

# INVESTIGAÇÕES EXPERIMENTAIS ACERCA DO PROBLEMA DE ENCHIMENTO DE ADUTORAS

*Felipe Eugenio de Oliveira Vaz Sampaio<sup>1</sup> & José Goes Vasconcelos<sup>2</sup>*

**RESUMO** -- Enchimentos de adutoras são promovidos após as mesmas passarem por algum tipo de manutenção ou quando são operadas pela primeira vez. Esse procedimento é feito de forma bastante cuidadosa, procurando evitar a formação de bolsões de ar e a ocorrência de sobrepressões elevadas. O conhecimento acerca das interações entre o ar e a água durante o processo de enchimento de adutoras é bastante limitado, e, na prática, projetistas utilizam recomendações genéricas sobre a disposição de válvulas de eliminação de ar em adutoras. O problema vem sendo investigado principalmente por meio de modelos numéricos para simulação desses eventos. Embora o uso de modelos seja útil, são necessárias investigações de campo ou experimentais para avaliação das hipóteses sobre as quais os modelos são construídos. O número de investigações experimentais nesse tema é pequeno e as condições experimentais são restritas no que tange à representatividade de enchimentos reais. Esse artigo apresenta o resultado de investigações experimentais acerca da morfologia das frentes de enchimento em adutoras, dando prosseguimento aos experimentos apresentados por Guizani et al. (2005). As condições experimentais testadas apontam para a limitada aplicabilidade de modelos de enchimento de adutora baseados na hipótese de interface vertical das frentes de enchimento.

**ABSTRACT** -- Pipeline filling is performed after the conduits undergo maintenance repairs or when they are operated for the first time. The filling process is performed carefully, in order to prevent the formation of air pockets and the occurrence of high pressure surges. Knowledge of air-water interactions during filling process is limited, and the designer's practice is to adopt generic recommendations regarding air valve placement along the water mains. This problem has been investigated mainly with numerical models for the simulation of such events. Though the use of these models is useful, experimental investigations are necessary for the evaluation of the hypothesis used in the model construction. The number of experimental investigations in this topic is small and the experimental conditions are restrictive with regards to the representation of real filling events. This article presents the results of experimental investigations regarding the morphology of filling fronts in water mains, continuing with the experimental series presented by Guizani et al. (2005). The tested experimental conditions point to the limited applicability of numerical models based on the vertical filling front interface.

**Palavras-chave:** Enchimento de adutoras, Pesquisas experimentais

---

1) Aluno de graduação em Engenharia Civil do Dept. Engenharia de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, Qd 8, Cj D, Casa 56 – Sobradinho-DF – 73005-080. E-mail: [felsvaz@yahoo.com.br](mailto:felsvaz@yahoo.com.br)

2) Professor do Dept. de Engenharia Civil e Ambiental – Universidade de Brasília, SHIS QL 02, Cj 04, Cs 04 – Lago Sul-DF – 71610-045. E-mail: [jvasconcelos@unb.br](mailto:jvasconcelos@unb.br)

## **1. INTRODUÇÃO**

As adutoras são componentes essenciais aos sistemas de abastecimento de água, sendo utilizadas no transporte em grandes distâncias de água bruta ou de água tratada. Apresentam seção fechada, totalmente preenchida e com pressão interna diferente da atmosférica, em geral maior do que esta, com fluxo orientado da seção de maior energia para a de menor energia. O transporte pode ocorrer por gravidade ou por recalque (elevação).

O enchimento de adutoras é um processo realizado usualmente, pois os condutos precisam passar por manutenções e, para isso, muitas vezes é preciso esvaziá-los. Esse enchimento também é feito quando uma adutora é operada pela primeira vez. Existem diversos problemas relacionados a esse enchimento, sendo que um deles está relacionado ao surgimento de pressões muito elevadas durante o processo. Essas pressões, que podem causar sérios danos às adutoras, são associadas ao aparecimento de bolsões de ar no interior desses condutos. O que pode ocorrer é a compressão desses bolsões de ar, criando pressões elevadas, e se a pressão gerada for maior do que a resistência do material constituinte da adutora, a mesma pode se romper. Isso é preocupante, pois pouco se sabe a respeito das interações entre ar-água durante o enchimento de adutoras. Esses bolsões de ar podem ser evitados com o enchimento gradual da adutora e com a instalação de válvulas que expulsam o ar dos condutos. No entanto, ainda assim, não é possível garantir que não haverá aprisionamento de bolsões de ar durante o enchimento de adutoras.

Apesar de se tratar de um assunto de maior relevância para quem opera adutoras, não existem muitas pesquisas que tratam esse tipo de assunto. A maioria dos estudos concentra-se na modelagem numérica e em menor número ainda são as pesquisas sobre esse tema no âmbito experimental. Além de serem em número muito pequeno, as pesquisas experimentais sobre o assunto são um pouco restritas no que tange à representatividade entre os ensaios realizados e o que de fato ocorre durante o enchimento de adutoras. Em função disso, é patente a necessidade de novas pesquisas experimentais sobre o problema. Esse artigo apresenta os resultados obtidos com uma pesquisa experimental, em que se procurou melhorar a representatividade entre os ensaios e a realidade dos sistemas de adução.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Os esforços para melhorar a compreensão acerca do problema de enchimento de adutora começaram com o desenvolvimento de modelos numéricos, sendo que um dos primeiros tipos de modelos numéricos foi apresentado por Liou e Hunt (1996). O modelo dos autores é fundamentado no Método da Coluna Rígida (Wylie e Streeter, 1993), que provavelmente é o método mais simples

de análise de problemas de escoamentos transientes em condutos fechados. Esse modelo introduz algumas simplificações em sua concepção e a principal delas é que considera como aproximação que a frente de enchimento tem o formato vertical e se movimenta como se um pistão estivesse preenchendo o conduto. Outro modelo, também baseado na Coluna Rígida, foi desenvolvido e apresentado por Izquierdo *et al.* (1999). Nesse caso, foi introduzida a possibilidade de simular enchimentos em adutoras que possuam bolsões de ar aprisionados. Esses bolsões seriam presos porque a adutora encontra-se preenchida de água no início do escoamento nos pontos baixos intermediários.

Em contrapartida a esses modelos, existe uma linha de modelos numéricos para o problema que é baseada numa adaptação das equações de Saint-Venant para escoamentos pressurizados, sendo um exemplo o trabalho de Vasconcelos (2007). Esse modelo possui a vantagem de não fazer nenhuma restrição com relação ao formato da frente de enchimento. Entretanto, o modelo possui a restrição de considerar que o sistema de adução possui ventilação perfeita, não considerando assim o efeito do ar no enchimento.

O que se percebe é que existem restrições importantes nos modelos propostos. Uma adutora pode possuir uma infinidade de configurações geométricas que podem, por vezes, ressaltar tais restrições. Em virtude disso é que entra a necessidade de novas pesquisas experimentais, que são muito escassas a respeito do tema, para avaliar a aplicabilidade dos modelos.

Com relação às pesquisas experimentais já realizadas, Liou e Hunt (1996), na mesma oportunidade em que apresentaram seu modelo, também desenvolveram uma pesquisa experimental sobre o problema e compararam os resultados obtidos com os adquiridos a partir do modelo por eles proposto. Além disso, outra investigação experimental, subsequente, realizada por Fuertes *et al.* (2000) teve como objetivo verificar e calibrar o modelo proposto por Izquierdo *et al.* (1999).

Os resultados obtidos nessas pesquisas, quando comparados com os modelos, foram satisfatórios. Mas no entanto, é importante avaliar se as condições simuladas pelo aparato experimental representam o que de fato ocorre nas adutoras reais. Em ambos estudos os diâmetros usados foram muito pequenos (quando comparados a diâmetros de adutoras reais) e a carga relativa à montante da adutora,  $H/D$ , era muito elevada, onde  $H$  é a altura da coluna d'água à montante da adutora e  $D$  é o diâmetro da adutora durante o enchimento. Esse é um ponto importante, pois em enchimentos reais não se usam cargas relativas elevadas para se evitar enchimentos rápidos.

Uma pesquisa experimental recente foi realizada por Guizani *et al.* (2005) e teve como objetivo verificar a validade da hipótese de frente de enchimento vertical. Para isso, foram usados condutos com material transparente, câmeras que filmaram a frente de enchimento e um aparato experimental capaz de prover variações na inclinação da adutora e na carga do reservatório. Os

resultados dessa pesquisa indicaram que, mesmo em cenários de enchimento rápido, a frente de enchimento em adutoras vazias assemelha-se àquela observada em eventos de ruptura de barragem.

Especula-se que em certos casos uma interface vertical poderia ser uma aproximação razoável caso o comprimento da frente de enchimento (medido entre a base da frente de enchimento e o ponto onde a mesma toca o topo do conduto) fosse relativamente pequeno, da ordem de poucos diâmetros. Mas, por outro lado, no caso em que a adutora é preenchida lentamente, a hipótese de uma interface de enchimento vertical é provavelmente inválida. Nesses casos, espera-se que a interface ar-água seja quase horizontal em localidades onde o conduto possui declividade ascendente, enquanto que em trechos de declividade descendente o escoamento dar-se-ia em regime livre até um ponto baixo intermediário em que a água se acumula. Dessa forma é de se supor que exista uma restrição à aplicabilidade do Método da Coluna Rígida para descrição de enchimentos de adutoras. Tal limitação será avaliada neste estudo experimental.

### **3. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho foi o de realizar uma investigação experimental sobre o problema de enchimento de adutoras em que se possa representar, de forma realista e satisfatória, as condições de escoamento das adutoras. Tal pesquisa tem a intenção de dar continuidade à que foi realizada por Guizani *et al.* (2005). Um dos objetivos específicos foi caracterizar, filmar e medir o comportamento da frente de enchimento da adutora, para que se possa melhorar o entendimento acerca das interações das interfaces ar-água. Outro objetivo específico foi o de registrar, comparar e analisar a evolução das velocidades das diferentes feições, presentes na frente de enchimento, e a velocidade geral do escoamento, mensurada através de um medidor ADV.

### **4. METODOLOGIA**

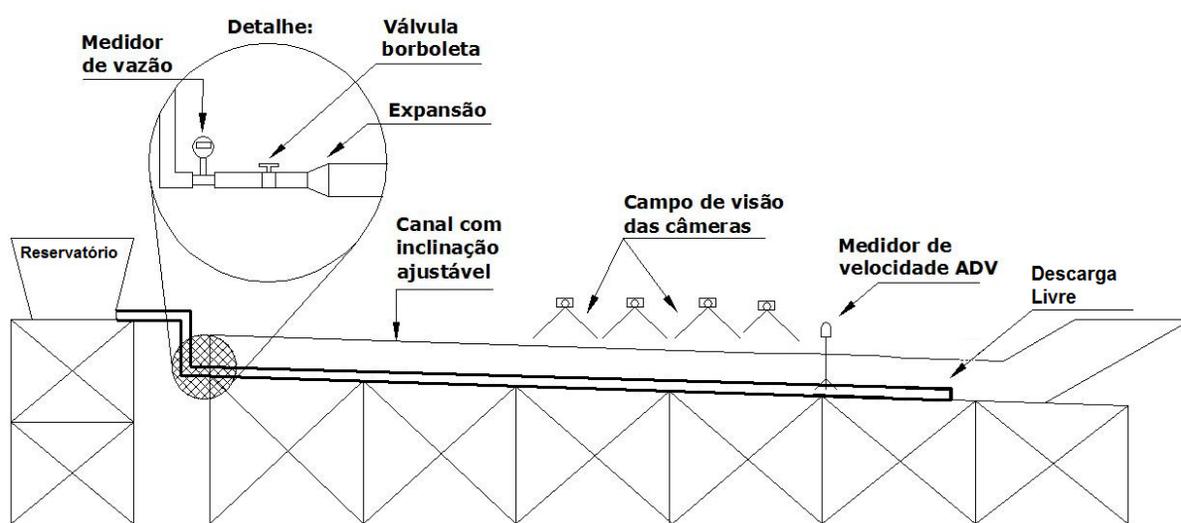
Os ensaios experimentais sobre o problema de enchimento de adutoras foram realizados nas dependências do Laboratório de Hidráulica da Universidade de Brasília.

#### **4.1 Condições experimentais**

O aparato experimental utilizado busca se aproximar das condições de enchimentos esperados em uma adutora real. Trata-se de um conduto feito em acrílico (esse material é utilizado porque tem a característica de ser transparente, o que é necessário para que as observações da frente de enchimento sejam feitas) com um comprimento total de 10,5 metros e com um diâmetro interno de

90 milímetros e externo de 100 milímetros. O conduto foi instalado em um canal de declividade ajustável, com 15 metros de comprimento. O reservatório que alimenta a adutora é uma caixa d'água com capacidade de 2000 litros apoiada sobre uma torre com 2,0 metros de altura. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático do aparato experimental.

Os instrumentos utilizados foram um medidor de vazão do tipo roda d'água (Contech Modelo CTH 2265i) e um medidor de velocidade Sontek MicroADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*). Além disso, foram usadas quatro câmeras digitais para realizar filmagens da frente de enchimento que possuem a capacidade de captar 30 imagens por segundo e um campo total de visão de aproximadamente 3,4 m.



**Figura 1 – Desenho esquemático do aparato experimental.**

As variáveis experimentais utilizadas no ensaio foram relacionadas com as variações das vazões, com valores de 1,5 L/s, 2,5 L/s e de 3,3 L/s, e das inclinações, com valores de 0,5% adversa ao escoamento, horizontal e 0,5% favorável ao escoamento.

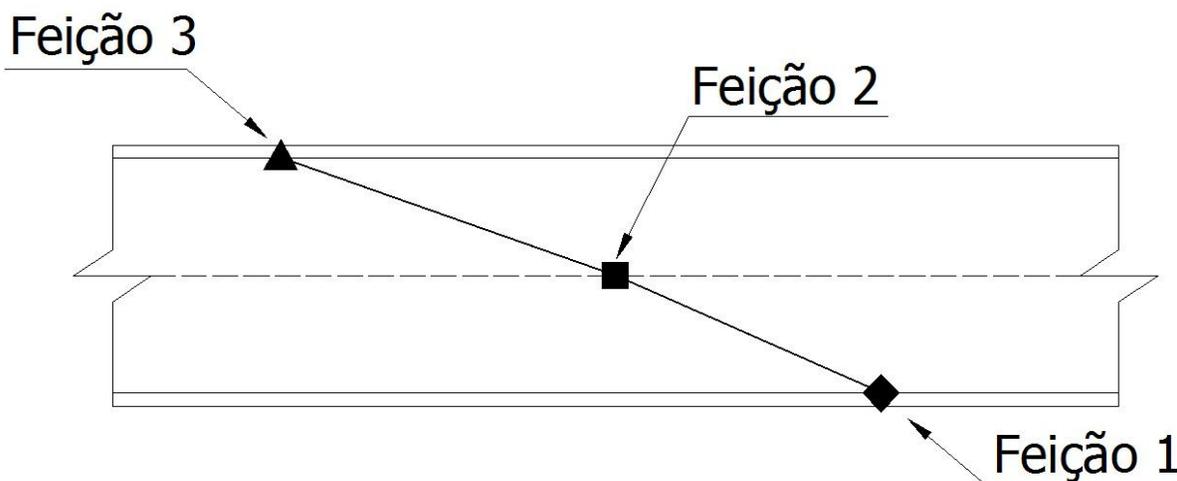
## 4.2 Coleta e tratamento dos dados

Realizaram-se três repetições para cada uma das nove configurações da adutora experimental, em que se combinaram as variáveis de inclinação e vazão já mencionadas.

Uma vez que os ensaios foram concluídos, procedeu-se então à organização, sistematização e tratamento dos dados. Em princípio, foram assistidos todos os vídeos gerados nas corridas experimentais. Enquanto os vídeos eram assistidos, foram definidas três diferentes feições do enchimento que caracterizaram a morfologia das frentes dos escoamentos. Notou-se a necessidade

de registrar os momentos em que essas diferentes feições do enchimento cruzavam o campo de visão das câmeras. As três feições foram definidas como:

- Feição 1: Parte inferior da cunha formada pela frente de enchimento. É a dianteira da cunha e caracteriza-se por ser o ponto onde ocorre o primeiro contato da água com o conduto.
- Feição 2: Parte mediana da cunha formada pela frente de enchimento. Caracterizada por ser o ponto onde a frente do preenchimento atinge metade do conduto.
- Feição 3: Parte superior da cunha formada pela frente de enchimento. Caracterizada por ser o ponto onde ocorre o total preenchimento do conduto.



**Figura 2 – Desenho esquemático das diferentes feições de enchimento**

Os instantes em que essas feições ocorriam foram anotados conforme elas iam acontecendo e avançando a cada segmento do conduto. O espaçamento entre segmentos foi definido como sendo de aproximadamente 30,5 centímetros. Definiu-se esse comprimento em função da capacidade de identificar e mensurar os dados no momento da coleta.

Enquanto a corrida experimental ocorria, os dados captados pelo medidor ADV eram armazenados no computador usado nos ensaios. Quando se finalizava a corrida, esses dados de velocidade eram exportados para planilhas eletrônicas, no formato CSV (*Comma Separated Values*). Com esses dados extraídos, procedeu-se então com o tratamento e análise dos mesmos. A primeira atividade feita foi verificar se haviam inconsistências nos dados coletados. Após a verificação de consistência dos dados, os mesmos eram organizados em tabelas. Percebeu-se que uma maneira prática de expor os dados referentes ao ADV e às feições seria a de extrair médias das velocidades entre as repetições, uma vez que não houve desvios significativos entre as mesmas para cada configuração.

Feito isso, foram traçados gráficos com os principais valores a serem comparados e estudados. Além disso, foi desenhada esquematicamente, para cada configuração, a morfologia da frente de enchimento para variados instantes.

Para efeito de análise dimensional, foi definido um valor adimensional, em função da vazão, para cada um das configurações do aparato experimental:

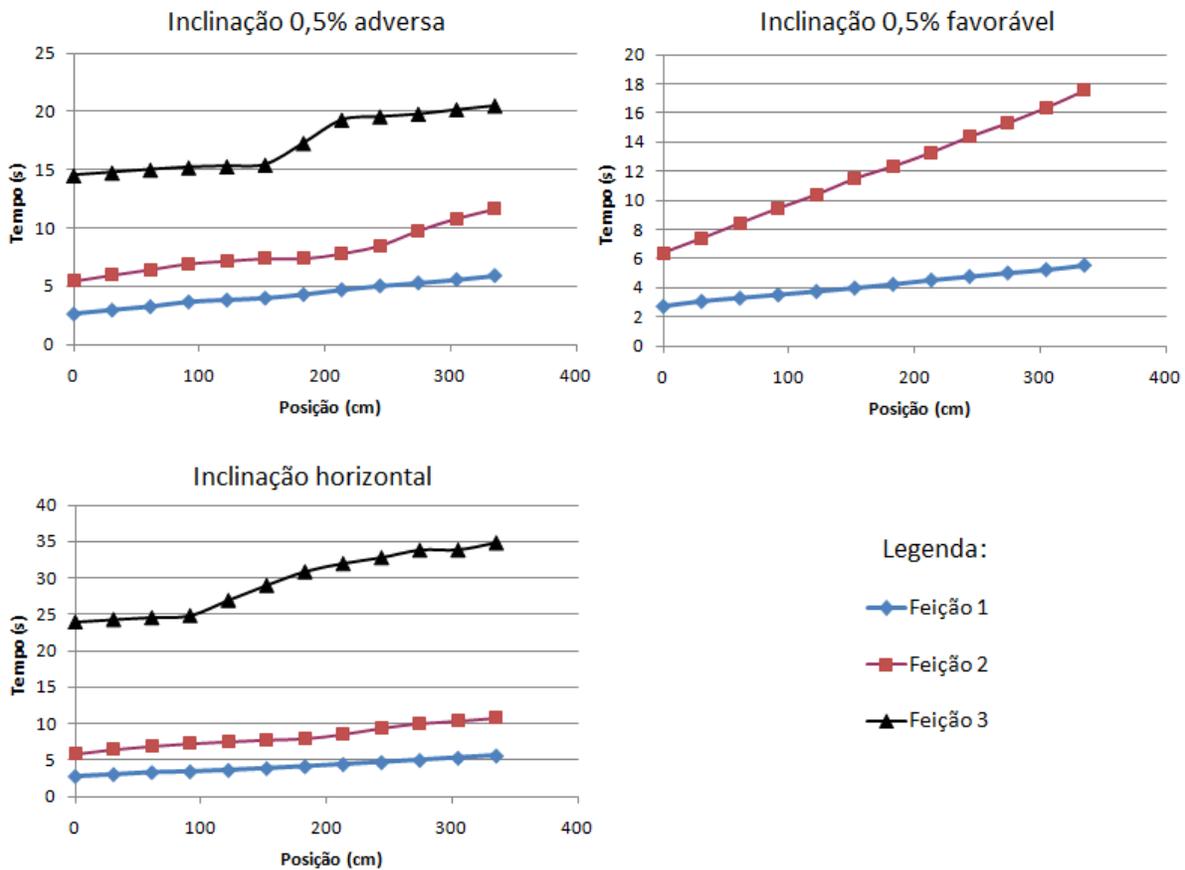
$$Q^* = \frac{Q}{\sqrt{g \cdot D^5}} \quad (1)$$

onde  $Q$  é a vazão,  $g$  a aceleração da gravidade e  $D$  o diâmetro da adutora. Esse valor é usado, quando apropriado, na apresentação dos resultados.

## 5. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE

### 5.1 Difusão da frente de enchimento

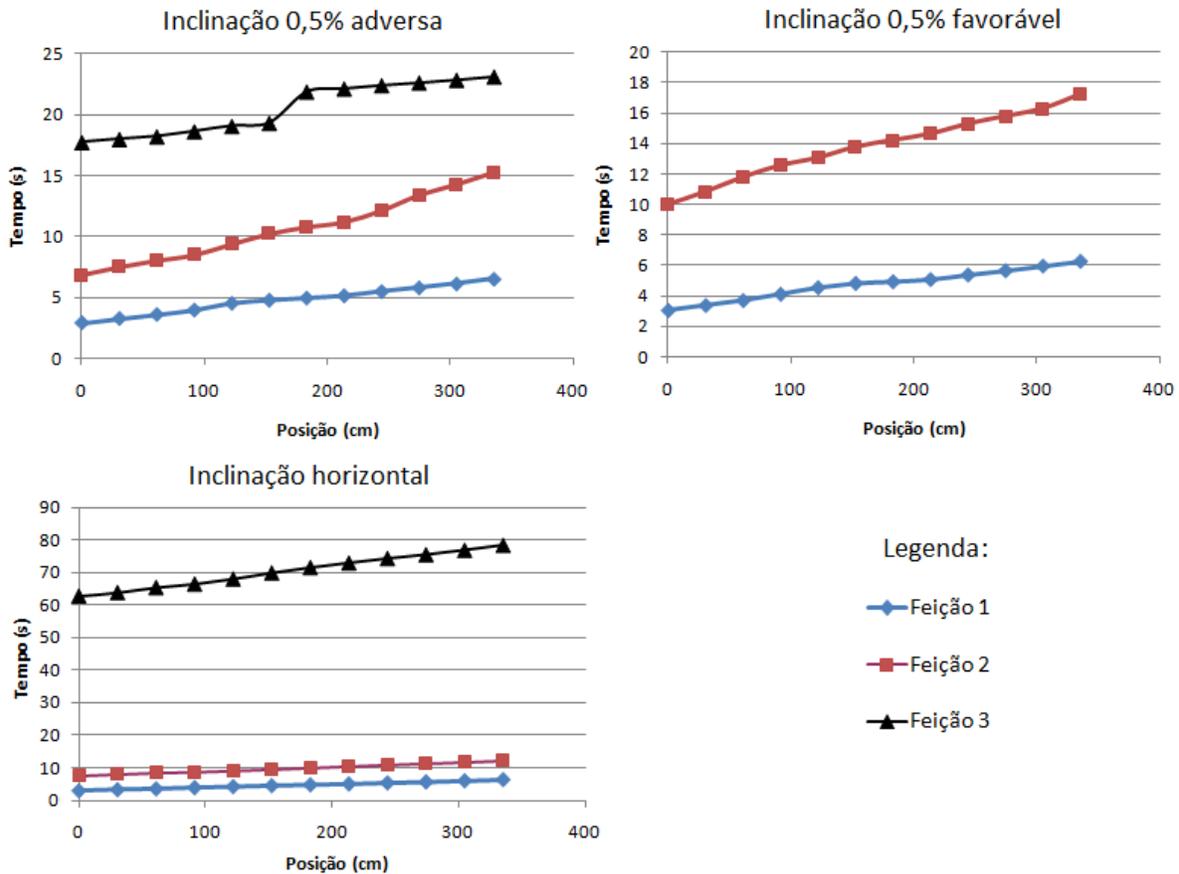
Foram traçados gráficos, para cada configuração experimental, do posicionamento das feições da frente de enchimento versus o instante em que esse posicionamento era registrado. Tais gráficos são apresentados nas Figuras 3, 4 e 5:



**Figura 3 – Trajetória das feições – Vazão de 3,3 L/s ( $Q^* = 0,434$ )**

A Figura 3 apresenta os resultados das trajetórias das feições da frente de enchimento para a vazão de 3,3 L/s ( $Q^* = 0,434$ ). Da forma como os mesmos foram gerados é possível ver que quanto menor for a inclinação da reta, maior será a velocidade da feição da frente de enchimento. Para este caso ( $Q^* = 0,434$ ), percebe-se que a velocidade média da feição 3 é maior do que a da feição 1 quando a inclinação é adversa. É possível ver uma diferença entre as velocidades das feições bastante acentuada. Tal representa o efeito da difusão da frente de enchimento, ou seja, que a frente torna-se mais longa à medida que avança no conduto. Para a inclinação favorável não foi detectada a feição 3, o que significa que não houve pressurização da frente após o início do escoamento.

Pôde-se perceber que houve uma despadronização nos resultados de posição e tempo da feição 3. Isso ocorreu porque o ADV, instalado no aparato experimental, causou um efeito nessa feição, gerando perturbações no escoamento. Em virtude disso, para o cálculo das velocidades médias dessa feição, o trecho a jusante do ADV foi desconsiderado.

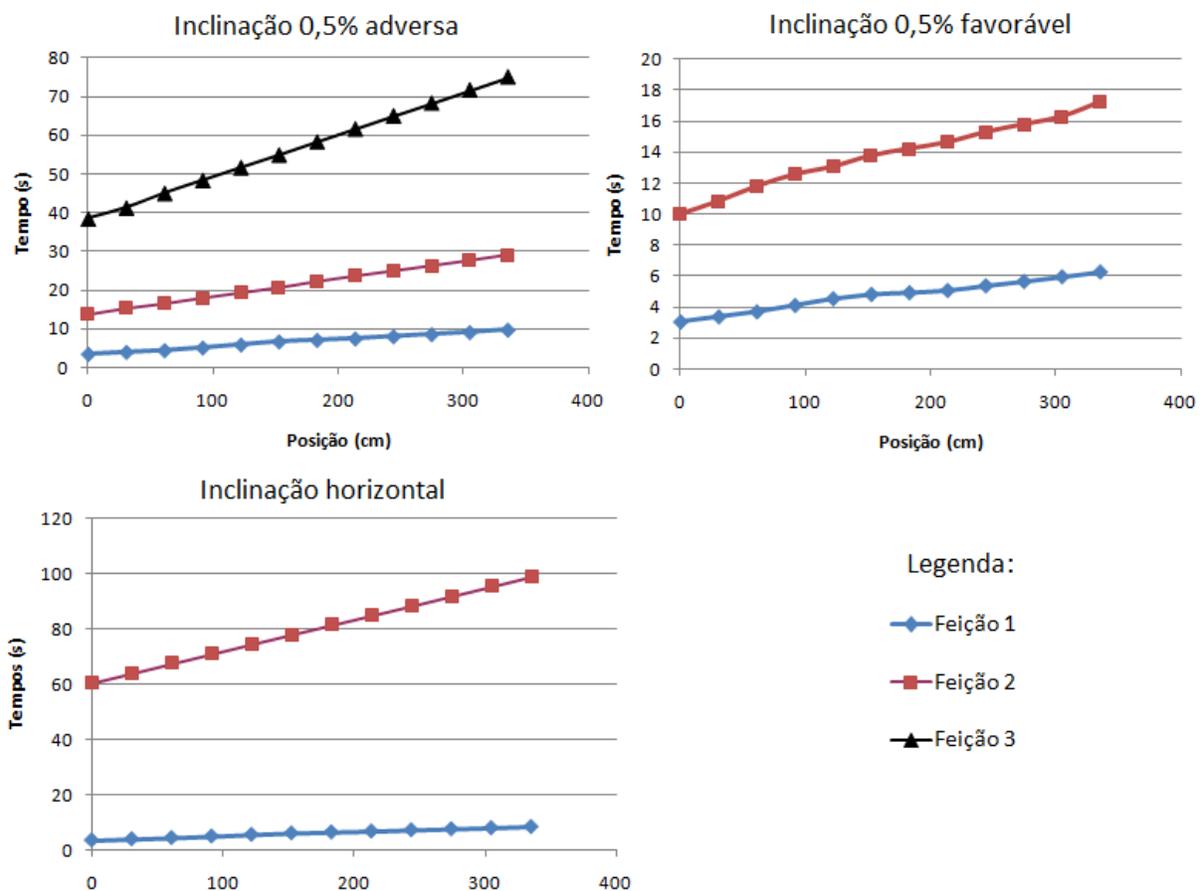


**Figura 4 – Trajetória das feições – Vazão de 2,5 L/s ( $Q^* = 0,329$ )**

O que se pode notar nos resultados apresentados na Figura 4, para a vazão de 2,5 L/s ( $Q^* = 0,329$ ), é que a velocidade da feição 3 mais uma vez foi a maior de todas para a inclinação

adversa. Percebe-se também que houve difusão da frente de enchimento, e que na inclinação favorável não houve pressurização durante o escoamento. Finalmente, o processo de pressurização foi muito mais lento na inclinação horizontal do que aquele observado para a mesma inclinação da vazão de 3,3 L (  $Q^* = 0,434$  ). Embora a profundidade de escoamento devesse crescer com a inclinação zero, o fato de haver condição de descarga livre da adutora limita a ocorrência de tal situação. Assim, há nessa configuração uma transição gradual entre regimes de escoamento, de pressurizado para livre, na adutora.

Mais uma vez nota-se uma despadronização nos resultados da feição 3, ocorrida pelo obstáculo que o ADV gera para essa feição e que foi visto e discutido para o caso da vazão de 3,3 L/s (  $Q^* = 0,434$  ).



**Figura 5 – Trajetórias das feições – Vazão de 1,5 L/s (  $Q^* = 0,197$  )**

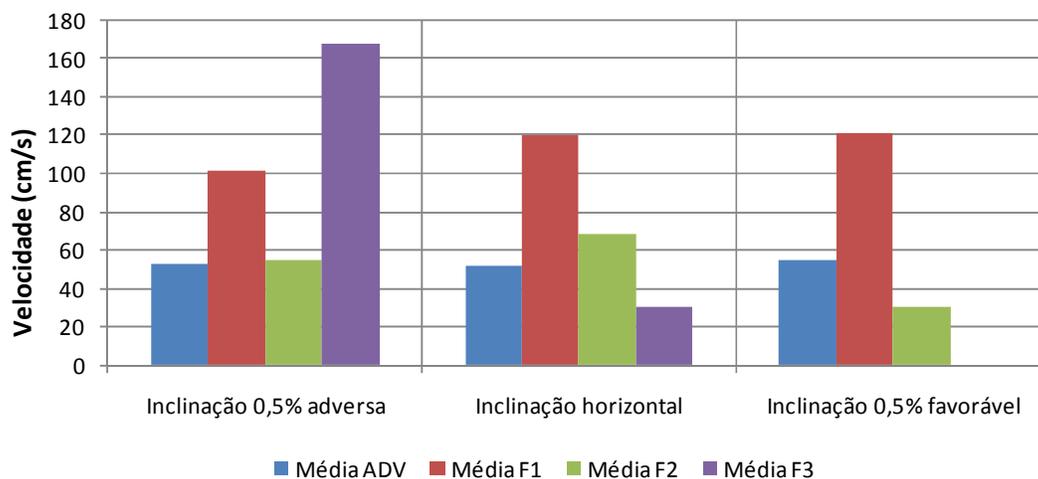
Já para os resultados apresentados da Figura 5, quando a vazão é de 1,5 L/s (  $Q^* = 0,197$  ), percebe-se que o comportamento da trajetória da feição 3 não se repete quando comparado com o observado em vazões maiores e para a mesma inclinação. Nesse caso a feição avança no conduto de forma similar a uma interface horizontal que causa a pressurização do sistema. Outro aspecto é que

mesmo no caso de declividade horizontal não se apresenta a feição 3, indicando que não há pressurização da frente de enchimento.

A análise dos resultados nos mostra que existe uma diferença entre as velocidades das feições da frente para cada configuração, uma vez que existe variação entre as declividades das retas das séries de dados das feições. Essa difusão da frente de enchimento entre as feições é uma característica relevante, pois significa que o formato da frente de enchimento vai mudando com o tempo, tornando-se cada vez mais próxima de uma frente com formato horizontal.

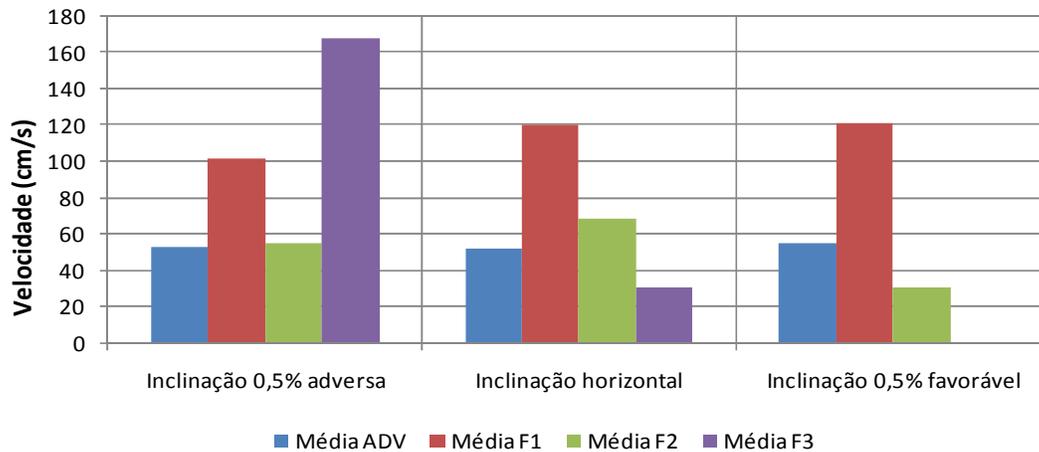
## 5.2 Velocidades médias das feições e velocidade medida pelo ADV

Usando os dados apresentados nas Figuras 3, 4 e 5, é possível calcular a velocidade média de deslocamento das feições da frente de enchimento. Foram criados gráficos para que se possa fazer uma comparação e análise entre as velocidades médias das feições da frente e as velocidades registradas pelo ADV.



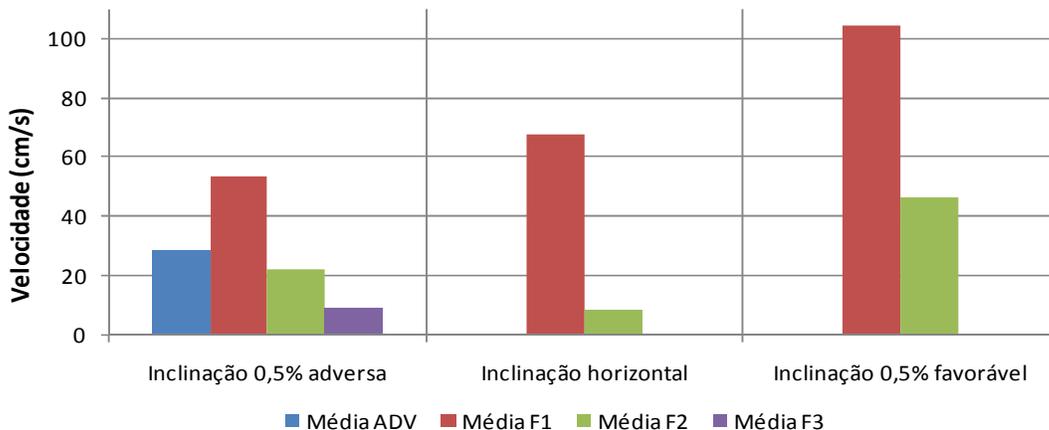
**Figura 6 – Comparação das velocidades das feições e da medida pelo ADV  
Vazão de 3,3 L/s ( $Q^* = 0,434$ )**

Com a análise desses dados observou-se alguns comportamentos interessantes. Foi possível notar, por exemplo, que as velocidades medidas pelo ADV, que representam a velocidade média do escoamento, estavam sempre entre as velocidades médias das feições das frentes de enchimento. A velocidade medida pelo ADV, na maioria dos casos, aproxima-se das velocidades de deslocamento da feição 2.



**Figura 7 – Comparação das velocidades das feições e da medida pelo ADV  
Vazão de 2,5 L/s ( $Q^* = 0,329$ )**

Percebe-se no caso da vazão de 1,5 L/s ( $Q^* = 0,197$ ), apresentado na figura 8, que não existem valores das médias das velocidades do ADV transcritos nos gráficos para as inclinações de 0,5% adversa e de 0,5% favorável. Isso ocorre porque os escoamentos para esses casos se deram no regime livre e com um nível de água muito baixo, de tal forma que a sonda ADV não foi submersa o suficiente para que começasse a registrar velocidades. Vale lembrar também que, para os casos em que foi notada a interferência do ADV no avanço da feição 3, as médias das velocidades foram extraídas com os dados registrados até antes dessa interferência.



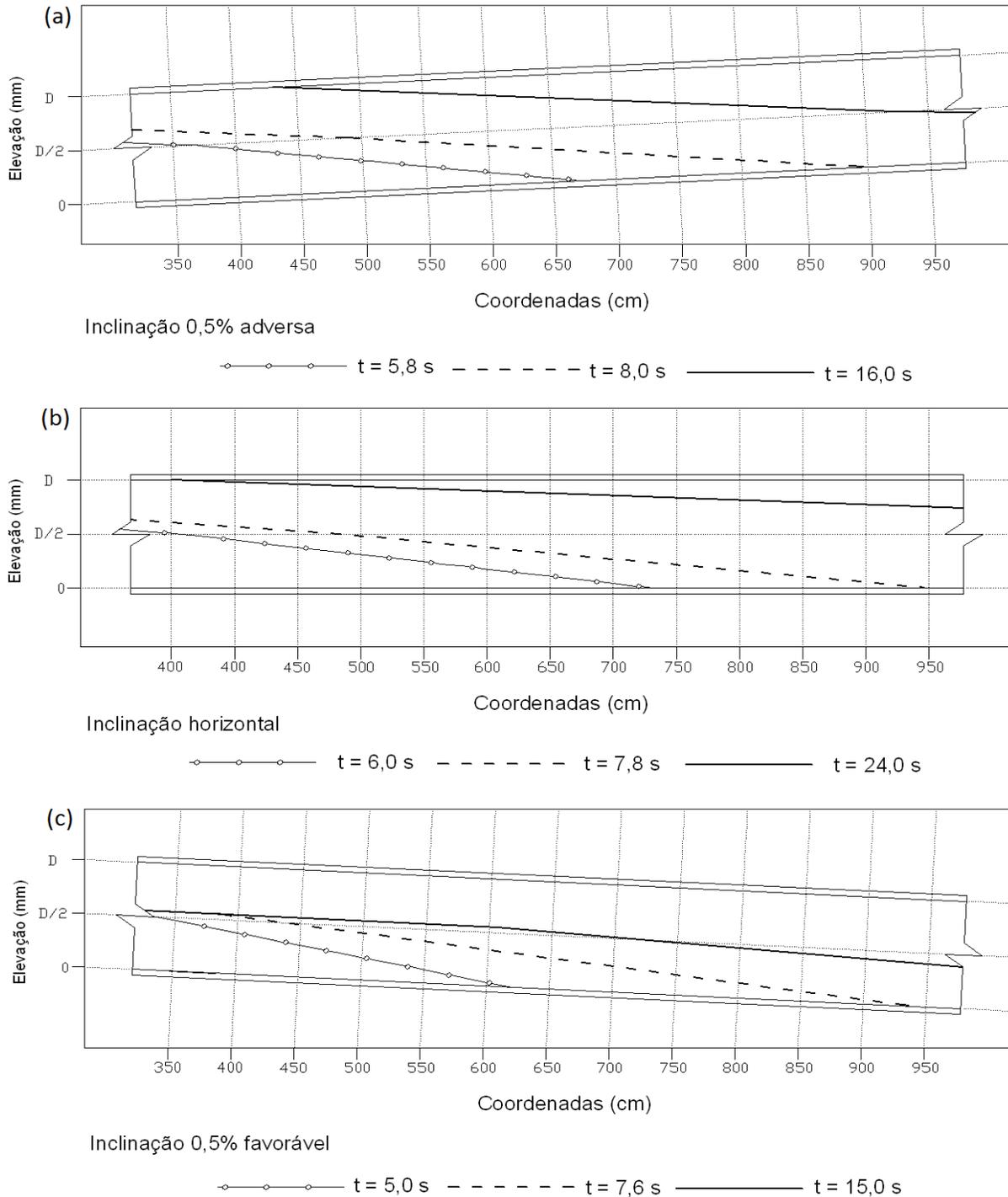
**Figura 8 – Comparação das velocidades das feições e da medida pelo ADV  
Vazão de 1,5 L/s ( $Q^* = 0,197$ )**

### 5.3 Morfologias das frentes de enchimento

Apresenta-se a seguir os formatos observados das frentes de enchimento. Essas frentes se mostraram bastante longas, com extensão horizontal entre feição 1 e feição 3 maior do que 4 metros em todas as condições experimentais testadas. Como o campo de visão total das quatro câmeras foi

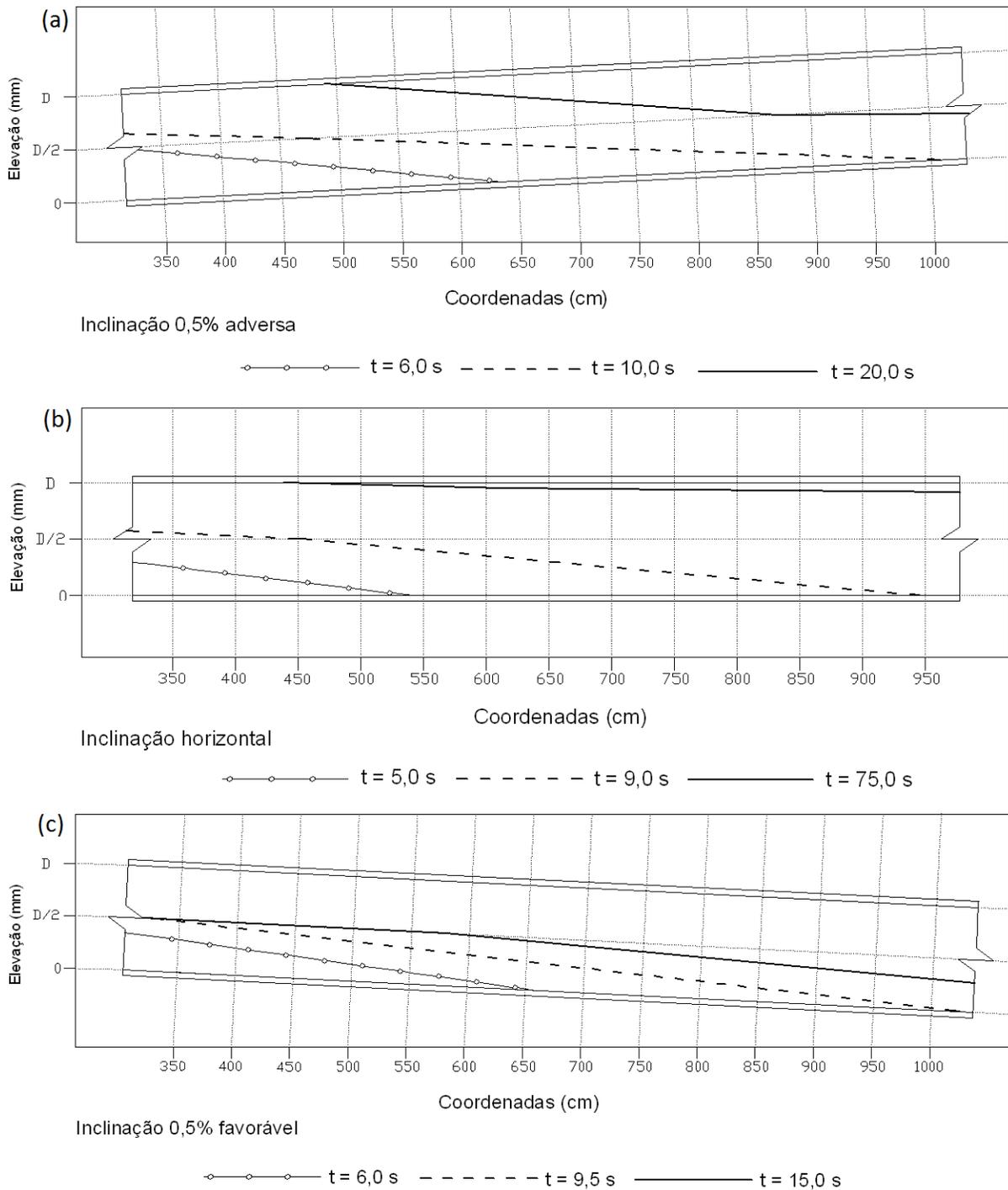
insuficiente para demonstrar satisfatoriamente essas morfologias, extrapolou-se esse campo, prevendo trechos da frente com base nas velocidades das feições de enchimento.

Os resultados apresentados na figura 9, para  $Q^* = 0,434$ , indicam que o avanço da feição 3 para a inclinação adversa dá-se de forma semelhante a uma onda de choque após a válvula de abertura da vazão. Já a Figura 9 (c) indica ocorrência de regime livre em toda extensão da adutora.



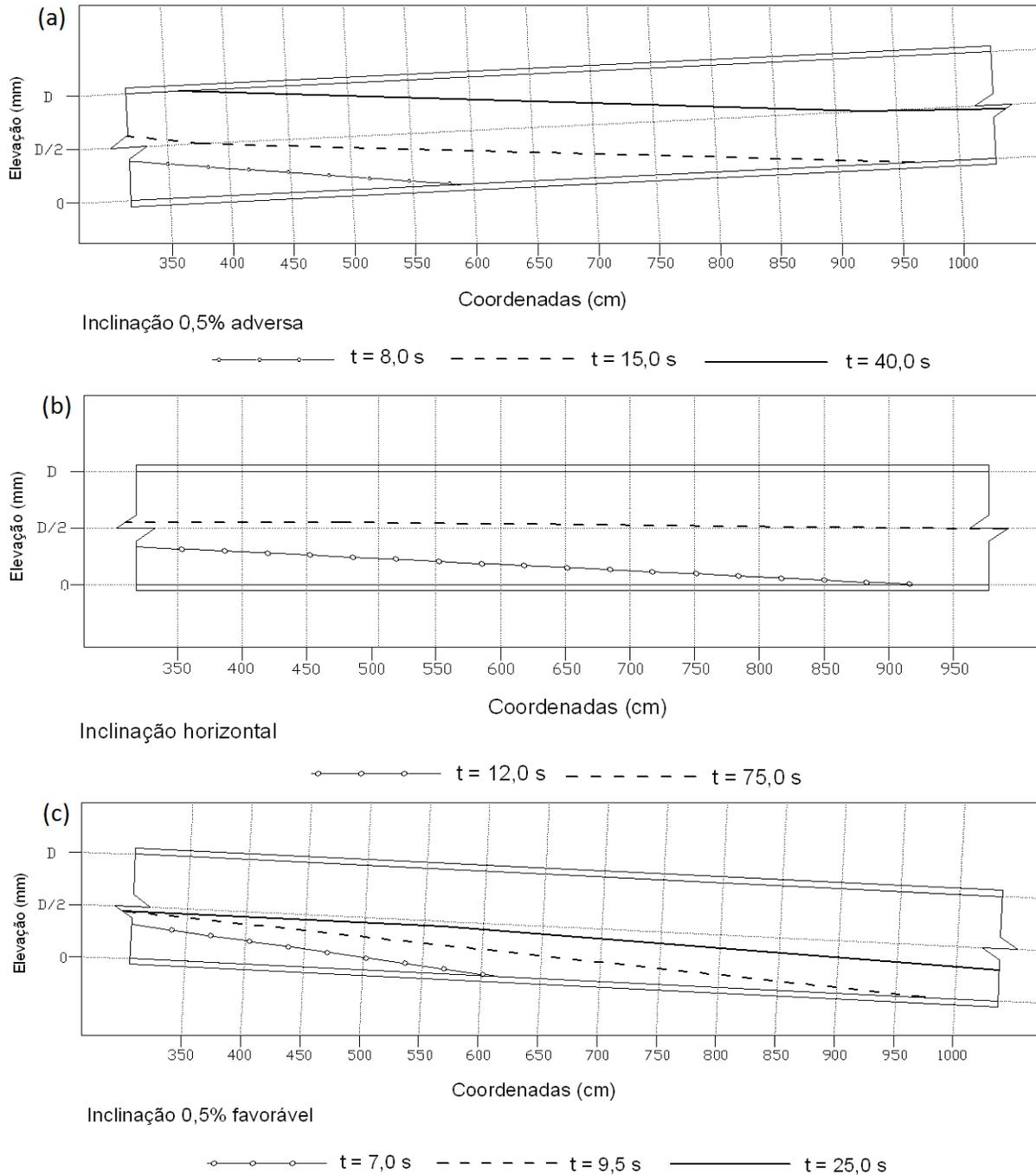
**Figura 9 – Morfologia da frente de enchimento em diversos instantes**  
**Vazão de 3,3 L/s ( $Q^* = 0,434$ )**

Os resultados apresentados na Figura 10, para  $Q^* = 0,329$ , indicam que a morfologia da frente de enchimento foi semelhante ao ocorrido no caso anterior. Durante os ensaios, foi possível notar também que, na maior parte das configurações da Figura 10, parte do escoamento no conduto se deu em regime pressurizado e parte se deu em regime livre, configurando a transição gradual entre regimes de escoamento pressurizado e livre.



**Figura 10 – Morfologia da frente de enchimento em diversos instantes  
Vazão de 2,5 L/s ( $Q^* = 0,329$ )**

Os resultados apresentados na Figura 11, para  $Q^* = 0,197$ , indicam que o formato da frente de enchimento em declividade adversa foi diferente do que se observou nas vazões anteriores. Na verdade o enchimento do conduto se deu de forma semelhante ao que se observa em enchimentos de reservatórios, com a interface de pressurização horizontal, e que evoluiu bem lentamente. Além disso, o escoamento em regime livre não se deu apenas para a inclinação favorável, sendo possível notá-la também para a configuração de inclinação horizontal.



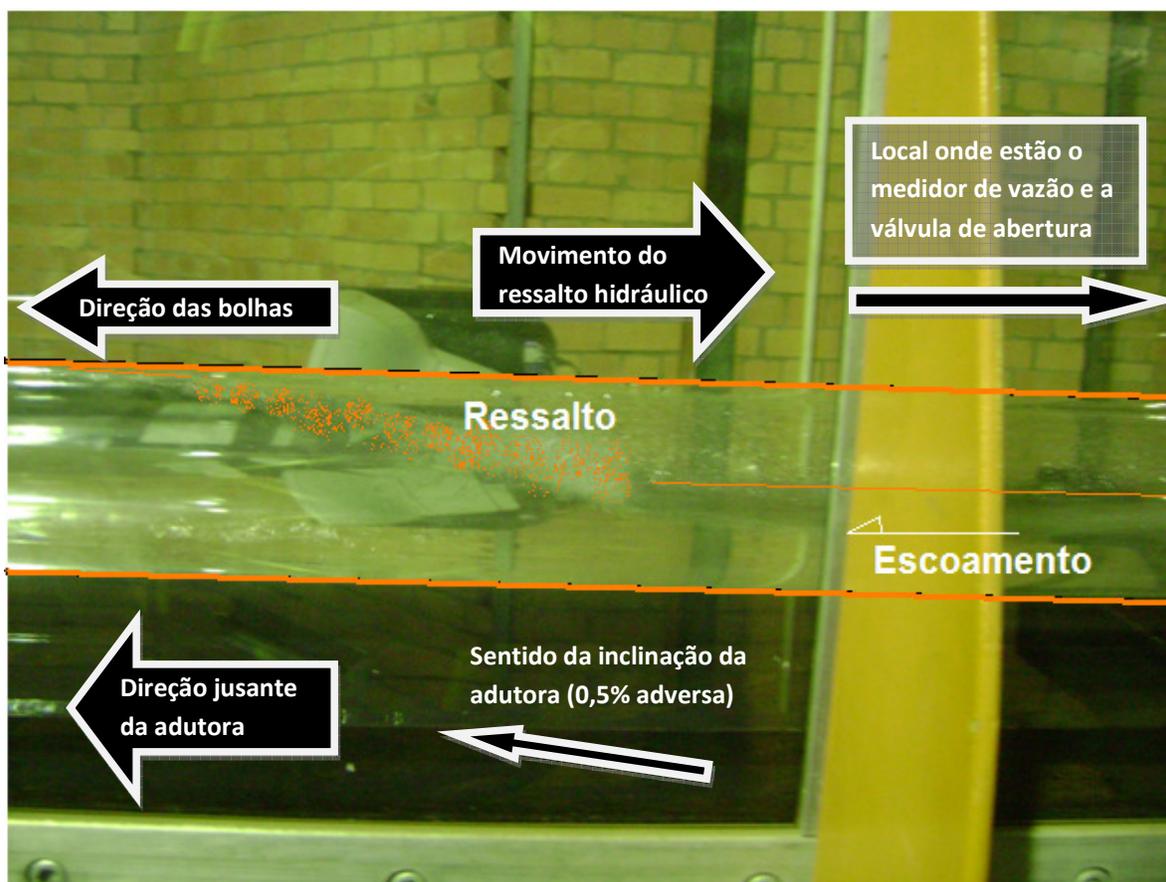
**Figura 11 – Morfologia da frente de enchimento em diversos instantes  
Vazão de 1,5 L/s ( $Q^* = 0,197$ )**

#### 5.4 Características gerais

As análises dos vídeos e dos desenhos esquemáticos nos mostram que, dependendo da combinação entre vazão e declividade, é possível ver a presença de diferentes morfologias das frentes de enchimento. Essas diferenças levaram à existência de três tipos de conformações finais da frente de enchimento através do conduto:

- Frente de enchimento tipo onda de choque: Observou-se que, para as vazões mais altas e as inclinações mais adversas, o escoamento na adutora se deu de forma que a feição 3 da frente de enchimento avançava devido à presença de perturbações hidráulicas que se propagavam com grande rapidez pelo conduto e que eram geradas por um ressalto hidráulico que surge nos primeiros trechos da adutora.
- Escoamento em regime livre: Percebeu-se que, para todas as inclinações favoráveis e para o caso de inclinação horizontal com a menor vazão, o escoamento se deu no regime livre, sem observar a ocorrência da feição 3.
- Enchimento análogo ao enchimento de reservatórios: Para a configuração de menor vazão e inclinação mais adversa, notou-se um enchimento do conduto que se assemelha ao enchimento de um reservatório, de tal forma que ocorreu bem lentamente e com o formato da frente de enchimento horizontal.

Um dos mais interessantes aspectos notados durante as corridas experimentais é o aparecimento, na maioria das configurações experimentadas, de um ressalto hidráulico, a jusante da válvula de abertura de escoamento. A válvula de abertura de vazão tem diâmetro de 60 milímetros, sendo ligada à adutora que tem diâmetro de 90 milímetros. Essa expansão, seguida da redução na velocidade, favorece a ocorrência desse ressalto. Os detalhes desse ressalto podem ser observados na Figura 12.



**Figura 12 – Foto com detalhes do ressalto hidráulico observado.**

A característica principal desse ressalto é que este, uma vez que é formado, se movimenta em direção contrária à do escoamento. Eventualmente o ressalto desaparece quando o mesmo chega à válvula de abertura da vazão. Isso ocorre porque o ar aprisionado entre a válvula e o ressalto vai sendo gradualmente expelido em forma de bolhas, capturadas no ressalto e que vão se dirigindo na mesma direção do escoamento até chegar ao fim da adutora. Especula-se que pressão do ar aprisionado é reduzida devido às bolhas terem sido expelidas, o que promove uma sucção no ressalto, resultando no movimento na direção da válvula. A utilização de válvulas de controle à montante de adutoras com diâmetros menores que o do conduto leva os autores a suporem que esse tipo de ressalto pode ser uma ocorrência comum no enchimento de adutoras.

## **6. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Pesquisas experimentais sobre o tema do enchimento de adutoras são muito escassas e, por causa disso, tais investigações são importantes:

Existe uma diferença entre a aqui apresentada pesquisa e a maioria das investigações experimentais anteriormente realizadas, como no caso dos trabalhos de Liou e Hunt (1998) e de Fuertes *et al.* (2000). Isso se dá porque, nos estudos anteriores, os diâmetros dos condutos eram muito pequenos (quando comparados aos diâmetros reais de adutoras) e a carga relativa do sistema,  $H/D$ , era muito elevada. Essa configuração não representa a realidade dos sistemas reais de abastecimento de água, onde a carga relativa durante o processo de enchimento é pequena. Já no caso desse trabalho, assim como na pesquisa feita por Guizani *et al.* (2005), a carga relativa e o diâmetro da adutora têm uma boa representatividade da realidade junto às adutoras reais.

Com relação à semelhança dos ensaios experimentais do presente trabalho com os realizados por Guizani *et al.* (2005), o que se pode dizer é que as conclusões chegadas nos dois estudos são similares. A frente de enchimento se dá em formato semelhante ao que se dá em rompimentos de barragens e não pode ser aproximado a uma interface vertical, mesmo nos enchimentos rápidos, como preconiza alguns modelos numéricos desenvolvidos. Isso quer dizer que provavelmente existem restrições para a aplicabilidade dos modelos que usam a hipótese da frente de enchimento vertical. Além disso, existe uma pequena diferença na forma como se dá a admissão de vazão nas adutoras dos dois trabalhos. No caso do aparato experimental do estudo Guizani *et al.* (2005), a vazão é admitida por meio da abertura de uma espécie de uma rolha e, no caso do desse estudo, ocorre por meio da abertura rápida de uma válvula seguida de expansão e isso se aproxima mais do que é feito nos sistemas reais.

Existe ainda uma consideração a se fazer sobre o ressalto hidráulico que foi observado nos experimentos realizados. Provavelmente o motivo pelo qual o ressalto se movimenta é, como foi descrito na seção anterior, a diminuição da pressão do ar aprisionado entre a válvula e o ressalto que ocorre através das bolhas de ar expelidas pelo ressalto. Tal comportamento é algo que ainda não foi preconizado em nenhum estudo anterior e isso demonstra a necessidade de que seja instaladas válvulas de eliminação de ar sempre a jusante de expansões de diâmetro e/ou de válvulas de abertura de vazão.

Por fim, é importante dizer que, mesmo diante de uma pequena amplitude de variáveis experimentais analisadas, foram observadas diversas morfologias para a frente de enchimento e comportamentos e conformações finais para o escoamento. Em virtude disso, e levando em conta que as pesquisas experimentais sobre o tema são limitadas, novas pesquisas nesse tema deverão ser promovidas para melhorar o entendimento do processo de enchimento de adutoras.

## AGRADECIMENTOS

À agência CNPq (Edital Universal – Processo 482216/2007-7) e à FINATEC por proverem recursos para a aquisição de equipamentos experimentais usados nestas investigações.

## BIBLIOGRAFIA

- ESTRADA, O. P. (2007). *Investigation on the Effects of Entrained Air in Pipelines*. Tese de Doutorado, Universidade de Stuttgart, Alemanha.
- FUERTES, V. S., ARREGUI, F., CABRERA, E. e IGLESIAS, P. L. (2000). “*Experimental setup of entrapped air pockets model validation*”. In Anais 8th International Conference on Pressure Surges - Safe Design and Operation of Industrial Pipe Systems, BHRA, Haia, Holanda, pp. 133-145.
- GUIZANI, M., VASCONCELOS, J. G., WRIGHT, S. J. e MAALEL, K. (2005). Investigation of rapid filling of empty pipes. Anais - International Stormwater and Urban Water Systems Modeling Conference, Toronto, Canada, Ontario, Canada. CHI.
- IZQUIERDO, J., FUERTES, J., CABRERA, E., IGLESIAS, P. L. e GARCIA-SERRA, J. (1999). “*Pipeline start-up with entrapped air*”. Journal of Hydraulic Research, IAHR, 37(5), 579-590.
- LIU, C. P. e HUNT, W. A. (1996). “*Filling of pipelines with undulating elevation profiles*”. Journal of Hydraulic Engrg., ASCE, 122(10), 534-539.
- VASCONCELOS, J. G., WRIGHT, S. J. e ROE, P. L. (2006). “*Two-Component Pressure Approach for the simulation of flow regime transition in sewers*”. Journal of Hydraulic Engrg., ASCE, 132(6), 553-562.
- VASCONCELOS, J. G. (2007). “*Modelo Matemático para Simulação de Enchimento de Adutoras de Água*”. In: Anais do 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária – ABES, Belo Horizonte.
- WYLIE, E. B. e STREETER, V. L. (1993). *Fluid Transients in Systems*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, EUA.