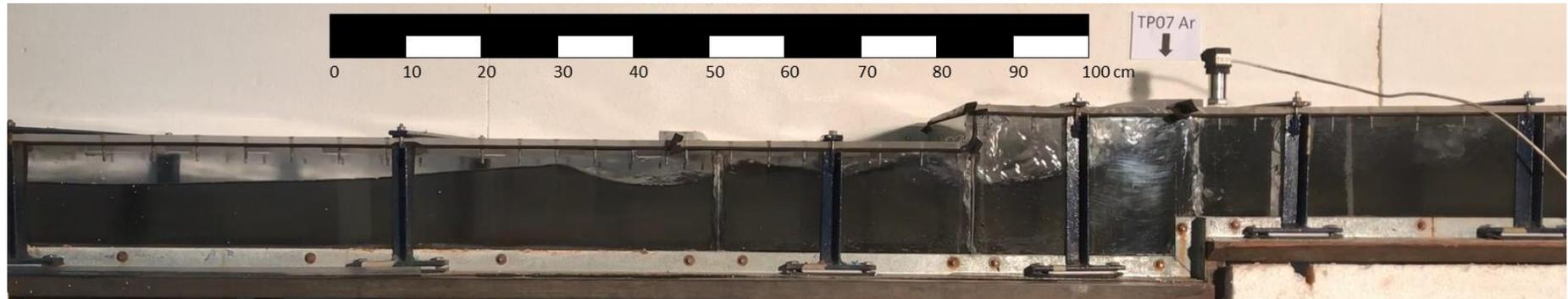
(d) 16,03s



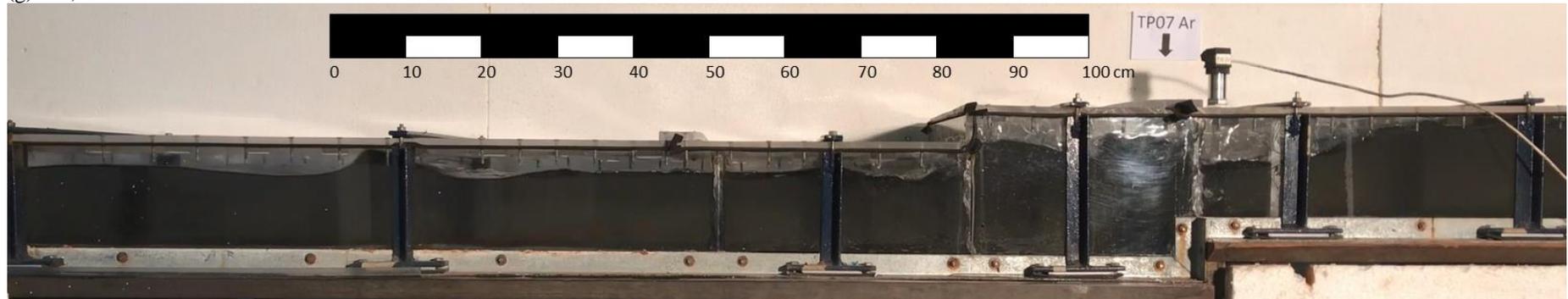
(e) 16,16s



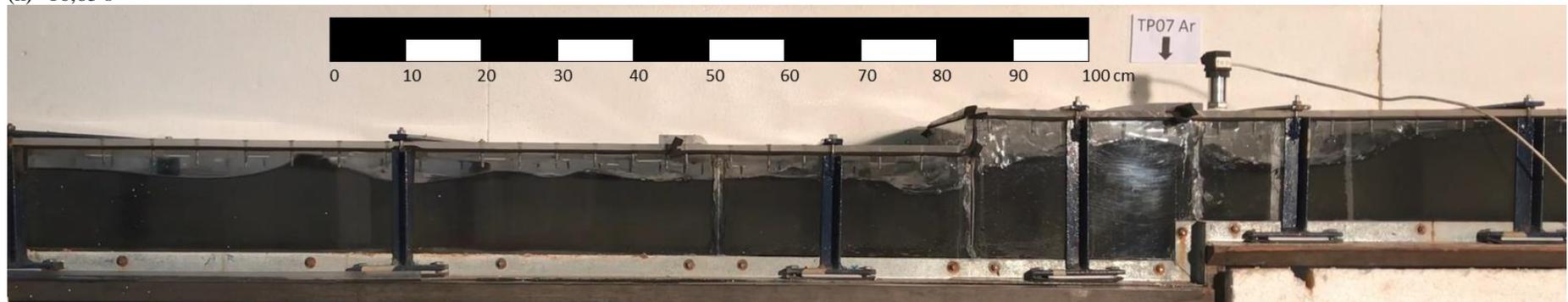
(f) 16,27 s



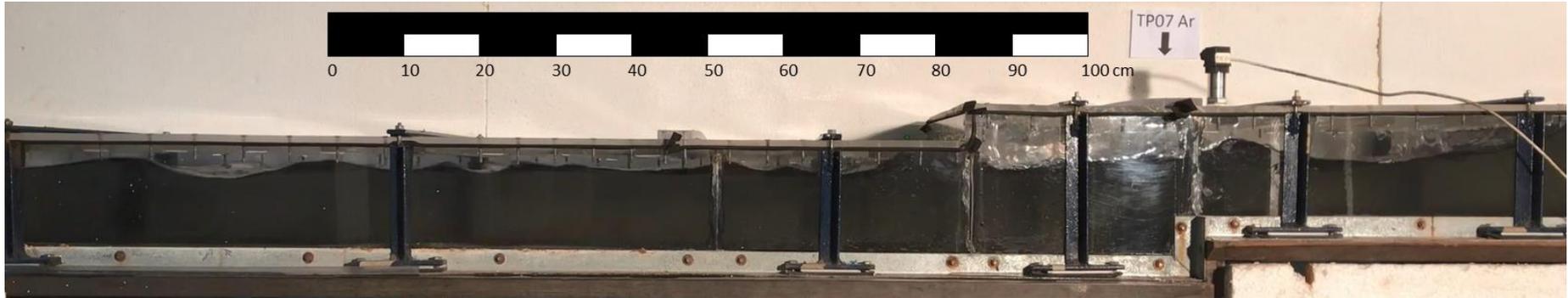
(g) 16,33



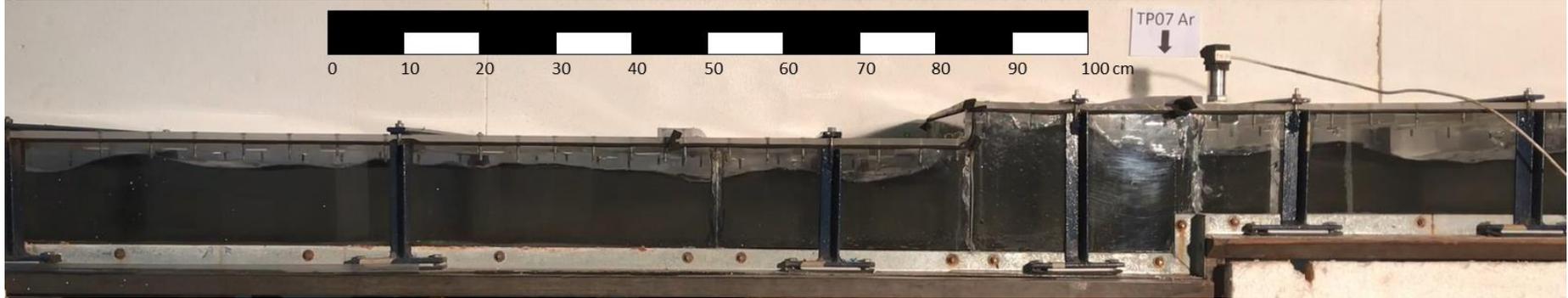
(h) 16,83 s



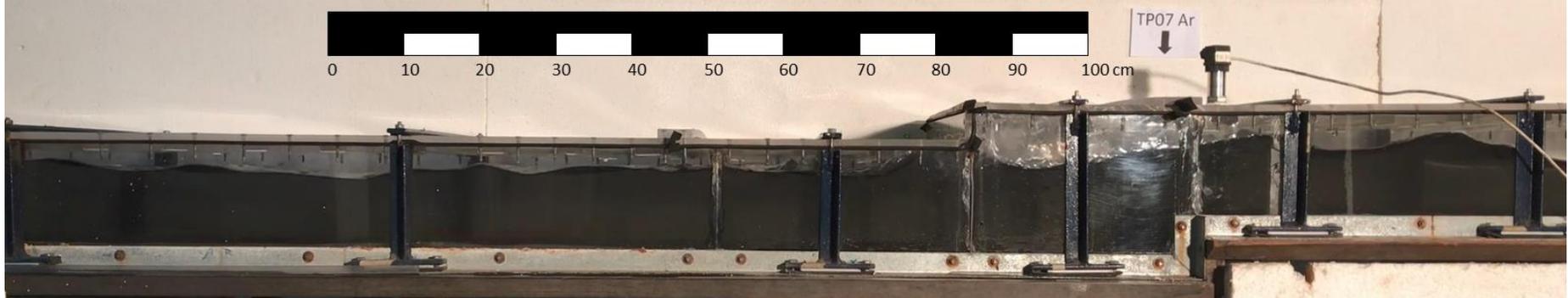
(i) 16,93 s



(j) 17,20 s

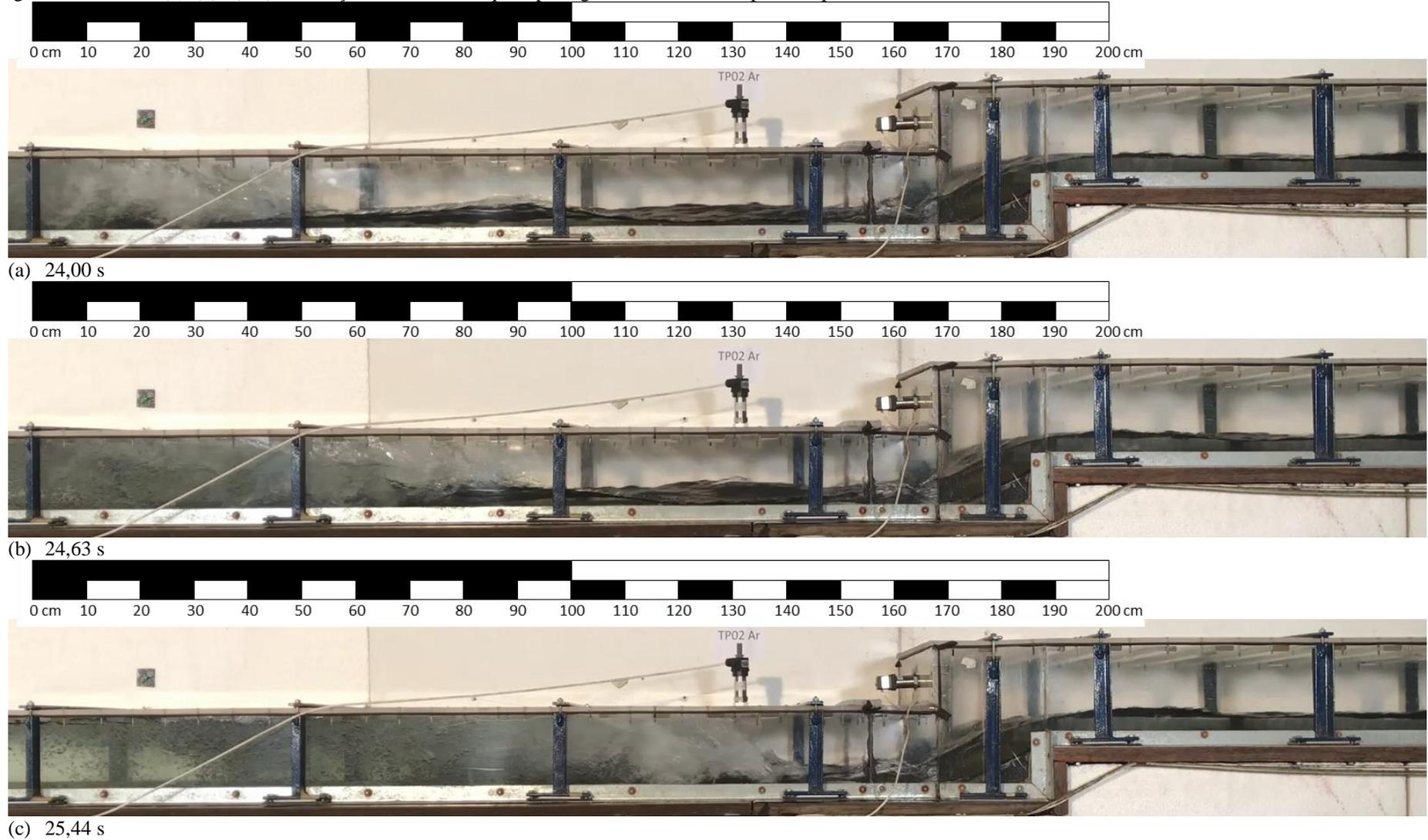


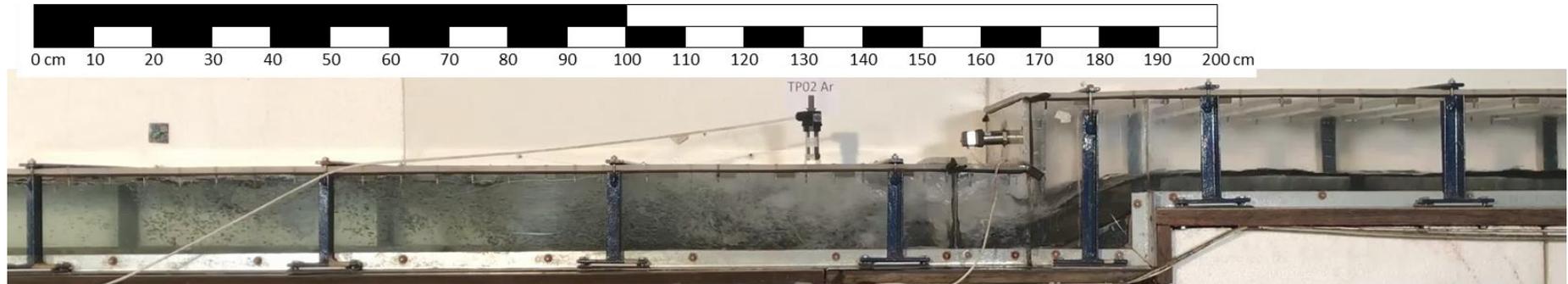
(k) 17,43 s



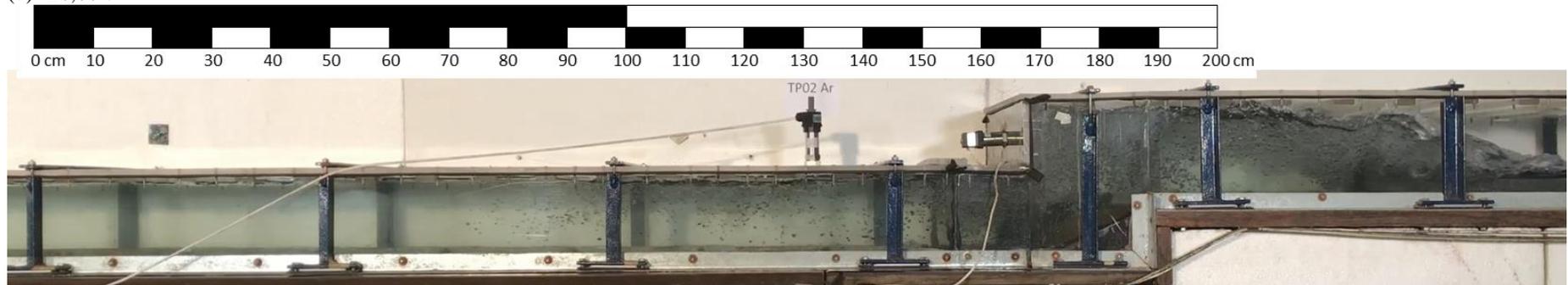
(l) 17,93 s

Figura 61. Ensaio N(2)J(5)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa.

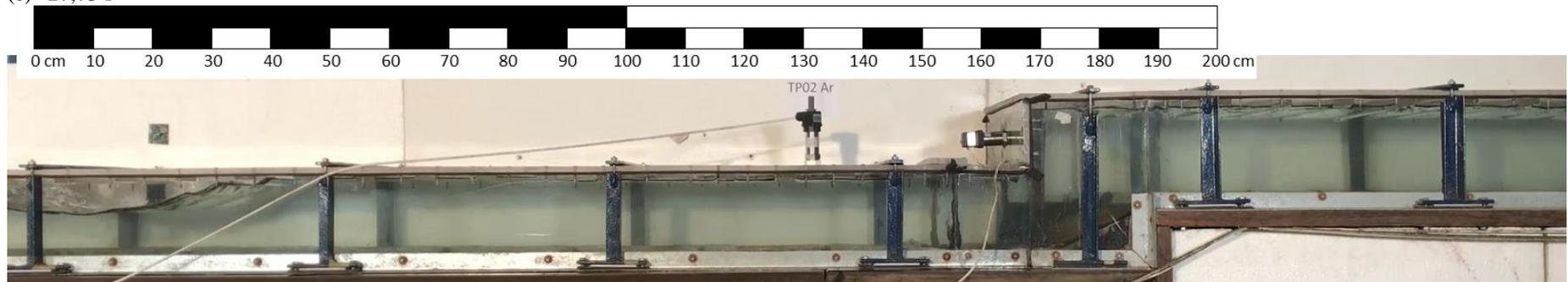




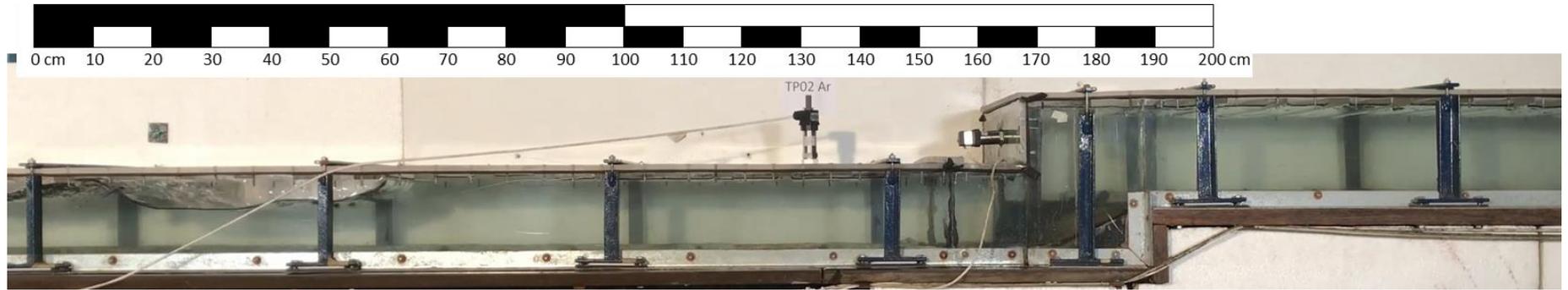
(d) 26,00 s



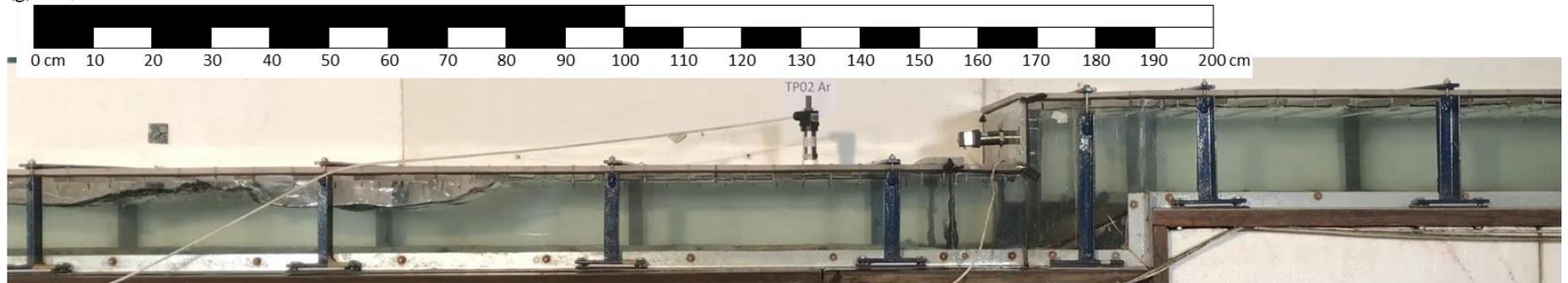
(e) 27,73 s



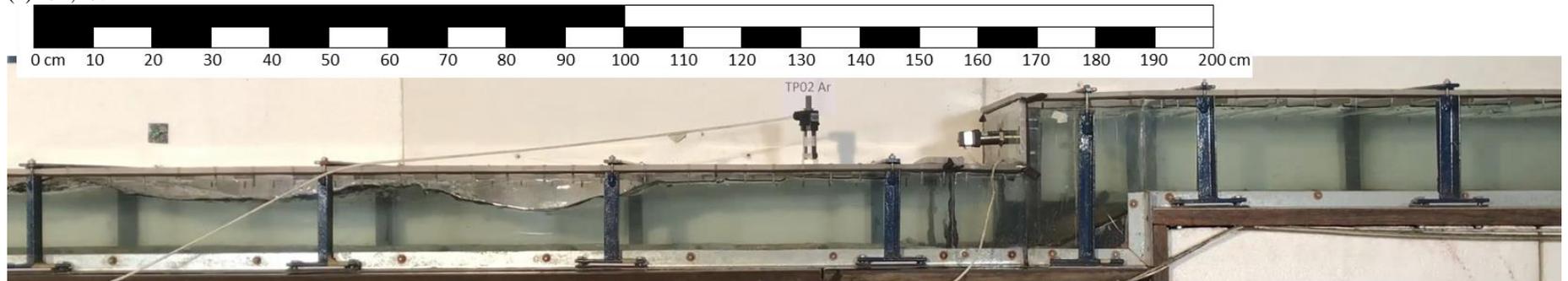
(f) 33,39s



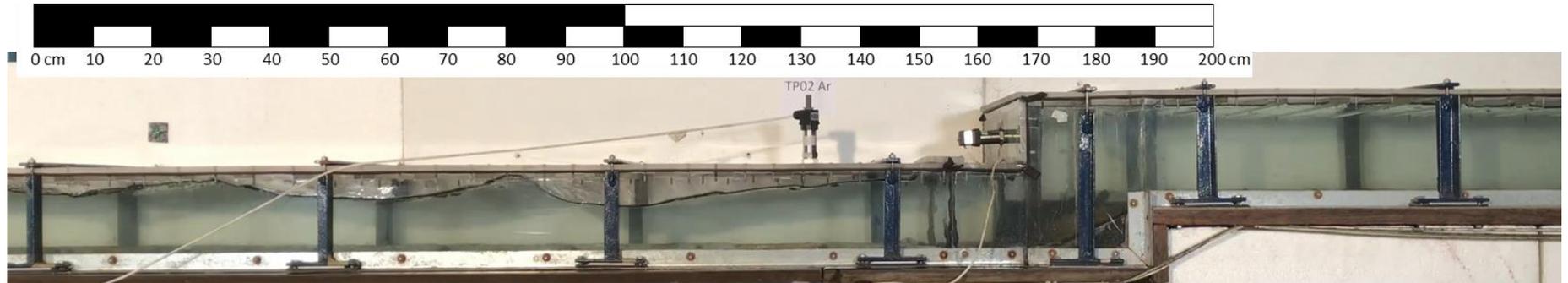
(g) 33,80s



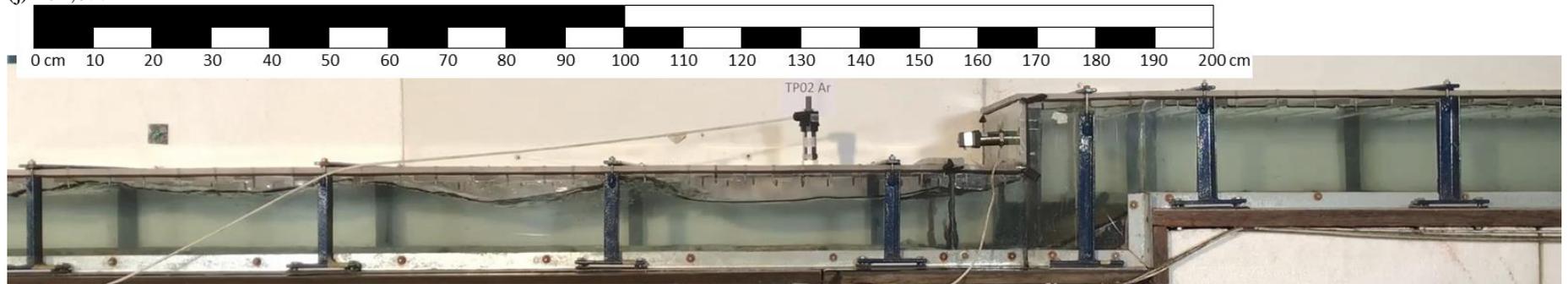
(h) 34,10s



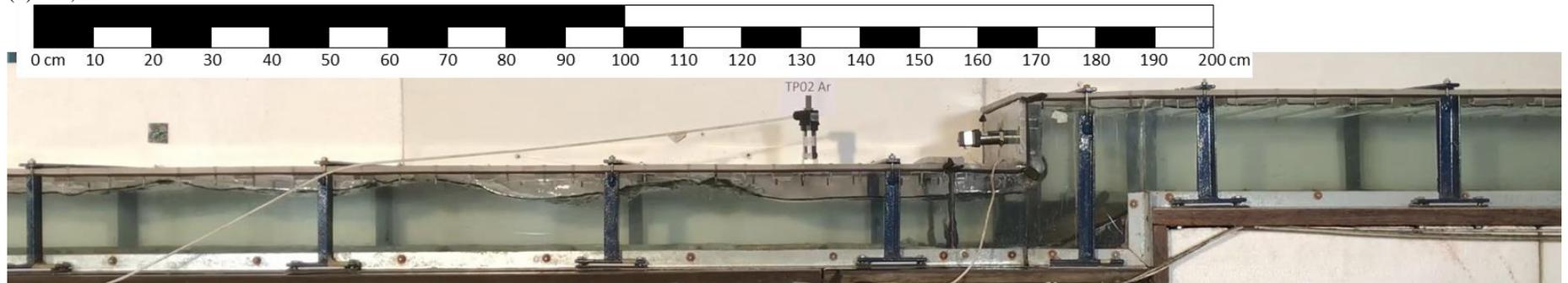
(i) 34,54s



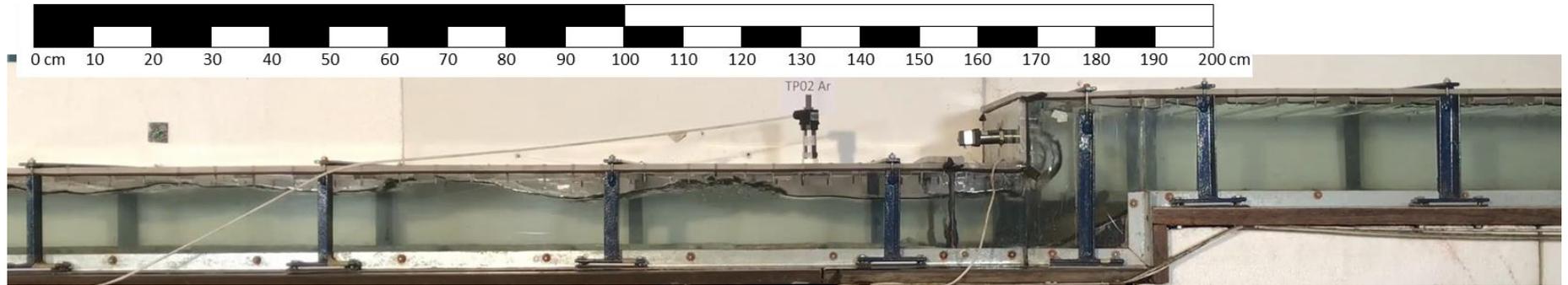
(j) 34,87s



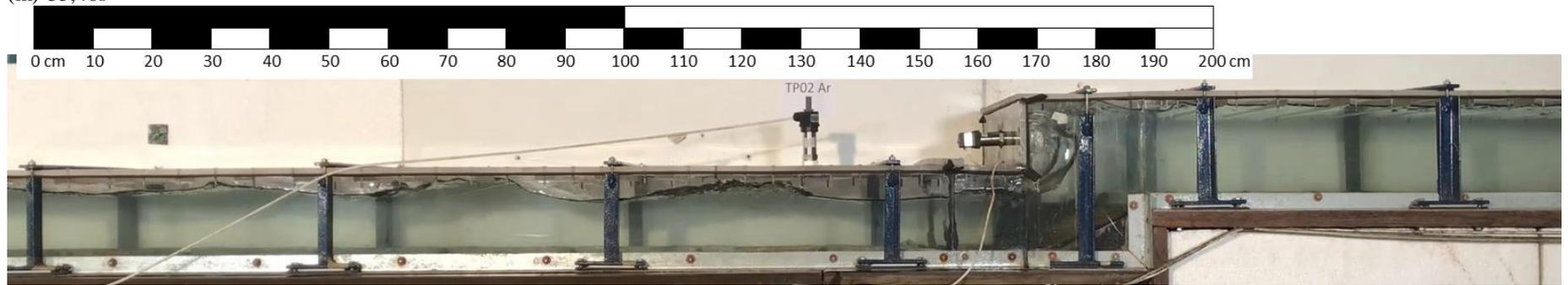
(k) 35,23s



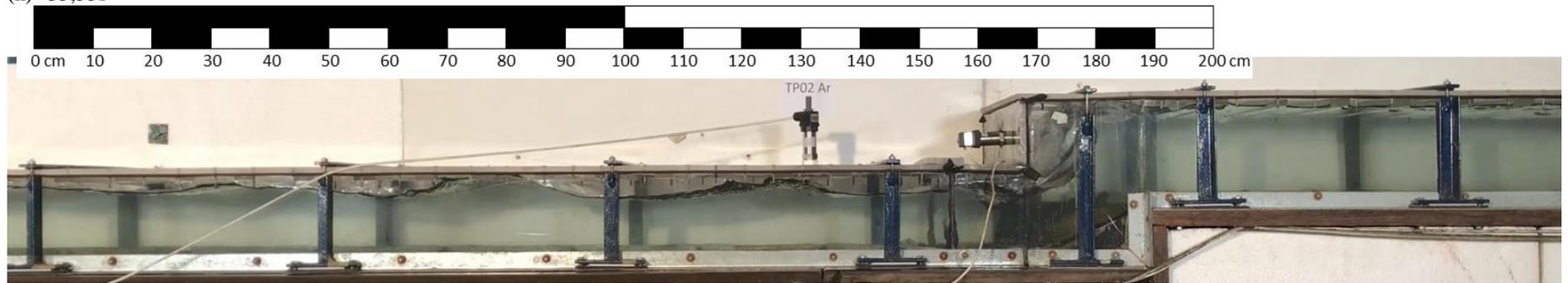
(l) 35,40s



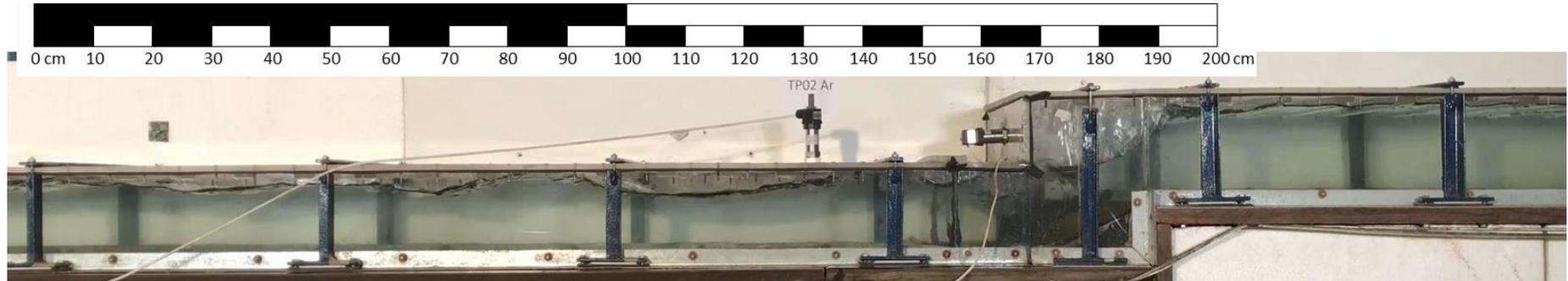
(m) 35,46s



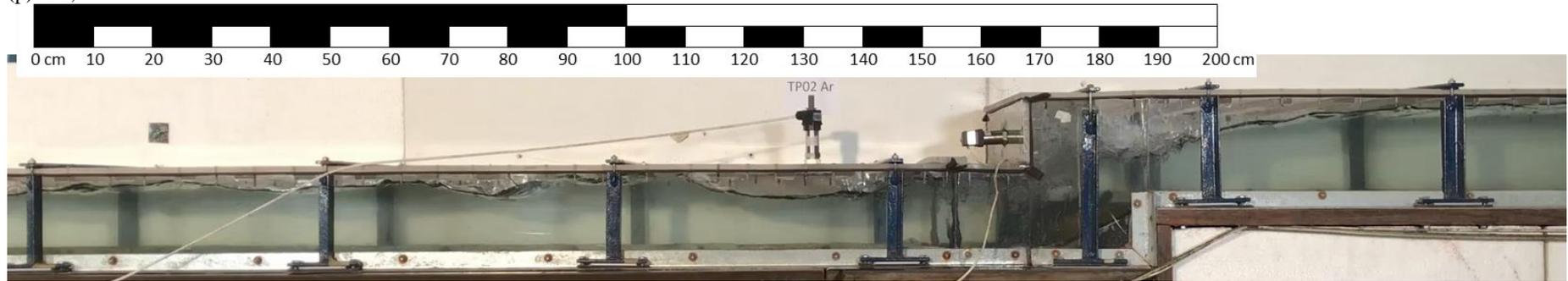
(n) 35,53s



(o) 35,60s



(p) 35,77s

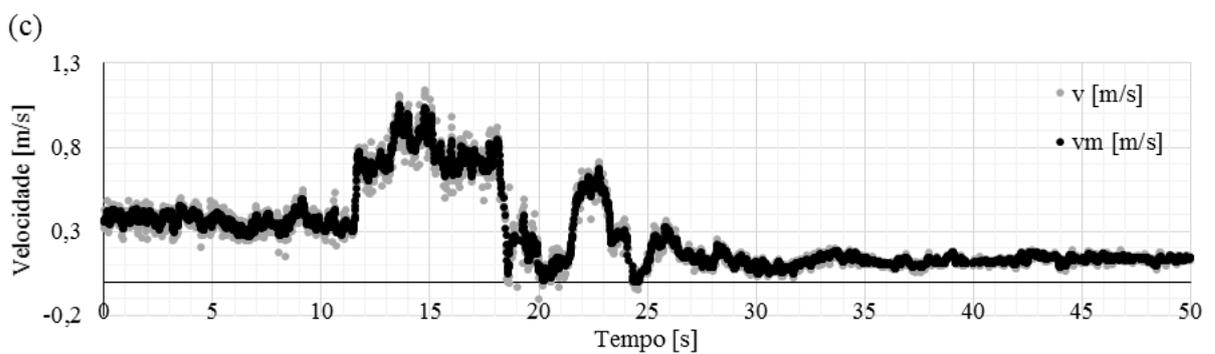
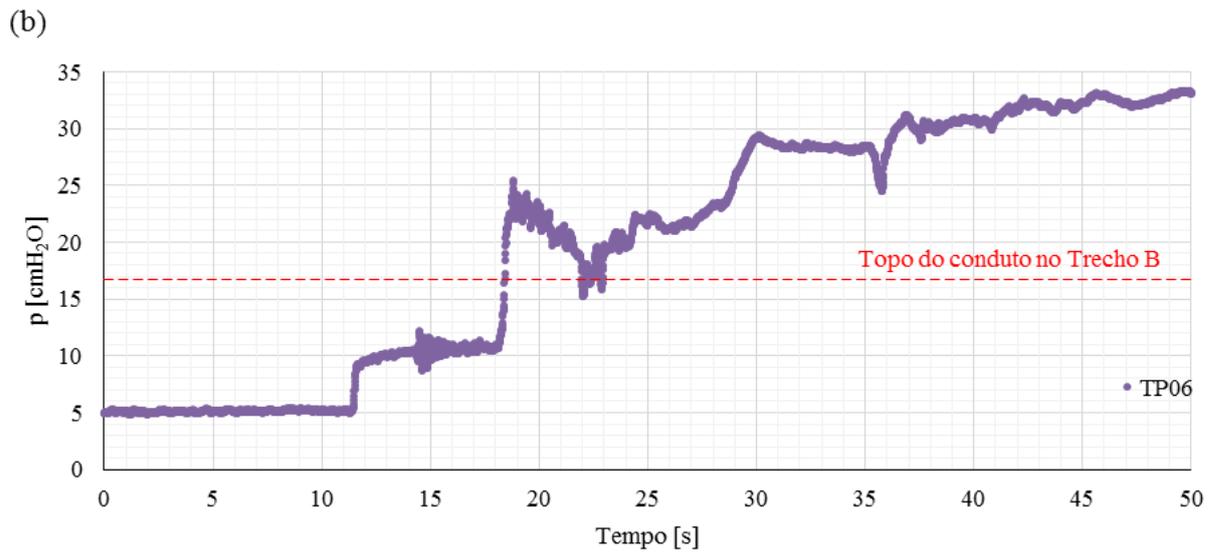
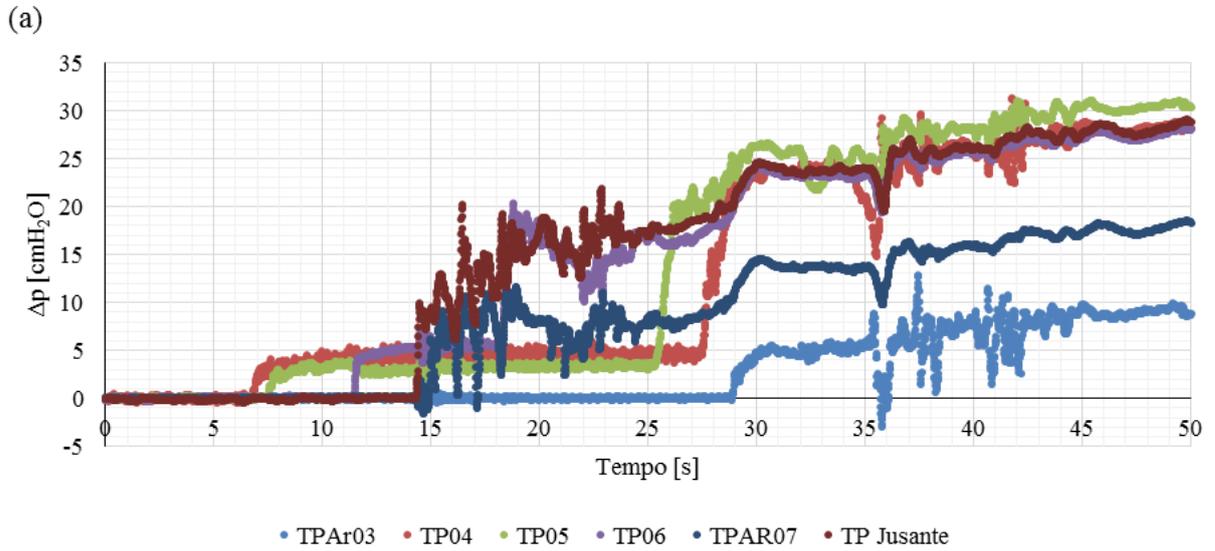
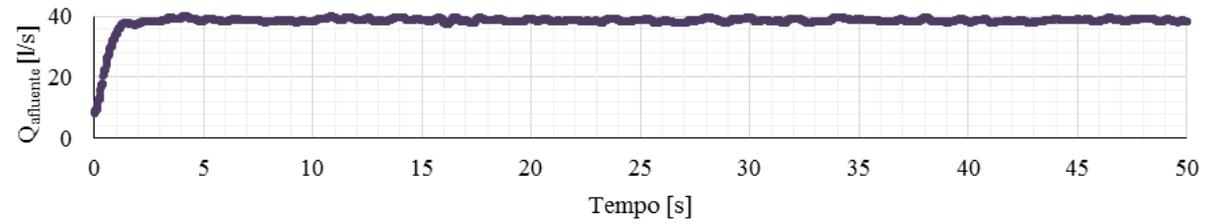


(q) 35,98

**Ensaio N(2)J(10)V(VL)**

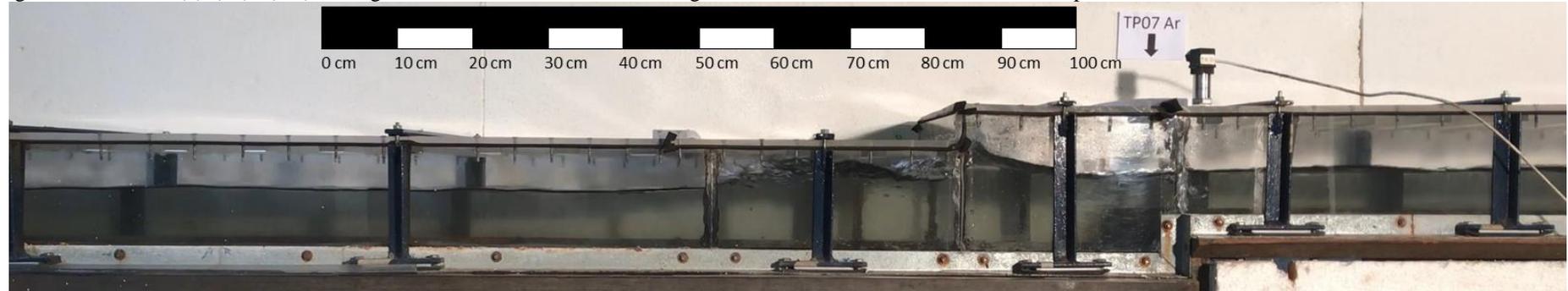
A Figura 62 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(2)J(10)V(VL). Nesse ensaio, o degrau é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 63 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Impacto da Frente de Enchimento e a passagem de um bolsão de ar pelo degrau. A Figura 64 apresenta o avanço da onda de choque e a passagem do primeiro bolsão de ar pela rampa.

Figura 62. Ensaio N(2)J(10)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

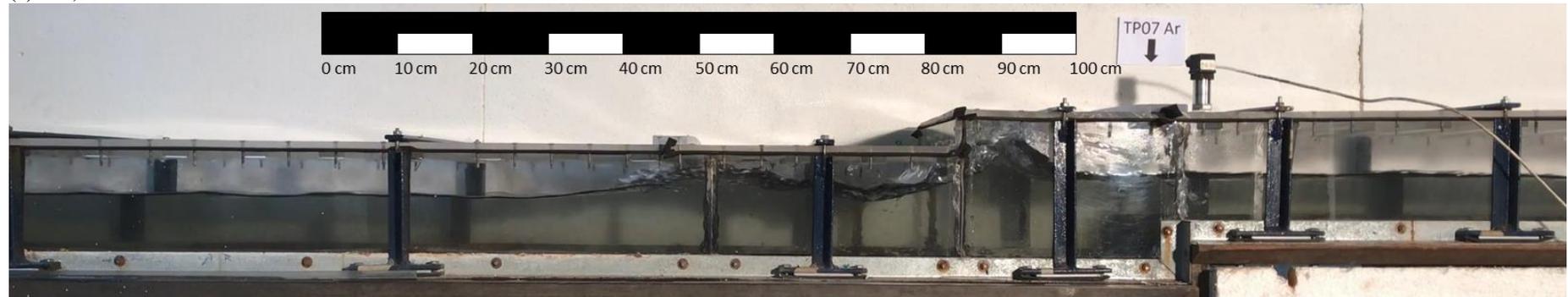


(d)

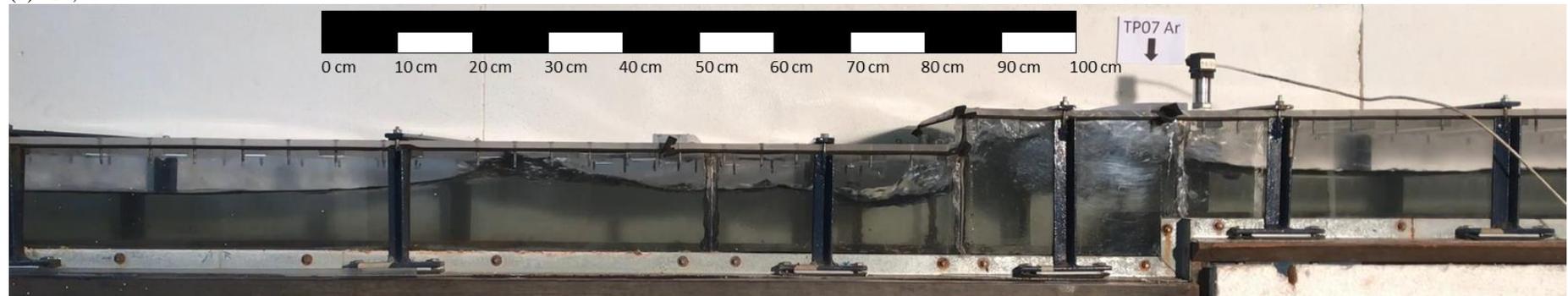
Figura 63. Ensaio N(2)J(10)V(VL) – Chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE.



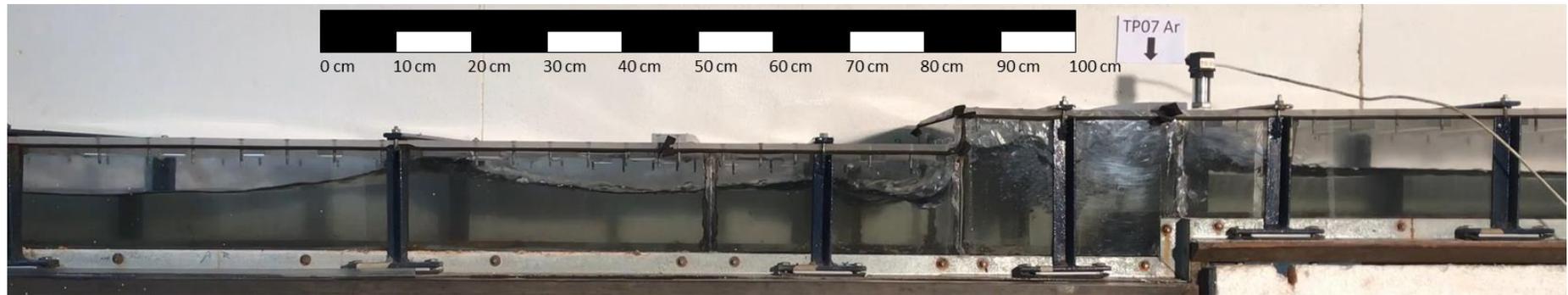
(a) 14,60s



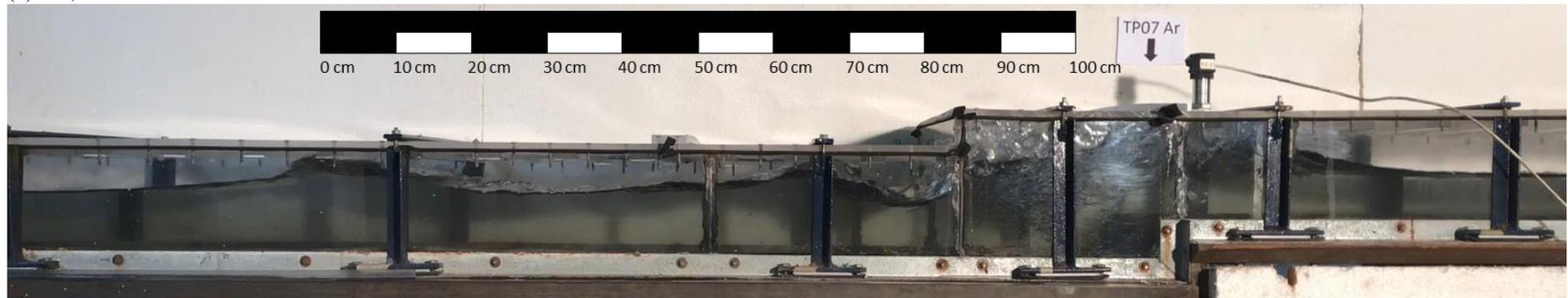
(b) 14,70s



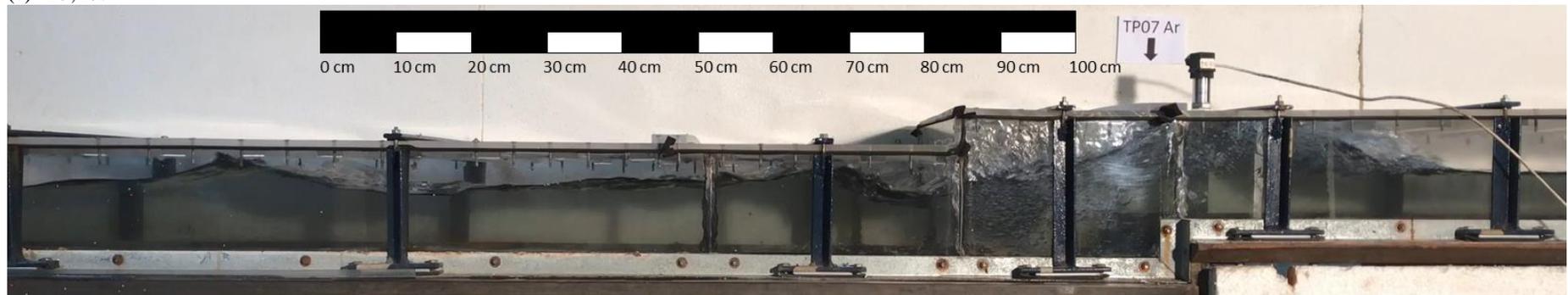
(c) 14,90s



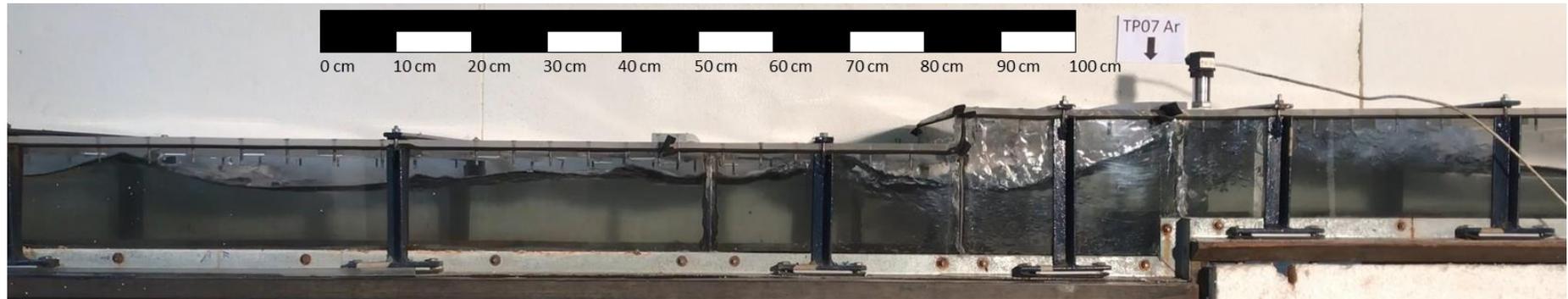
(d) 15,00s



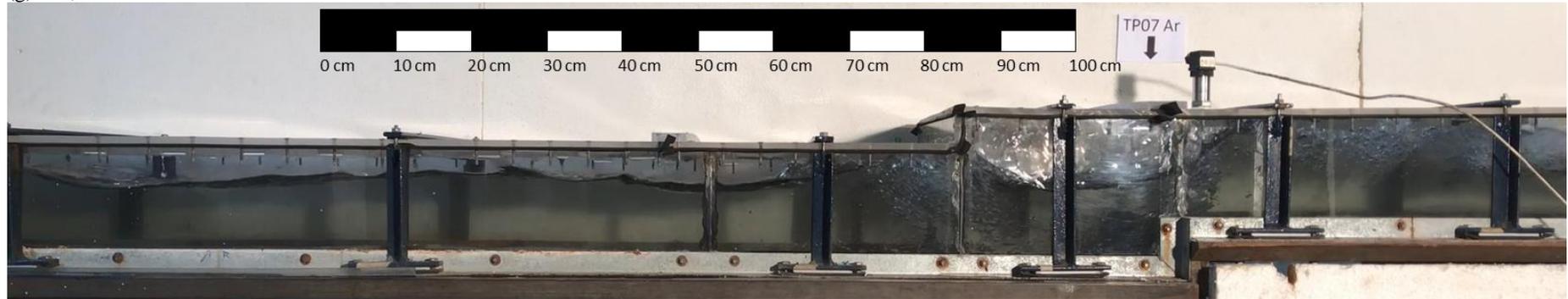
(e) 15,10s



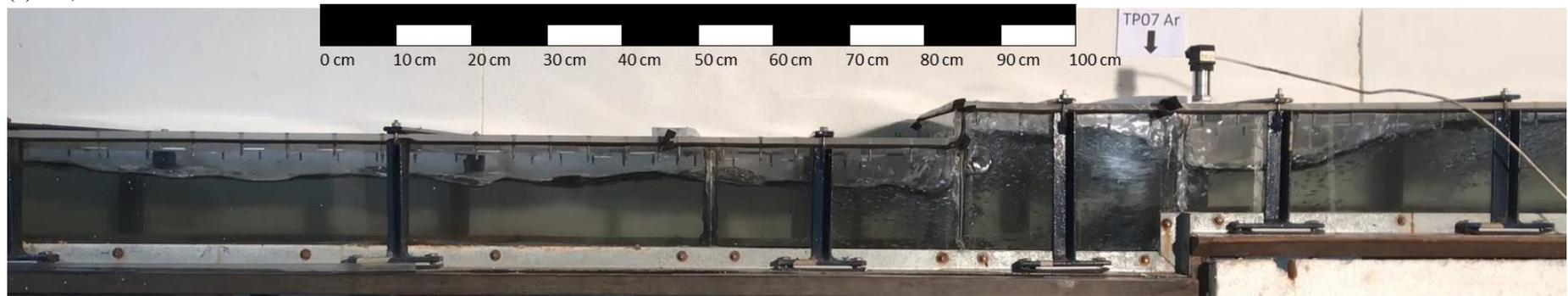
(f) 15,20 s



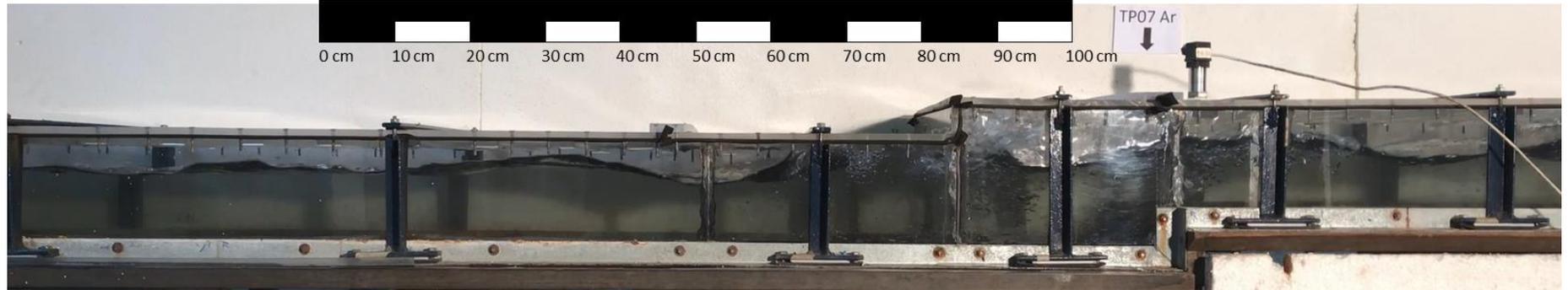
(g) 15,32 s



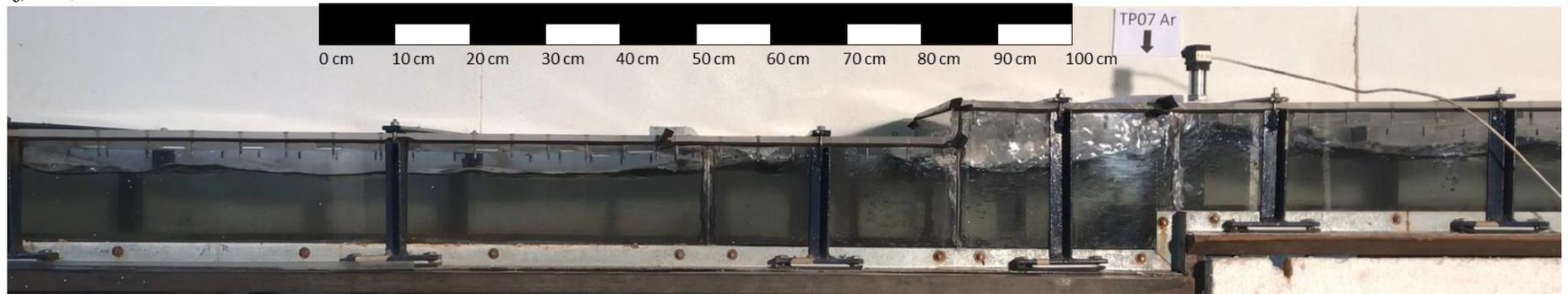
(h) 15,50 s



(i) 16,00 s

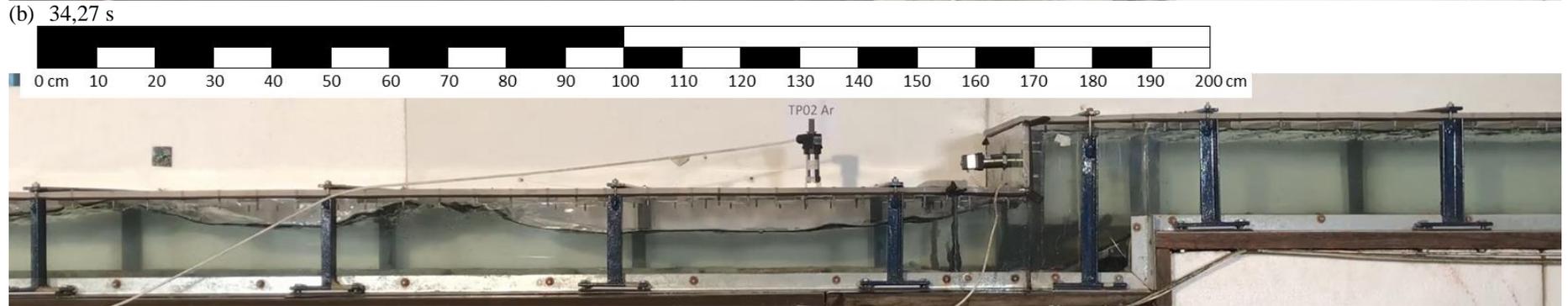
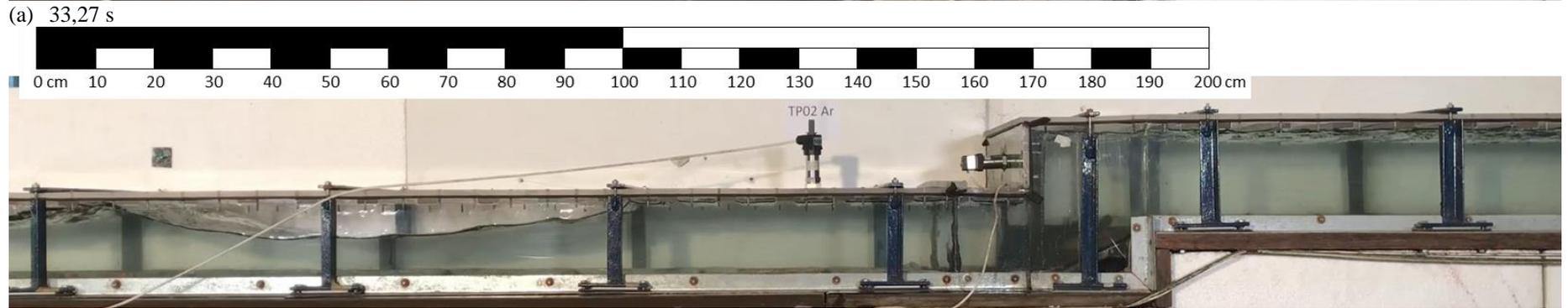
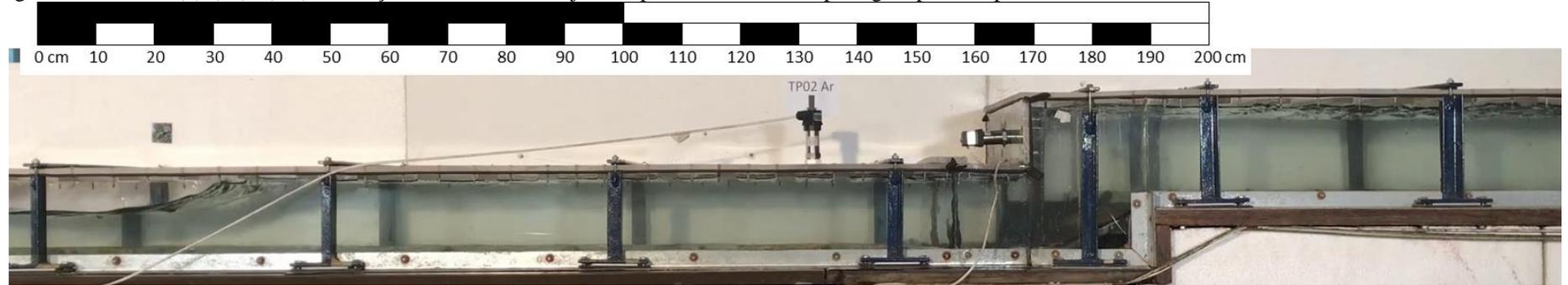


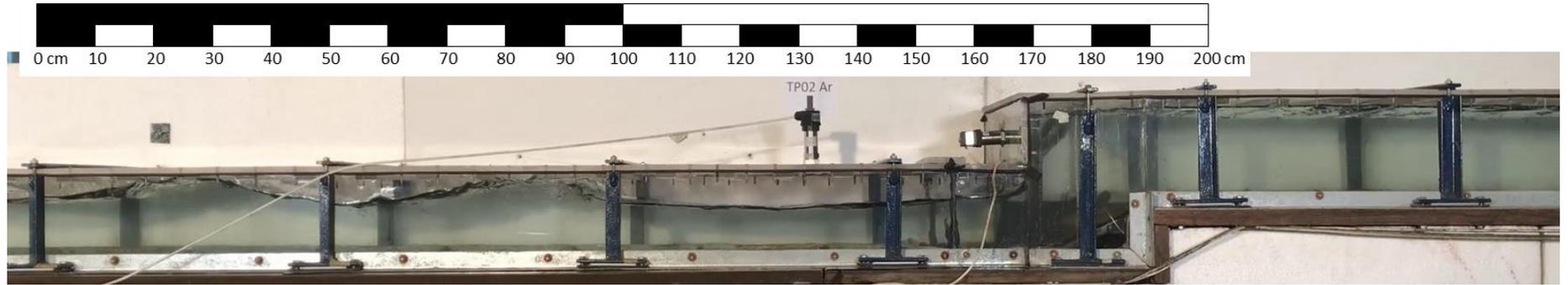
(j) 16,50 s



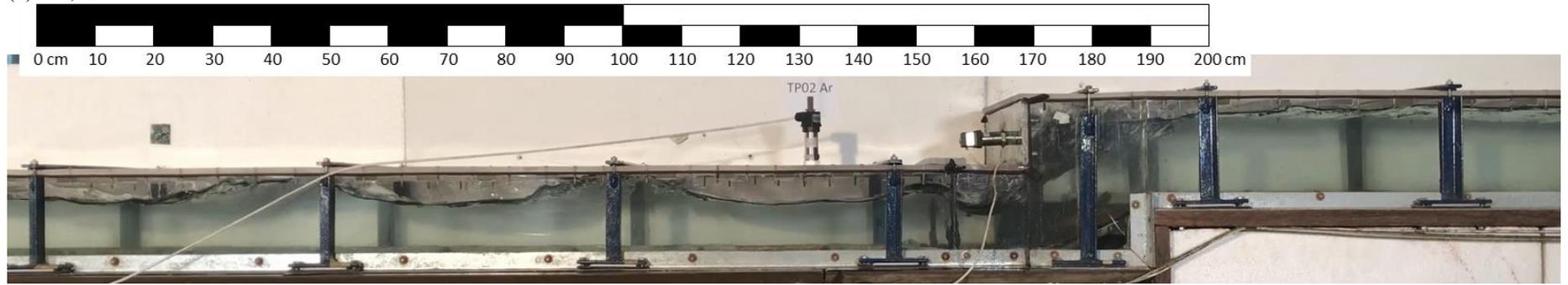
(k) 17,27 s

Figura 64. Ensaio N(2)J(10)V(VL) - Avanço do bolsão de ar de jusante para montante e sua passagem pela rampa.

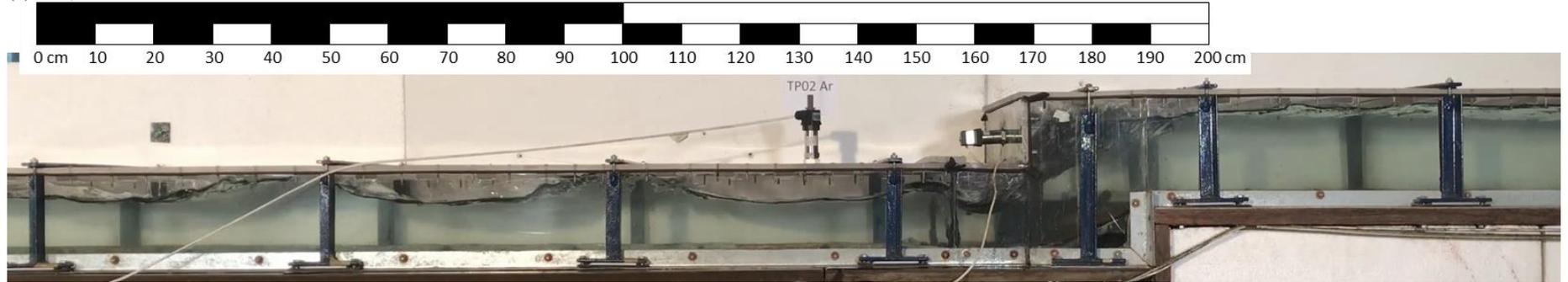




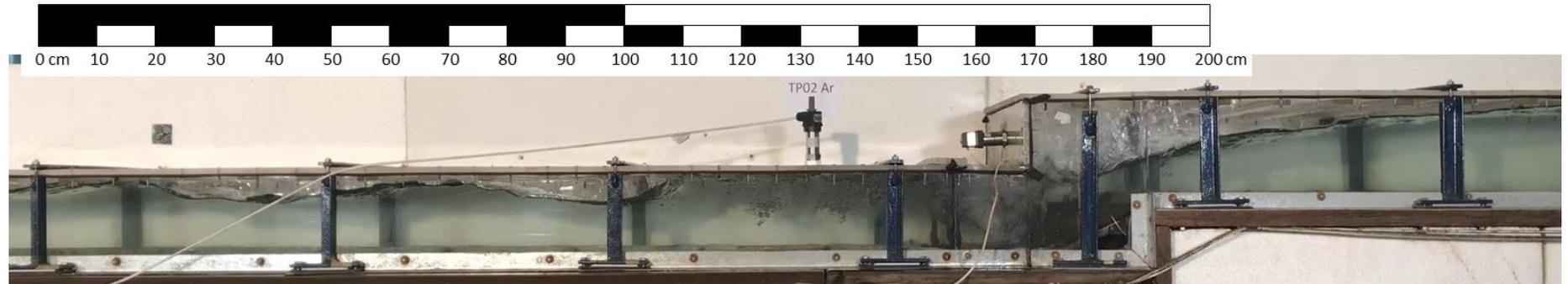
(d) 35,53 s



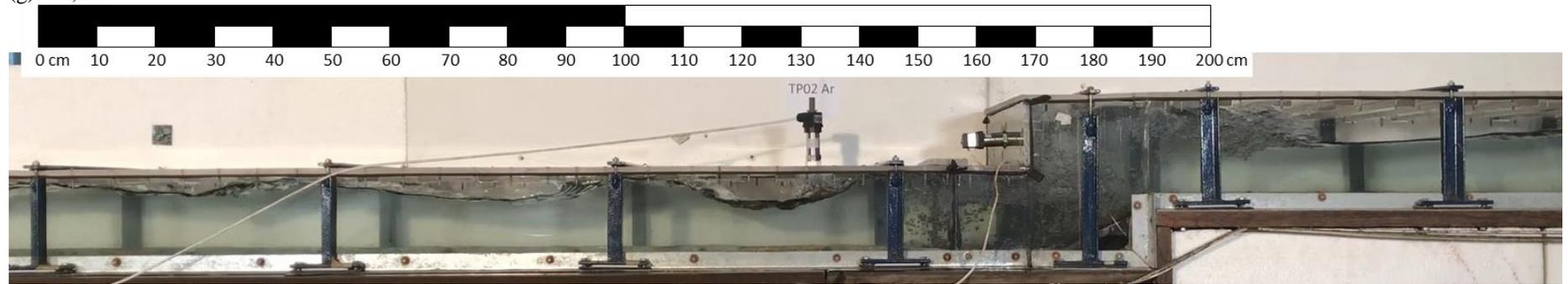
(e) 35,78 s



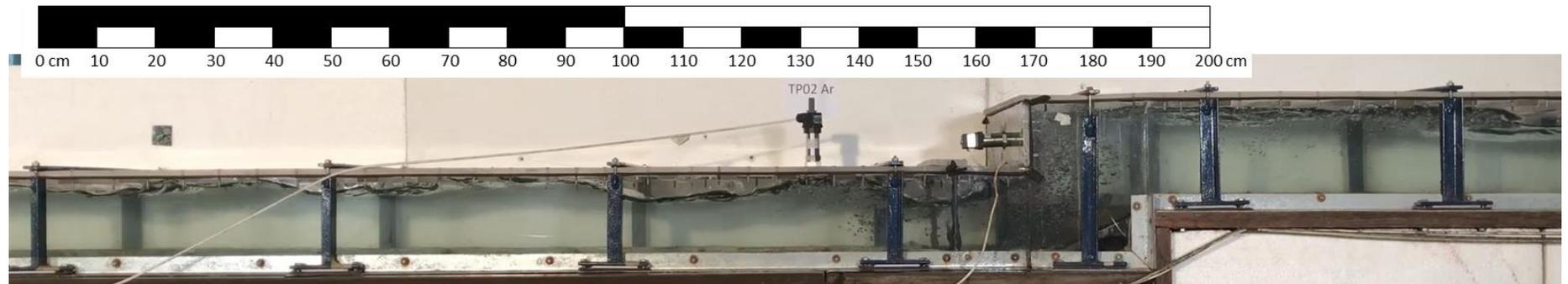
(f) 36,00 s



(g) 36,20 s



(h) 36,80 s



(i) 37,38 s

**Ensaio N(2)J(14)V(VL)**

A Figura 65 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(2)J(14)V(VL). Nesse ensaio, o degrau é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 66 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Impacto da Frente de Enchimento e a passagem de um bolsão de ar pelo degrau. A Figura 67 apresenta o avanço da onda de choque e a passagem do primeiro bolsão de ar pela rampa.

Figura 65. Ensaio N(2)J(14)V(VL) - Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

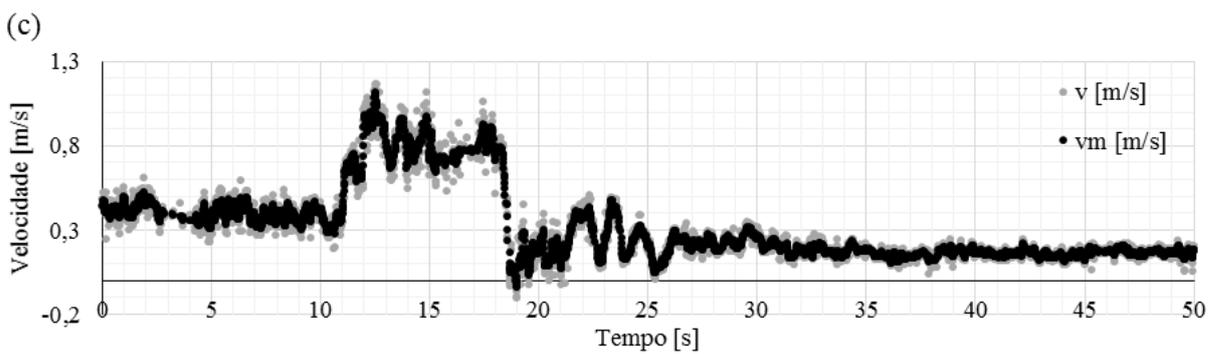
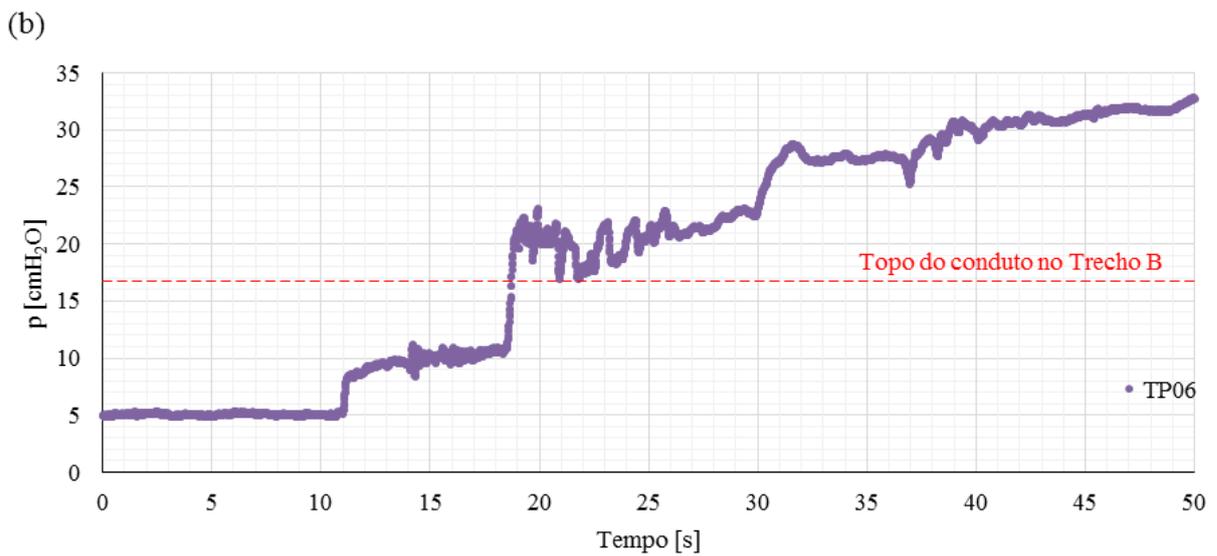
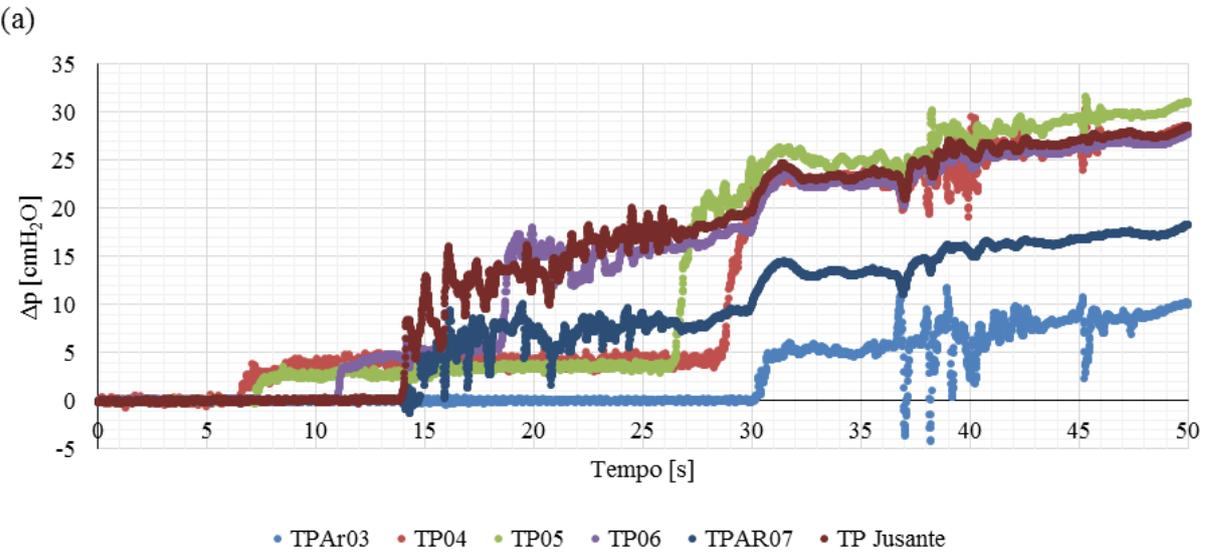
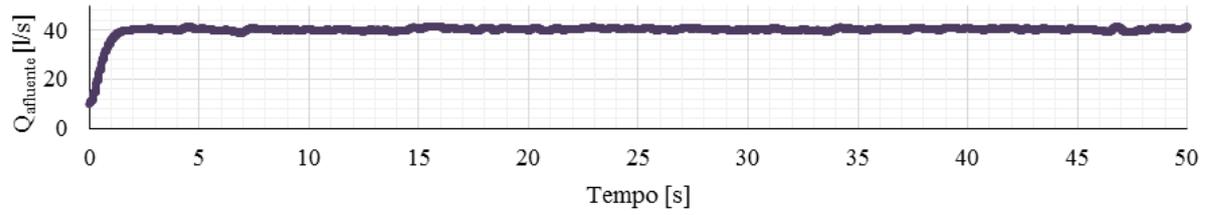
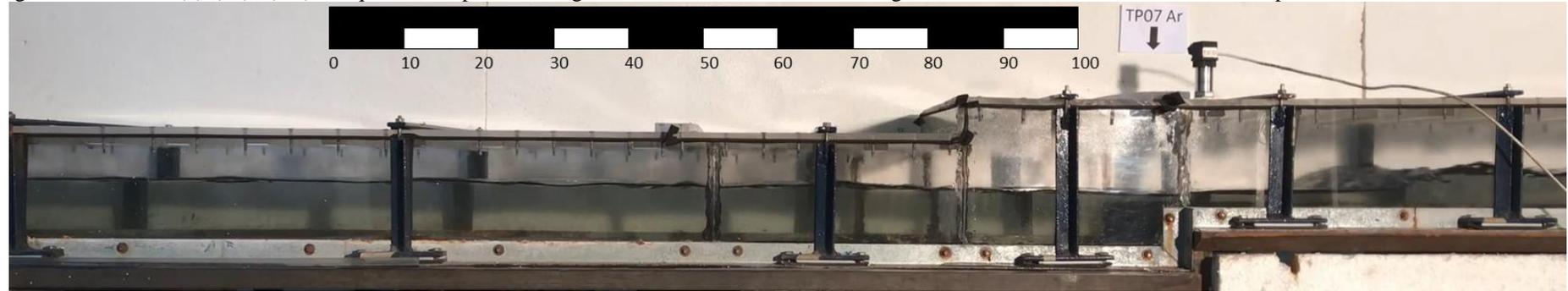
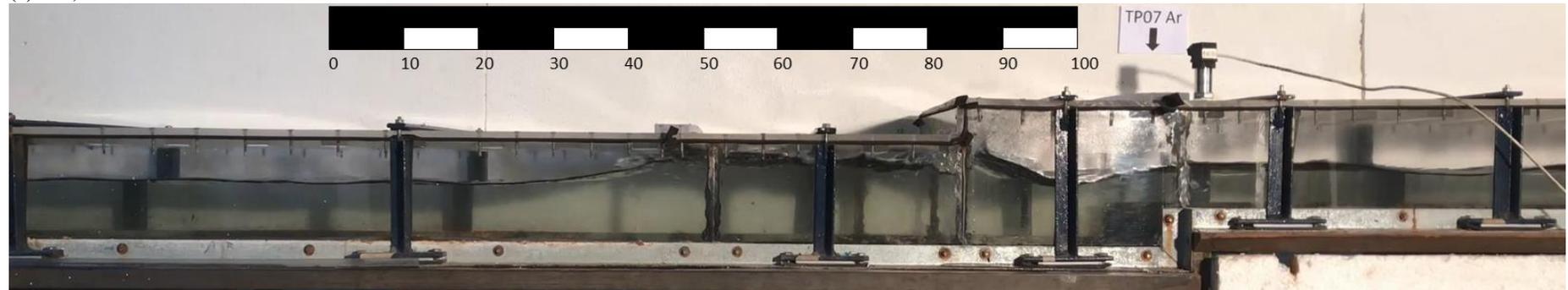


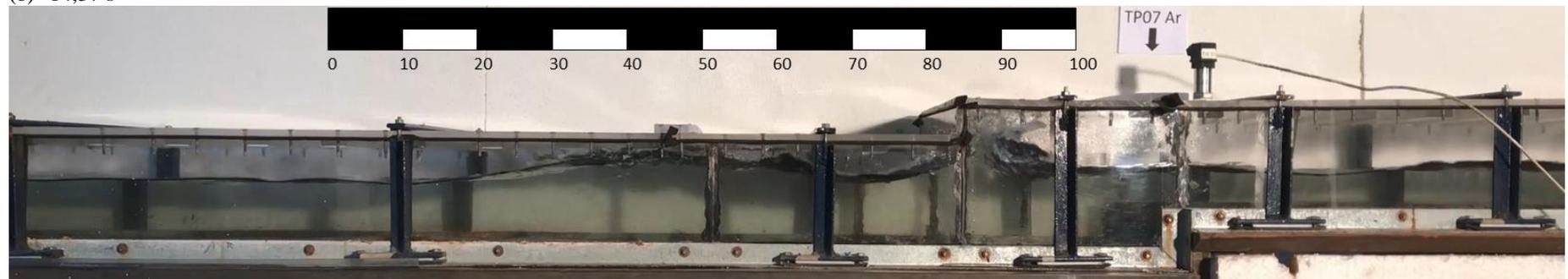
Figura 66. Ensaio N(2)J(14)V(VL) - Sequência temporal da chegada da frente de enchimento ao degrau e estabelecimento de mecanismo de aprisionamento de ar.



(a) 13,63 s



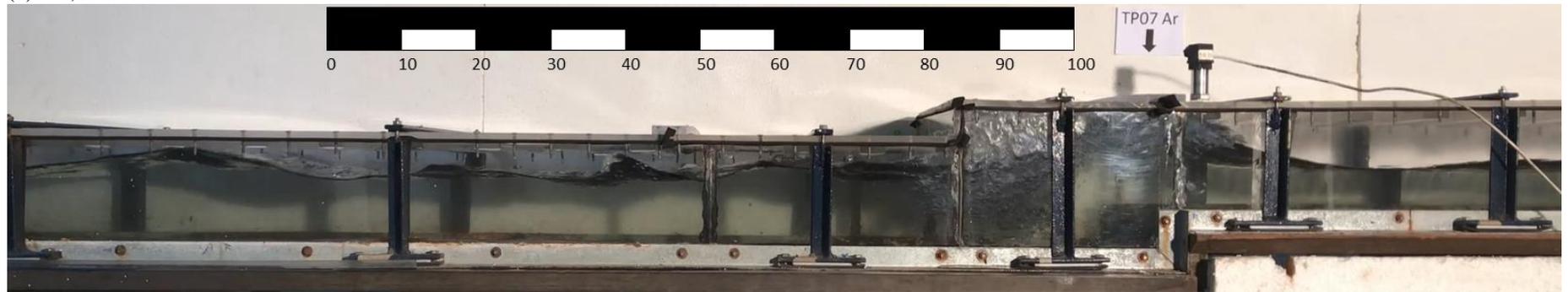
(b) 14,37 s



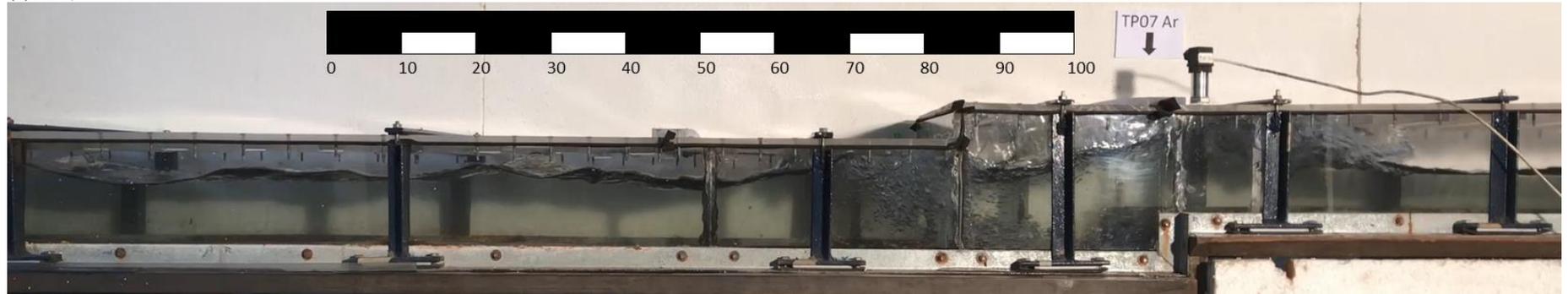
(c) 14,47 s



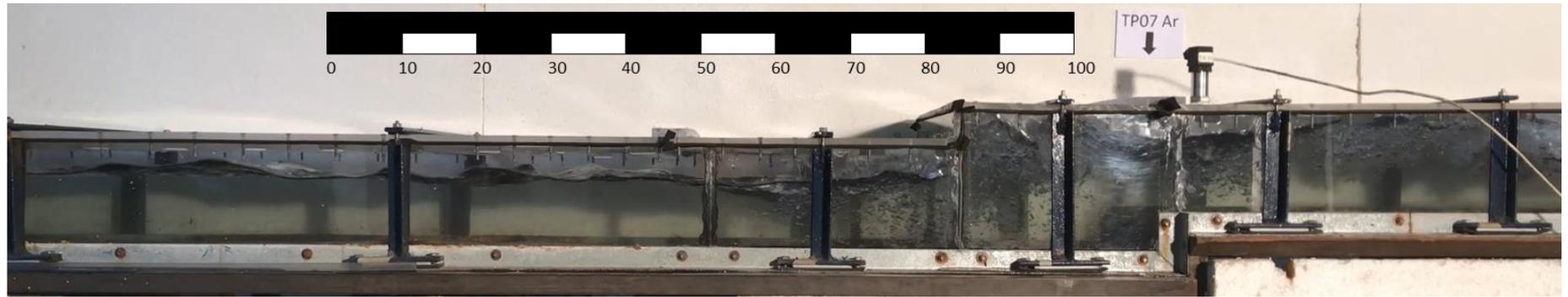
(d) 14,67 s



(e) 14,93 s

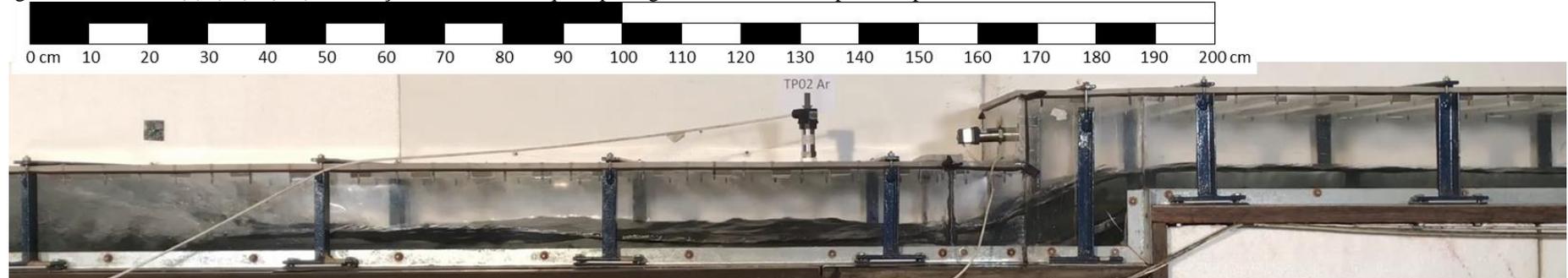


(f) 15,17

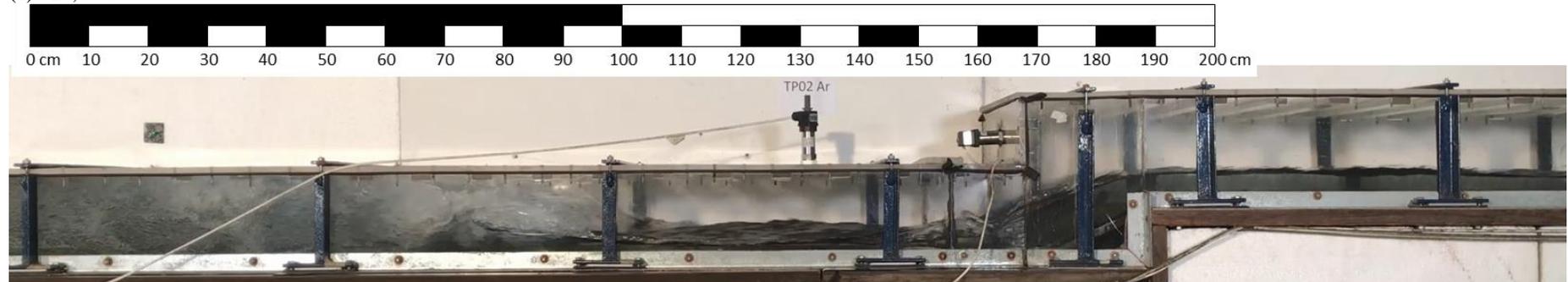


(g) 15,57 s

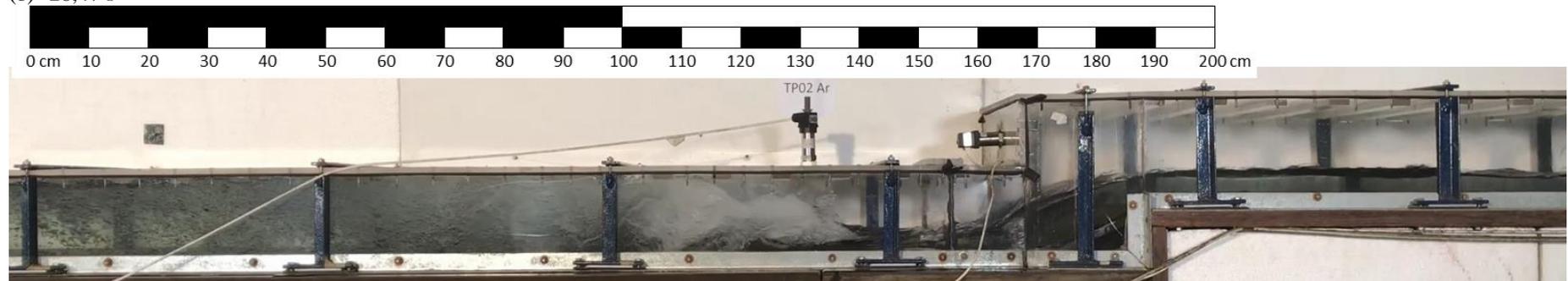
Figura 67. Ensaio N(2)J(14)V(VL) – Avanço da onda de choque e passagem do bolsão de ar pela rampa.



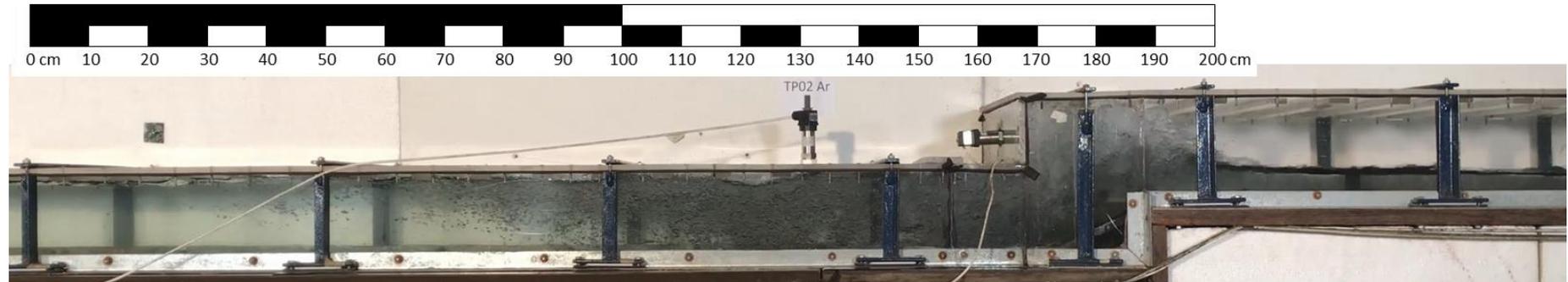
(a) 27,57 s



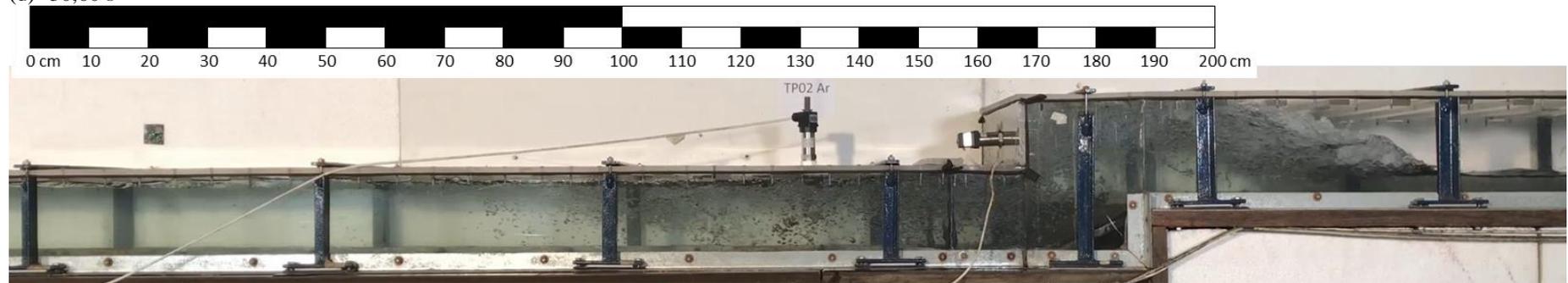
(b) 28,47 s



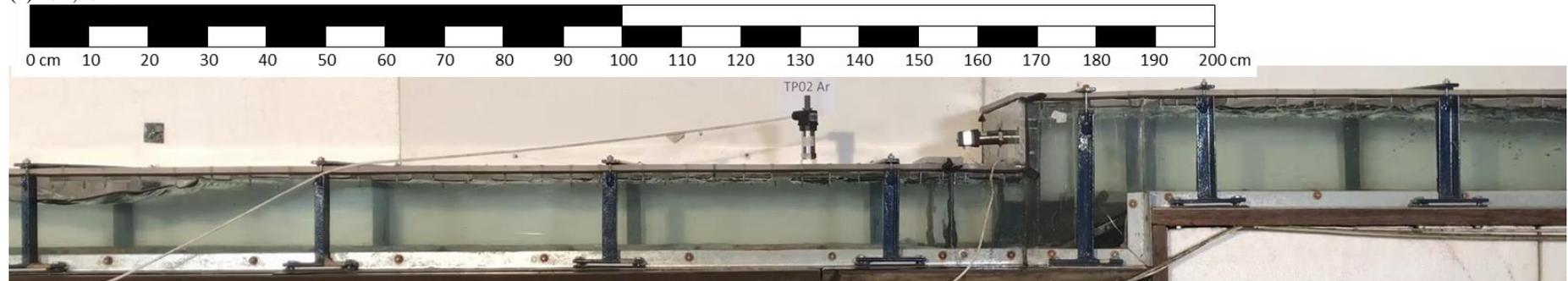
(c) 29,13 s



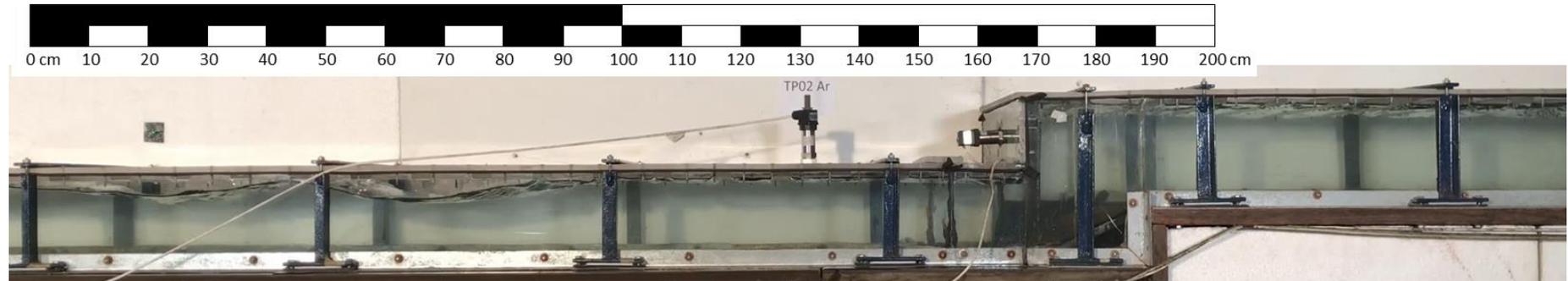
(d) 30,60 s



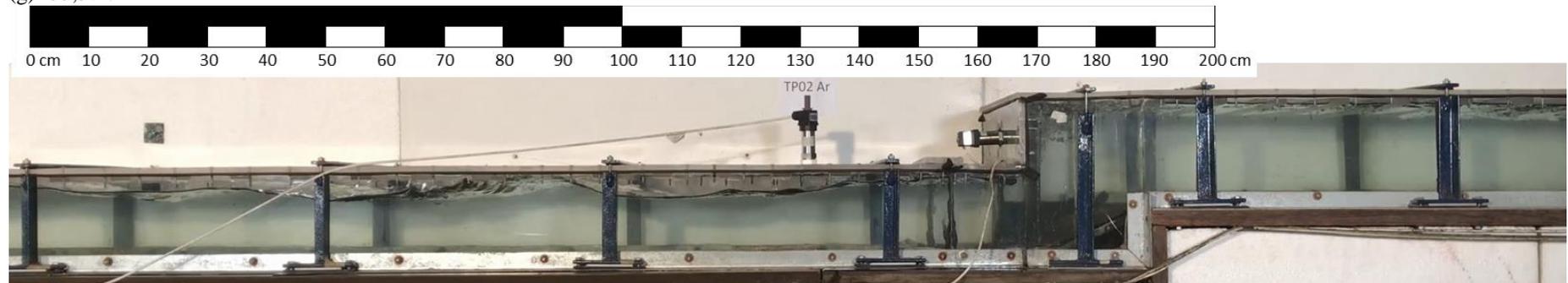
(e) 31,23 s



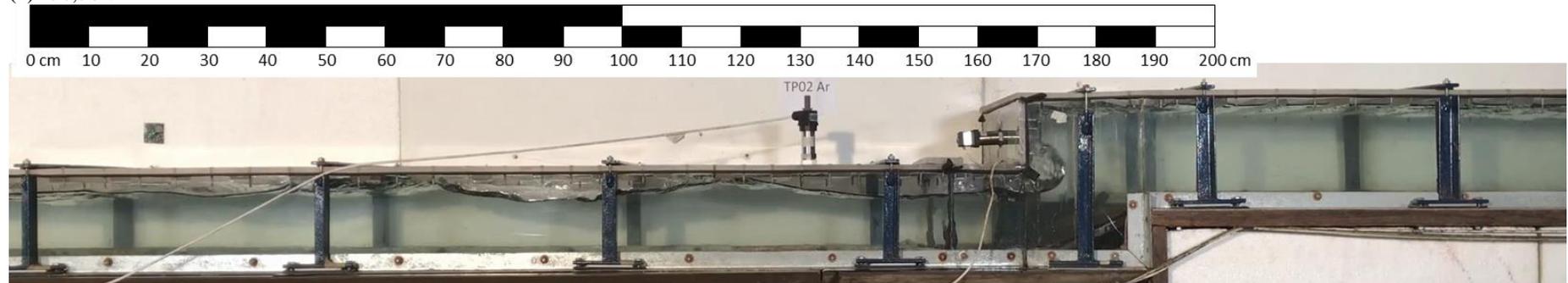
(f) 34,37 s



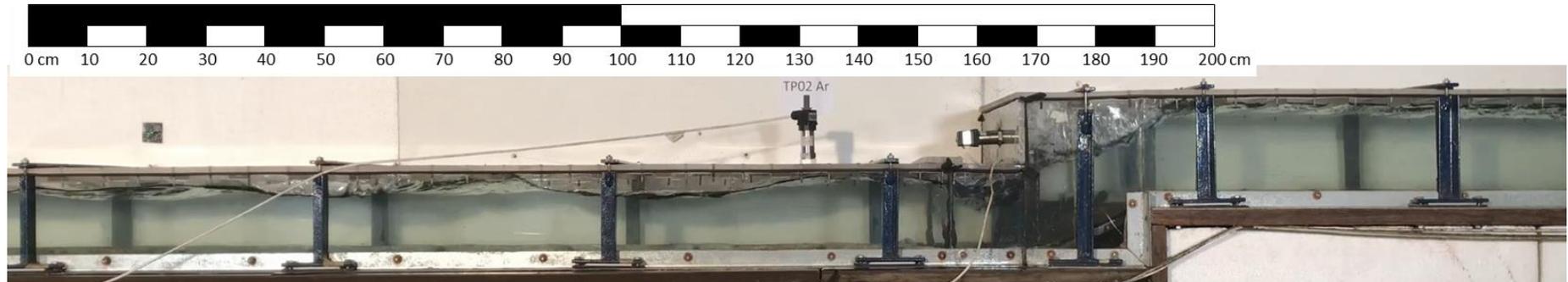
(g) 35,57 s



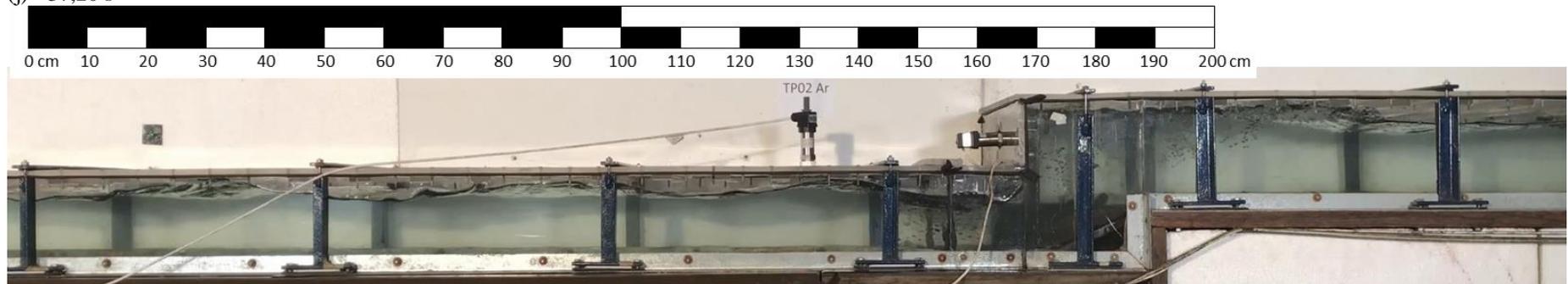
(h) 36,38 s



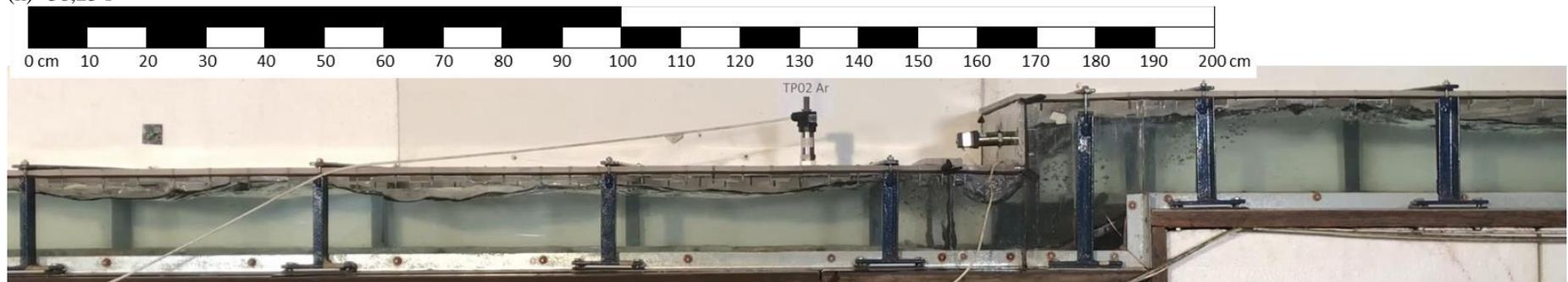
(i) 36,93 s



(j) 37,20 s



(k) 38,23 s



(l) 38,43 s

**Ensaio N(3)J(5)V(VL)**

A Figura 68 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(3)J(5)V(VL). Nesse ensaio, a rampa é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 69 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Impacto da Frente de Enchimento, seguido pelo mecanismo Interface de Pressurização, e a passagem de bolsões de ar pelo degrau.

Figura 68. Ensaio N(3)J(5)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

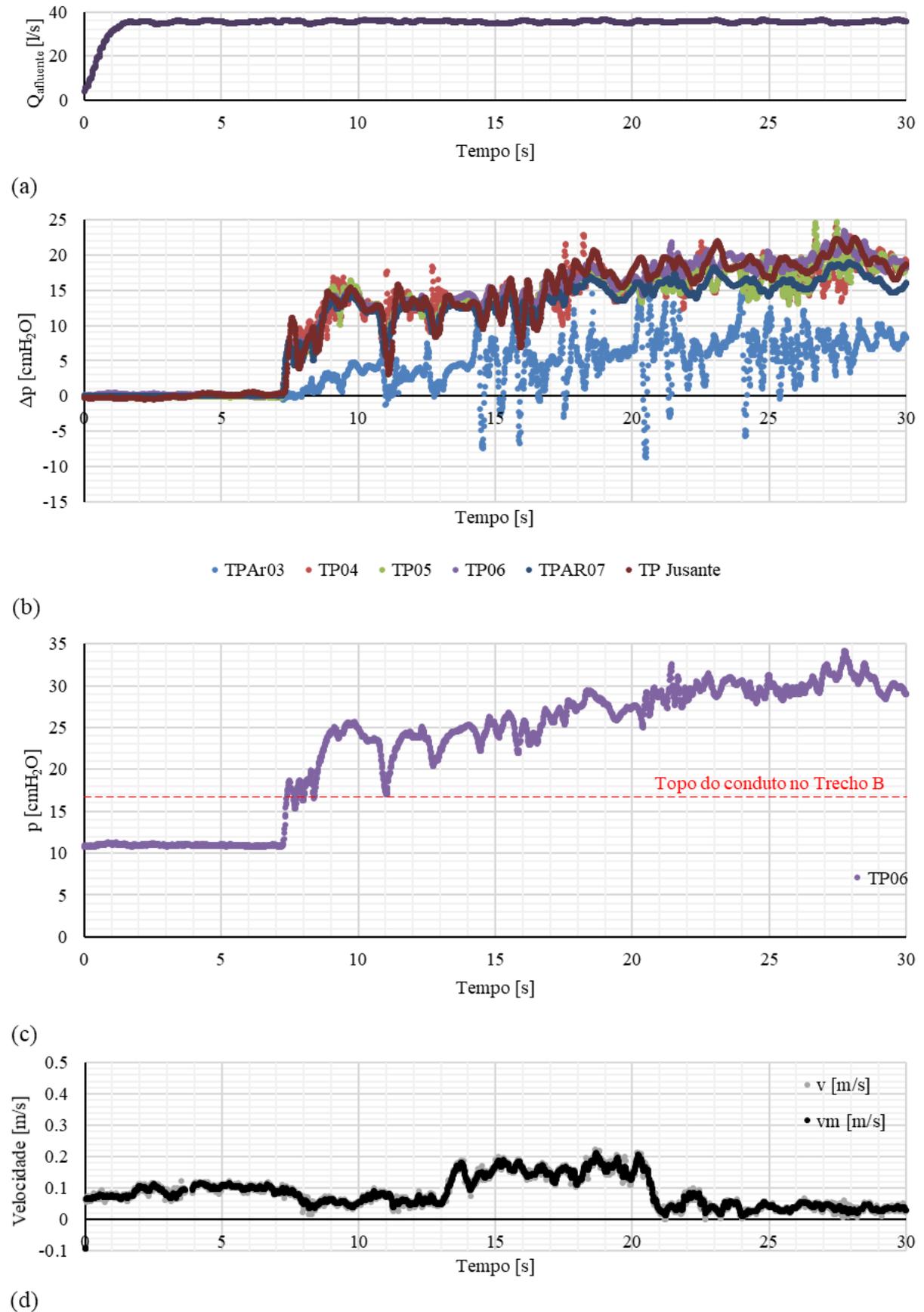
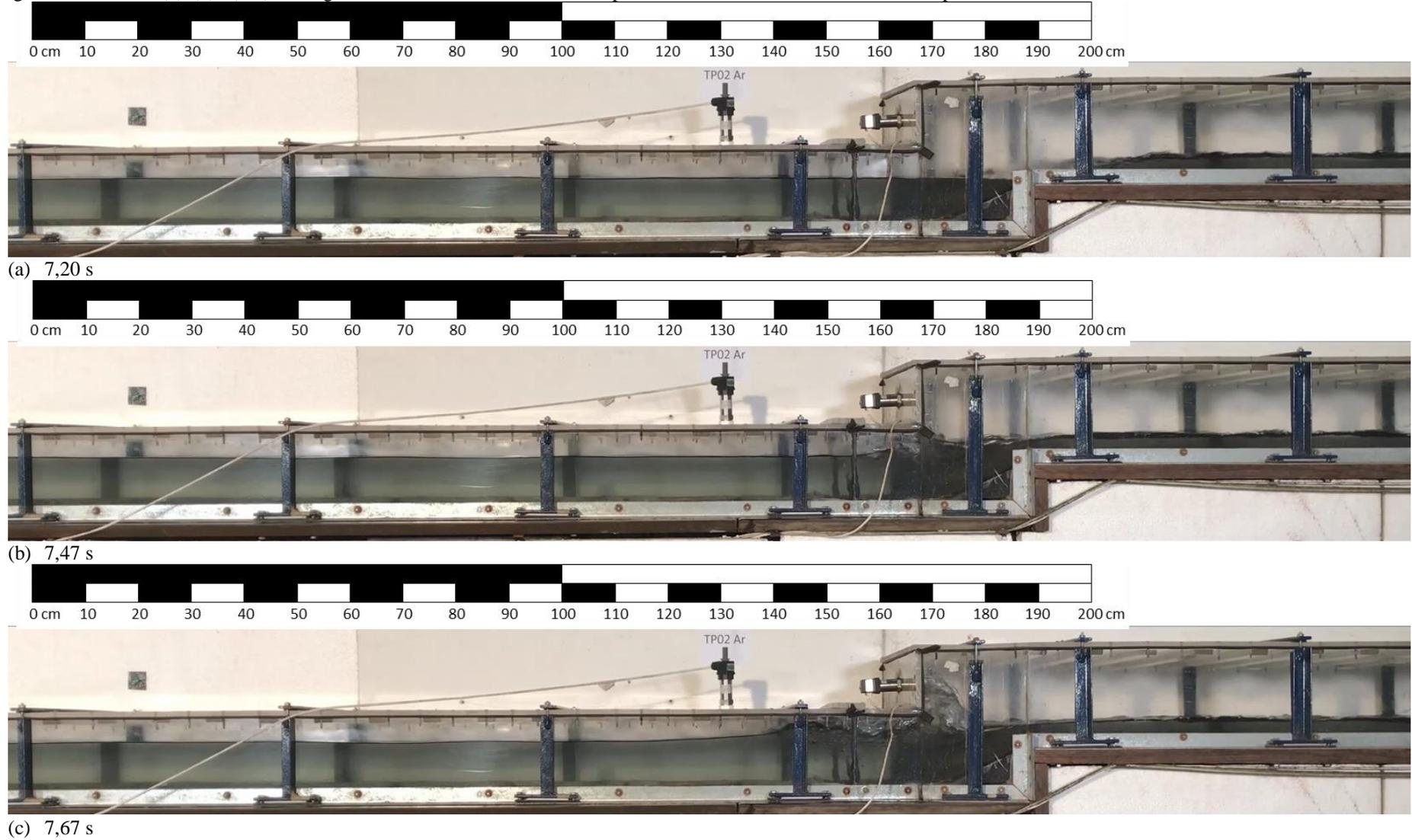
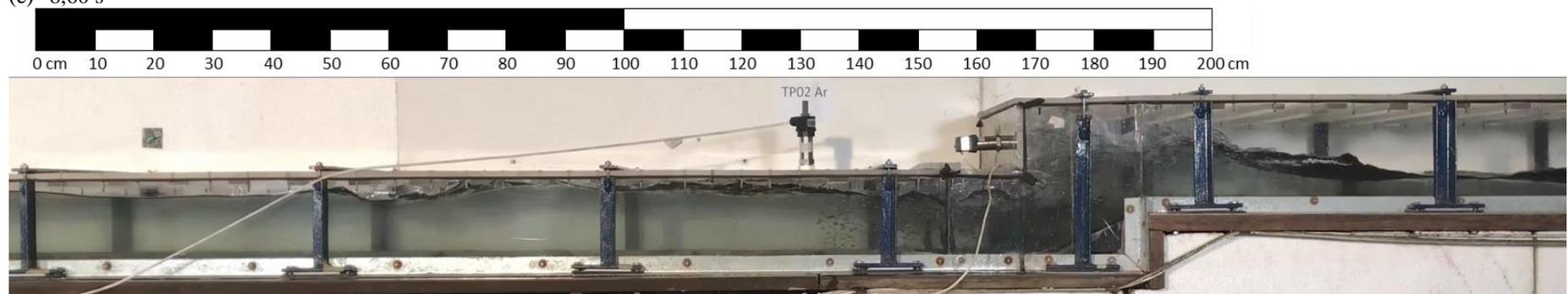
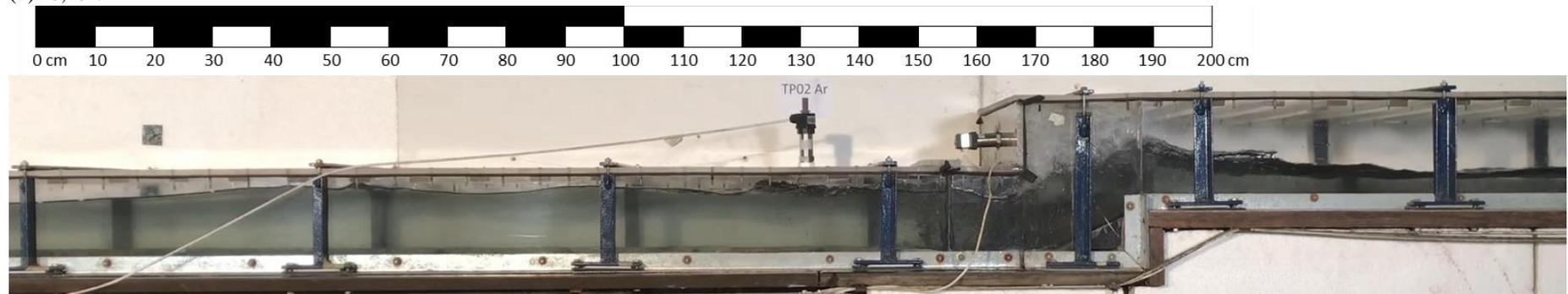
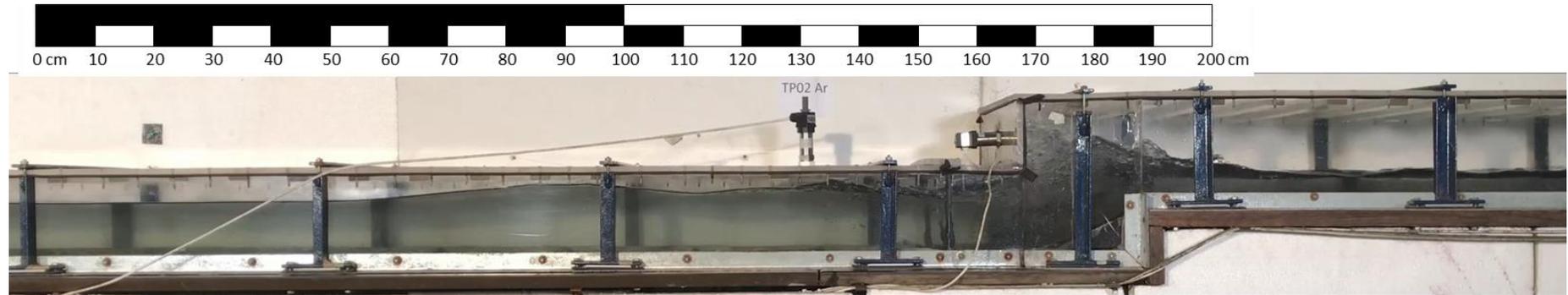
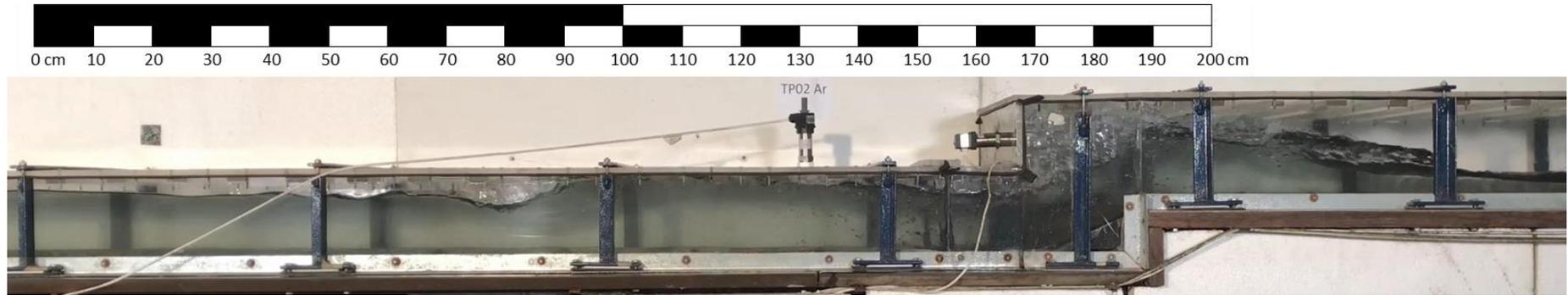


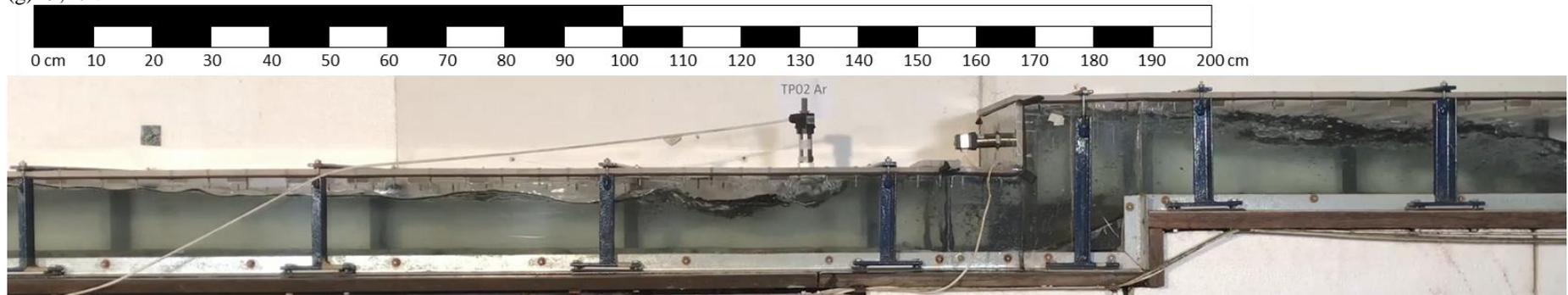
Figura 69. Ensaio N(3)J(5)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IFE.



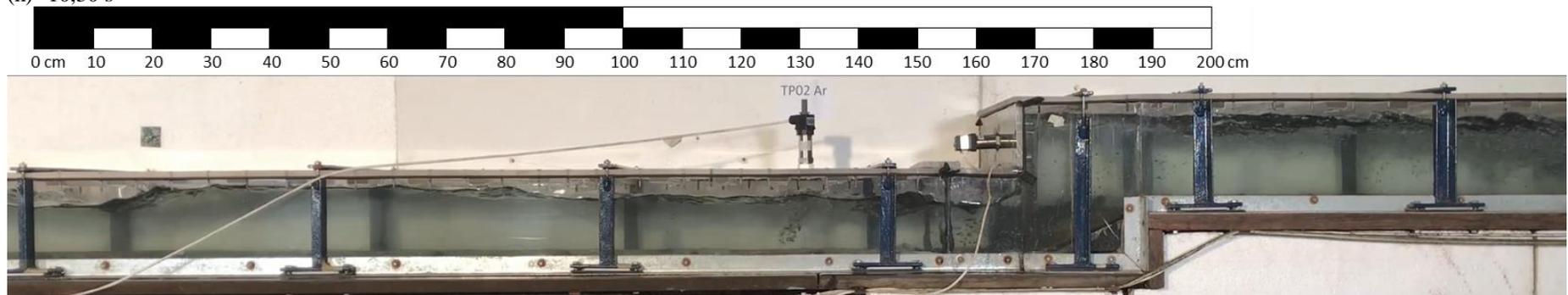




(g) 9,40 s



(h) 10,30 s



(i) 10,90 s

**Ensaio N(3)J(10)V(VL)**

A Figura 70 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(3)J(10)V(VL). Nesse ensaio, a rampa é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 71 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização e a passagem de bolsões de ar pelo degrau.

Figura 70. Ensaio N(3)J(10)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

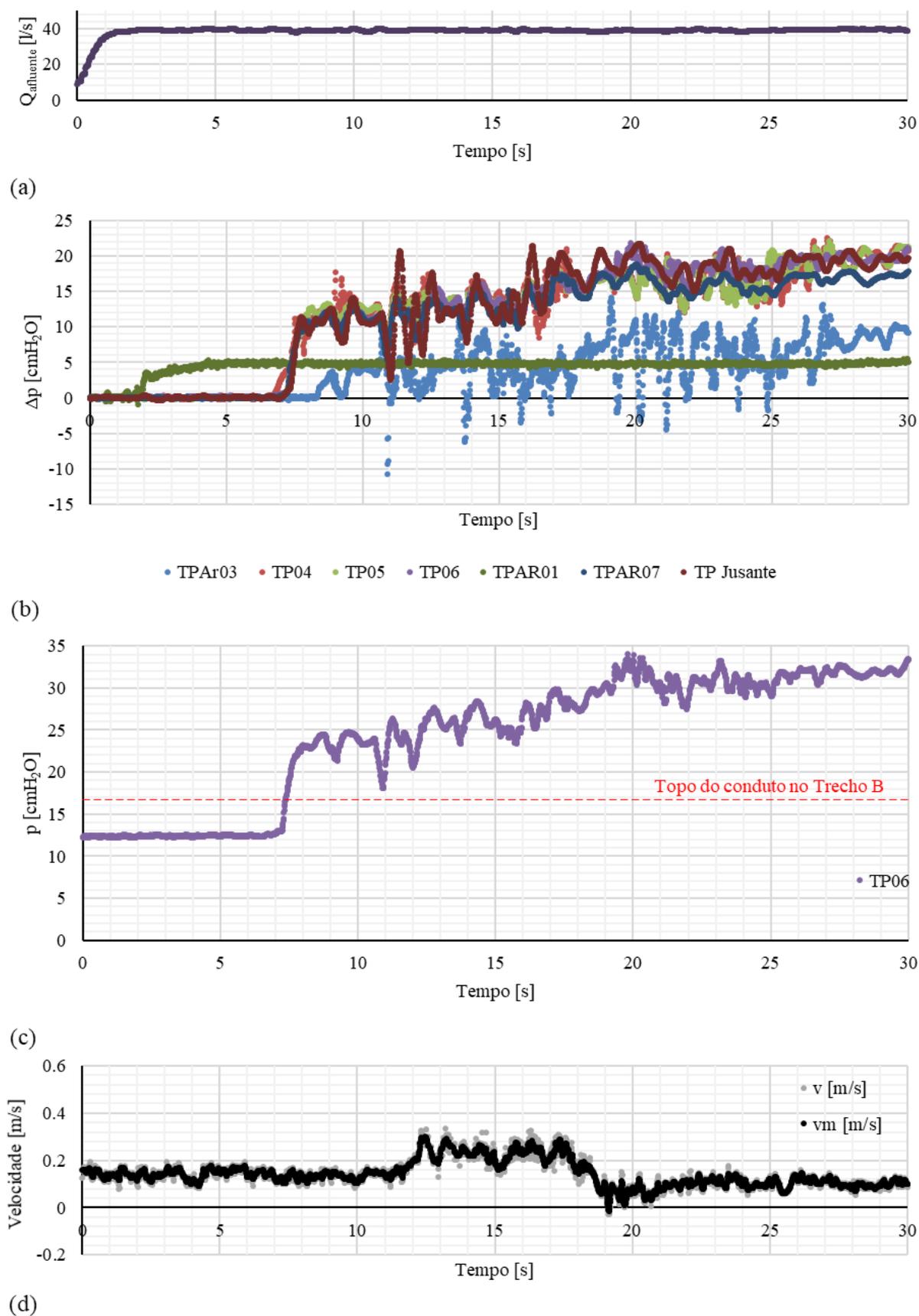
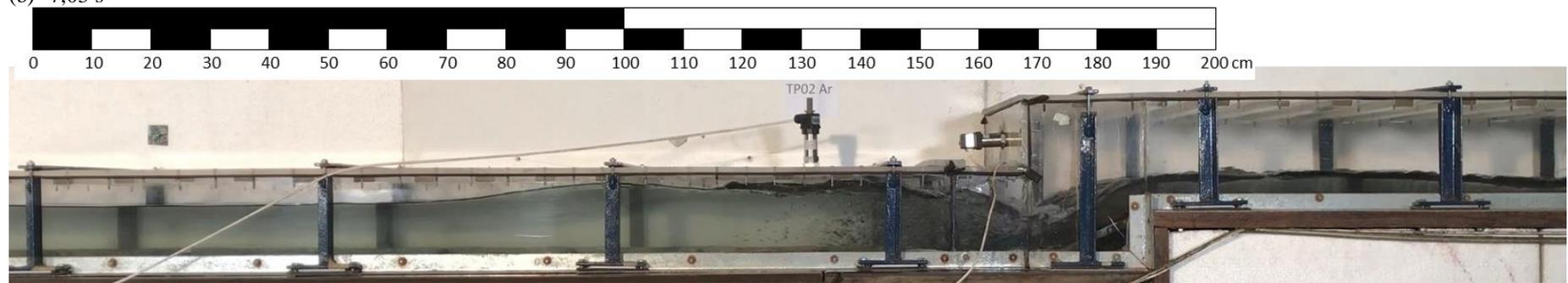
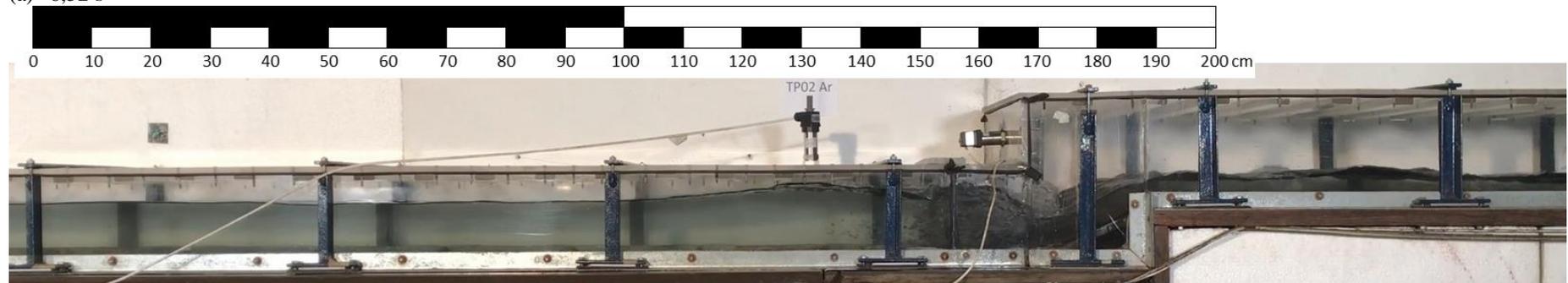
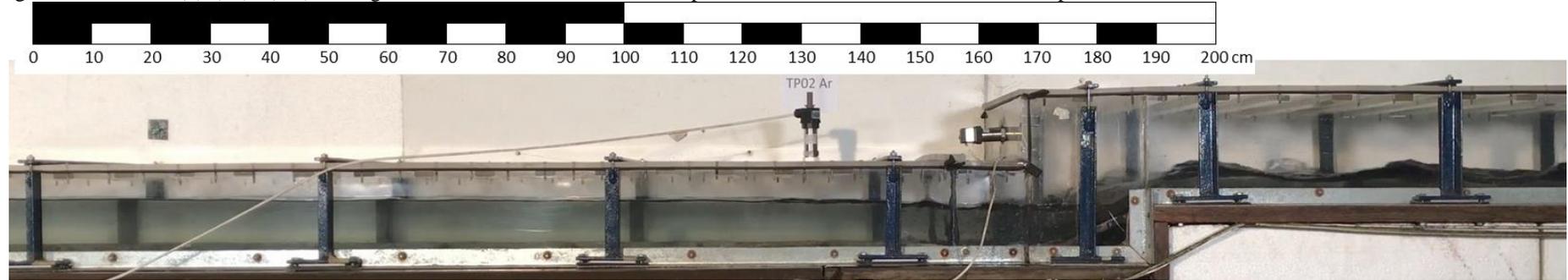
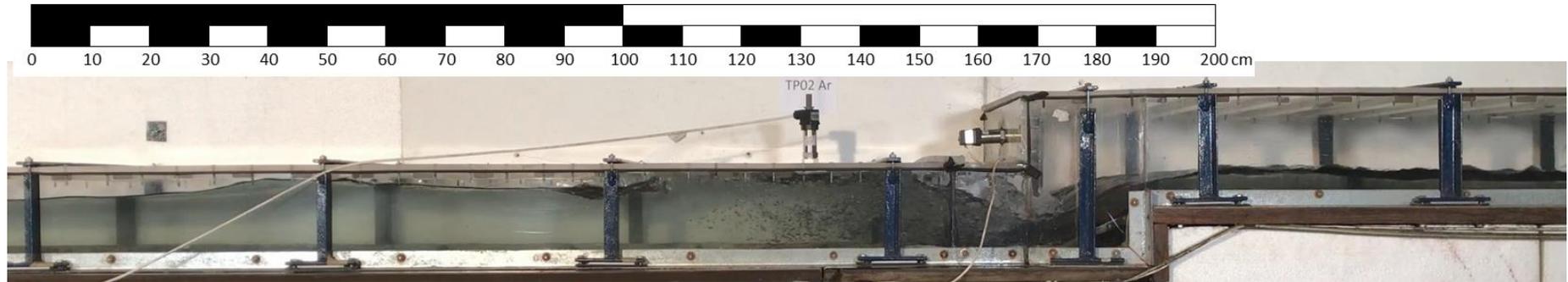
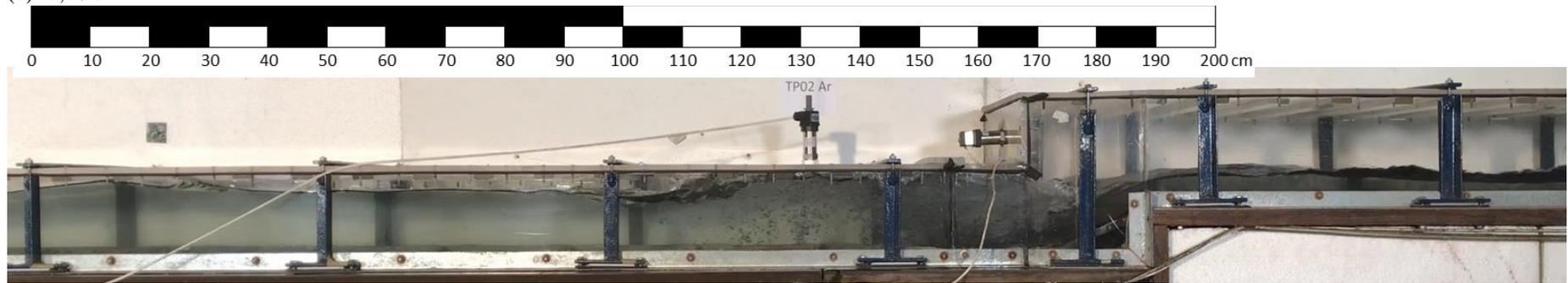


Figura 71. Ensaio N(3)J(10)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP.

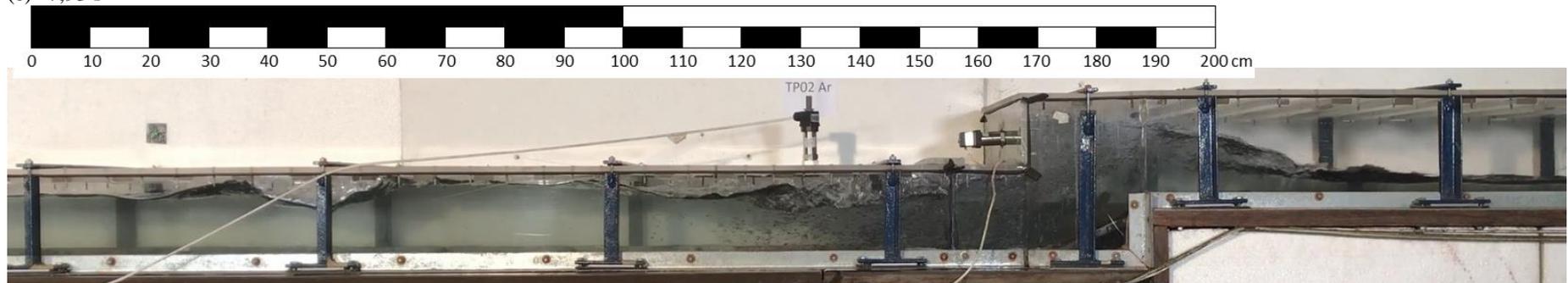




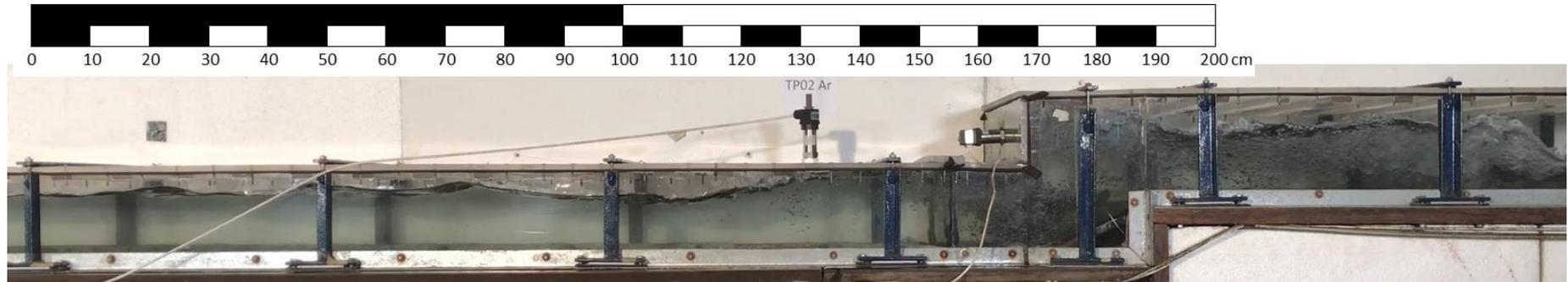
(d) 7,70 s



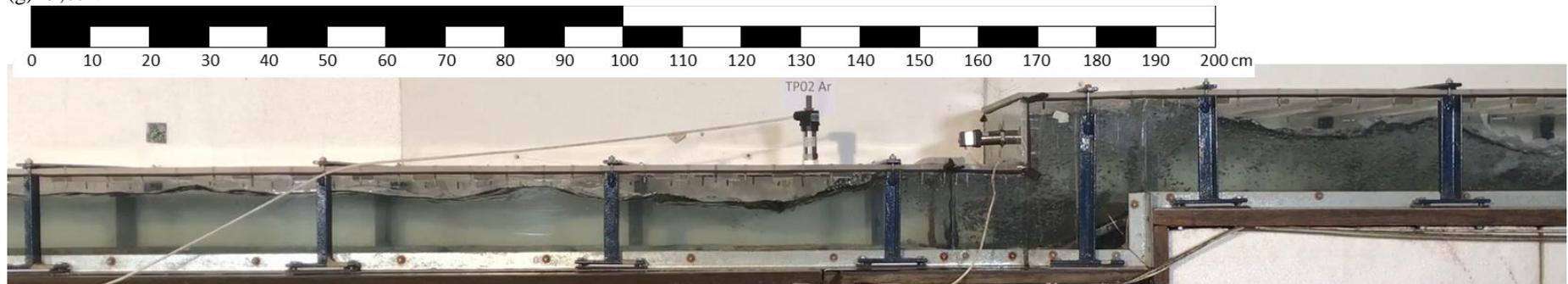
(e) 7,93 s



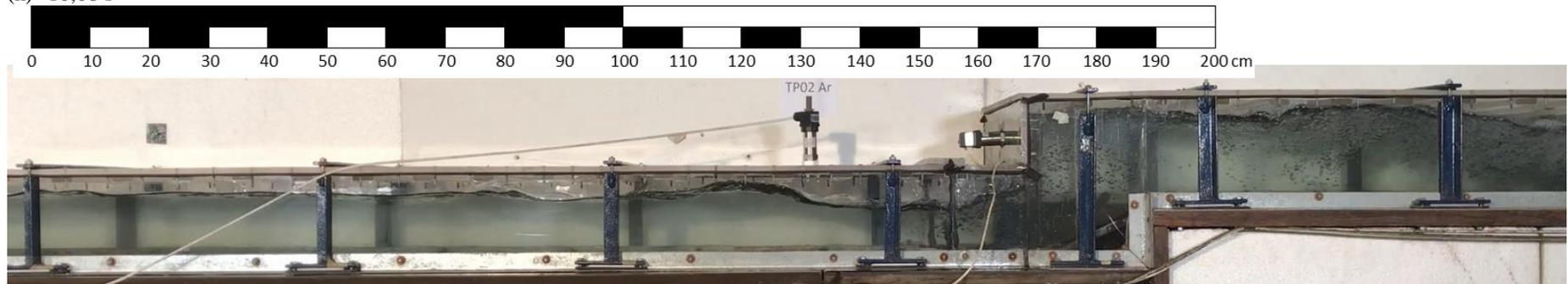
(f) 8,73 s



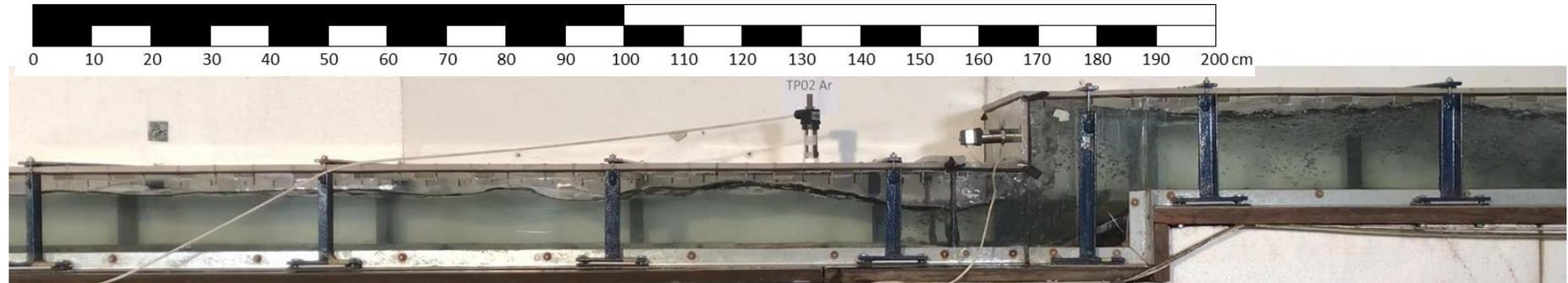
(g) 9,83 s



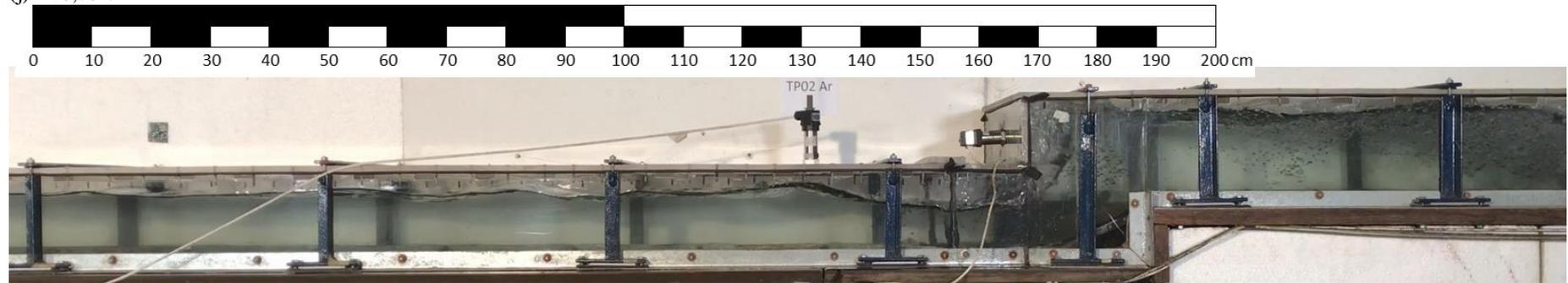
(h) 10,08 s



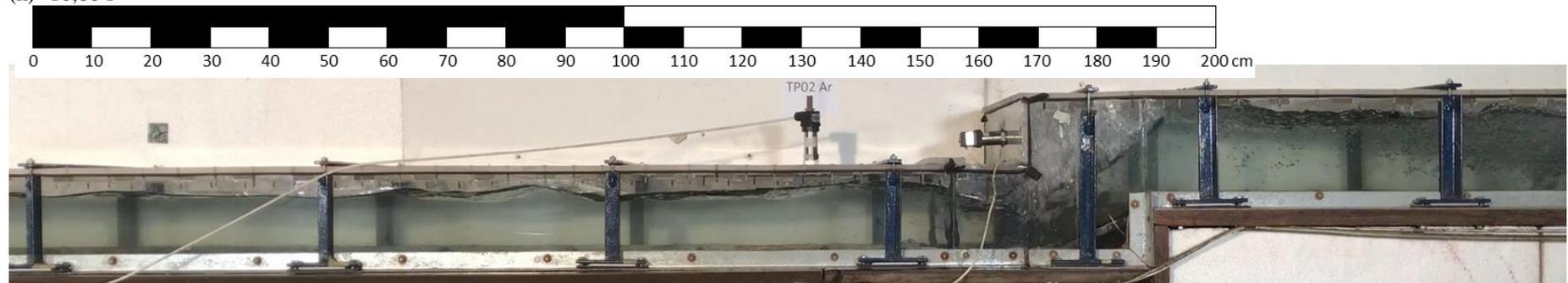
(i) 10,63 s



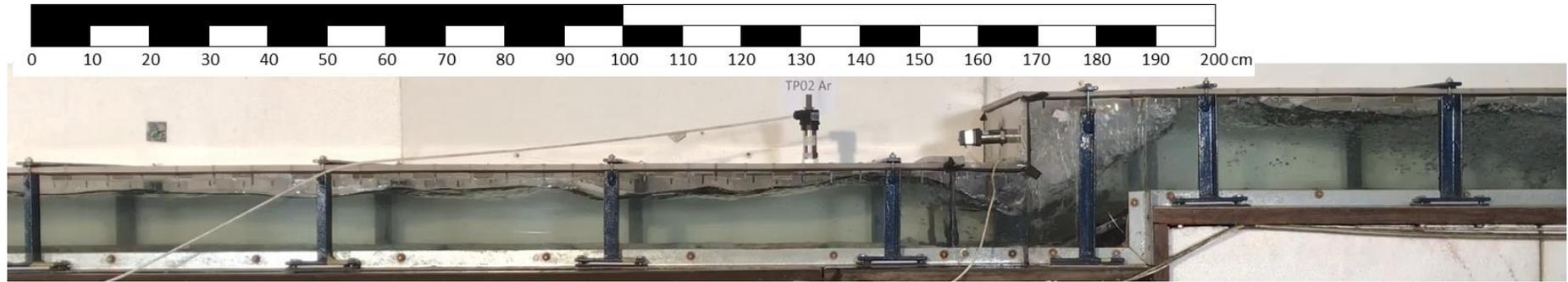
(j) 10,73 s



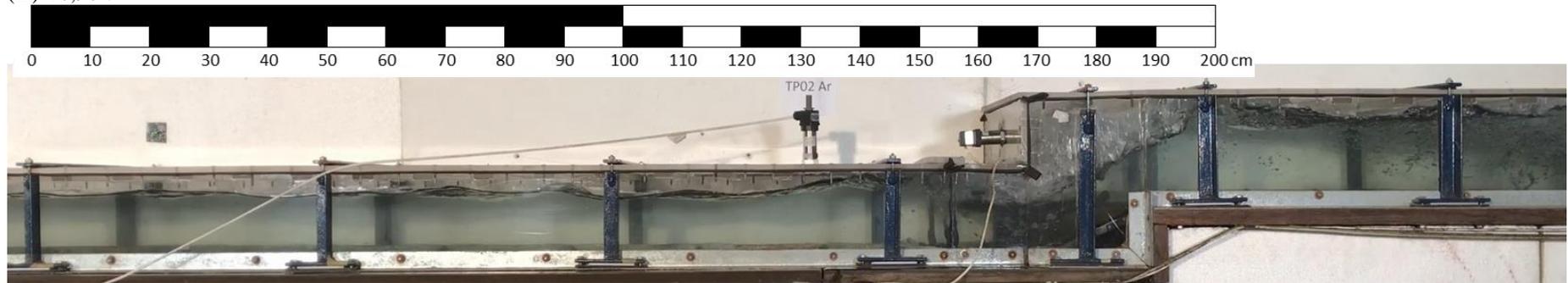
(k) 10,80 s



(l) 10,95 s



(m) 10,98 s



11,07 s

**Ensaio N(3)J(14)V(VL)**

A Figura 72 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(3)J(14)V(VL). Nesse ensaio, a rampa é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 73 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização e a passagem de bolsões de ar pelo degrau.

Figura 72. Ensaio N(3)J(14)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

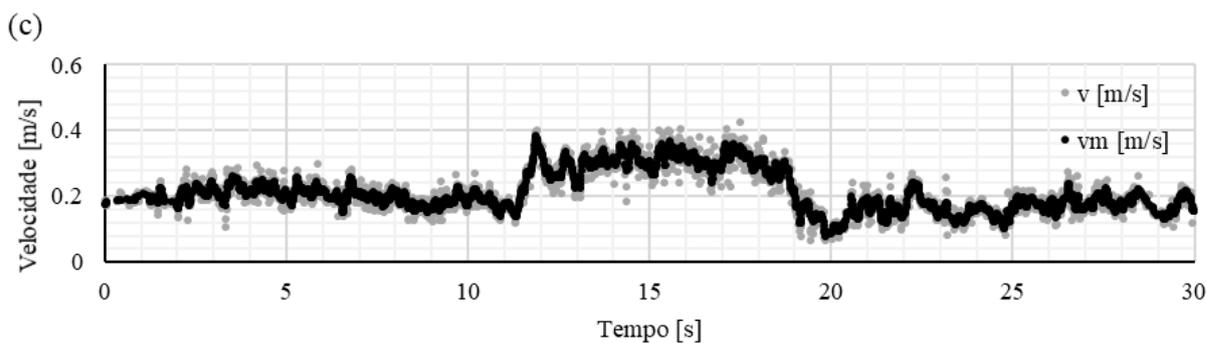
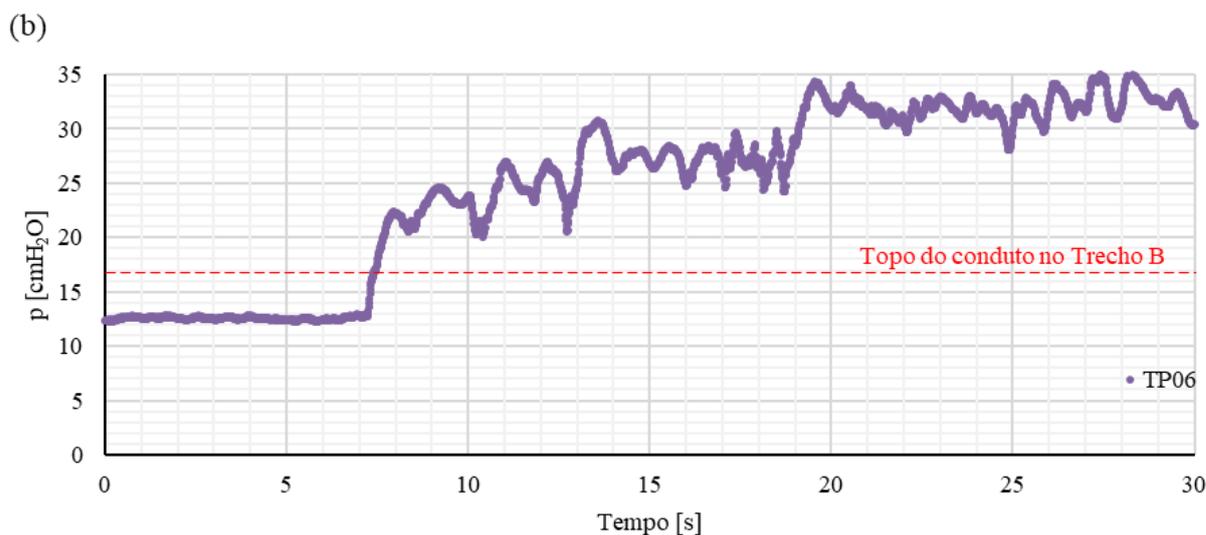
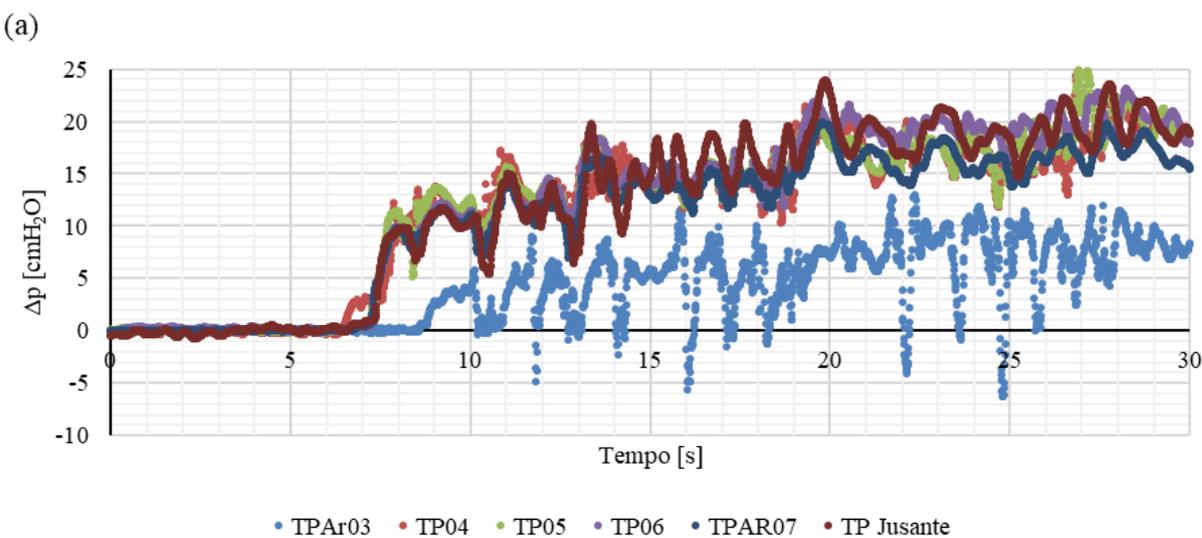
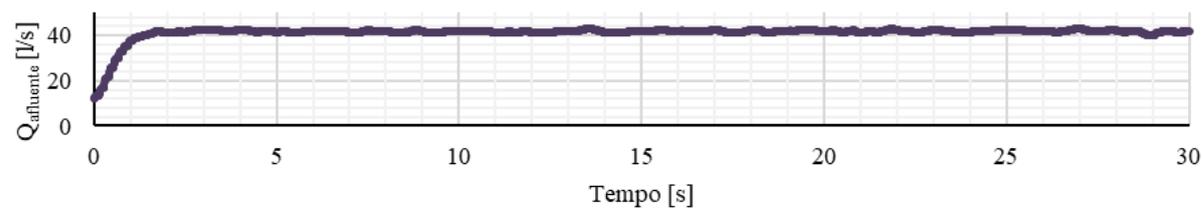
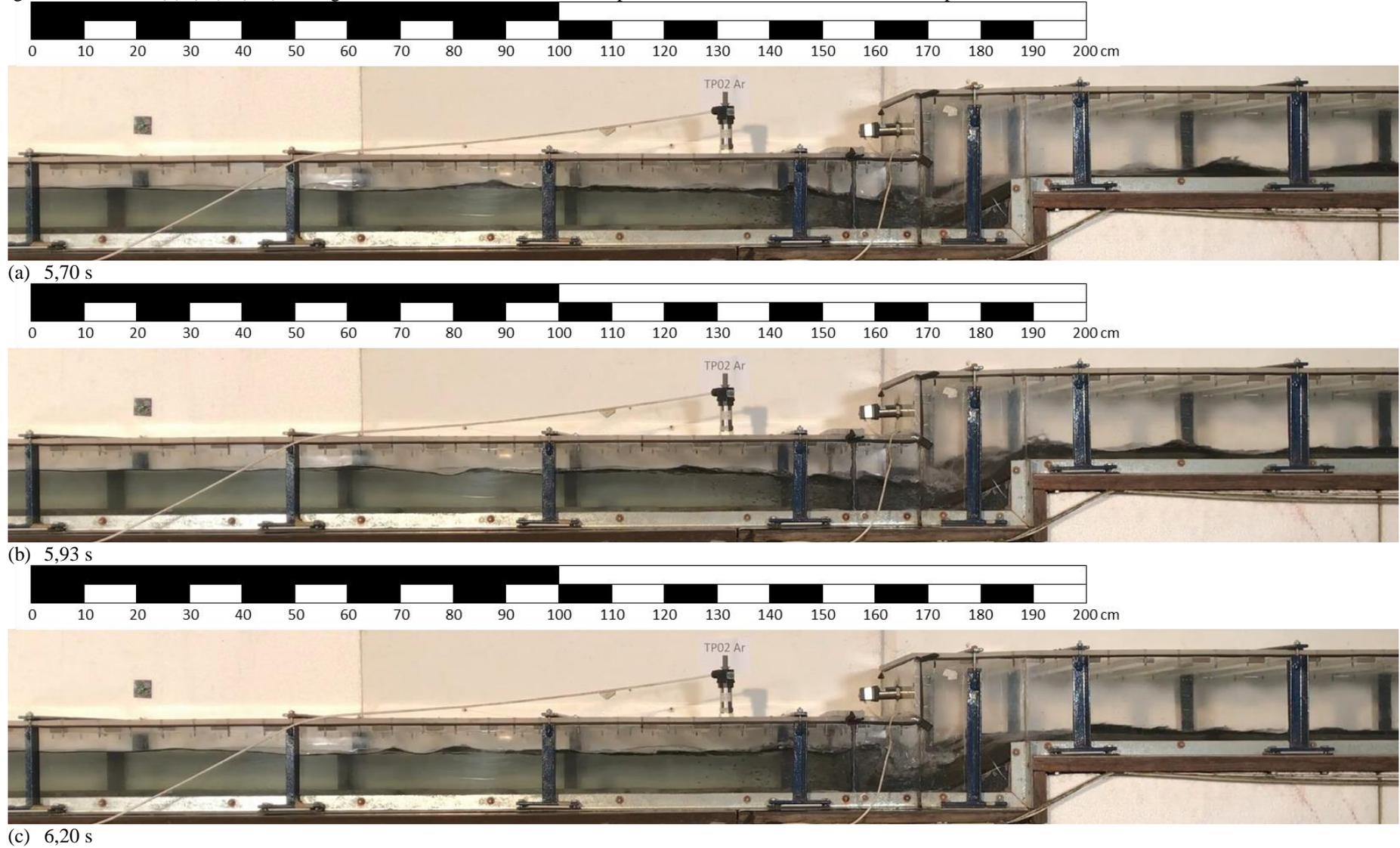
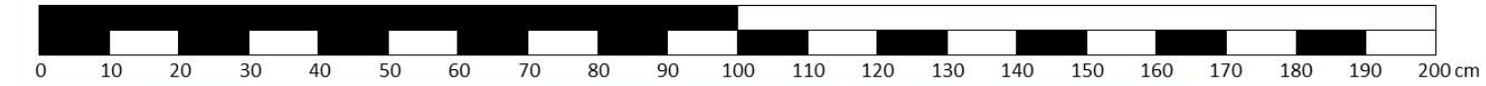
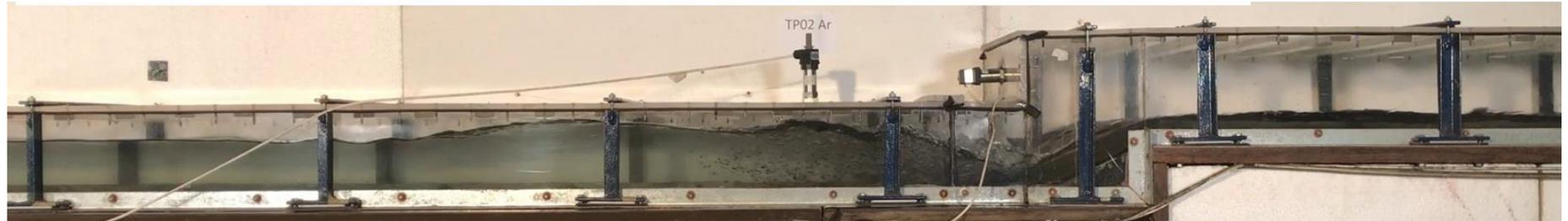
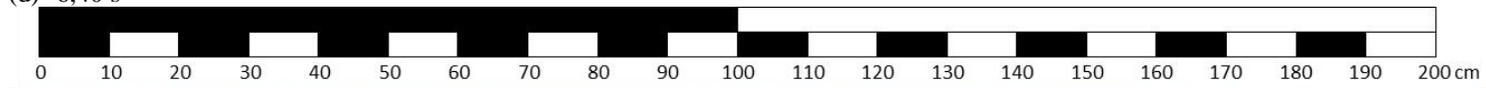


Figura 73. Ensaio N(3)J(14)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP.

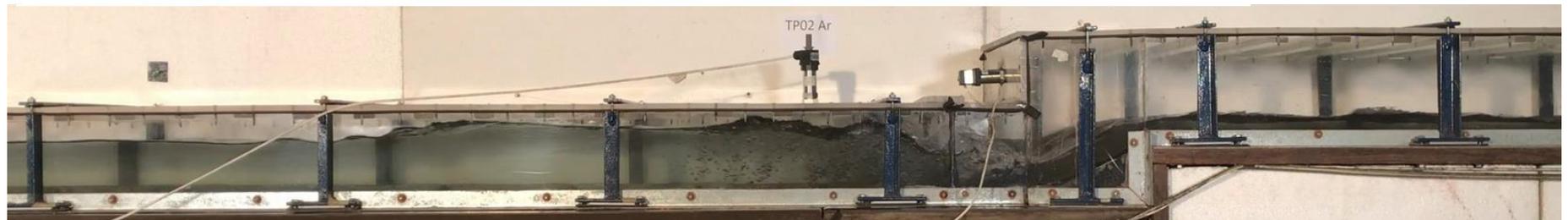
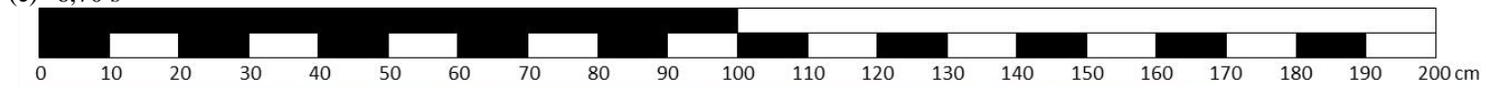




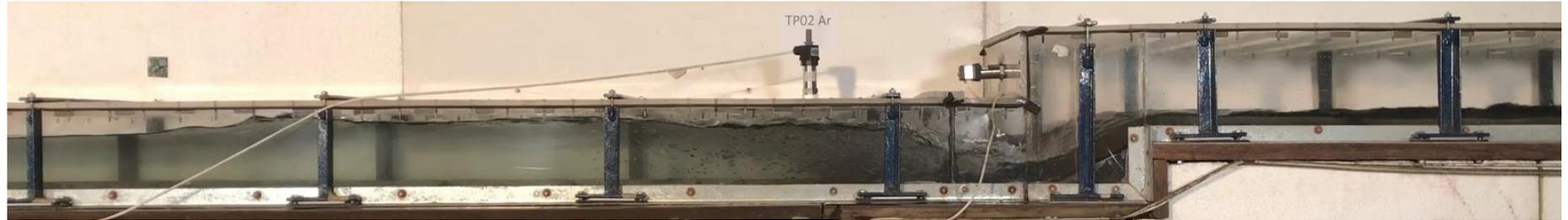
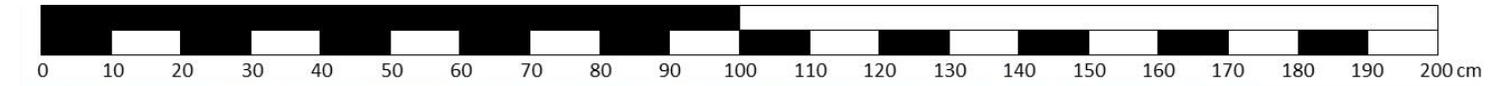
(d) 6,40 s



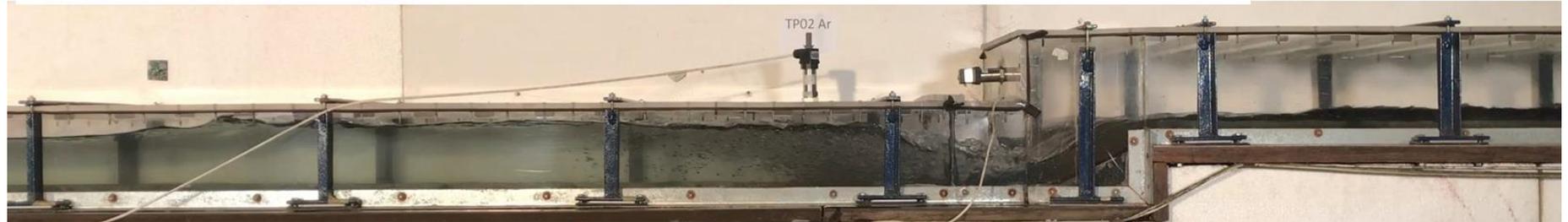
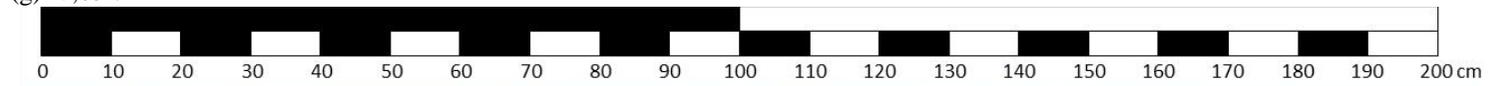
(e) 6,70 s



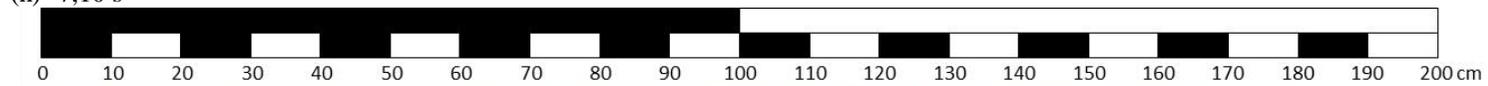
(f) 6,77 s



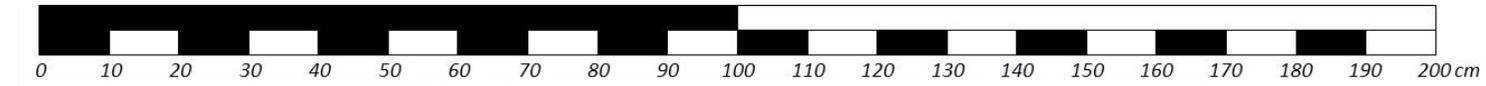
(g) 7,03 s



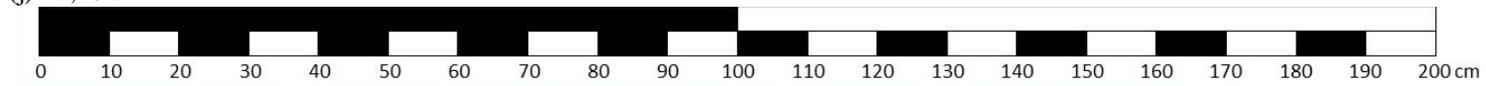
(h) 7,10 s



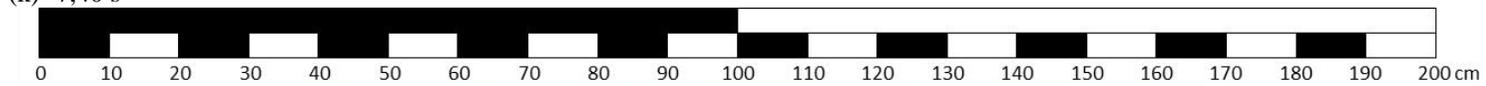
(i) 7,13 s



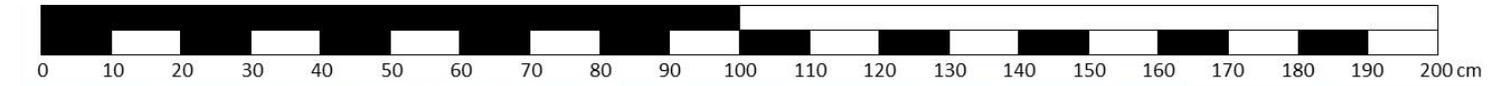
(j) 7,20 s



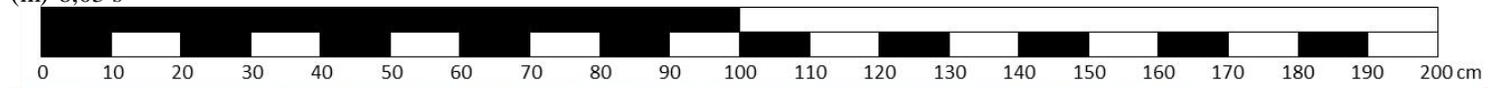
(k) 7,40 s



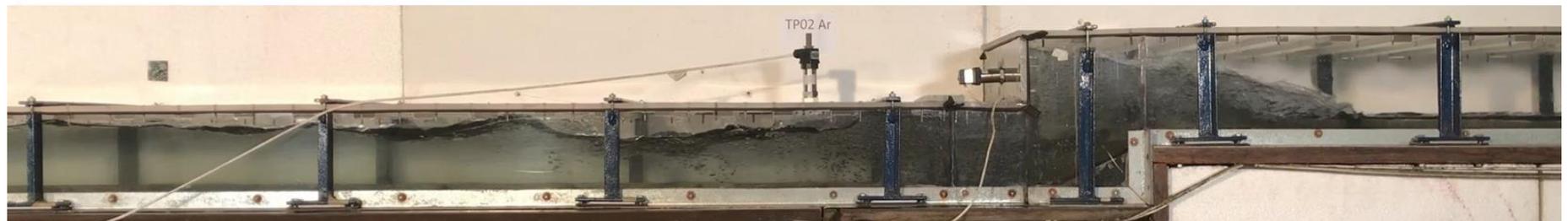
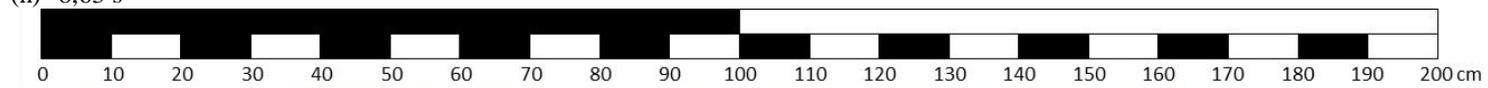
(l) 7,67 s



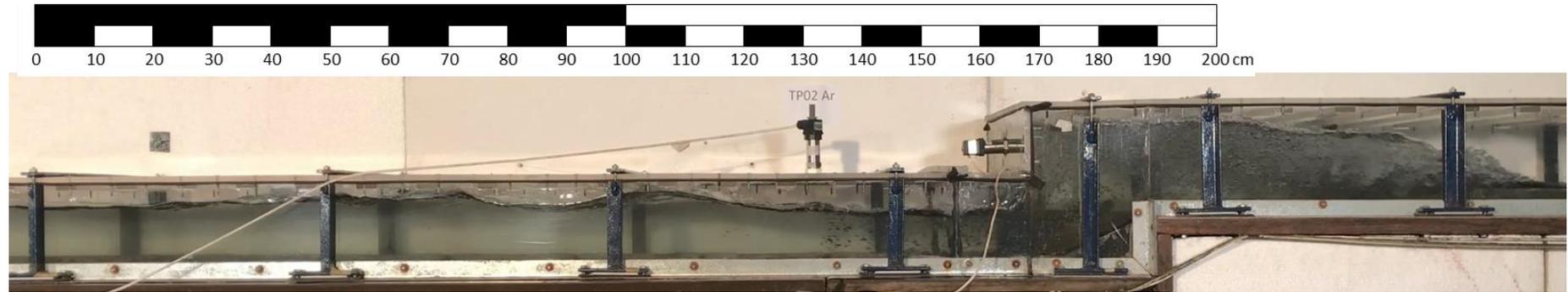
(m) 8,03 s



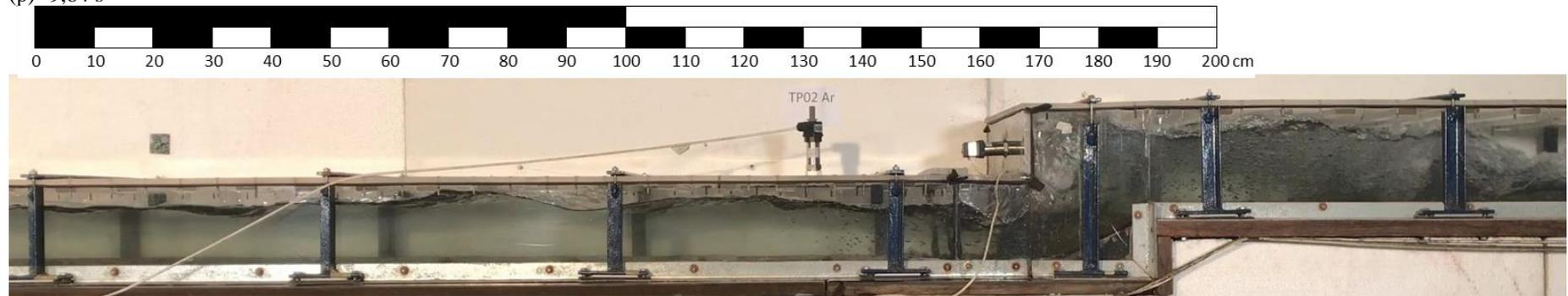
(n) 8,63 s



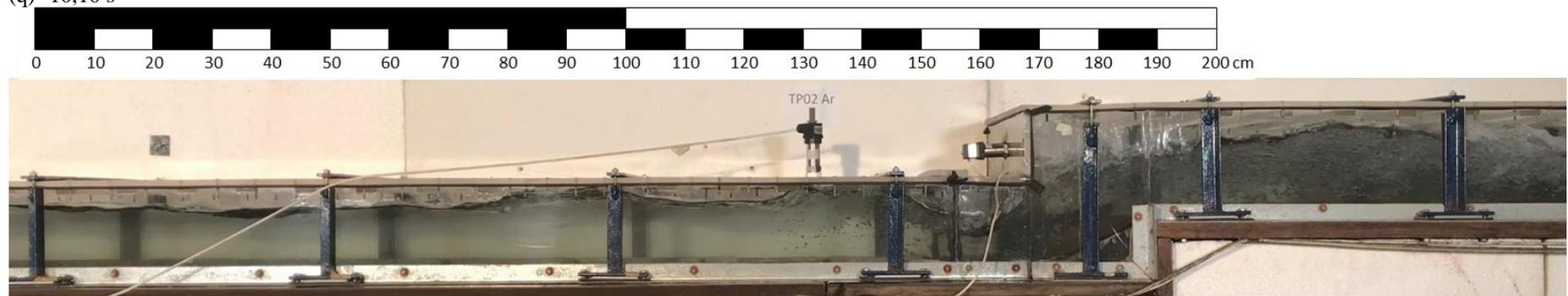
(o) 9,17 s



(p) 9,84 s



(q) 10,10 s



(r) 10,43 s

**Ensaio N(3)J(27)V(VL)**

A Figura 74 apresenta os dados de vazão afluyente, pressão e velocidade registrados durante o Ensaio N(3)J(27)V(VL). Nesse ensaio, a rampa é o local de aprisionamento dos bolsões de ar. Assim, a Figura 75 indica a chegada da frente de enchimento, o estabelecimento do mecanismo Interface de Pressurização e a passagem de bolsões de ar pelo degrau.

Figura 74. Ensaio N(3)J(27)V(VL) – Séries temporais de vazão afluente, pressão e velocidade.

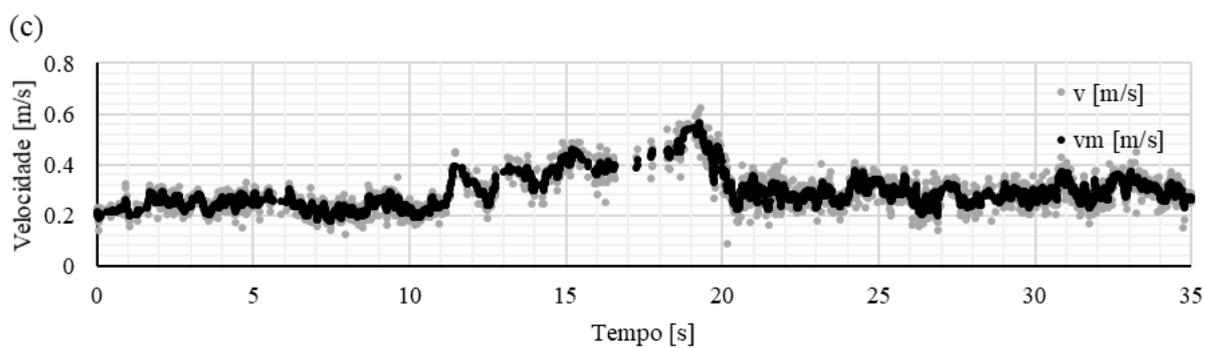
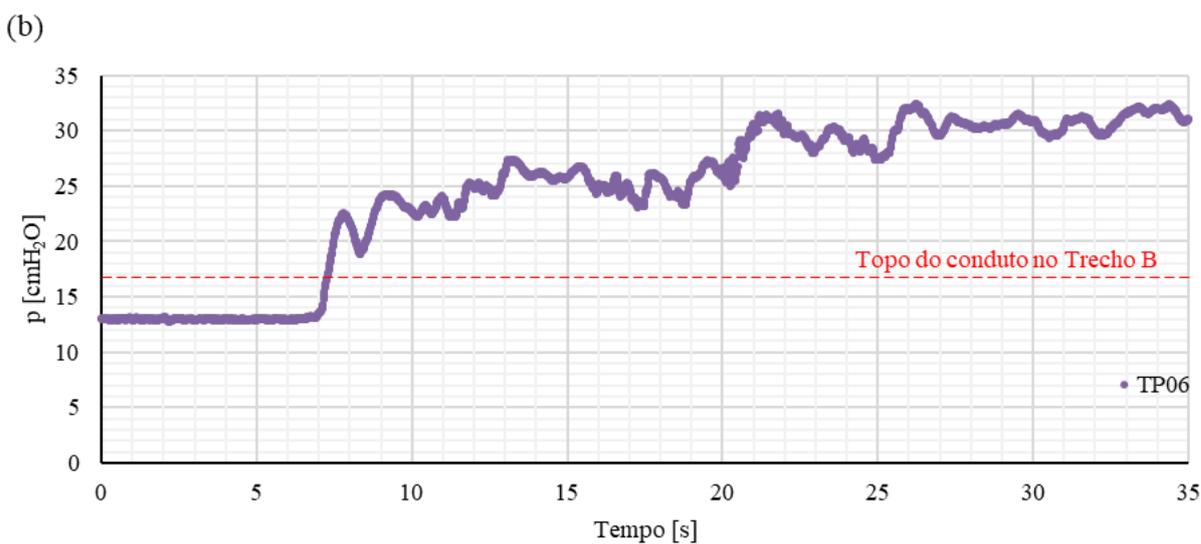
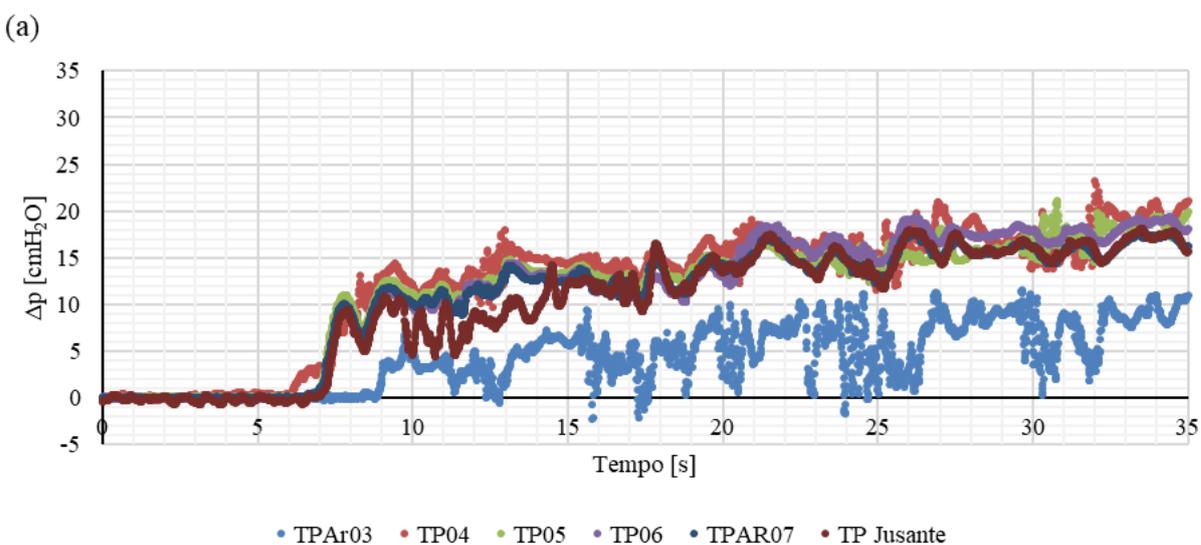
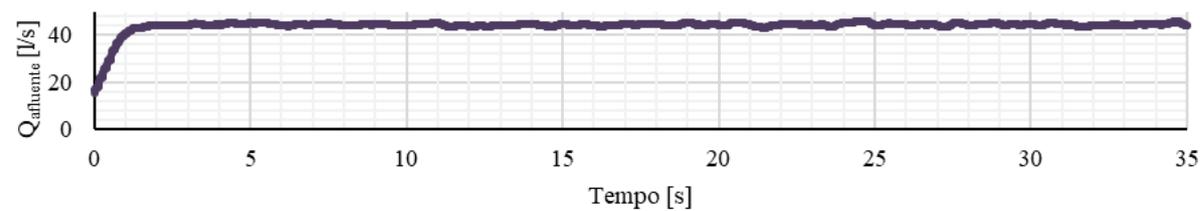
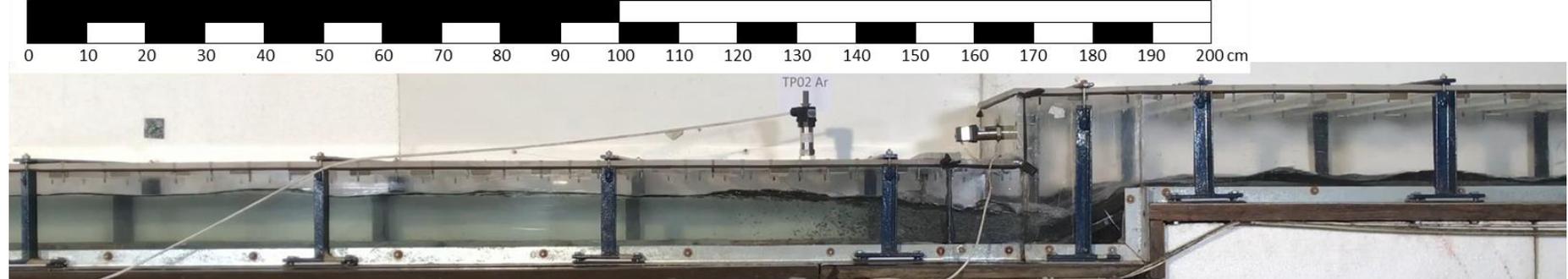
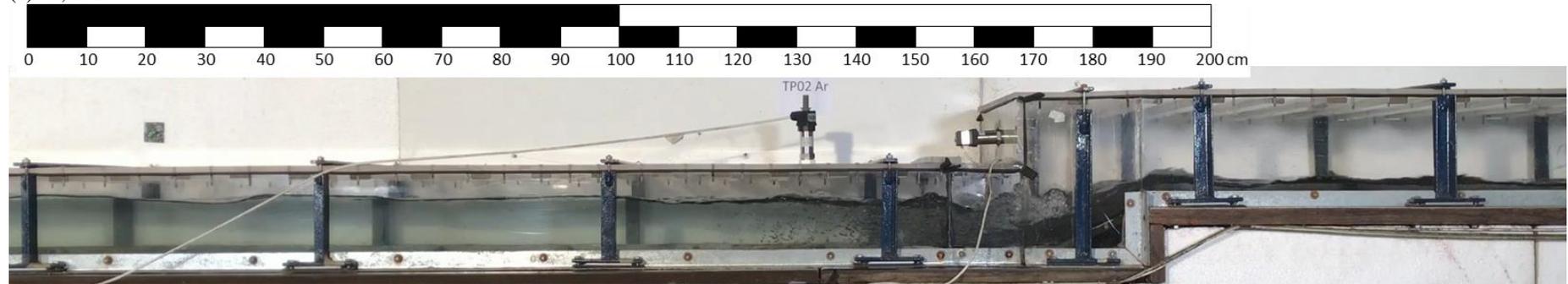


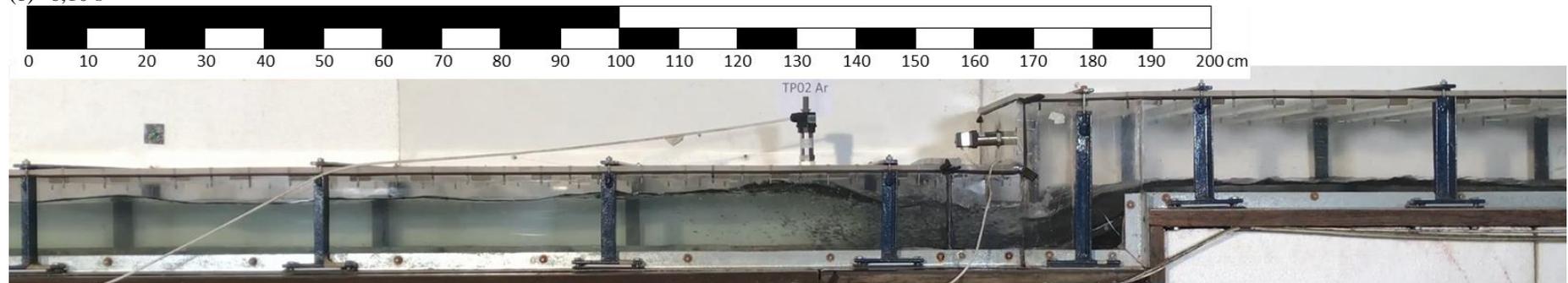
Figura 75. Ensaio N(3)J(27)V(VL) – Chegada da frente de enchimento à rampa e estabelecimento do mecanismo de aprisionamento de ar IP



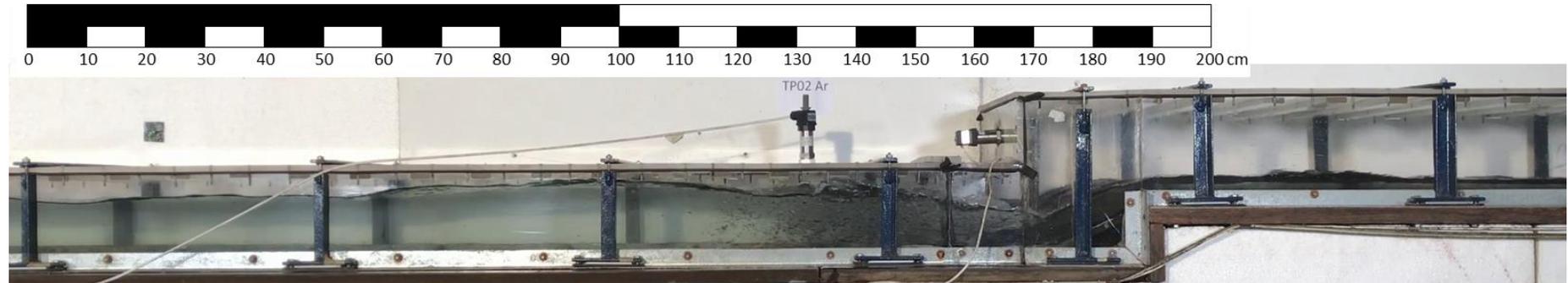
(a) 5,80 s



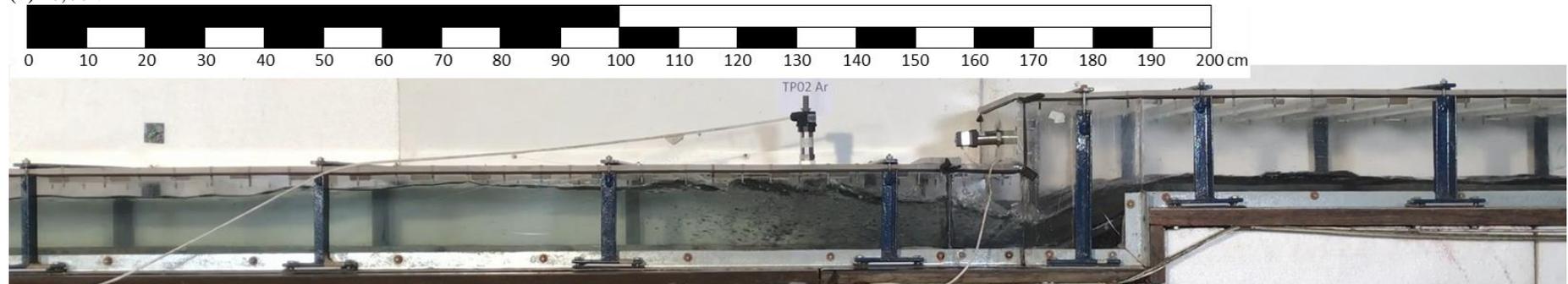
(b) 6,10 s



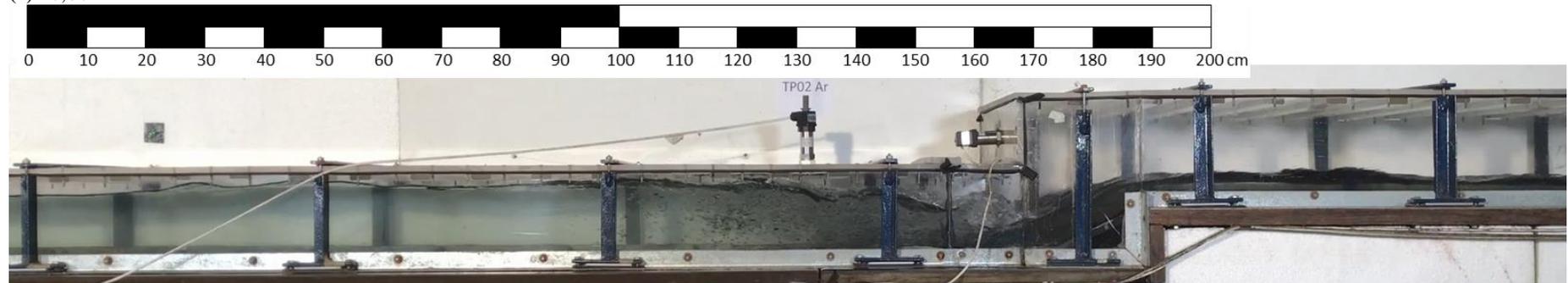
(c) 6,40 s



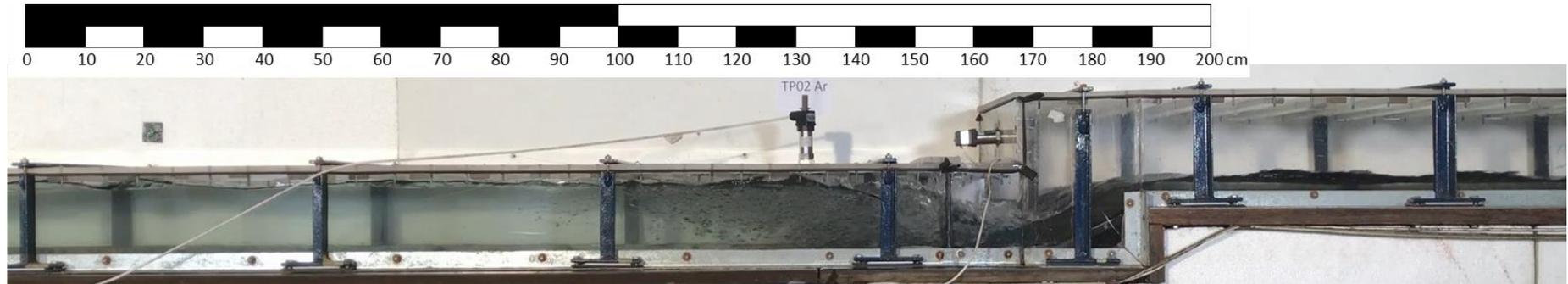
(d) 6,66 s



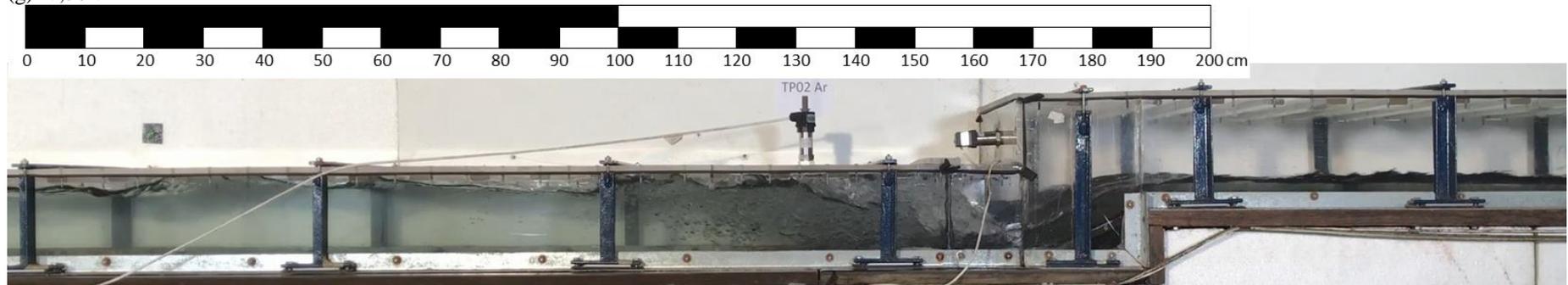
(e) 6,86



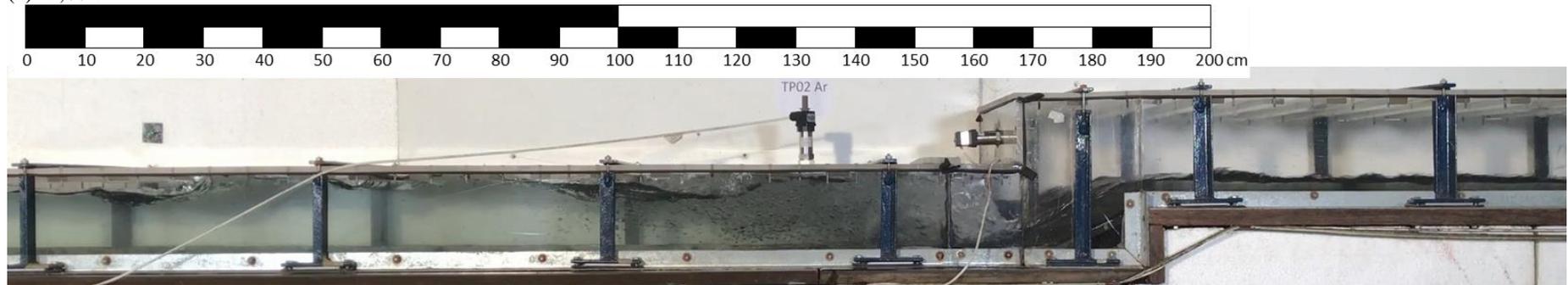
(f) 7,07 s



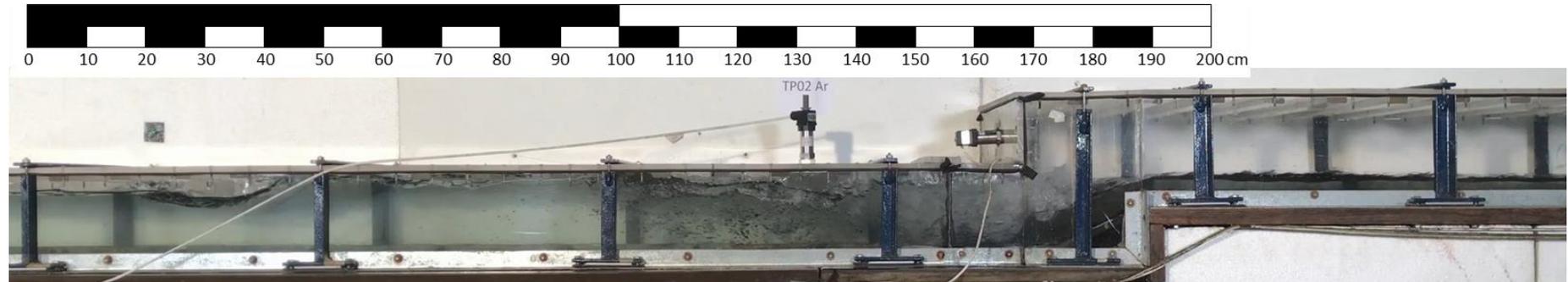
(g) 7,30 s



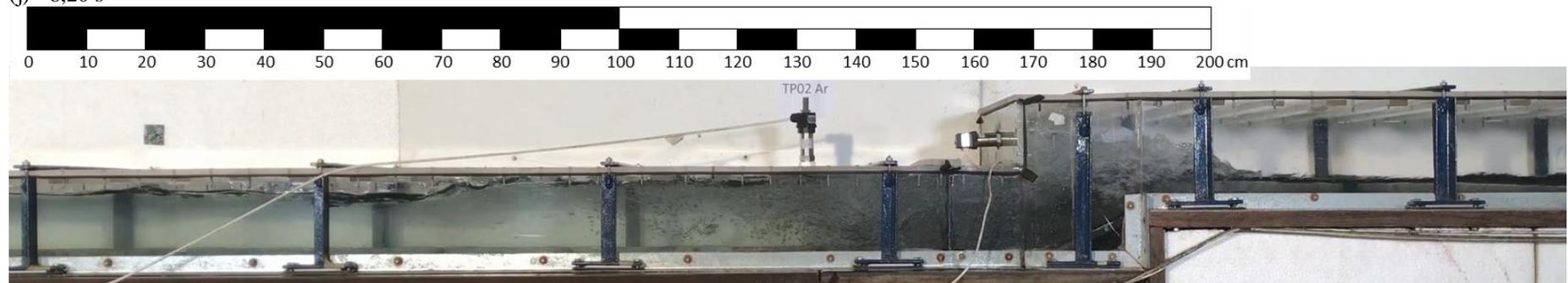
(h) 7,60 s



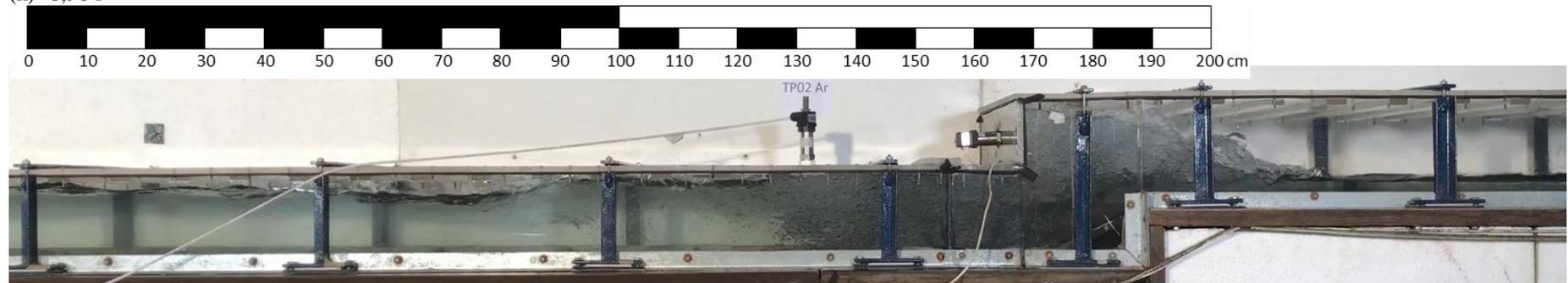
(i) 7,90 s



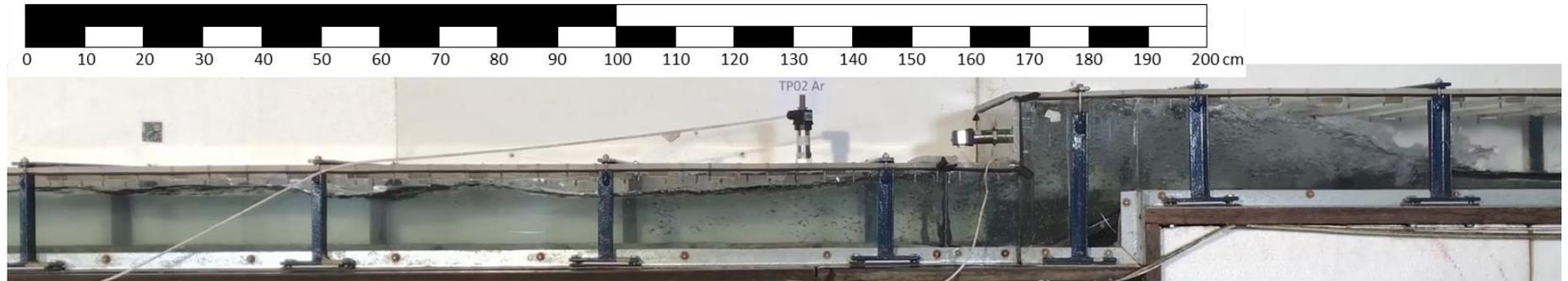
(j) 8,20 s



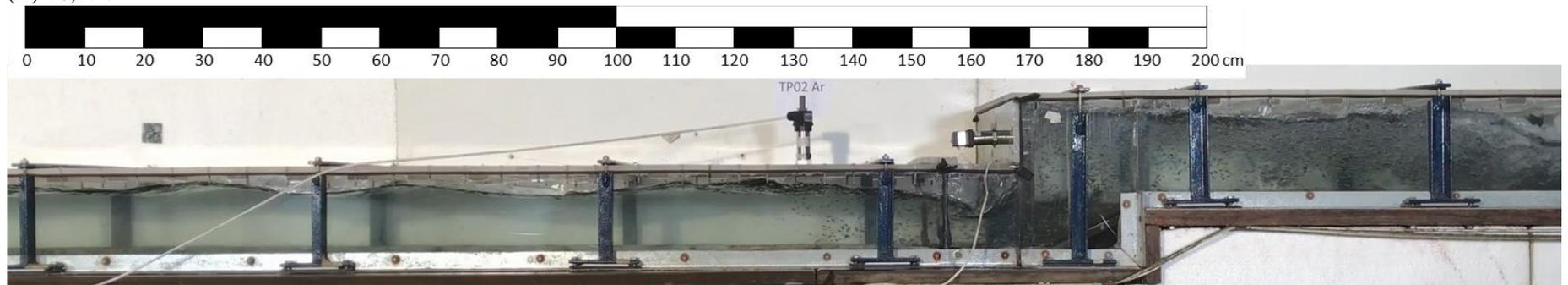
(k) 8,96 s



(l) 9,30 s



(m) 10,17 s



(n) 11,10 s

