

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise do Deslocamento de um *Pig*
Multidiâmetro e da Dinâmica do Escoamento

Marcelo Tai Júnior

Itajubá, 26 de agosto de 2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Marcelo Tai Júnior

Análise do Deslocamento de um *Pig*
Multidiâmetro e da Dinâmica do Escoamento

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Térmica, Fluidos e Máquinas de Fluxo

Orientadora: Profa. Dra. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva

Coorientador: Prof. Me. Marcos Aurélio de Souza

26 de agosto de 2020

Itajubá

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Análise do Deslocamento de um *Pig*
Multidiâmetro e da Dinâmica do Escoamento

Marcelo Tai Júnior

Dissertação aprovada por banca examinadora em
27 de julho de 2020, conferindo ao autor o título
de **Mestre em Ciências em Engenharia Me-
cânica.**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva
Prof. Me. Marcos Aurélio de Souza
Prof. Dr. Marcelo José Pirani
Prof. Dr. Elisan dos Santos Magalhães

Itajubá
2020

Marcelo Tai Júnior

Análise do Deslocamento de um *Pig* Multidiâmetro e da Dinâmica do Escoamento/ Marcelo Tai Júnior. – Itajubá, 26 de agosto de 2020-
92 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientadora: Profa. Dra. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva

Coorientador: Prof. Me. Marcos Aurélio de Souza

Dissertação (Mestrado)

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, 26 de agosto de 2020.

1. Escoamento. 2. *PIG*. I. Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva. II. Marcos Aurélio de Souza III. Universidade Federal de Itajubá. IV. Instituto de Engenharia Mecânica. V. Análise de Escoamentos em Torno de um *Pig* Multidiâmetro.

CDU 07:181:009.3

Marcelo Tai Júnior

Análise do Deslocamento de um *Pig* Multidiâmetro e da Dinâmica do Escoamento

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. Itajubá, 27 de julho de 2020:

**Profa. Dra. Ana Lúcia Fernandes de
Lima e Silva**
Orientadora

Prof. Me. Marcos Aurélio de Souza
Coorientador

Prof. Me. Marcos Aurélio de Souza

Prof. Dr. Marcelo José Pirani

Itajubá
26 de agosto de 2020

Agradecimentos

Meu sincero agradecimento ao professor Marcos Aurélio de Souza por me possibilitar trabalhar no campo de desenvolvimento tecnológico do setor petroquímico e de me apresentar esses equipamentos fascinantes denominados *pigs*. Desenvolver projetos, construí-los e testá-los é uma experiência fantástica e mostra a engenharia em ação, muito obrigado por essa oportunidade.

Meu agradecimento à professora Ana Lúcia Fernandes de Lima e Silva por me acompanhar no mestrado e orientar na construção de um trabalho cujo tema eu me senti confortável em desenvolver e ainda pude explorar algumas áreas da engenharia mecânica.

Obrigado a toda a equipe e amigos do NUSEC pela ajuda na construção do *loop* de testes, pelos lançamentos do *pig* e pelas inúmeras ajudas que colaboraram na construção da presente dissertação. Obrigado a todos que de forma direta ou indireta me ajudaram.

*"Porque a multidão acredita ser profundo tudo aquilo de que não pode ver o fundo."
(Friedrich Nietzsche, "A Gaia Ciência")*

Resumo

Tubulações são o meio de transporte de fluidos mais empregado no mundo devido a sua eficiência, facilidade e segurança. Linhas de tubulações apresentam vida útil e precisam de manutenções ao longo do tempo. Desgastes, corrosões e formação de incrustações são exemplos de avarias que devem ser inspecionadas e devidamente tratadas. Para realizar esse serviço de manutenção, são utilizados os *pigs*, que são equipamentos capazes de realizar processos de inspeção, limpeza, entre outras funções. O uso da ferramenta é feito colocando a mesma na linha e passando-a através de um fluido com pressão suficiente para empurrar o *pig* por todo o percurso. É uma tecnologia extremamente necessária que deve ser cuidadosamente projetada, pois sua aplicação nas linhas é um procedimento perigoso. No presente estudo são feitas análises teóricas e experimentais das velocidades que um *pig* multidiâmetro de 4x8,5 polegadas pode atingir em trechos retos de quatro e sete polegadas. A análise teórica foi realizada aplicando as equações do movimento no *pig* e resolvendo-as por simulação numérica. A análise experimental foi feita através de lançamentos do equipamento em um *loop* de testes multidiâmetro localizado na Universidade Federal de Itajubá, no Núcleo de Separadores Compactos. O fluido de trabalho foi a água em condições ambiente, com vazões de trabalho de 20, 30, 40 e 50 m^3/h e a pressão máxima atingida na linha foi de 10 bar. Além desse estudo, também são observadas as fotos obtidas de testes com o *pig* referentes aos escoamentos que ocorrem antes, durante e após a passagens do equipamento em alguns trechos transparentes do *loop*. Conseguiu-se um intervalo de velocidades teóricas compatíveis com as obtidas experimentalmente, mas não foi possível a obtenção de um parâmetro preciso. Quanto aos escoamentos, percebeu-se modificações dos mesmos de acordo com o desempenho do *pig*.

Palavras-chaves: *Pig*. Multidiâmetro. Velocidade.

Abstract

Pipelines are the most widely used fluid transport method in the world due to their efficiency, ease and safety. Those have a long service life and need maintenance over time. Wear, corrosion and scale formation are examples of faults that must be inspected and properly treated. To perform this service, the pigs are used, which are equipment capable of carrying out inspection, cleaning, among other functions. This tool is used by placing it on the line and passing it through a fluid with sufficient pressure to push the all the way. It is an extremely necessary technology that must be carefully designed, as its application on the lines is a dangerous procedure. In the present study, theoretical and experimental analyzes are made of the speeds that a 4x8.5 inch multi-diameter can achieve in straight sections of four and seven inches. The theoretical analysis was performed by applying the equations of motion in and solving them by numerical simulation. The experimental analysis was done by launching the equipment in a loop of multi-diameter tests located at the Universidade Federal de Itajubá, Núcleo de Separadores Compactos. The working fluid was water in ambient conditions, with working flow rates of 20, 30, 40 and 50 m^3/h and the maximum pressure reached on the blade was 10 bar. In addition to this study, photos obtained from tests with the referring to the flows that occur before, during and after the passage of the equipment in some transparent sections of the loop are also observed. It was achieved a range of theoretical speeds compatible with those obtained experimentally, but it was not possible to obtain a precise parameter. As for flows, modifications were noticed according to the performance of pig.

Key-words: Pig. Multi-diameter. Velocity.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Foto ilustrativa de um <i>Pig</i> saindo de uma linha de tubulação.	22
Figura 2 – Operador inserindo um <i>pig</i> em uma linha de tubulação	23
Figura 3 – Esquema de movimentação do <i>pig</i>	23
Figura 4 – Ilustração de um <i>Pig</i> multidímetro.	24
Figura 5 – <i>Pig</i> bidirecional.	25
Figura 6 – Ilustração de uma câmara de lançamento.	25
Figura 7 – Ilustração de uma câmara de Recebimento.	26
Figura 8 – Ilustração de um processo de prevenção de corrosão.	27
Figura 9 – <i>Mandel cleaning pig</i> da Companhia ROSEN.	28
Figura 10 – <i>Mandel sealing pig</i> da Companhia ROSEN.	29
Figura 11 – <i>Pig</i> espuma.	30
Figura 12 – <i>Pig</i> sólido.	30
Figura 13 – <i>Pig</i> esfera.	31
Figura 14 – <i>Pig</i> de inspeção RoCorr MFL-C SERVICE.	32
Figura 15 – <i>Pig</i> de inspeção RoCorr UTWM SERVICE.	32
Figura 16 – Barras para tes com saída de comprimento 50% menor que o diâmetro nominal da tubulação.	34
Figura 17 – Exemplo de um <i>pig</i> esfera entalado em um tê.	35
Figura 18 – <i>Pig</i> entalado na saída da redução.	36
Figura 19 – <i>Pig</i> que passará por uma válvula não aberta totalmente.	36
Figura 20 – <i>Pig</i> passando por um acúmulo de detritos, aumentando o desgaste no topo do equipamento.	37
Figura 21 – Diferencial de pressão atuando nas paredes da tubulação e interferindo no <i>pig</i>	37
Figura 22 – Projeto do <i>pig</i> MFL.	39
Figura 23 – Análise da deformação do <i>pig</i> esfera antes da redução (a), na redução (b) e depois da redução (c).	39
Figura 24 – Protótipo do <i>pig</i> de limpeza multidímetro de 48"x28".	41
Figura 25 – Protótipo do <i>pig</i> de limpeza multidímetro aberto em 48".	41
Figura 26 – Protótipo do <i>pig</i> de limpeza multidímetro fechado em 28".	42
Figura 27 – Desenho do protótipo do <i>pig</i> de limpeza multidímetro bidirecional.	43
Figura 28 – <i>Pig</i> de limpeza multidímetro bidirecional concluído.	43
Figura 29 – Esboço do <i>pig</i> em deslocamento.	47
Figura 30 – Esboço do trem de <i>pig</i> em deslocamento.	50
Figura 31 – <i>Loop</i> de testes para <i>pigs</i> multidímetro do NUSEC.	51
Figura 32 – Desenho do <i>loop</i> de testes para <i>pigs</i> multidímetro do NUSEC.	53

Figura 33 – Conjunto de bombas de cavidade progressiva do <i>loop</i> de testes do NUSEC.	54
Figura 34 – Conjunto de inversores <i>loop</i> de testes do NUSEC.	54
Figura 35 – Flange de abertura rápida e válvula de esfera do lançador do <i>loop</i> de testes do NUSEC.	54
Figura 36 – Simulação da velocidade do <i>pig</i> pelo tempo com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 4 polegadas.	58
Figura 37 – Simulação da velocidade do <i>pig</i> pelo tempo com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 4 polegadas.	59
Figura 38 – Simulação da velocidade dos módulos do <i>pig</i> pelo tempo com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 4 polegadas.	61
Figura 39 – Simulação da velocidade dos módulos do <i>pig</i> pelo tempo com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 7 polegadas.	62
Figura 40 – Resultado das velocidades teóricas do escoamento e das velocidades médias experimentais do <i>pig</i> em função da vazão no trecho de 4 polegadas.	64
Figura 41 – Resultado das velocidades teóricas do escoamento e das velocidades médias experimentais do <i>pig</i> em função da vazão no trecho de 7 polegadas.	65
Figura 42 – Resultado das pressões a montante do <i>pig</i> em função da vazão no trecho de 4 polegadas.	66
Figura 43 – Velocidades teóricas para a configuração de um módulo e velocidades experimentais obtidas pelo <i>pig</i> no trecho reto de 4 polegadas.	67
Figura 44 – Velocidades teóricas para a configuração de dois módulos e velocidades experimentais obtidas pelo <i>pig</i> no trecho reto de 4 polegadas.	67
Figura 45 – Velocidades teóricas para a configuração de um módulo e velocidades experimentais obtidas pelo <i>pig</i> no trecho reto de 7 polegadas.	68
Figura 46 – Velocidades teóricas para a configuração de dois módulos e velocidades experimentais obtidas pelo <i>pig</i> no trecho reto de 7 polegadas.	69
Figura 47 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento sem modificações na vedação.	70
Figura 47 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento sem modificações na vedação (<i>cont.</i>).	71
Figura 48 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento do <i>pig</i> sem modificações na vedação.	71
Figura 48 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento do <i>pig</i> sem modificações na vedação (<i>cont.</i>).	72
Figura 49 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento do <i>pig</i> com modificações na vedação.	73
Figura 50 – Imagens do escoamento no trecho de limpeza de 7 polegadas referente ao lançamento do <i>pig</i> com modificações.	74

Figura 51 – Imagens do escoamento no trecho de limpeza de 7 polegadas referente
ao lançamento do *pig* com modificações. 75

Lista de tabelas

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do <i>pig</i> espuma.	29
Tabela 2 – Tolerâncias máximas para desvios do diâmetro interno de acordo com Tiratsoo (1992).	33
Tabela 3 – Relação entre raio de curvatura e diâmetro da tubulação (TIRATSOO, 1992).	33
Tabela 4 – Parâmetros utilizados nas simulações para configuração de 1 módulo e 2 módulos.	57
Tabela 5 – Velocidades teóricas atingidas pelo <i>pig</i> de 1 módulo para o trecho de 4 polegadas.	59
Tabela 6 – Velocidades teóricas atingidas pelo <i>pig</i> de 1 módulo para o trecho de 7 polegadas.	60
Tabela 7 – Velocidades teóricas atingidas pelo <i>pig</i> de 2 módulos para o trecho de 4 polegadas.	61
Tabela 8 – Velocidades teóricas atingidas pelo <i>pig</i> de 2 módulos para o trecho de 7 polegadas.	63
Tabela 9 – Valores experimentais do tempo gasto pelo <i>pig</i> para percorrer os trechos de 4 e 7 polegadas e pressões médias	64
Tabela 10 – Velocidades teóricas do escoamento no <i>loop</i> e velocidades experimentais do <i>pig</i>	65

Lista de abreviaturas e siglas

FPSO	<i>Floating Production Storage and Offloading</i>
LAMP	Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo
MFL	<i>Magnetic Flux Leakage</i>
NUSEC	Núcleo de Separadores Compactos
PIG	<i>Pipeline Inspection Gauge</i>
UFRN	Universidade Federal do Rio Grande do Norte
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá

Lista de símbolos

A	Área da secção transversal ao escoamento [m^2]
A_1	Área da secção transversal ao escoamento atrás do <i>pig</i> [m^2]
A_2	Área da secção transversal ao escoamento à frente do <i>pig</i> [m^2]
A_{vaz}	Área da secção transversal ao escoamento referente ao vazamento [m^2]
C	Coefficiente de atrito dado pelo <i>pig</i> e o fluido de trabalho [Ns/m]
F_1	Força do volume de controle atrás do <i>pig</i> [N]
F_2	Força do volume de controle na frente do <i>pig</i> [N]
F_μ	Força de atrito causada pelo <i>pig</i> e o fluido de trabalho [N]
F_{at}	Força de atrito causada pelo <i>pig</i> e parede da tubulação [N]
F_c	Força de atrito causada pelo <i>pig</i> e a parede da tubulação [N]
K_p	Coefficiente total de perda de carga localizada [$-$]
K_{CB}	Coefficiente de perda de carga localizada devido à contração do escoamento [$-$]
K_{EB}	Coefficiente de perda de carga localizada devido à expansão do escoamento [$-$]
\bar{p}_{linha}	Pressão da linha obtida pelo manómetro instalado no <i>loop</i> de testes [bar]
\bar{v}_{pig}	Velocidade média do <i>pig</i> experimental [m/s]
ρ	Massa específica do fluido de trabalho [kg/m^3]
\vec{u}	Vetor velocidade do escoamento na direção x [m/s]
f_c	Coefficiente de atrito causada pelo contato do <i>pig</i> com a parede da tubulação [Ns/m]
k	Rigidez que acopla o primeiro módulo do <i>pig</i> com o segundo [N/m]
m_1	Massa correspondente ao primeiro módulo do <i>pig</i> [kg]
m_2	Massa correspondente ao segundo módulo do <i>pig</i> [kg]
m_{pig}	Massa total do <i>pig</i> [kg]
p_1	Pressão a montante do <i>pig</i> [bar]
p_2	Pressão a jusante do <i>pig</i> [bar]
t	Tempo diferencial do deslocamento do <i>pig</i> [s]
t_f	Tempo final obtido após o <i>pig</i> apontar na curva acentuada de 90 graus [s]
t_i	Tempo inicial obtido após o fechamento da válvula de esfera do lançador [s]
u	Módulo do vetor velocidade do escoamento [m/s]
v_1	Velocidade média do escoamento no ponto 1 [m/s]
v_2	Velocidade média do escoamento no ponto 2 [m/s]
v_{pig}	Velocidade teórica do <i>pig</i> [m/s]

x_1 Deslocamento do primeiro módulo do *pig* [m]
 x_2 Deslocamento do segundo módulo do *pig* [m]
 x_{pig} Deslocamento do *pig* [m]

Sumário

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO TEÓRICA	22
2.1	Definição e Funcionamento dos <i>Pigs</i>	22
2.2	Descrição da Movimentação e Aplicação dos <i>pigs</i>	23
2.3	Tipos de Processos <i>pigging</i>	25
2.3.1	Para a separação de produtos	26
2.3.2	Para a remoção de parafinas e limpeza	26
2.3.3	Para a inibição de corrosão	27
2.3.4	Mapeamento através de ondas eletromagnéticas	27
2.3.5	Ultrassom inteligente	28
2.4	Tipos de <i>pigs</i>	28
2.4.1	<i>Utility Pigs</i> - <i>Pigs</i> Utilitários	28
2.4.1.1	<i>Mandrel cleaning pigs</i> — <i>Pigs</i> Mandril de Limpeza	28
2.4.1.2	<i>Mandrel sealing pigs</i> — <i>Pigs</i> Mandril de Vedação	29
2.4.1.3	<i>Foam pigs</i> — <i>Pigs</i> espumas	29
2.4.1.4	<i>Solid cast pigs</i> — <i>Pigs</i> sólidos fundidos	30
2.4.1.5	<i>Spheres pigs</i> — <i>Pigs</i> esfera	30
2.4.2	<i>In line Inspection Pigs</i>	31
2.5	Requisitos das Linhas de Tubulações	32
2.5.1	Geometria Ideal das Tubulações	33
2.5.2	Válvulas e Conexões	34
2.6	Problemas com <i>pig</i>	35
2.6.1	<i>Pigs</i> bloqueando a linha	35
2.6.2	Incrustações e Detritos	36
2.6.3	Desgastes excessivos	36
2.6.4	Danos Mecânicos	37
2.7	Estudos com <i>pigs</i>	37
2.7.1	Trabalhos analíticos	38
2.7.2	Trabalhos numéricos	38
2.7.3	Trabalhos experimentais	40
3	METODOLOGIA	46
3.1	Análise teórica da dinâmica do conjunto	46
3.1.1	Configuração com um único módulo	46
3.1.2	Configuração com dois módulos ligados	50

3.2	Análise experimental	51
3.2.1	Bancada de testes	51
3.2.1.1	Procedimento experimental	52
3.2.2	Geometria e construção do <i>pig</i>	55
4	RESULTADOS	57
4.1	Resultados teóricos	57
4.1.1	Configuração de 1 módulo	57
4.1.2	Configuração de 2 módulos	60
4.2	Resultados experimentais	63
4.2.1	Velocidade do <i>pig</i>	63
4.2.2	Escoamentos ao redor do <i>pig</i>	69
5	CONCLUSÕES	76
	REFERÊNCIAS	78
	APÊNDICES	82
	APÊNDICE A – APÊNDICE A - CÓDIGO SCILAB: CONFIGURAÇÃO DE 1 MÓDULO	83
	APÊNDICE B – APÊNDICE B - CÓDIGO SCILAB: CONFIGURAÇÃO DE 2 MÓDULOS	87

1 Introdução

As linhas de tubulações são o meio de transporte mais empregado no mundo para condução de fluidos, pois apresentam segurança e uma alta eficiência no transporte de massa. Mais de três milhões de quilômetros de tubulações são empregados pelo setor petroquímico para a movimentação de gás e óleo. Entretanto, com o passar do tempo, as linhas de tubulações começam a apresentar acúmulos de incrustações, desgastes por corrosão, assim como surgimento de trincas. Se não houver uma manutenção adequada do equipamento, pode prejudicar a integridade das tubulações, gerando consequências catastróficas como desastres ecológicos através de vazamento de óleo nos oceanos, assim como prejuízos econômicos de alta escala. Dessa forma, tecnologias para manter a integridade das tubulações vêm sendo desenvolvidas até os dias atuais. Podem ser citados os equipamentos denominados *pigs*, que são utilizados para a limpeza e inspeção das linhas (MIRSHAMSI; RAFEEYAN, 2015; TIRATSOO, 1992; CORDELL; VANZANT, 2002; MAZREAH; ALNAIMI; SAHARI, 2017).

Pigs são equipamentos utilizados em linhas de tubulações para realizar tarefas de manutenções, como limpeza, proteção, inspeção, entre outros. Esse equipamento apresenta os mais variados tipos de configuração, pois sua construção depende intrinsecamente da função a ser realizada na linha. Para a função de limpeza, devem ser projetadas escovas e raspadores, enquanto que para a inspeção, devem ser estudados e confeccionados sensores detectores de corrosão, trincas, entre outros defeitos. Em comum a todos os *pigs*, uma função necessária em qualquer tipo de tipo de *pig* é a de vedação, pois o equipamento precisa de um diferencial de pressão para se movimentar na linha e os vedadores atuam justamente para manter essa condição. Os modelos de *pigs* mais comuns são o de carretel, usado em limpeza e inspeção, e o de cilindro de espuma, utilizado para limpeza.

A manutenção das linhas de tubulações pelas indústrias é um ato obrigatório e há diversos procedimentos e normas para a realização dessa tarefa. Atualmente, as linhas de tubulações, antes de serem construídas, devem ser projetadas para o lançamento e recebimento de *pigs*. Isso mostra o quão importante é o equipamento, devendo o mesmo ser capaz de fazer a manutenção das tubulações de forma segura e eficaz. Esse procedimento de limpeza e inspeções com *pigs* é considerado por ser um procedimento crítico, ou seja, de alto risco, dado o uso de altas pressões para o transporte do equipamento, assim como o risco de o mesmo ficar entalado, prejudicando toda a linha de transporte. O equipamento deve ser capaz de passar por todo trecho da tubulação, incluindo conexões e válvulas (TIRATSOO, 1992).

De forma simplificada, a movimentação do *pig* dentro dos tubos acontece através

de um diferencial de pressão no fluido aplicado no equipamento. Para que aconteça essa diferença de pressão, o *pig* deve ser capaz de realizar uma vedação suficiente para ser empurrado. Além disso, a pressão deve ser alta o suficiente para vencer o atrito entre o tubo e a vedação, considerando as interações entre as possíveis deformações das linhas e também cumes de incrustações (O'DONOGHUE, 2003).

Geralmente, as aplicações mais básicas de *pigs* são feitas em tubulações que apresentam o mesmo tamanho. Ou seja, o equipamento entra e sai por uma linha de tubulação constante. Dessa forma, os vedadores e toda a estrutura do mesmo é feita levando em conta somente esse diâmetro. Contudo, um dos grandes desafios para aplicação de *pigs* em determinadas linhas é que o diâmetro dos tubos das mesmas variam em certos trechos. Isso faz com que o equipamento precise se deslocar em diversos diâmetros, o que acarreta em uma geometria diferencial e adaptável para as dimensões das linhas em voga. Essa característica de mudança de diâmetro deve ser atrelada à capacidade de vedação pelo *pig*, já que é um dos fatores que mais provocam entalamento. O *pig* capaz de atuar nessas linhas é chamado de *pig* multidiâmetro ou *multi diameter pig* — em inglês, que é o tipo de *pig* estudado no presente trabalho.

Um dos fatores analisados em trabalhos de porte acadêmico e técnico, é a relação entre fluido, estrutura da tubulação e estrutura de vedação do *pig*, assim como análises do movimento do equipamento por todo o trecho da linha a ser limpada e inspecionada. Para essa análise entre o fluido de trabalho, as estruturas do equipamento e as estruturas da linha de tubulações, são utilizadas diversas ferramentas, tanto teóricas como experimentais para prever o comportamento entre esses três tipos de sistemas.

Os métodos mais aplicados para análise do *pig*, principalmente da parte de vedação, são os numéricos. As abordagens mais simplificadas levam em conta somente a deformação no material da vedação, que geralmente é o poliuretano. Já as análises mais complexas fazem interações entre fluido e a estrutura da vedação, sendo o fluido responsável por aplicar as deformações na vedação. Em análises de movimento, também são usadas abordagens teóricas para descrição da dinâmica do corpo pela linha, procurando verificar se o equipamento passará pelas curvas, válvulas e conexões do trecho. Análises experimentais também são bastantes aplicadas, visto que os fenômenos que ocorrem durante esse processo de movimentação do equipamento são complexos, e através dos experimentos, pode-se tanto visualizar os fatores de vedação reais, assim como o de movimentação, entre outros.

O presente trabalho é uma parte dos resultados do projeto "Estudo conceitual e desenvolvimento de um protótipo de *pig* de limpeza multi-diâmetros 4x8,5 da parceria de pesquisa e desenvolvimento firmado com a Petrobras e a UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). Esse projeto é desenvolvido no NUSEC (Núcleo de Separadores Compactos), onde foram desenvolvidos componente a componente do equipamento, como também a

construção de um *loop* de testes para *pigs* multidiâmetros que se encontram na faixa de 4 à 8,5 polegadas.

O objetivo principal deste trabalho é o de analisar os fenômenos que ocorrem devido ao escoamento e à movimentação de um *pig* multidiâmetro em uma linha de tubulações e como esses fatores interferem na velocidade do equipamento, sendo esse estudo realizado através de análise teórica e de testes experimentais com um modelo de *pig* multidiâmetro. Essa influência da dinâmica do fluido, assim como da dinâmica do equipamento, pode modificar o modo como os vedadores atuam, assim como influenciar na abertura e fechamento dos vedadores na transição de diâmetros. A análise teórica foi realizada fazendo uma estimativa da velocidade a ser atingida pelo *pig* em trechos retos nos diâmetros nominal das tubulações de quatro e sete polegadas, enquanto que a realização dos testes foi feita em um *loop* de testes para a passagem do *pig*, também construído no NUSEC, tendo as condições máximas para a linha ajustadas a 10bar de pressão e $50m^3/h$ de água. Com os testes experimentais, objetivou-se obter as velocidades adquiridas pelo equipamento em trechos específicos do *loop*, verificar as condições do escoamento ao redor do *pig*, assim como visualizar a interação entre estrutura das tubulações, fluido em movimento e estrutura do equipamento.

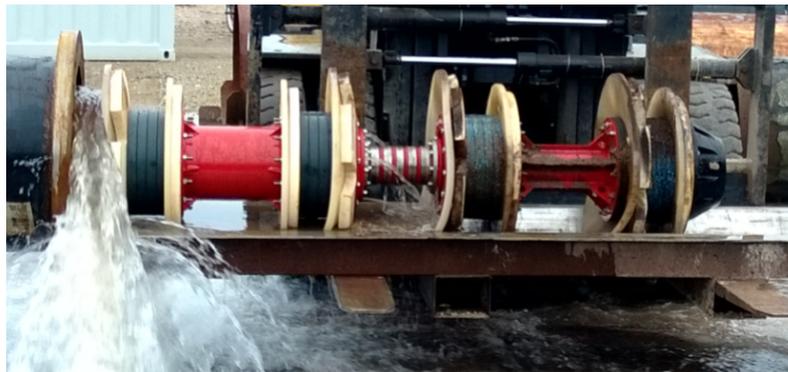
Esta dissertação contém seis capítulos sendo que na Introdução, que é o presente capítulo do trabalho, são abordadas as necessidade da construção e desenvolvimento de *pigs*, assim como os tipos de estudos com o equipamento, como os objetivos do trabalho. No Capítulo 2 são abordados os estudos bibliográficos sobre os *pigs*, colocando em destaque o método de funcionamento, os principais tipos e construções. São mostrados alguns dos principais problemas tanto na construção como sua aplicação nas linhas de tubulações. A Metodologia é descrita no Capítulo 3 onde são apresentados os detalhes da construção da bancada experimental, assim como os recursos e ferramentas aplicados no trabalho. No Capítulo 4 são apresentados os resultados dos ensaios numéricos e experimentais da velocidade adquirida pelo *pig*, assim como as fotos do escoamento segundos antes e depois da passagem do equipamento. No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões com base nos resultados obtidos e sugestões para trabalhos futuros. As Referências Bibliográficas utilizadas ao longo do trabalho são mostradas no final da dissertação.

2 Revisão teórica

2.1 Definição e Funcionamento dos *Pigs*

Sistemas de tubulações são empregados no mundo todo, pois são uma maneira segura e eficiente para transportar diversos tipos de fluidos, como petróleo e gases, por exemplo. Entretanto, com o uso e com o tempo, as tubulações começam a apresentar incrustações, desgastes, deformações e ataques de corrosão, prejudicando o rendimento e a segurança da operação (MIRSHAMSI; RAFEEYAN, 2015; OLANIYAN; LARREY, 2014). Como solução, os equipamentos denominados *pigs* são utilizadas para realizar inspeções e limpezas nas tubulações, como pode ser visto na Fig. 1.

Figura 1 – Foto ilustrativa de um *Pig* saindo de uma linha de tubulação.



Fonte: ROSENGroup (2018a)

Considera-se que o desenvolvimento dos primeiros *pigs* começou em meados de 1870, nos Estados Unidos, com o propósito de limpar tubulações de petróleo, pois as incrustações estavam exigindo um aumento das pressões pelas bombas, aumentando o gasto de energia do processo. Pedacos de panos eram amarrados em conjunto, embolados, e colocados para passarem nas tubulações. Esse procedimento removia parafinas e incrustações, conseguindo, então, melhorar o escoamento da linha (DAVIDSON; PIPELINE, 2002). Com o avanço do desenvolvimento dessa tecnologia, no ano de 2002 já havia mais de 350 tipos de *pigs* segundo Cordell e Vanzant (2002). De acordo com Boghi et al. (2018), estudos científicos com *pigs* têm aumentado vastamente nas últimas décadas devida à sua importância para o desenvolvimento desses equipamentos.

A origem do termo *pig* é incerta, mas há teorias de que esses equipamentos, devido aos raspadores de parafina, emitiam ruídos estridentes como de um porco – *pig* em inglês. Há também, afirmações de que por saírem cobertos de óleo e sujeira das tubulações, ganharam essa denominação. Em contrapartida, o termo também é considerado como o acrônimo de PIG (*Pipeline Inspection Gauge*) (TIRATSOO, 1992). Destaca-se também

que o termo *pigging* é bastante utilizado nas literaturas do tema e faz alusão ao processo de aplicar o *pig* na tubulação (ZHANG et al., 2017b). Na Alemanha são chamados de *molch* e na França são conhecidos como *picage* ou *racleur* (HILTSCHER; MÜHLTHALER; JÖRG, 2006).

A utilização de *pigs*, geralmente, é de carácter preventivo como na Fig. 2, tendo as indústrias o cuidado de manter a integridade e a ótima eficiência da tubulação, já que geralmente quando acontece algum problema nas linhas, o mesmo é grave e pode gerar uma alta despesa econômica (CORDELL; VANZANT, 2002).

Figura 2 – Operador inserindo um *pig* em uma linha de tubulação

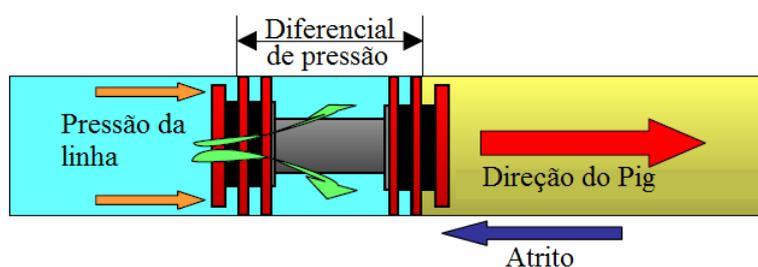


Fonte: ROSENGroup (2018b)

2.2 Descrição da Movimentação e Aplicação dos *pigs*

Propositalmente, os *pigs* são construídos para apresentarem interferência com a tubulação, fazendo com que a mesma seja vedada. Com os *pigs* devidamente implantados nos tubos, é aplicada uma pressão pela bomba, através do fluido, suficiente para que o mesmo seja movido. Com isso, tem-se um diferencial de pressão que deve ser suficiente para empurrar o equipamento pela linha, vide Fig. 3 (DAVIDSON; PIPELINE, 2002).

Figura 3 – Esquema de movimentação do *pig*.



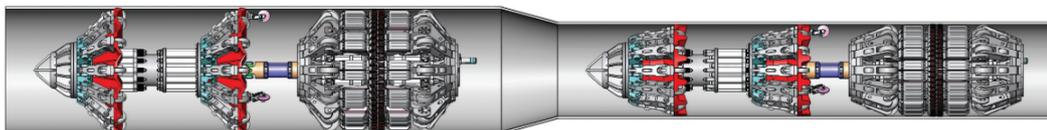
Fonte: Adaptada de Davidson e Pipeline (2002).

Para o caso de linhas operacionais, a pressão é aplicada pelo fluido da própria linha de trabalho, enquanto que em outros casos que não fazem o uso do fluido da linha, é realizado primeiro o procedimento de esvaziamento das tubulações e somente depois é inserido na linha o fluido que realizará a limpeza, que pode ser água, gás ou qualquer líquido necessário para esse trabalho. No caso de gás, o mais comumente utilizado é o ar comprimido (DAVIDSON; PIPELINE, 2002; ESMAEILZADEH; MOWLA; ASEMAN, 2009).

Zhang et al. (2017a) destacam que todos os *pigs* devem ser construídos para suportar um diferencial de pressão, dentro do limite da linha a ser pigada ¹. O projeto deve ser tal que garanta que esse diferencial de pressão seja mantido durante todo o percurso do equipamento, evitando que o mesmo possa ficar entalado ou que apresente mau funcionamento. O projeto do equipamento deve atentar às geometrias dos vedadores, massa dos componentes, o atrito gerado entre o fluido e a estrutura do *pig*, a fricção entre o equipamento e a parede da tubulação, entre outros, pois são fatores que modificam o desempenho do sistema, já que essas condições interferem diretamente nas forças atuantes no conjunto (AZEVEDO et al., 1996).

Normalmente a aplicação de *pigs* é realizada em linhas que apresentam diâmetro interno das tubulações constante, ou seja, desde o lançamento na linha até o recebimento do equipamento, o mesmo percorre por trechos que têm o mesmo diâmetro. Entretanto, há diversas linhas de tubulações que não apresentam essa característica de diâmetro interno constante. Esse tipo de linha, como qualquer outra, também precisa de limpeza e inspeção, que nesse caso em específico, devem ser utilizados *pigs* multidiâmetro, como pode ser visualizado na Fig. 4. Dessa forma, o equipamento deve ser capaz de trabalhar em diversos diâmetros. Para que a movimentação do equipamento seja efetiva nesse tipo de linha, os selos de vedação devem ser capazes de ajustarem ao diâmetro do tubo (ROSENGROUP, 2018a).

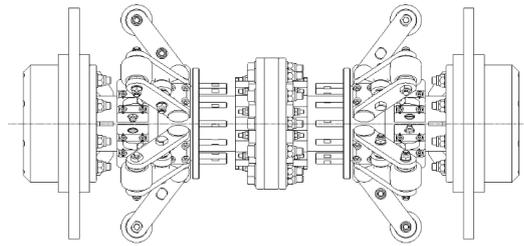
Figura 4 – Ilustração de um *Pig* multidiâmetro.



Fonte: ROSENGROUP (2013a).

Outra característica ligada à movimentação dos *pigs* é que geralmente eles possuem uma direção única. Logo, não podem voltar pela linha sem antes terem sido invertidos. Em algumas aplicações, é necessário que o equipamento consiga se movimentar em ambas as direções, sendo denominado de *pigs* bidirecionais (Fig. 5) (TIRATSOO, 1992; ROSENGROUP, 2018a).

¹ O termo se refere à aplicação do *pig* nas tubulações.

Figura 5 – *Pig* bidirecional.

Fonte: Vik et al. (2010).

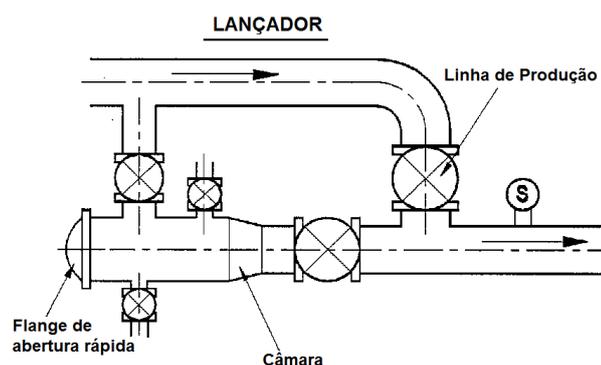
2.3 Tipos de Processos *pigging*

Um processo de *pigging* é caracterizado pela passagem do *pig* por uma linha de tubulações, podendo realizar procedimentos de limpeza, inspeção, além de outros tipos de funções. Esse procedimento é caracterizado por apresentar três etapas fundamentais: o lançamento na linha, a passagem na linha e pelo recebimento do equipamento.

O lançamento e o recebimento do *pig* são realizados em câmaras que podem ser do tipo lançador, receptor ou lançador-receptor. Essas câmaras de *pig* são construídas de acordo com normas técnicas, como a ABNT NBR 16381, mas que somente apresenta a normatização para *pigs* de diâmetro constante. Há diferentes tipos de projetos para essas câmaras, as quais variam de acordo com os tipos de *pigs* a serem utilizados na linha (CORDELL; VANZANT, 2002).

O procedimento de lançamento é realizado no lançador (Fig. 6) ou lançador-receptor, que deve ser construído de forma que a câmara seja conectada à linha de produção. Há uma sequência de procedimentos que devem ser aplicados para que se tenha um lançamento sem riscos ou que danifiquem o equipamento. O *pig* deve ser inserido na câmara e também deve ser realizada a manobra de válvulas para que a câmara tenha acesso completo à linha a ser *piggada*, para então, se aplicar o fluido na câmara que empurrará o *pig* pela linha.

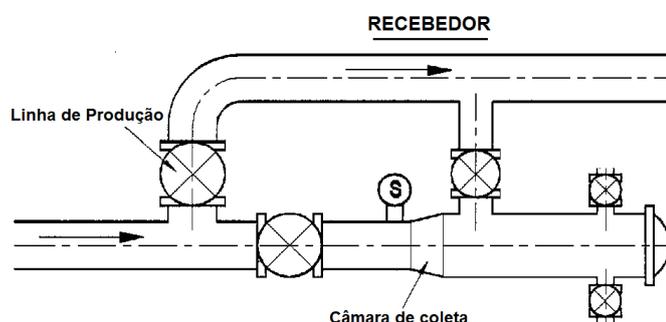
Figura 6 – Ilustração de uma câmara de lançamento.



Fonte: Adaptada de Cordell e Vanzant (2002).

Após a passagem do equipamento pela linha pigada, o mesmo é recolhido no receptor (Fig. 7). A válvula que faz a ligação entre a linha de produção com a câmara é fechada e o *pig* pode ser removido pelo flange de abertura rápida. Em alguns projetos de câmaras em plataformas *offshore*, os receptores são instalados na margem da estruturas e direcionados ao oceano, já que o *pig* pode chegar em velocidades altas, danificando o flange de abertura rápida, e dependendo da situação, estourar e causar acidentes. Esse tipo de instalação minimiza o risco de comprometer outros equipamentos da plataforma, e principalmente, a equipe de trabalho, pois caso ocorra esse tipo de situação, o *pig* cai diretamente no mar (CORDELL; VANZANT, 2002).

Figura 7 – Ilustração de uma câmara de Recebimento.



Fonte: Adaptada de Cordell e Vanzant (2002).

Os processos de *pigging* variam de acordo com o objetivo a ser realizado na tubulação. A seguir são descritos alguns dos processos que podem ser realizados com o equipamento, de acordo com Tiratsoo (1992):

2.3.1 Para a separação de produtos

Certas aplicações industriais necessitam que diferentes tipos de fluidos sejam transportados por uma mesma linha de tubulações, pois esse procedimento é economicamente mais viável do que implantar uma linha para cada tipo de produto a ser transportado. Existem *pigs* que conseguem realizar esse processo, separando os fluidos em uma linha, resultando em uma interface entre os produtos. Para a garantia de que os fluidos não se misturem, um trem de dois ou três *pigs* pode ser utilizado no processo.

2.3.2 Para a remoção de parafinas e limpeza

Determinados tipos de óleo crus apresentam a característica de formarem parafina quando são resfriados. O acúmulo de parafina nas linhas de tubulações faz com que o diâmetro interno do duto seja reduzido, e ainda que as paredes apresentem uma maior irregularidade. Isso faz com que a eficiência do fluxo caia, e exige da bomba um maior gasto de energia. Frente a esse problema, os *pigs* podem ser utilizados nas tubulações

para realizarem a remoção da parafina e a limpeza desses resíduos. A maioria desses *pigs* apresenta um *by-pass*, passando pela sua estrutura, que aplica fluxos de água na linha à frente para ajudar na remoção da cera. Além disso, esses *pigs* também apresentam escovas ou raspadores para remover as incrustações nas paredes das tubulações. Em linhas que trabalham com outros fluidos, o processo de piggagem é utilizado para remover resíduos sólidos e retirar incrustações. Com uma tubulação mais limpa, o gasto energético com fornecimento de pressão é menor e também se tem um melhor desenvolvimento do escoamento.

2.3.3 Para a inibição de corrosão

A corrosão é um dos fatores que mais causam problemas na integridade das tubulações e conexões, e em específico, para aplicações petroquímicas as corrosões nos dutos são associadas aos cloretos e sulfetos (TENNYSON; MORISON, 2006). Para prevenir o ataque corrosivo, podem ser acrescentadas pequenas quantias de inibidores de corrosão no fluido. Entretanto, para casos em que toda a área da tubulação deve ser seguramente protegida, usa-se um trem de dois *pigs* com o líquido inibidor entre eles, o que garante que o topo do duto também seja protegido (Fig. 8).

Figura 8 – Ilustração de um processo de prevenção de corrosão.



Fonte: WILLIAMSON (2019).

2.3.4 Mapeamento através de ondas eletromagnéticas

Técnicas mais sofisticadas podem ser implantadas em *pigs* para medição da espessura das tubulações, detecção de dentes e trincas e análise de ovalização. Uma dessas técnicas é o uso de ondas eletromagnéticas para detecção de vazamentos. Vazamento de Fluxo Magnético (MFL (*Magnetic Flux Leakage*)), que é um método de inspeção aplicado em materiais ferromagnéticos que utiliza sensores magnéticos para detectarem anomalias geradas em um fluxo magnético causado pela falta de metal (EGE; CORAMIK, 2018).

Essa técnica consegue determinar o volume de metal perdido no trecho da tubulação, assim como o tamanho do defeito. Através da interação entre as ondas eletromagnéticas com a tubulação, são obtidos os dados de análise, que são computados e interpretados. Esses *pigs* podem ser utilizados tanto em tubulações de gases quanto em tubulações de líquidos.

2.3.5 Ultrassom inteligente

O objetivo desse processo é o mesmo que do mapeamento por ondas eletromagnéticas, mas é realizado pelo uso de ultrassom. Ele é mais preciso que a técnica por ondas magnéticas, mas só pode ser utilizado em tubulações que contenham líquidos acoplantes, que são fluidos viscosos que apresentam eficiência na transmissão de energia acústica (DUGMORE; JONSON; WALKER, 2002). Com esses fluidos o *pig* consegue medir a espessura das paredes em toda a linha da tubulação, dada a análise entre as ondas emitidas e a interação delas com o fluido transportado.

2.4 Tipos de *pigs*

Como já explicado anteriormente, há diversos tipos de *pigs*, variando as estruturas de acordo com a aplicação. Os *pigs* são utilizados para inspecionar tubulações, reduzir a queda de pressão, prevenir e analisar corrosões, aplicar tratamentos químicos, assim como realizar limpezas ao remover sólidos e incrustações indesejadas, de acordo com Olaniyan e Larrey (2014). A seguir, são descritos alguns tipos de *pigs*, assim como sua finalidade, de acordo com a classificação de Cordell e Vanzant (2002):

2.4.1 *Utility Pigs* - *Pigs* Utilitários

Os *pigs* utilitários podem ser divididos em dois grupos: *pigs* de Limpeza, responsáveis pela remoção de sólidos e incrustações, e *pigs* de selo, usados para remover líquidos acumulados, separar fluidos e esvaziar as tubulações.

2.4.1.1 *Mandrel cleaning pigs* — *Pigs* Mandril de Limpeza

Esses tipos de *pigs* apresentam em sua construção os principais componentes: os vedadores, que têm como objetivo manter a pressão na linha, os componentes de limpeza, necessários para a remover sujeiras e incrustações, e o corpo do *pig*, peça em que são fixados os outros componentes (Fig. 9).

Figura 9 – *Mandrel cleaning pig* da Companhia ROSEN.



Fonte: Adaptada de ROSENGroup (2018b).

O que varia de um equipamento para outro é a quantidade de vedadores, o comprimento do corpo, assim como a quantidade e geometria das escovas e raspadores. Em específico para tubulações que apresentam válvulas, as hastes do *pig* devem ser longas o bastante para que a vedação aconteça na entrada e saída da válvula.

2.4.1.2 *Mandrel sealing pigs* — *Pigs* Mandril de Vedação

Estes *pigs*, como o da Fig. 10, são praticamente iguais aos *Mandrel cleaning pigs*, mas diferem por não apresentarem elementos de limpeza, como raspadores e escovas. Eles também apresentam configurações diferentes de acordo com a particularidade da linha a ser aplicada e o desenvolvimento do vedador a ser utilizado no equipamento deve ser suficiente para vedar de maneira adequada, pois em processos de separação, não deve haver cruzamento de fluidos. O objetivo principal desses *pigs* é de selar a tubulação corretamente, podendo a construção apresentar de dois a seis, ou até mais selos.

Figura 10 – *Mandrel sealing pig* da Companhia ROSEN.



Fonte: ROSENGroup (2018b).

2.4.1.3 *Foam pigs* — *Pigs* espumas

A utilização de materiais plásticos na construção de *pig* proporciona no projeto uma redução dos custos e baixo risco de entupimento, entretanto, devem ser analisados se são compatíveis com o objetivo em voga. Atualmente, esses materiais apresentam uma maior resistência à ruptura e também ao desgaste. Particularmente, são usados em linhas que não foram regularmente *piggadas* e que podem apresentar algum problema inesperado. As vantagens e desvantagens de se utilizar *pigs* de espuma podem ser visualizadas na Tab. 1.

Tabela 1 – Vantagens e desvantagens do *pig* espuma.

Vantagens	Desvantagens
Expansíveis	Não são tão efetivos quanto outros <i>pigs</i> de limpeza
Apresentam menor custo	Vida útil baixa
Flexíveis, diminuindo as chances de ficarem entalados	

Esses *pigs* são feitos de poliuretano de célula aberta, tendo estrutura normalmente cilíndrica. De acordo com a empresa INLINE (2018), a mesma apresenta *pigs* espumas (Fig.11) que vão de 2 até 60 polegadas, indicados para remoção de líquidos e limpeza em geral.

Figura 11 – *Pig* espuma.



Fonte: INLINE (2018).

2.4.1.4 *Solid cast pigs* — *Pigs* sólidos fundidos

Do mesmo modo que os *pigs* espumas, esses *pigs* são feitos de polituretano, e são fabricados, normalmente, para atuarem na vedação. *Pigs* sólidos, vide Fig. 12, são usados para se obter resultados similares aos do *pigs* de mandril, mas em contrapartida, não se tem o intuito de usá-los em longo prazo. São bastante utilizados por empresas de tubulações, pois muitas vezes apresentam um custo menor e não precisam ter peças trocadas. Além disso, o custo do transporte desse equipamento também é outro fator de vantajoso.

Figura 12 – *Pig* sólido.



Fonte: INLINE (2018).

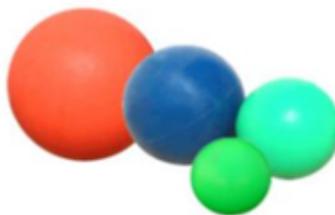
2.4.1.5 *Spheres pigs* — *Pigs* esfera

Pigs de formato esféricos são utilizados em vedação, tendo poucos modelos desenvolvidos para realização de limpeza. O *design* desses *pigs* de esferas deve ser tal para que o mesmo não fique entalado nas linhas de tubulação, pois até mesmo tês barrados² podem fazer com que a esfera fique presa. Esses tipos de *pigs*, Fig. 13, apresentam baixas eficiências, mas em contrapartida são bastante versáteis porque são capazes de passar

² Tês que apresentam um conjunto de barras transversais fixadas internamente com o propósito de barrar a passagem do *pig* pela via perpendicular. O mesmo pode ser visualizado na Fig. 16.

por curvas acentuadas e se arrastarem pela tubulação livremente. São muito utilizados em linhas com gases para controle e remoção de fluido condensado. No site da INLINE (2018), os diâmetros variam de 2 até 42 polegadas.

Figura 13 – *Pig* esfera.



Fonte: INLINE (2018).

2.4.2 *In line Inspection Pigs*

Dentro desta categoria são encontrados os *pigs* que realizam atividades de inspeção e análise de tubulações e componentes, como conexões e válvulas. Dentro dessas análises, as mais comuns são a verificação de perda de material, metais gastos e ataques de corrosão, e a medida da geometria da tubulação. Outras análises que também podem ser realizadas é a detecção de trincas, mapeamento da linha, detecção de vazamentos, medição de ovalização dos tubos, mapeamento por vídeo câmeras, medição de deposição de parafinas, entre outras (CORDELL; VANZANT, 2002).

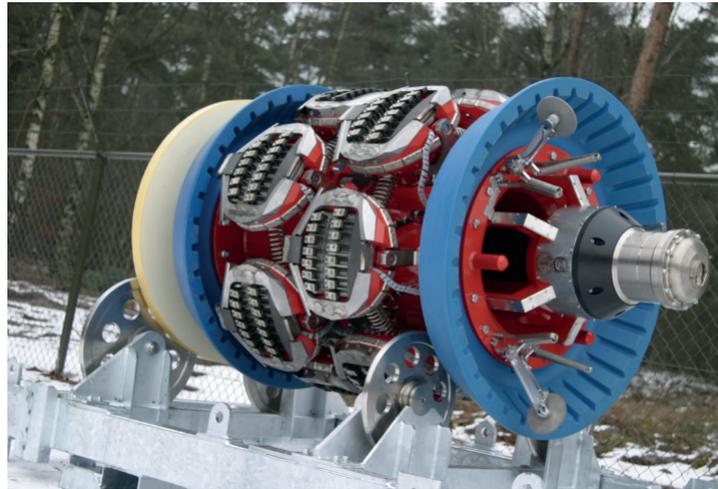
Esses *pigs*, chamados também de *pigs* inteligentes, são construídos de acordo com as particularidades da linha a ser pigada. Alguns são montados para realizarem mais de uma análise em uma só passagem. Assim, a estrutura de cada *pig* é variável, tendo diversos modelos para diversas análises (CORDELL; VANZANT, 2002; HILTSCHER; MÜHLHALER; JÖRG, 2006). A seguir, são descritos alguns modelos de casos específicos de *pig* desenvolvidos pela empresa ROSEN:

- RoCorr MFL-C SERVICE

Este equipamento (Fig. 14) foi construído para identificar de forma precisa e detalhada a perda de metais da tubulação e também constatar anomalias na direção axial do duto, como corrosões e trincas. O equipamento realiza a análise de perda de metais pela tecnologia de MFL. Além dessas características, o *pig* é multidiâmetro e pode ter a velocidade controlada pelo mecanismo de *by-pass* (ROSENGROUP, 2013b).

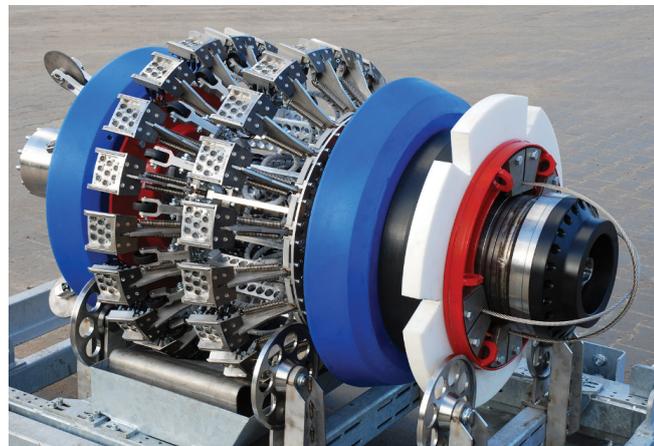
- RoCorr UTWM SERVICE

Foi construído para analisar a integridade de tubulações afetada por corrosão, laminação e corrosão em cordões de solda. A inspeção feita pelo equipamento é realizada

Figura 14 – *Pig* de inspeção RoCorr MFL-C SERVICE.

Fonte: ROSENGROUP (2013b).

por ultrassom, logo, o equipamento somente trabalha com líquidos, e o mesmo também é multidiâmetro (ROSENGROUP, 2016). O *pig* em específico pode ser visualizado na Fig. 15.

Figura 15 – *Pig* de inspeção RoCorr UTWM SERVICE.

Fonte: ROSENGROUP (2016).

2.5 Requisitos das Linhas de Tubulações

Para o perfeito funcionamento da movimentação dos *pigs* é ideal que as tubulações sejam alinhadas, tenham diâmetro interno constante, não sejam ovalizadas, não contenham válvulas ou conexões, entre outros fatores, pois a passagem do *pig* pode danificar ainda mais a linha, como também aumentar a possibilidade de quebrá-lo ou ficar com o mesmo preso dentro da tubulação. Porém, essas condições de integridade não são facilmente encontradas, sendo que muitas linhas apresentam ovalizações, pontos internos de soldas, por exemplo. Entretanto, quanto mais próximo dos fatores exigidos, menores

serão as chances com problemas funcionais do equipamento. A seguir, são descritas algumas das características importantes que as tubulações, assim como as conexões, devem apresentar para um melhor desempenho do processo de passagem do *pig* (CORDELL; VANZANT, 2002).

2.5.1 Geometria Ideal das Tubulações

Para que o *pig* se movimente de maneira adequada, as linhas de tubulações devem ser projetadas levando em conta que as mesmas utilizarão de *pigs* para limpeza ou outro processos. Dentro desse contexto, Cordell e Vanzant (2002) destacam que muitas linhas de tubulações são construídas levando em conta apenas o diâmetro externo dos tubos, tendo o diâmetro interno variando de acordo com a espessura da parede em cada trecho da linha. O ideal é que as linhas sejam construídas mantendo constante o diâmetro interno para que o *pig* se movimente sem interferências. As tolerâncias do diâmetro interno podem ser consultadas na Tab. 2.

Tabela 2 – Tolerâncias máximas para desvios do diâmetro interno de acordo com Tiratsoo (1992).

Diâmetro Nominal (polegadas)	Máximo Desvio (mm)
4	4
6	6
8-12	10
14-20	14
20-36	16
Maior que 36	20

Além disso, pontos de soldas atravessando as paredes dos tubos podem ocasionar problemas no processo ao interferir na estanqueidade dos vedadores, como também danificando-os. Outro fator que interfere nos vedadores é a rugosidade do material da tubulação, assim como das respectivas conexões (CORDELL; VANZANT, 2002; TIRATSOO, 1992).

Outro fator a ser levado em conta na montagem das linhas de tubulação são as curvas (O'DONOGHUE, 2003). As linhas de tubulações que utilizarão *pigs* devem apresentar um mínimo raio de curvatura de acordo com a Tab. 3.

Tabela 3 – Relação entre raio de curvatura e diâmetro da tubulação (TIRATSOO, 1992).

Diâmetros da linha de tubulação	Raio de curvatura
Menor ou igual a 4 polegadas	10 vezes o diâmetro da tubulação (10D)
Entre 6 e 12 polegadas	5 vezes o diâmetro da tubulação (5D)
Maior ou igual a 12 polegadas	3 vezes o diâmetro da tubulação (3D)

Tiratsoo (1992) também apresenta uma relação de entre raio de curvatura e diâmetro da tubulação, sendo mais cauteloso do que Cordell e Vanzant (2002) ao considerar

os valores dos raios de curvatura sendo praticamente o dobro dos valores tabelados anteriormente.

Deve-se atentar nas curvas se o diâmetro interno da tubulação se mantém constante ao longo de todo o trecho. Qualquer deformação excessiva na curva pode prejudicar a passagem do *pig*. Além disso, não é aconselhado que as curvas sejam conectadas uma a outra diretamente. Usam-se, no mínimo, três vezes o diâmetro da tubulação como distância de trecho reto entre elas (CORDELL; VANZANT, 2002).

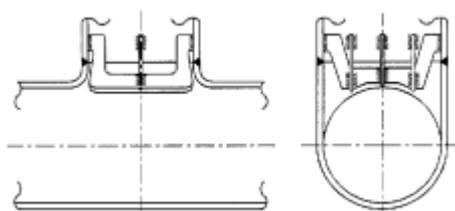
2.5.2 Válvulas e Conexões

Nos casos em que válvulas e conexões forem utilizadas nas linhas, há certas sugestões no arranjo desses dispositivos e instalação para que não ocorram problemas com a passagem do *pig* (CORDELL; VANZANT, 2002; TIRATSOO, 1992).

Para o caso de redutores, podendo os mesmos serem tanto concêntricos como excêntricos, é indicado uma redução com inclinação de aproximadamente 22° ou menos. É importante notar que conexões com redução abruptas não são aceitáveis nessas linhas, e também que quanto maior a diferença do tamanho das tubulações, menos efetivo será o funcionamento do *pig*. A maioria dos *pigs* não é construída para ter seu diâmetro alterado na tubulação e também mudarem de direção dentro da linha, logo, não podem passar por redutores (CORDELL; VANZANT, 2002).

Já para as conexões tês, a maioria dos *pigs* não apresentam problemas em passar por elas. É aconselhado que sejam instaladas barras em todos tês com saídas menores que 50% do diâmetro nominal da tubulação, como na Fig. 16. *Pigs* convencionais passam seguramente em saídas com 70% do diâmetro nominal da linha, enquanto que *pigs* instrumentados passam com até 60%. E também, é necessário verificar se os acessórios do *pig*, como raspadores, sensores e escovas não ficarão presos ou danificarão esses trechos (CORDELL; VANZANT, 2002).

Figura 16 – Barras para tes com saída de comprimento 50% menor que o diâmetro nominal da tubulação.



Fonte: Cordell e Vanzant (2002).

Em junções Y convergentes, a maioria é construída com um ângulo de abertura de trinta graus. Ângulos mais rasos reduzem o impacto do *pig* com o lado oposto da junção,

mas faz com que o comprimento do equipamento seja maior para não perder a vedação, exigindo, às vezes, um trem de *pigs* (CORDELL; VANZANT, 2002).

Um dos problemas mais frequentes com *pigs* acontece com válvulas. Válvulas de esferas em plantas de *pigs* devem ser concêntricas e não devem interferir no movimento do equipamento. Já as válvulas de gaveta não devem conter cavidades, anéis de selo, ou qualquer tipo de construção e acessório que atrapalhem no deslocamento do pig. Para qualquer tipo de válvula a ser utilizada na planta de tubulações, é necessário realizar a verificação se estão funcionando de acordo com o projetado, principalmente em caso de válvulas acionadas por atuadores, pois em válvulas não abertas totalmente podem trazer danos tanto para a linha, como para o *pig* (CORDELL; VANZANT, 2002).

2.6 Problemas com *pig*

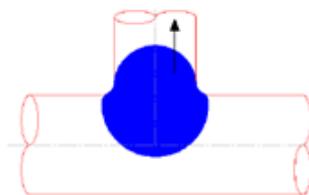
O principal problema com *pigs* ocorre quando os mesmos ficam entalados nas tubulações. As causas desse problema podem ser diversas, podendo trazer consequências graves e altas despesas. Alguns deles, de acordo com O'DONOGHUE (2003), são citados a seguir.

2.6.1 *Pigs* bloqueando a linha

O bloqueio causado pelo *pig* pode ser devido a um projeto incorreto ou pela sua aplicação errada em uma linha de tubulações. Geralmente, esses problemas estão relacionados com o aprisionamento do equipamento nas tubulações, válvulas e conexões. Em casos mais graves, um aumento da pressão em resposta ao aprisionamento pode piorar ainda mais o bloqueio do *pig* na linha.

No caso de tês, a falta de barras pode fazer com que os *pigs* fiquem entalados, como ilustrado na Fig. 17. Para o caso de *pigs* multidiâmetros, essa característica deve ser analisada com mais cuidado, uma vez que os vedadores desse tipo de equipamento podem se deformar erroneamente nesse trecho, podendo ficar entalado ou comprometer componentes do *pig*.

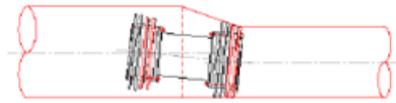
Figura 17 – Exemplo de um *pig* esfera entalado em um tê.



Fonte: O'DONOGHUE (2003).

Já em reduções pode acontecer a estagnação do *pig* por causa dos selos, (Fig. 18). É importante que o diâmetro interno das guias seja um pouco menor (aproximadamente 99%) que o diâmetro interno da tubulação para que o selo não bloqueiem as mesmas.

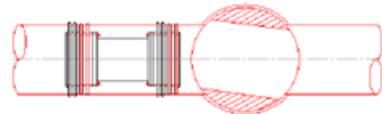
Figura 18 – *Pig* entalado na saída da redução.



Fonte: O'DONOGHUE (2003).

As válvulas se não estiverem totalmente abertas ou não forem adequadas para a pigagem podem fazer com que os *pigs* fiquem presos (Fig. 19).

Figura 19 – *Pig* que passará por uma válvula não aberta totalmente.



Fonte: O'DONOGHUE (2003).

Além desses fatores, outros como *pigs* projetados de forma errada ou que apresentem alto contato de sua estrutura com a tubulação podem trazer esse risco de bloqueio, assim como curvas em trechos das tubulações que não estão dentro da tolerância de raio de curvatura.

2.6.2 Incrustações e Detritos

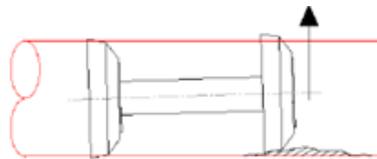
Ao realizar a pigagem para a remoção de parafinas, pode acontecer que a quantidade desse tipo de incrustação chegue a um nível tão elevado, fazendo com que elas se solidifiquem na frente do equipamento e como consequência, ocorre um aumento da pressão, podendo até ultrapassar a pressão máxima de segurança, fazendo com que o processo não possa ser continuado. Para evitar esse problema, pode-se fazer o uso de *by-pass* no projeto do *pig* (Fig. 20).

Além das parafinas, detritos como areia podem prejudicar o funcionamento do equipamento ao aumentar o desgaste dos selos, fazendo com que os mesmos possam perder o potencial exigido de vedação .

2.6.3 Desgastes excessivos

Os selos vedadores de *pigs* quando muito desgastados perdem sua função e podem ser um motivo para que o equipamento fique entalado na linha. Alguns fatores como alto diferencial de pressão, baixa velocidade do *pig*, alta rugosidade da parede, baixa

Figura 20 – *Pig* passando por um acúmulo de detritos, aumentando o desgaste no topo do equipamento.



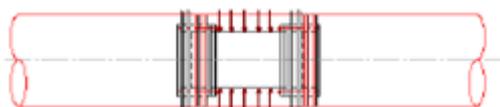
Fonte: O'DONOGHUE (2003).

viscosidade do fluido e tubulações com diâmetro pequeno podem aumentar o desgaste dos selos. É necessário saber qual o percurso máximo que pode ser realizado com o *pig* sem que o desgaste interfira a ponto de pará-lo no meio da linha.

2.6.4 Danos Mecânicos

Problemas de travamento de *pigs* por danos mecânicos estão relacionados com a ruptura de estruturas e componentes do equipamento, podendo ser causados por falhas no desenvolvimento do projeto ou com a ocorrência de fatores inusitados, como a descentralização brusca do equipamento ou graves defeitos internos das tubulações. Casos como alto diferencial de pressão entre a interna e externa da tubulação podem afetar o movimento do equipamento, já que o mesmo pode sofrer resistência com o estreitamento do diâmetro nominal causado por esse fenômeno (Fig. 21).

Figura 21 – Diferencial de pressão atuando nas paredes da tubulação e interferindo no *pig*.



Fonte: O'DONOGHUE (2003).

Outro fator que pode comprometer o *pig* é a alta velocidade, que pode ser causada em linhas com fluidos compressíveis e também por *pig* muito pesado, que passando em trechos altamente inclinados, como *risers*³, começam uma aceleração por caírem em queda livre.

2.7 Estudos com *pigs*

As áreas de estudo com *pigs* são diversas pois os processos envolvendo-os exigem conhecimentos tanto de engenharia de projetos como de mecânica dos fluidos, além de outras áreas da engenharia. Os estudos podem analisar as interações entre o equipamento

³ "Um *riser* é um tubo que liga uma estrutura de produção *offshore* flutuante, ou uma plataforma de perfuração, a um sistema submarino para fins produtivos, como a perfuração, produção, injeção e exportação, ou para perfuração", de acordo com TENARIS (2019).

com a tubulação, o equipamento com o escoamento, como também as modificações no escoamento nas tubulações causadas pela passagem do *pig*. A seguir são discutidos alguns trabalhos da literatura científica que apresentam estudos da parte analítica, numérica e experimental com *pigs*.

2.7.1 Trabalhos analíticos

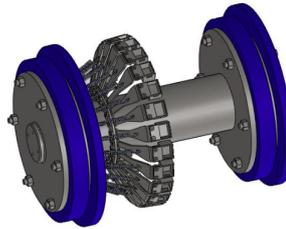
De modo geral, os trabalhos teóricos com *pigs* fazem análise do dimensionamento do equipamento através de equações teóricas e empíricas, seleção de materiais e estudo de viabilidade.

No trabalho de Mushiri et al. (2016) são apresentados os procedimentos realizados para dimensionar um *pig* de limpeza para atuar em linhas de transporte de líquido em Zimbábue. Para o dimensionamento do *pig* foi proposto analisar o percurso a ser feito pelo equipamento, para então, projetá-lo. Para isso, foram necessárias as coletas de dados sobre a linha a ser pigada, além da análise minuciosa de trechos críticos. Com as tubulações analisadas, foi realizado o projeto do *pig*, que deve ser capaz de limpar os trechos das tubulações, como também fazer inspeção nas mesmas. Com as considerações da linha, Mushiri et al. (2016) dimensionaram os discos de vedação, os discos de espaçadores, o disco de estruturação, assim como o carretel, além dos componentes de montagem como parafusos. Com as dimensões do *pig* foram calculados os desgastes dos vedadores, além da velocidade teórica a ser atingida pelo equipamento durante a pigagem. Além dessas análises, também são dimensionados os componentes eletrônicos, como sensores, para acoplar no *pig*, para que o mesmo seja capaz de realizar a inspeção durante o percurso. O fluido de trabalho considerado nos cálculos foi o diesel à uma temperatura de vinte graus Celsius.

Mantendo a proposta de um estudo analítico, o trabalho de Curvelo (2016) também aborda o desenvolvimento de um *pig*. Nesse caso, o *pig* foi dimensionado para trabalhar em inspeção do tipo (MFL). A autora desenvolve o trabalho, primeiramente, fazendo uma análise da linha a ser pigada, para então, iniciar o projeto de um módulo discriminador utilizando a técnica de sensores para detecção da corrosão interna. São apresentados os cálculos para o dimensionamento dos discos vedadores, corpo do *pig*, como também a quantidade e a disposição dos sensores de efeito *Hall*. Além da abordagem analítica, também foi realizada uma análise numérica de esforços atuantes nas estruturas. Uma ilustração do projeto final pode ser visualizado na Fig. 22.

2.7.2 Trabalhos numéricos

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura sobre estudos com *pigs* são realizados utilizando metodologias numéricas. Esses estudos exploram as diversas áreas

Figura 22 – Projeto do *pig* MFL.

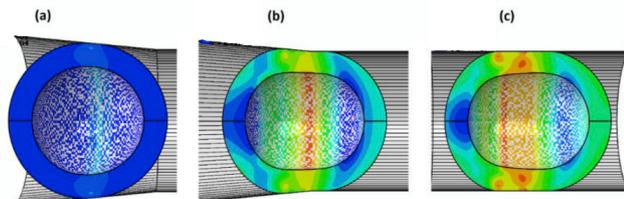
Fonte: Curvelo (2016).

envolvendo *pigs*. Alguns trabalhos de característica numérica são descritos a seguir.

No que diz respeito à obtenção de informações da movimentação do equipamento, há análises em 2D (O'DONOGHUE, 2012), como também em 3D (SAEIDBAKHSI; RAFEEYAN; ZIAEI-RAD, 2009). Em alguns trabalhos, o objetivo é o de analisar a dinâmica quando o fluido considerado é um gás (NGUYEN TANBONG KIM; YOO; RHO, 2001; PATRICIO et al., 2016), ou também um líquido (LESANI; RAFEEYAN; SOHANKAR, 2012), já que essa diferença interferirá no escoamento.

Na área relacionada aos projetos e desenvolvimento de componentes de *pigs*, podem ser encontradas análises do comportamento dos vedadores (ZHANG et al., 2017a), pois esses estudos são importantes para verificar a eficiência de estanqueidade entre o equipamento e a tubulação. Geralmente, os mesmos são de materiais elásticos, que apresentam um comportamento de deformação não linear, sendo importante prever como esses materiais se comportam nas condições de pigagem, como o realizado por Soorgee (2018), que realizou esse estudo com *pig* do tipo esfera. Em um dos ensaios realizados, foi obtido o comportamento dos esforços que ocorrem quando uma esfera de 24 polegadas de diâmetro com dureza de 75 Shore A é deslocada por uma redução (antes, durante e depois), como pode ser visualizado na Fig. 23. A esfera perde seu formato e passa a apresentar uma geometria elipsoide, concentrando os esforços de deformação nos locais com maior área de contato.

Figura 23 – Análise da deformação do *pig* esfera antes da redução (a), na redução (b) e depois da redução (c).



Fonte: Soorgee (2018).

Além do estudo do material, há também trabalhos que buscam geometrias otimizadas para melhorar o desempenho do equipamento, como no estudo realizado por Dong,

Zhang e Liu (2019) ao utilizar geometrias de vedadores bio-inspiradas em patas de aves e sapos. Também podem ser encontrados trabalhos sobre o desgaste desses materiais (HEIJER, 2016), já que esse problema é um fator comum, dado que um *pig* pode percorrer centenas de quilômetros de tubulações durante o deslocamento pela linha.

Além dos estudos com vedadores, são também realizados estudos de controle de velocidade por *by-pass*, como no trabalho de Heijer (2016), Mirshamsi e Rafeeyan (2012). O *by-pass* é um mecanismo de desvio de fluido, que passa à frente do equipamento, tendo como consequência, a redução da velocidade do equipamento.

Outro foco de estudo é referente ao comportamento do escoamento e como ele afeta o movimento do *pig* e vice-versa. Boghi et al. (2017) analisaram a dinâmica do escoamento bifásico entre óleo e parafina quando é realizado um processo de passagem de *pig* pela tubulação. Trabalho como o de Arild, Svein Bjarte e Arve (2018) estudam as mudanças na pigagem com a troca de fluido a ser transportado pela linha, e como essa troca afeta a frequência em que a linha precisa ser limpada, como também analisa a deposição de parafina, entre outros parâmetros.

A obtenção de equações através de modelagem para descreverem características do processo de passagem de diversos tipos de *pigs* pode ser encontrado no trabalho de Azevedo et al. (1996).

Além dos trabalhos citados, outros relacionados à simulação dos processos envolvendo *pigs* podem ser encontrados. Destaca-se que existem trabalhos que além de realizarem as simulações numéricas, também fazem a comparação com experimentos.

2.7.3 Trabalhos experimentais

Grande parte dos trabalhos experimentais sobre *pigs* são encontrados em relatórios de execução e ensaios, sendo que nesse tipo de documento há a descrição de testes e modificações realizadas com um tipo de *pig* em específico. Além disso, há também trabalhos de carácter acadêmico que geralmente visam realizar testes de componentes em específico do *pig*, analisar a dinâmica do equipamento passando pela tubulação, e também verificar fenômenos relacionados ao escoamento. Alguns trabalhos experimentais tanto técnicos como acadêmicos, são citados a seguir.

Falck, Svendsen e O'Donoghue (2000) fizeram a descrição do desenvolvimento de um conjunto de *pigs* para realizar a inspeção e limpeza da linha do campo de Åsgard⁴, localizado na Noruega. Essa linha contém tubulações com diâmetros que vão de 28 po-

⁴ É um campo situado na parte central do mar da Noruega. A profundidade da água na área é de 240 a 300 metros. O campo Åsgard contém os depósitos de Smørbukk, Smørbukk Sør e Midgard. O campo foi desenvolvido com poços submarinos vinculados a um FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), denominado de Åsgard A. O desenvolvimento também inclui o Åsgard B, uma instalação flutuante semi-submersível para processamento de gás e condensado.

legadas até 48 polegadas com um comprimento total de 710km. O grande propósito do trabalho foi o de projetar um conjunto de *pigs* de limpeza e inspeção com estruturas capazes de passar por toda a linha do campo de Åsgard. O *pig* multidiâmetro de limpeza construído pode ser visualizado na Fig. 24. O equipamento apresenta vedadores de poliuretano que atuam em todos os diâmetros do intervalo de 24 a 48 polegadas e é mantido centralizado pelos braços mecânicos. O grande desafio do projeto foi o de fazer com que o equipamento conseguisse passar tanto pelas tubulações com 28 polegadas como pelas de 48 polegadas sem perder a vedação ou apresentar problemas de centralização.

Figura 24 – Protótipo do *pig* de limpeza multidiâmetro de 48"x28".



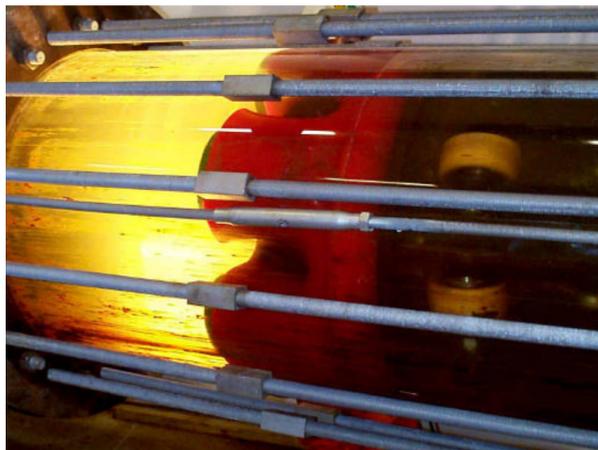
Fonte: Falck, Svendsen e O'Donoghue (2000).

O protótipo foi construído com base em dois componentes básicos: uma suspensão mecânica de rodas capaz de suportar o conjunto e também mantê-lo centralizado ao eixo da tubulação (Fig. 25), e os discos vedadores com indutores de dobra para que fechassem de maneira correta, para manter a vedação, à medida que o *pig* passasse pela tubulação de menor diâmetro (Fig. 26). Os ensaios foram realizados no *loop* de testes com *pigs* da Statoil localizado em Kårstø. Os ensaios com o *pig* de limpeza ocorreram como o esperado, possibilitando a qualificação do equipamento para ser utilizado na linha do campo de Åsgard.

Figura 25 – Protótipo do *pig* de limpeza multidiâmetro aberto em 48".



Fonte: Falck, Svendsen e O'Donoghue (2000).

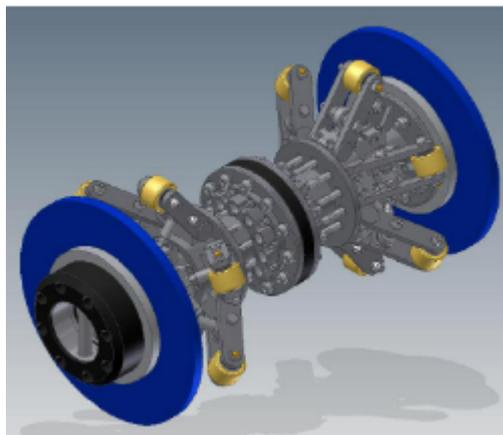
Figura 26 – Protótipo do *pig* de limpeza multidímetro fechado em 28".

Fonte: Falck, Svendsen e O'Donoghue (2000)

Outro relatório técnico foi escrito por Vik et al. (2010) que faz a sintetização do desenvolvimento de um *pig* de separação multidímetro e bidirecional para operar em uma linha de gás que apresenta tubulações que vão de 10 polegadas até 12 polegadas. Essa linha faz a conexão entre o FPSO Norne até o *manifold* de Alve, situados no mar da Noruega. O desafio no desenvolvimento do *pig* foi de que o mesmo, além de ser multidímetro, também precisou ser bidirecional, pois o lançamento e o recebimento deveria ser feito pelo FPSO, já que o *manifold* de Alve não apresenta lançadores ou recebedores. Assim, o equipamento deveria fazer a separação saindo de Norne, e ainda voltar para Alve para ser recolhido. Inicialmente foi estudada a aplicabilidade de *pigs* multidímetros disponíveis no mercado, mas como a exigência de bidirecionalidade não era possível ser descartada, a quantidade de testes a ser feita com esses *pigs* exigiria um alto tempo, exigindo também tempo para realizar modificações para atender à linha em voga. Dessa forma, foi elaborado um modelo pela *FTL Seals Technology*, baseado nas recomendações da *Pipeline Pigging Technology* e *Pipeline Research Limited*.

O equipamento projetado (Fig. 28) possui dois módulos de rodas interligadas por braços de suspensão, fazendo com que o *pig* se mantenha centralizado, realizando a vedação necessária. Deve-se destacar que as molas utilizadas na suspensão apresentam uma força maior que o peso do *pig* para restaurá-lo ao centro em trechos que ele saia do meio da tubulação. Os braços foram desenvolvidos de modo que a força de fechamento nos mesmos, em menores diâmetros, não aumentasse significativamente.

Para a condição de bidirecionalidade, o *pig* foi projetado com simetria axial. Os vedadores não foram construídos com indutores de dobra, ficando lisos para fazerem a vedação. Também foi desenvolvido um vedador adicional para atuar em uma curva acentuada (5D). Em frente à necessidade de alta vedação, pois o procedimento não poderia apresentar vazamentos, uma grande parte do tempo de desenvolvimento foi direcionado aos vedadores. Os discos vedadores foram estudados de forma a prever sua interação com

Figura 27 – Desenho do protótipo do *pig* de limpeza multidímetro bidirecional.

Fonte: Vik et al. (2010).

a parede da tubulação, focando principalmente, na parte do dobramento. Diferentemente de outros modelos de vedadores, o objetivo do projeto foi fazer com que os vedadores de maior diâmetro não apresentassem dobramentos, devendo ficar ajustados e curvados na tubulação de menor diâmetro. Os testes foram feitos no *loop* de testes com *pigs* da Statoil localizado em Kårstø. Dessa forma, o *loop* consistiu de lançador, linhas de 10 polegadas e 12 polegadas, curva de 12 polegadas e um *manifold* em que era feito o processo de inversão. Com os testes feitos e tendo o equipamento com o desempenho aprovado (Fig.28), foi realizada a aplicação na linha de Norne até Alve que ocorreu em março de 2009. De acordo com os autores, a operação foi bem sucedida e o *pig* teve um ótimo desempenho. Como conclusão do trabalho, destacam a importância do desenvolvimento de vedadores capazes de realizarem a função de vedação, como também o equipamento apresentar uma estrutura mecânica capaz de mantê-lo centralizado com a tubulação durante todo o processo de pigagem.

Figura 28 – *Pig* de limpeza multidímetro bidirecional concluído.

Fonte: Vik et al. (2010).

Minami e Shoham (1995) fizeram um estudo comparativo entre uma metodologia teórica e experimental da dinâmica de um escoamento bifásico durante um processo de *pigging*. Os autores destacam que o escoamento em estudo é transiente, já que a passagem do *pig* interfere no comportamento do escoamento, e dessa forma, propõem um estudo teórico considerando a transiência no sistema. Para comparar com a teoria desenvolvida, os autores utilizaram um *loop* de diâmetro constante de 3 polegadas. Os ensaios foram

realizados com *pigs* esferas, numa vazão de líquido mais gás que variava de 0 à $0,10 \text{ m}^3/\text{s}$ e pressão de 1,5 até 3,5 bar, sendo a aquisição dos dados realizadas por um sistema digital. Dos resultados comparativos foi possível considerar que os cálculos teóricos desenvolvidos pelos autores se aproximaram dos resultados dos experimentos, entretanto, destacam a dificuldade de expansão do conteúdo para previsão de comportamento em outros cenários, já que diversos fatores durante o processo de pigagem podem modificar o escoamento.

Canavese et al. (2015) fizeram o estudo do desenvolvimento de um novo modelo de *pig* de inspeção (inteligente) feito de espuma de poliuretano. O modelo desenvolvido contém os mesmos sensores que um *pig* de inspeção apresenta, e ainda, é caracterizado pelo baixo risco em operação, pois sua flexibilidade é a de um *pig* espuma. Esses estudos são necessários, já que, geralmente, esses equipamentos de inspeção são muito robustos, tendo um alto risco de entalamento. Os ensaios experimentais foram realizados com dois protótipos e uma linha de 8 km em Oil Center Plant of Trecate, Itália. Foram obtidos e analisados os dados dos protótipos e comparados com os resultados de um *pig* comercial, também ensaiado no mesmo local. Os protótipos desenvolvidos conseguiram obter uma maior quantidade de informações sobre a linha do que o *pig* comercial, indicando uma melhor capacidade e sensibilidade na aquisição dos dados (RAMELLA et al., 2015).

No campo de estudo de componentes constituintes de *pigs*, Hendrix, Graafland e Ostayen (2018) focaram em analisar as forças de atrito atuantes no equipamento, como também fizeram um estudo com os discos vedadores. Foram realizados testes com seis diferentes discos de 12 polegadas de diâmetro. Foram feitos ensaios estáticos para análise do desgaste através da atuação da força normal e tangencial, como também a obtenção dos efeitos ocasionados pelo superdimensionamento dos discos, tanto do diâmetro como da espessura, e a obtenção dos módulos de Young dos discos. Quanto aos ensaios dinâmicos, os autores passaram os discos por um trecho de tubulação vertical de 1,7 metros de comprimento, analisando os efeitos de passar o disco a seco ou lubrificados com água, obtendo coeficientes de atrito.

Sadeghi, Chitsaz e Eftefagh (2019) analisam o que acontece com o comportamento mecânico de uma linha instalada acima do solo quando diferentes *pigs* passam por ela. Foi feita uma análise teórica do sistema, investigando as vibrações do sistema linha, equipamento e fluido. Foram investigadas as alterações nas frequências naturais do sistema devido à velocidade e posição do *pig* passando pela linha, e também os equipamentos foram modificados de acordo com o tamanho do corpo central, massa total do conjunto, como também a quantidade de discos vedadores utilizados na montagem. Do ponto de vista da análise mecânica, essas variações da massa, disco de vedadores, comprimento do corpo interferem na frequência natural do sistema, sendo mais sensível com a mudança do número de discos vedadores, podendo ser empregados além da vedação, para o amortecimento.

Há também estudo de viabilidade de funcionamento de *loops* de testes, como o de Lima et al. (2017), que apresentaram e validaram um *loop* para supervisionar e estudar o controle de velocidade de *pigs*. O *loop* apresenta diâmetro interno de 6 polegadas, trabalhando com ar comprimido, podendo chegar até 6 bar de pressão e foi construído no LAMP (Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo), localizado na UFRN (Universidade Federal do Rio Grande do Norte). A metodologia empregada para analisar essa supervisão da velocidade pelo próprio sistema de aquisição do *loop* foi realizada através de transdutores de pressão instalados nas tubulações da bancada para detectarem a passagem do *pig*. Esses dados foram tratados, obtendo-se uma velocidade média por trecho de transdutor. Essas velocidades foram comparadas com as velocidades obtidas de um odômetro instalado no *pig*. De acordo com os autores, o sistema de obtenção da velocidade foi bem sucedido, pois a margem de diferença entre as duas velocidades quando comparada foi baixa. Nos testes realizados, a velocidade média obtida pelos transdutores foi de $0,43m/s$, enquanto que a do odômetro foi de $0,45m/s$.

Os trabalhos acadêmicos relacionados aos *pigs* geralmente apontam estudos de componentes isolados, como desgaste, esforços, por exemplo, ou estudos de interações entre fluido e estrutura do *pig*. Já os trabalhos técnicos encontrados apresentam um conjunto de testes experimentais e dados de projetos sobre o desenvolvimento do equipamento. Podem também ser encontrados trabalhos comparativos de simulações numéricas com ensaios experimentais de *pigs*, entretanto, esses trabalhos apresentam dados de *pigs* que não têm variação de diâmetro e também não são descritos os tipos de escoamentos formados durante o procedimento de passagem. No presente trabalho é feita uma comparação entre velocidades teóricas de um *pig*, modelado de duas formas diferentes, com velocidades obtidas experimentalmente de um *pig* de limpeza multidiâmetro que consegue passar em uma linha que vai de 4 até 8,5 polegadas de diâmetro interno. Além disso, também são apresentados os escoamentos que são formados durante a passagem desse equipamento em curvas acentuadas de 4 polegadas e trecho reto de 7 polegadas.

3 Metodologia

A metodologia do presente trabalho foi construída em dois estudos: o teórico e o experimental. Na parte teórica foi realizado um estudo com base na movimentação do *pig* fazendo o uso de equações do Movimento e da Mecânica dos Fluidos com a finalidade de prever os possíveis comportamentos do conjunto. Deve-se destacar que a variável analisada com as equações foi a velocidade que o equipamento pode atingir em trechos específicos, tendo como ponto de partida a consideração de que a pressão e a vazão aplicada no equipamento se comportam de maneira uniforme e são conhecidas. A parte experimental foi feita ao realizar os ensaios com o *pig* em estudo no *loop* de testes, visando obter as velocidades médias que o equipamento atinge em alguns trechos, além de obter imagens referentes aos escoamentos formados antes, durante e depois da passagem do *pig*.

3.1 Análise teórica da dinâmica do conjunto

Para a análise teórica foi realizado o estudo da dinâmica com duas configurações diferentes. A primeira é o caso em que o *pig* multidiâmetro é considerado como um único corpo, não havendo qualquer acoplamento ou ligação entre os módulos. Já a segunda configuração é feita considerando que o *pig* é um conjunto de dois módulos conectados e unidos por um material que apresenta rigidez.

Esse estudo visou analisar o comportamento da velocidade do equipamento no tubo de quatro e sete polegadas de diâmetro do *loop*, e para a segunda configuração, além desse comportamento da velocidade, analisar como a rigidez do acoplamento altera a velocidade do *pig*. Para a modelagem do problema em questão, foi considerado que o equipamento se mantém centralizado durante a passagem nesses trechos retos.

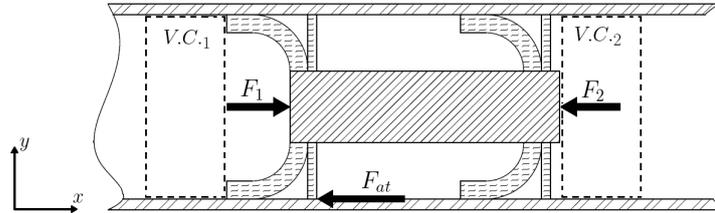
3.1.1 Configuração com um único módulo

Para a realização da modelagem do *pig* multidiâmetro dentro de uma tubulação, foi considerado o caso em que o equipamento passa por um trecho de diâmetro constante, podendo o mesmo ser visualizado no esboço (Fig. 29), juntamente com as forças que são aplicadas nele. O modelo desenvolvido foi feito com base no estudo de Mirshamsi e Rafeeyan (2012) e de Liang, He e Cai (2017).

As condições consideradas no problema são:

- O escoamento está em regime permanente;

- O fluido utilizado é a água em temperatura ambiente e dessa forma, o escoamento é incompressível;
- As áreas à frente e atrás do *pig* são iguais e constantes;

Figura 29 – Esboço do *pig* em deslocamento.

Fonte: o próprio.

Fazendo o balanço de forças no *pig* na direção x , tem-se:

$$m_{pig} \frac{d^2 x_{pig}}{dt^2} = F_1 - F_2 - F_{at} \quad (3.1)$$

Em que m_{pig} é a massa total do *pig*, x_{pig} é o deslocamento do *pig*, t é o tempo correspondente ao deslocamento, F_1 e F_2 são as forças exercidas pelo volume de controle atrás e à frente do equipamento, respectivamente. A Força de atrito (F_{at}) é a soma de dois tipos de forças contrárias ao movimento. Uma é a F_c , resultante da fricção entre o *pig*, montado com vedadores de poliuretano, com a parede da tubulação. De acordo com Nieckele, Braga e Azevedo (2001), essa força atuante em sentido contrário ao movimento do equipamento é uma função da velocidade do *pig*, aumentando quando o equipamento está mais rápido, mas os autores fazem o uso da força como sendo constante no trabalho citado. A outra é a força devido às tensões viscosas, causadas pela interação entre o *pig* e o fluido que o empurra (F_μ). Dessa forma, tem-se:

$$F_{at} = F_c + F_\mu \quad (3.2)$$

em que

$$F_c = f_c \frac{dx_{pig}}{dt} \quad (3.3)$$

e

$$F_\mu = C \frac{dx_{pig}}{dt} \quad (3.4)$$

Em que f_c corresponde ao coeficiente de atrito oriundo do contato entre o equipamento e a parede da tubulação, enquanto C que corresponde ao coeficiente de atrito devida à interação entre o fluido e o *pig*.

Para a obtenção da força F_1 e F_2 , considerou-se um volume de controle que apresenta mesma velocidade do *pig*. A Equação da Quantidade de Movimento na forma integral, na direção x pode ser escrita por:

$$F_1 - p_1 A_1 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{v.c.} \rho u dV + \int_{s.c.} \rho u (\vec{u} \cdot \vec{n}) dA \quad (3.5)$$

$$-F_2 + p_2 A_2 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{v.c.} \rho u dV + \int_{s.c.} \rho u (\vec{u} \cdot \vec{n}) dA \quad (3.6)$$

ρ é a massa específica do fluido que empurra o *pig*, \vec{u} é o vetor velocidade do escoamento na direção x e u é o seu módulo. Como as áreas A_1 e A_2 consideradas são iguais (A) e o escoamento em regime permanente e é incompressível, tem-se:

$$F_1 = p_1 A \quad (3.7)$$

e

$$F_2 = p_2 A \quad (3.8)$$

Substituindo as Equações 3.2, 3.3, 3.4, 3.7 e 3.8 na Eq. 3.1, obtém-se:

$$m_{pig} \frac{d^2 x_{pig}}{dt^2} + (C + f_c) \frac{dx_{pig}}{dt} = (p_1 - p_2) A \quad (3.9)$$

Para obter a variação de pressão da parte de trás com a parte atuante na frente do equipamento ($p_1 - p_2$), pode-se aplicar a Equação da Energia, considerando que o ponto 1 é logo atrás do *pig* e o ponto 2 logo à frente:

$$p_1 + \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho g z_1 = p_2 + \rho \frac{v_2^2}{2} + \rho g z_2 + p_{perdas} \quad (3.10)$$

Em que v_1 e v_2 são as velocidades médias do escoamento no ponto 1 e 2, respectivamente. Considerando-se que o ponto 1 e o ponto 2 apresentam a mesma cota geométrica e que a velocidade do escoamento no início antes de passar pelo *pig* é igual à saída, obtém-se:

$$p_1 - p_2 = p_{perdas} \quad (3.11)$$

De acordo com Nieckele, Braga e Azevedo (2001), o termo referente ao delta de pressão, é também função da velocidade do *pig* e do escoamento, sendo considerado como uma perda de carga localizada e é dado por:

$$p_1 - p_2 = K_p \left(\frac{A}{A_{vaz}} \right)^2 \frac{\rho (u - v_{pig})^2}{2} \quad (3.12)$$

Em que v_{pig} é a velocidade média do *pig*, K_p é o coeficiente de perda de carga localizada e A_{vaz} corresponde à área em torno do *pig* que permite a passagem de uma parcela do escoamento. No estudo de Liang, He e Cai (2017) e Mirshamsi e Rafeeyan (2015) essa equação foi utilizada para calcular a perda de carga de um *by pass*, mas para o caso em estudo, o equipamento não apresenta configurações para *by pass*, entretanto apresenta escape do fluido nas laterais do *pig*. É importante destacar que o termo referente às perdas de cargas distribuídas não foram consideradas porque o comprimento do trecho é bastante curto, resultando em um valor bem menor quando comparado ao valor da perda de carga localizada. O coeficiente de perda de carga total é resultante do somatório das perdas causadas pela expansões (K_{CB}) e contrações (K_{EB}) em torno do equipamento oriundas do escoamento referente ao vazamento. Dessa forma, tem-se:

$$K_p = K_{EB} + K_{CB} \quad (3.13)$$

onde:

$$K_{CB} = 0,42 \left(1 - \frac{A_{vaz}^2}{A^2} \right) \quad (3.14)$$

e

$$K_{EB} = \left(1 - \frac{A_{vaz}^2}{A^2} \right)^2 \quad (3.15)$$

logo,

$$K_p = \left(1,42 - \frac{A_{vaz}^2}{A^2} \right) \left(1 - \frac{A_{vaz}^2}{A^2} \right) \quad (3.16)$$

Substituindo a Eq. 3.12 na Eq. 3.9:

$$m_{pig} \frac{d^2 x_{pig}}{dt^2} + (C + f_c) \frac{dx_{pig}}{dt} = K_p \left(\frac{A}{A_{vaz}} \right)^2 \frac{\rho(u - v_{pig})^2}{2} A \quad (3.17)$$

Deixando a equação em termos de velocidade:

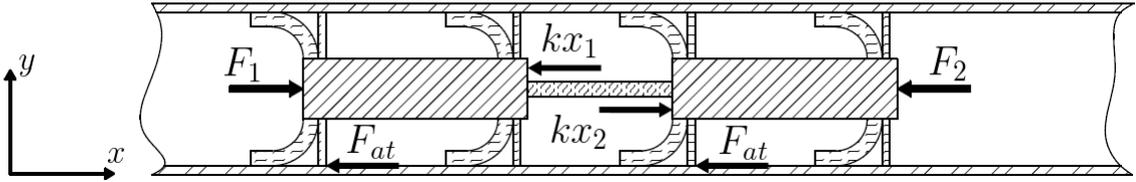
$$m_{pig} \frac{dv_{pig}}{dt} + (C + f_c)v_{pig} = K_p \left(\frac{A}{A_{vaz}} \right)^2 \frac{\rho(u - v_{pig})^2}{2} A \quad (3.18)$$

Com a Equação 3.18, pode-se obter a velocidade que o *pig* atinge em um dado intervalo de tempo. O *software* utilizado para resolver a equação foi o *Scialb*, que é um programa de código aberto disponibilizado gratuitamente pelo site da empresa e tem ferramentas matemáticas para aplicação no setor de engenharia e pesquisas científicas. Todas as equações foram resolvidas pelo uso da função "ode", em que é feita a solução da equação diferencial pelo método de Runge-Kutta de quarta ordem. A equação diferencial é resolvida em termos da velocidade do *pig* pelo tempo de passagem pelo percurso.

3.1.2 Configuração com dois módulos ligados

O equacionamento para a configuração do *pig* em dois módulos é semelhante à feita para a configuração de um único módulo, mas neste caso haverá também a presença da força elástica atuante nos dois corpos devido ao acoplamento, como pode ser visualizado na Fig. 30.

Figura 30 – Esboço do trem de *pig* em deslocamento.



Fonte: o próprio.

A massa total do *pig* é composta por m_1 e m_2 , equivalente ao primeiro e segundo módulo, respectivamente, que estão interligados pelo corpo com massa desprezível e rigidez k , e o deslocamento primeiro módulo é dado por x_1 e do segundo módulo por x_2 . As outras forças atuantes nos corpos são as mesmas abordadas na configuração de um módulo. Para obter a equação do movimento dos dois módulos é aplicado o balanço de forças em cada corpo:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} = F_1 - k(x_1 - x_2) - F_c - F_\mu \quad (3.19)$$

e

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} = -F_2 - F_c - F_\mu - k(x_2 - x_1) \quad (3.20)$$

Rearranjando as equações descritas e substituindo as forças F_1 e F_2 , isolando p_1 da Eq. 3.12 e substituindo-a na Eq. 3.20 e fazendo a substituição da Eq. 3.8 na Eq. 3.20, tem-se:

$$m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + (C + f_c) \frac{dx_1}{dt} + kx_1 = kx_2 + p_2 A + K_p \left(\frac{A}{A_{vaz}} \right)^2 \frac{\rho(u - v_{Pig})^2}{2} A \quad (3.21)$$

e

$$m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + (C + f_c) \frac{dx_2}{dt} + kx_2 = -p_2 A + kx_1 \quad (3.22)$$

A equação obtida é resolvida pelo mesmo procedimento descrito no tópico anterior.

3.2 Análise experimental

A análise experimental da dinâmica do conjunto leva em conta realização das observações das variáveis obtidas durante os ensaios experimentais com o *pig* em estudo. Com esses testes, esperou-se obter relações empíricas através dos experimentos realizados no *loop* de testes com base no *pig* ensaiado, como também do comportamento do fluido de trabalho. Dessa forma, o banco de testes, que será detalhado a seguir, apresenta trechos parcialmente transparentes que possibilitam a visualização, tanto do equipamento, como também do fluido e o respectivo escoamento. Para a visualização do escoamento, espera-se coletar imagens referentes ao escoamento que ocorre a jusante e a montante do *pig*.

3.2.1 Bancada de testes

Os testes foram realizados no *loop* para *pigs* multidiâmetro (Fig. 31) localizado na UNIFEI, mais especificamente, no NUSEC. O *loop* foi construído no ano de 2019 e foi projetado para simular caminhos críticos que um *pig* multidiâmetro pode enfrentar em linhas de tubulações do setor de óleo e gás *offshore*.

Figura 31 – *Loop* de testes para *pigs* multidiâmetro do NUSEC.



Fonte: o próprio.

É importante destacar que o *loop* de testes foi construído no NUSEC para atender os testes com o *pig* em desenvolvimento. Todos os trechos, componentes e conexões foram projetados de forma a simular as piores condições que o mesmo irá enfrentar nas linhas da plataforma. Todo o processo de construção foi realizado no NUSEC, desde o desenvolvimento dos trechos transparentes com resina epóxi, a soldagem dos tubos, a instalação dos suportes até os testes de estanqueidades da linha.

Por se tratar de um *loop* multidiâmetro, o mesmo apresenta tubulações de diâmetro interno que vão de 4 polegadas até 8,5 polegadas, tendo no total cerca de 40 metros de percurso. Além de trechos retos, o *loop* apresenta curvas acentuadas em 90° em acrílico e em inox em 4 polegadas, um trecho de curva S em 4 polegadas, um conjunto de dois Y em material transparente com diâmetro de 8 polegadas, além de um trecho reto transparente de resina epóxi com diâmetro de 7 polegadas. A vista de topo do esboço do projeto com a indicação dos componentes do *loop* pode ser visualizado na Fig. 32.

Por essa condição de mudança de diâmetro interno das tubulações ao longo da linha, tem-se como consequência modificações do deslocamento do *pig* e do escoamento em toda trajetória.

Para realizar o lançamento e a passagem do *pig* no *loop* de testes foi feita a instalação na linha de duas bombas de cavidade progressiva Weatherford WHT65F e Weatherford WHT53F (Fig. 33). As bombas foram acopladas em paralelo com o intuito de se obter um maior intervalo de vazões. A configuração apresenta uma vazão máxima de trabalho de 50 m^3/h e alcança pressões de até 12 *bar*.

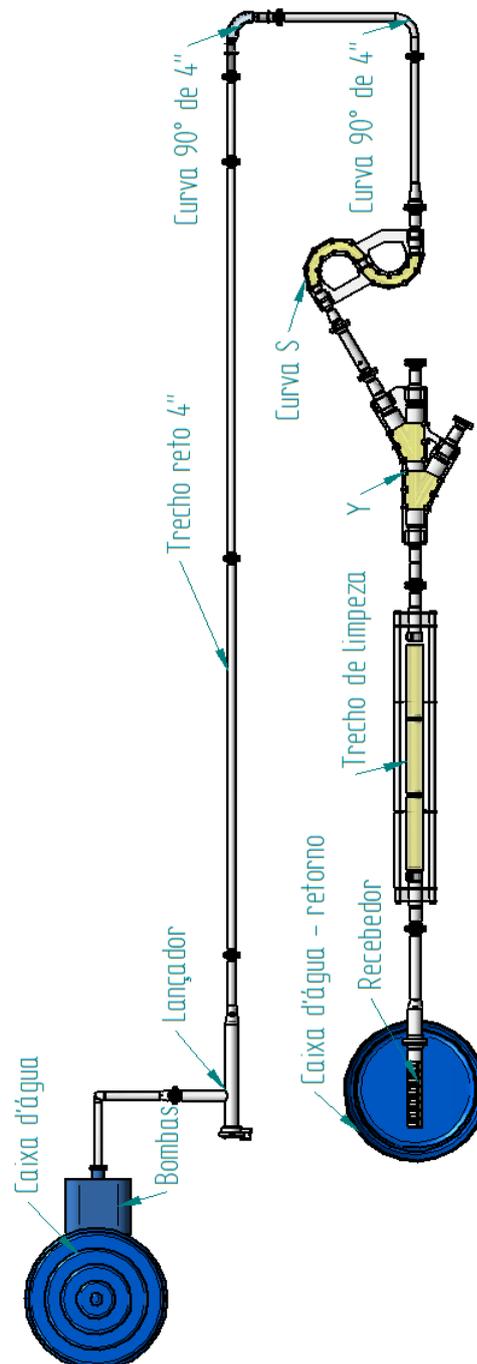
Por motivos de segurança, foi instalada na linha uma válvula limitadora de pressão, que se abre quando a pressão no *loop* chega à 10 *bar*. Deve-se destacar que as vazões são ajustadas nos inversores de frequências (Fig. 34), pois ajustando-se a rotação do motor, modifica-se a vazão fornecida pelo conjunto, uma vez que as bombas foram calibradas.

3.2.1.1 Procedimento experimental

Para a realização dos testes, os trechos retos do *loop* utilizados para analisar o comportamento do conjunto escoamento e *pig* foram de:

- 4 polegadas com 14,8 metros de comprimento
- 7 polegadas com 3,2 metros de comprimento

O lançamento do *pig* foi realizado de forma a manter o escoamento formado atrás do equipamento ser o menos perturbado possível, e ainda, visando ter somente água dentro da câmara, já que a presença de ar poderia modificaria as condições em análise.

Figura 32 – Desenho do *loop* de testes para *pigs* multidímetro do NUSEC.

Fonte: o próprio.

O primeiro passo realizado é a inserção do *pig* dentro do lançador. Abre-se o flange de abertura rápida e o equipamento é inserido e depois empurrado mecanicamente até atingir a redução de 4 polegadas. Após isso, as bombas de cavidade progressiva são partidas, e até que as mesmas atinjam a rotação correspondente à vazão requerida, é mantida aberta a válvula de esfera que fica na parte superior da câmara (Fig. 35).

Esse procedimento é feito para eliminar o máximo de ar residual presente na linha

Figura 33 – Conjunto de bombas de cavidade progressiva do *loop* de testes do NUSEC.



Fonte: o próprio.

Figura 34 – Conjunto de inversores *loop* de testes do NUSEC.



Fonte: o próprio.

Figura 35 – Flange de abertura rápida e válvula de esfera do lançador do *loop* de testes do NUSEC.



Fonte: o próprio.

atrás do *pig*. Assim que os respectivos inversores atingem a rotação de teste estabelecida, a válvula de esfera é fechada e toda a pressão exercida pelas bombas no fluido é transferida para o *pig*, que então, começa a percorrer o trecho reto de 4 polegadas.

Depois que a válvula de esfera é fechada, sabe-se que o *pig* começa a se deslocar pelo trecho devido à pressurização do fluido atrás do equipamento. Assim, é disparado o cronômetro para contagem do tempo que o *pig* percorre no trecho de 4 polegadas. O tempo é contado até que o nariz do *pig* seja visto na entrada da curva acentuada de 90°, indicando que o equipamento percorreu os 13 metros de trecho reto.

Após passar nos trechos críticos das curvas de 90°, curva S e das duas bifurcações em Y, o *pig* entra no trecho reto de 7 polegadas. Neste percurso, o tempo é contado à partir do momento em que o equipamento aparece no trecho reto visível do *loop*. Após a parte frontal do *pig* sair do trecho transparente, novamente o cronômetro é parado.

Com esse método citado, pode-se obter a velocidade média do equipamento (\bar{v}_{pig}) da Eq. 3.23, já que se tem a distância percorrida nesses trechos, como também os tempos que o *pig* entra (t_i) e sai (t_f) dos trechos retos.

$$\bar{v}_{pig} = \frac{\Delta s_{trecho}}{t_f - t_i} \quad (3.23)$$

Outra variável obtida é a pressão a montante do *pig*, que é obtida através de um manômetro situado na saída da bomba, mas como a mesma sofre pequenas variações em um mesmo trecho, é colocado o valor médio das leituras obtidas (\bar{p}_{linha}).

O recebimento do equipamento é feito na cesta recebedora, a qual fica aberta em pressão ambiente. O escoamento a jusante sai pela cesta, que também recebe o *pig*. A cesta apresenta um bloqueio para casos em que o equipamento venha com uma velocidade muito alta.

3.2.2 Geometria e construção do *pig*

O *pig* utilizado nos testes do presente trabalho foi desenvolvido em parceria com a Petrobras através do convênio "Estudo conceitual e desenvolvimento de um protótipo de *pig* de limpeza multidiâmetros 4x8,5. O projeto do equipamento não pode ser mostrado devido às condições de confidencialidade com a empresa parceira. Dessa forma, as fotos utilizadas no atual trabalho não contém a forma completa e identificável do *pig* desenvolvido, mas os ensaios foram realizados com um protótipo do mesmo.

Deve-se destacar que o *pig* desenvolvido é de limpeza e é capaz de percorrer os diâmetros que ficam no intervalo de 4 até 8,5 polegadas. É um *pig* que apresenta membranas capazes de vedar tanto em diâmetros menores, como de voltar ao tamanho inicial e manter a vedação em diâmetros maiores. Além dos vedadores, o equipamento também

apresenta módulos mecânicos que contêm ferramentas para a realização da limpeza, como raspadores e escovas, além de ter um mecanismo de sustentação responsável por mantê-lo o mais centralizado possível nos trechos aplicados.

Os vedadores foram desenvolvidos e moldados com tecnologia de impressão 3D e etc

Como já abordado, o objetivo do trabalho é o de analisar os fenômenos que ocorrem devido ao escoamento e à movimentação de um *pig* multidiâmetro. A não ilustração da geometria completa do equipamento não interfere na produção do trabalho.

4 Resultados

No presente capítulo são descritos os resultados referentes às velocidades obtidas da aplicação da Metodologia referente à análise teórica e experimental, assim como a apresentação dos padrões de escoamentos obtidos experimentalmente.

4.1 Resultados teóricos

As simulações para prever as possíveis velocidades que o *pig* pode atingir nos trechos retos de quatro e sete polegadas foram feitas utilizando as Eq. 3.18, 3.21 e 3.22, anteriormente descritas na Metodologia do presente trabalho. As constantes utilizadas na simulação podem ser visualizadas na Tab. 4 e os códigos em `.sce` para solução da configuração de 1 módulo e 2 módulos se encontram no Apêndice A e Apêndice B, respectivamente, do presente trabalho.

Tabela 4 – Parâmetros utilizados nas simulações para configuração de 1 módulo e 2 módulos.

Constante	Valor	Unidade
m_{pig}	7,524	kg
m_1	2,135	kg
m_2	5,389	kg
ρ	998,2	kg/m^3
k	679,89	kN/m

Fonte: o próprio.

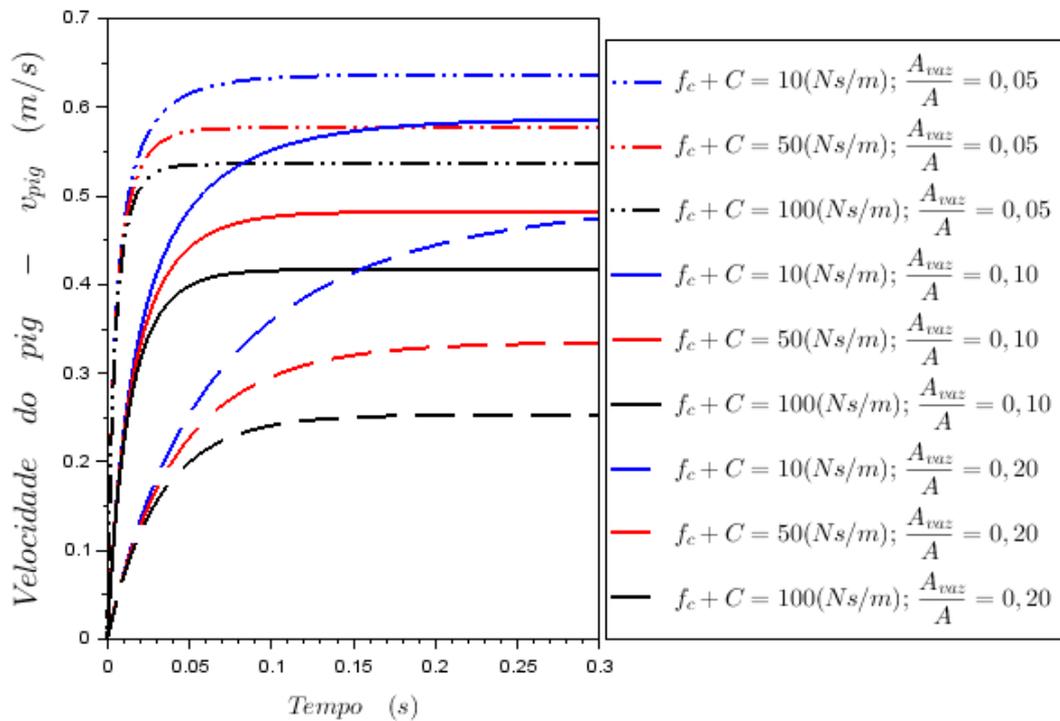
Como não há valores padrões para os coeficientes de atrito e também não se sabe a razão de áreas correspondentes aos vazamentos, foram realizadas as simulações considerando três valores de cada variável aplicada às vazões de 20, 30, 40 e 50 m^3/s . Dessa forma, os valores simulados para o coeficiente de atrito foi de 10, 50 e 100 Ns/m e para as razões de área foi de 5%, 10% e 20%. Outro fator a ser destacado é que a velocidade com que o *pig* entra no trecho de sete polegadas foi considerado como nula porque o equipamento sofre uma desaceleração no trecho Y a ponto de ficar estagnado num curto intervalo de tempo até que o fluido inunde o trecho e empurre-o no trecho de sete polegadas.

4.1.1 Configuração de 1 módulo

A seguir, são apresentados os valores das velocidades resultantes das soluções numéricas realizadas para a configuração de 1 módulo do *pig*. Ao total, foram simulados 72 comportamentos, cada um com uma combinação de diâmetro, vazão, coeficiente de atrito

e razão de área. Os resultados foram divididos de acordo com a vazão e os diâmetros dos trechos simulados. O comportamento gráfico obtido das simulações apresentam uma configuração semelhante, variando seu crescimento de acordo com os parâmetros aplicados. O gráfico obtido da simulação com vazão de $20m^3/s$ e diâmetro de 101,3 milímetros pode ser visualizado na Fig. 36. Percebe-se que após um intervalo de tempo a velocidade começa por apresentar um valor constante, que é a velocidade teórica que o *pig* atinge no trecho reto e é constante nesse percurso. Para facilitar as análises das velocidades, os valores constantes das mesmas serão colocados em tabelas, indicadas de acordo com as vazões, os diâmetros, os coeficientes de atrito e as razões de áreas.

Figura 36 – Simulação da velocidade do *pig* pelo tempo com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 4 polegadas.



Fonte: o próprio.

A Tabela 5 contém os valores das velocidades atingidas pelo *pig* no trecho reto de quatro polegadas de acordo com os parâmetros indicados na mesma. Percebe-se que para cada aumento do coeficiente de atrito e mantendo-se a razão de área constante, as velocidades do *pig* diminuem. Essa relação de redução da velocidade também é observada quando se aumenta o valor da razão de áreas.

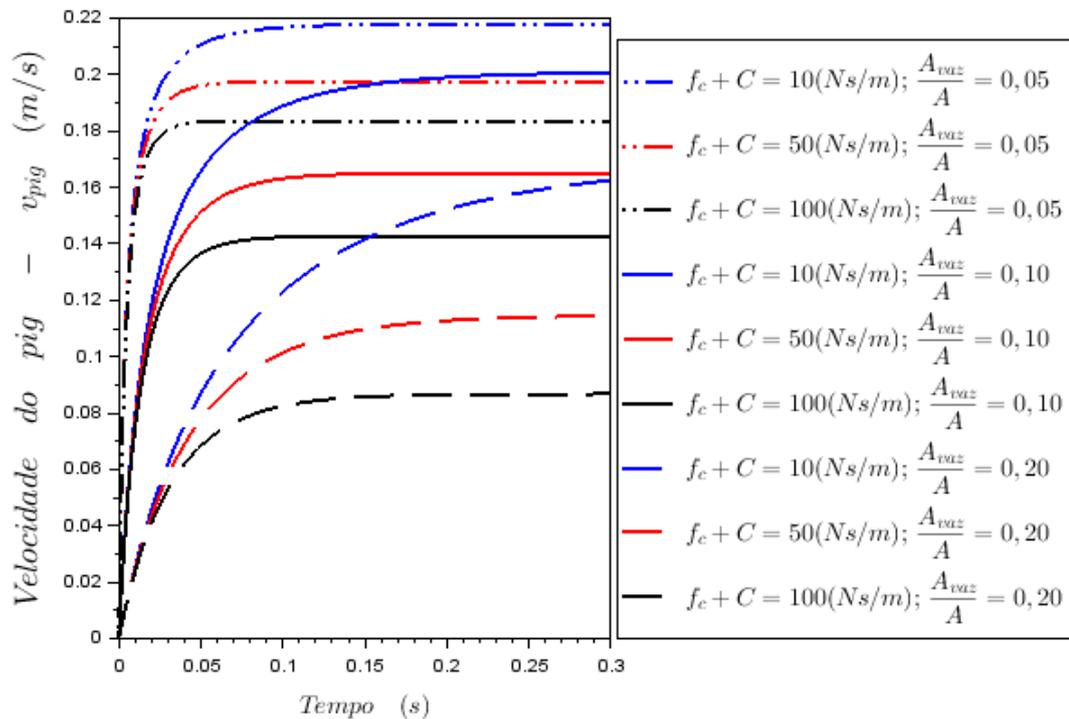
Tabela 5 – Velocidades teóricas atingidas pelo *pig* de 1 módulo para o trecho de 4 polegadas.

$f_c + C(Ns/m)$	$A_{vaz}/A(-)$	$V_{20}(m/s)$	$V_{30}(m/s)$	$V_{40}(m/s)$	$V_{50}(m/s)$
10	0,05	0,636	0,969	1,303	1,638
50	0,05	0,577	0,894	1,215	1,539
100	0,05	0,536	0,842	1,153	1,469
10	0,1	0,587	0,907	1,231	1,557
50	0,1	0,482	0,772	1,070	1,374
100	0,1	0,417	0,685	0,964	1,251
10	0,2	0,496	0,790	1,092	1,399
50	0,2	0,335	0,571	0,823	1,085
100	0,2	0,253	0,452	0,670	0,901

Fonte: o próprio.

O comportamento das velocidades do equipamento no trecho de sete polegadas a uma vazão de $20m^3/s$ pode ser visualizado na Fig. 37. Da mesma forma que no trecho de quatro polegadas, a curva da velocidade apresenta um crescimento em um curto intervalo de tempo, que no caso é menos de 1 segundo, até que o valor da mesma se mantém constante pelo resto do tempo. As velocidades obtidas neste trecho de diâmetro são menores do que as velocidades atingidas no trecho de quatro polegadas.

Figura 37 – Simulação da velocidade do *pig* pelo tempo com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 4 polegadas.



Fonte: o próprio.

A Tabela 6 contém os valores das velocidades, obtidas por cada conjunto de pa-

râmetros indicado. As velocidades diminuem com o aumento do valor do coeficiente de atrito, como também com o aumento das razões de áreas. Para o caso de maior coeficiente de atrito, maior razão de área e menor vazão, o valor da velocidade obtido foi $0,086m/s$, sendo bastante baixo quando comparado com os outros valores de outros conjuntos de parâmetros.

Tabela 6 – Velocidades teóricas atingidas pelo *pig* de 1 módulo para o trecho de 7 polegadas.

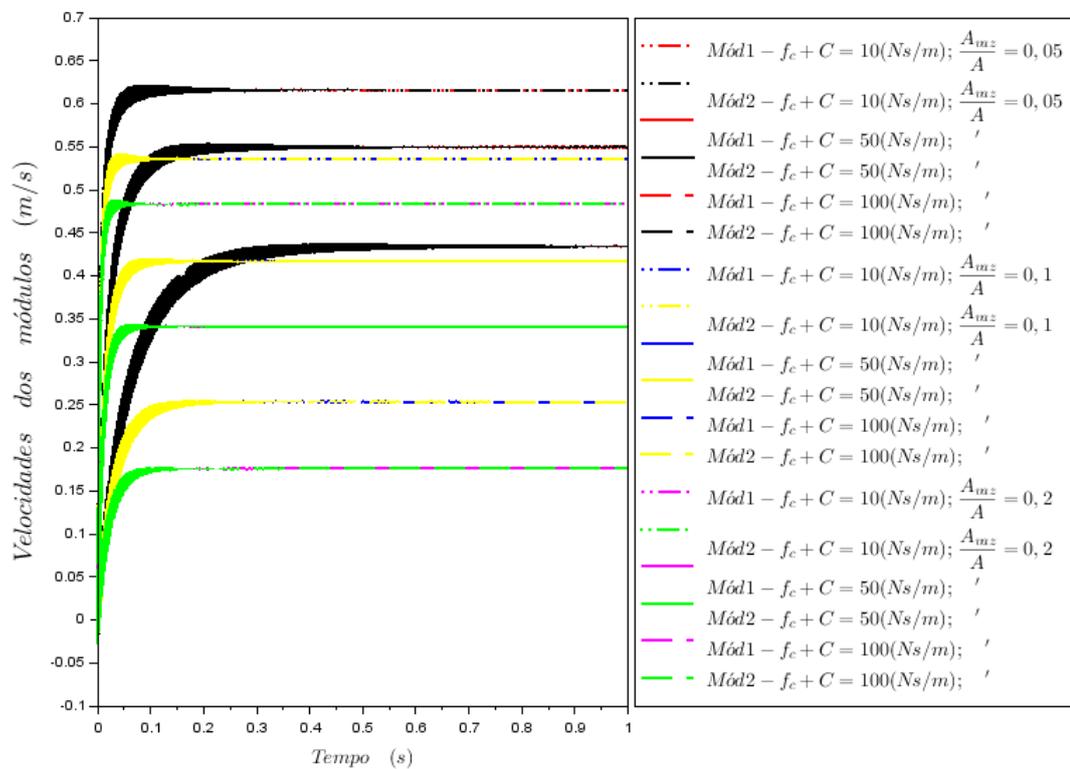
$fc + C(Ns/m)$	$A_{vaz}/A(-)$	$V_{20}(m/s)$	$V_{30}(m/s)$	$V_{40}(m/s)$	$V_{50}(m/s)$
10	0,05	0,216	0,329	0,442	0,556
50	0,05	0,196	0,303	0,412	0,522
100	0,05	0,152	0,286	0,391	0,499
10	0,1	0,199	0,308	0,418	0,528
50	0,1	0,164	0,262	0,363	0,466
100	0,1	0,141	0,232	0,327	0,425
10	0,2	0,168	0,268	0,371	0,475
50	0,2	0,114	0,194	0,279	0,368
100	0,2	0,086	0,153	0,227	0,306

Fonte: o próprio.

4.1.2 Configuração de 2 módulos

São apresentados os resultados das soluções numéricas realizadas para a configuração de 2 módulos do *pig*. Ao total foram simulados 72 comportamentos, cada um com uma combinação de diâmetro, vazão, coeficiente de atrito, razão de área, e neste caso também foi levado em conta o valor da rigidez, da pressão a jusante no valor de $101325Pa$. A Figura 38 contém as curvas obtidas para as soluções com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 4 polegadas. O comportamento é semelhante ao da configuração de 1 módulo, mas o conjunto com dois módulos, por causa da rigidez, apresenta oscilação no início e as velocidades de cada módulo são diferentes no começo. Entretanto, com o passar do tempo, a oscilação do sistema diminui, que pode ser visualizado no afinamento das curvas, chegando ao ponto de a velocidade do primeiro e segundo módulo ser a mesma.

Figura 38 – Simulação da velocidade dos módulos do *pig* pelo tempo com vazão de $20m^3/s$ no trecho de 4 polegadas.



Fonte: o próprio.

A Tabela 7 contém os valores das velocidades finais do conjunto para as simulações feitas no trecho reto de quatro polegadas, juntamente com os outros parâmetros, indicados na mesma. O comportamento da velocidade final do conjunto de 2 módulos ocorre de forma semelhante à configuração de 1 módulo, mas apresenta valores menores, cerca de 70%. À medida que é aumentado o coeficiente de atrito e a razão de áreas, a velocidade do equipamento decai.

Tabela 7 – Velocidades teóricas atingidas pelo *pig* de 2 módulos para o trecho de 4 polegadas.

$f_c + C(Ns/m)$	$A_{vaz}/A(-)$	$V_{20}(m/s)$	$V_{30}(m/s)$	$V_{40}(m/s)$	$V_{50}(m/s)$
10	0,05	0,616	0,943	1,273	1,605
50	0,05	0,549	0,859	1,174	1,493
100	0,05	0,434	0,708	0,993	1,284
10	0,1	0,536	0,842	1,153	1,469
50	0,1	0,417	0,685	0,964	1,251
100	0,1	0,253	0,452	0,670	0,901
10	0,2	0,483	0,773	1,072	1,376
50	0,2	0,341	0,580	0,834	1,098
100	0,2	0,176	0,330	0,507	0,699

Fonte: o próprio.

O mesmo procedimento de simulação foi aplicado para o trecho de sete polegadas.

Tabela 8 – Velocidades teóricas atingidas pelo *pig* de 2 módulos para o trecho de 7 polegadas.

$fc + C(Ns/m)$	$A_{vaz}/A(-)$	$V_{20}(m/s)$	$V_{30}(m/s)$	$V_{40}(m/s)$	$V_{50}(m/s)$
10	0,05	0,209	0,320	0,432	0,544
50	0,05	0,186	0,292	0,398	0,507
100	0,05	0,147	0,240	0,337	0,436
10	0,1	0,182	0,286	0,391	0,499
50	0,1	0,141	0,232	0,327	0,425
100	0,1	0,086	0,153	0,227	0,306
10	0,2	0,164	0,262	0,364	0,467
50	0,2	0,116	0,197	0,283	0,373
100	0,2	0,060	0,112	0,172	0,237

Fonte: o próprio.

4.2 Resultados experimentais

4.2.1 Velocidade do *pig*

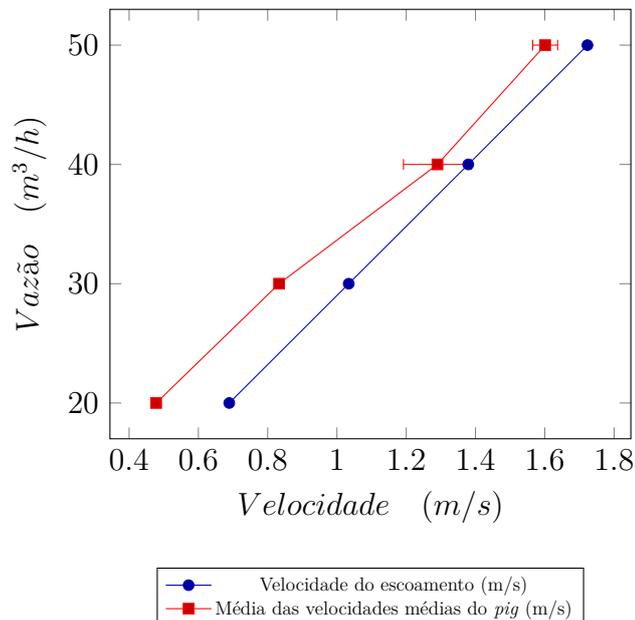
Seguindo os procedimentos de testes descritos no Capítulo 3, foram realizados um total de vinte e um lançamentos do *pig* no *loop* de testes. A Tab. 9 contém as variações do tempo que o equipamento percorreu nos trechos retos de quatro e oito polegadas, separadas de acordo com as vazões de ensaio. Na tabela é encontrada também a pressão média obtida pelas leituras feitas no manômetro durante os ensaios. É importante ressaltar que o Teste 6 não apresenta os tempo dos percursos porque o *pig* ficou entalado na linha por causa de uma deformação em um de seus componentes, causada durante a inserção no lançador. A pressão do *loop* atingiu o valor máximo de segurança, sendo necessário abrir a linha para retirar o equipamento.

Com os dados correspondente aos tempos de percurso, pôde-se calcular as velocidades médias atingidas pelo *pig*, que podem ser encontradas juntamente com as velocidades teóricas no escoamento na Tab. 10. O Teste 6 foi descartado para obtenção das velocidades. O comprimento considerado para a linha de 4 polegadas foi de 14,8 metros, enquanto que para a linha de 7 polegadas foi de 3,2 metros. O diâmetro considerado na tubulação nominal de 4 polegadas e 7 polegadas foi de 101,3 milímetro e 173,1 milímetros, respectivamente.

Para facilitar a visualização, foi plotado o gráfico (Fig. 40) com os valores médios correspondentes às velocidades do *pig* no trecho de 4 polegadas, de acordo com cada faixa de vazão, juntamente com o erro associado pelo desvio padrão dos dados. Além da velocidade experimental do *pig*, também foi inserida a velocidade teórica do escoamento correspondente às vazões aplicadas no *loop* de testes.

Tabela 9 – Valores experimentais do tempo gasto pelo *pig* para percorrer os trechos de 4 e 7 polegadas e pressões médias

Teste	Vazão (m^3/s)	Trecho de 4"		Trecho de 7"	
		Tempo (s)	Pressão média (bar)	Tempo (s)	Pressão média (bar)
1	50	9,45	4,5	6,16	0
2	50	9,31	4,5	6,63	0
3	50	8,98	4,5	6,75	0
4	50	9,08	4,3	6,75	0
5	50	9,42	4,5	7,07	0
6	40	-	10	-	0
7	40	10,93	3,8	8,87	0
8	40	10,83	3,5	9,21	0
9	40	11,75	3,5	8,60	0
10	40	11,06	3,8	8,86	0
11	40	13,09	3,5	9,03	0
12	30	17,79	3,4	13,01	0
13	30	17,28	3,2	11,96	0
14	30	17,94	3,4	13,90	0
15	30	17,78	3,4	12,58	0
16	30	18,08	3,2	12,56	0
17	20	31,09	2,8	19,94	0
18	20	31,67	2,8	22,73	0
19	20	30,29	2,8	21,55	0
20	20	30,92	2,6	19,95	0
21	20	30,81	2,6	19,68	0

Figura 40 – Resultado das velocidades teóricas do escoamento e das velocidades médias experimentais do *pig* em função da vazão no trecho de 4 polegadas.

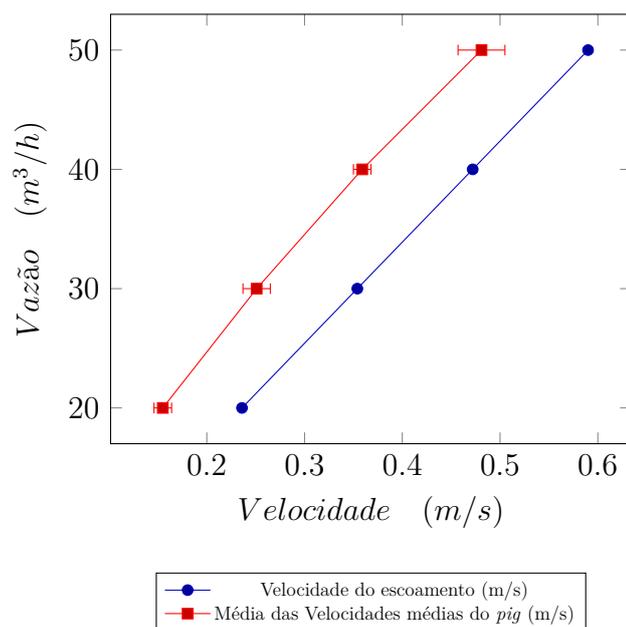
Fonte: o próprio.

Tabela 10 – Velocidades teóricas do escoamento no *loop* e velocidades experimentais do *pig*.

Teste	Vazão (m^3/s)	Trecho de 4"		Trecho de 7"	
		Velocidade teórica do escoamento (m/s)	Velocidade média do pig no trecho (m/s)	Velocidade teórica do escoamento (m/s)	Velocidade média do pig no trecho (m/s)
1	50	1,723	1,566	0,590	0,519
2	50	1,723	1,590	0,590	0,483
3	50	1,723	1,648	0,590	0,474
4	50	1,723	1,630	0,590	0,474
5	50	1,723	1,571	0,590	0,453
7	40	1,379	1,354	0,472	0,361
8	40	1,379	1,367	0,472	0,347
9	40	1,379	1,260	0,472	0,372
10	40	1,379	1,338	0,472	0,361
11	40	1,379	1,131	0,472	0,354
12	30	1,034	0,832	0,354	0,246
13	30	1,034	0,856	0,354	0,268
14	30	1,034	0,825	0,354	0,230
15	30	1,034	0,832	0,354	0,254
16	30	1,034	0,819	0,354	0,255
17	20	0,689	0,476	0,236	0,160
18	20	0,689	0,467	0,236	0,141
19	20	0,689	0,489	0,236	0,148
20	20	0,689	0,479	0,236	0,160
21	20	0,689	0,480	0,236	0,163

Da mesma forma, foi plotado o gráfico das velocidades correspondentes às passagens do equipamento pelo trecho de 7 polegadas (Fig. 41).

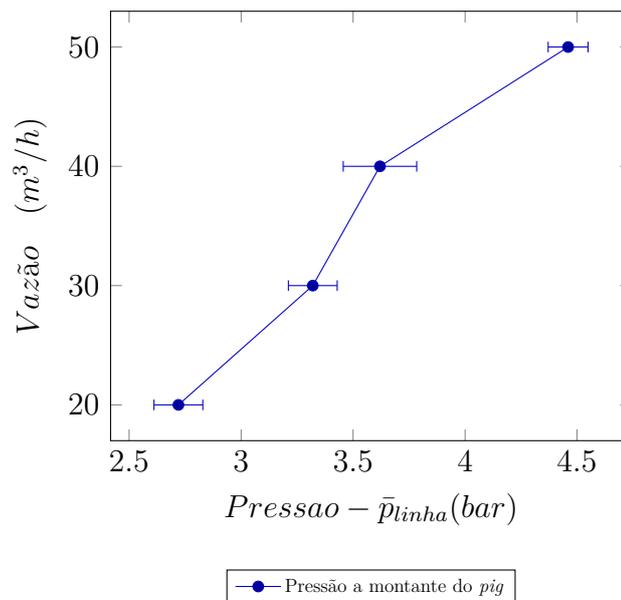
Figura 41 – Resultado das velocidades teóricas do escoamento e das velocidades médias experimentais do *pig* em função da vazão no trecho de 7 polegadas.



Fonte: o próprio.

Outro fator que pôde ser levantado foi a relação entre as vazões de testes com as pressões a montante do *pig*. A Fig. 42 contém a relação dessas duas variáveis somente para o trecho reto de 4 polegadas, uma vez que para o trecho de 7 polegadas a pressão lida no manômetro foi sempre nula.

Figura 42 – Resultado das pressões a montante do *pig* em função da vazão no trecho de 4 polegadas.



Fonte: o próprio.

Com o objetivo de verificar o comportamento das velocidades teóricas com as velocidades médias experimentais, a Fig. 43 e Fig. 44 contêm as curvas referentes às velocidades correspondentes ao trecho reto de 4 polegadas, para a configuração de um módulo e para a de dois módulos, respectivamente. Observa-se que as velocidades teóricas obtidas para a configuração de um módulo são maiores que a de dois módulos, podendo a curva de velocidades experimentais serem utilizadas como referência para essa comparação. Para a vazão de $40m^3/s$ e $50m^3/s$, é possível visualizar claramente que os valores das velocidades experimentais ficam abaixo da curva de $f_c + C = 10$ e $A_{vaz}/A = 5\%$ para a configuração de um módulo, enquanto que para a de dois módulos, esses valores ficam acima. É importante destacar que o comportamento da velocidade experimental não é linear, ficando mais próximas de curvas com maior valor de parâmetros até $35m^3/s$ e após esse valor, o comportamento se aproxima de curvas com menor valor de parâmetros. Essa variação da velocidade experimental pode ser explicada pelo fato do escoamento não estar completamente desenvolvido no início do trecho, principalmente nas velocidades menores.

Figura 43 – Velocidades teóricas para a configuração de um módulo e velocidades experimentais obtidas pelo *pig* no trecho reto de 4 polegadas.

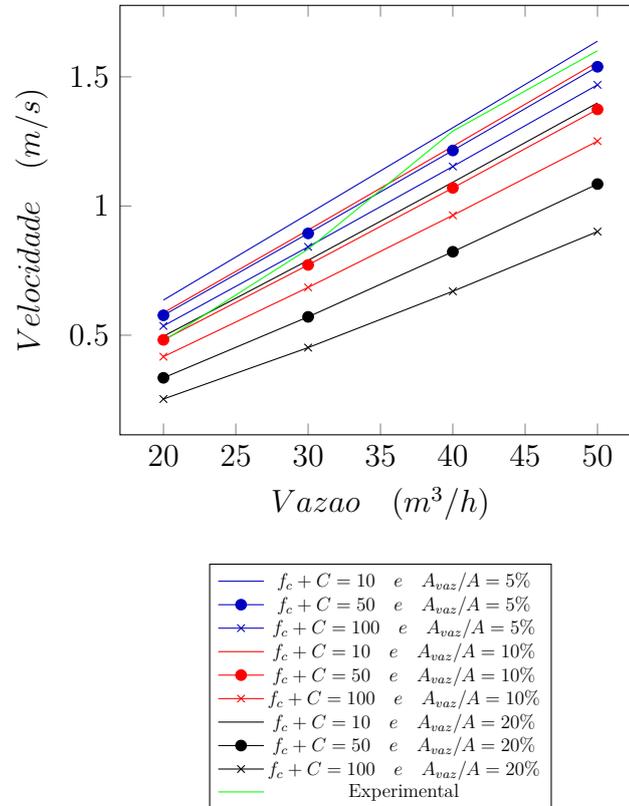
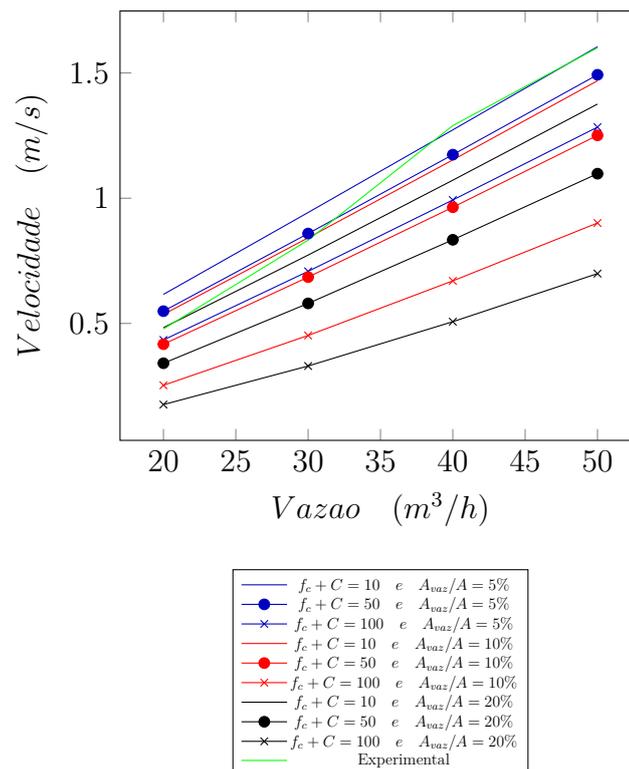


Figura 44 – Velocidades teóricas para a configuração de dois módulos e velocidades experimentais obtidas pelo *pig* no trecho reto de 4 polegadas.



Os gráficos correspondentes ao trecho reto de 7 polegadas podem ser visualizados na Fig. e Fig. para a configuração de um módulo e para a de dois módulos, respectivamente. Da mesma forma que as velocidades teóricas do trecho de quatro polegadas, a configuração de um módulo apresenta valores maiores do que a de dois módulos. Enquanto que a curva experimental fica mais perto da simulação teórica para os parâmetros $f_c + C = 50$ e $A_{vaz}/A = 10\%$ para as velocidades da configuração de um módulo, para a de dois módulos a mesma fica próxima da curva de $f_c + C = 10$ e $A_{vaz}/A = 20\%$. É importante notar que a curva experimental no trecho de sete polegadas é visivelmente mais linear que a de quatro polegadas, podendo indicar que o escoamento passando por esse trecho possa estar desenvolvido.

Figura 45 – Velocidades teóricas para a configuração de um módulo e velocidades experimentais obtidas pelo *pig* no trecho reto de 7 polegadas.

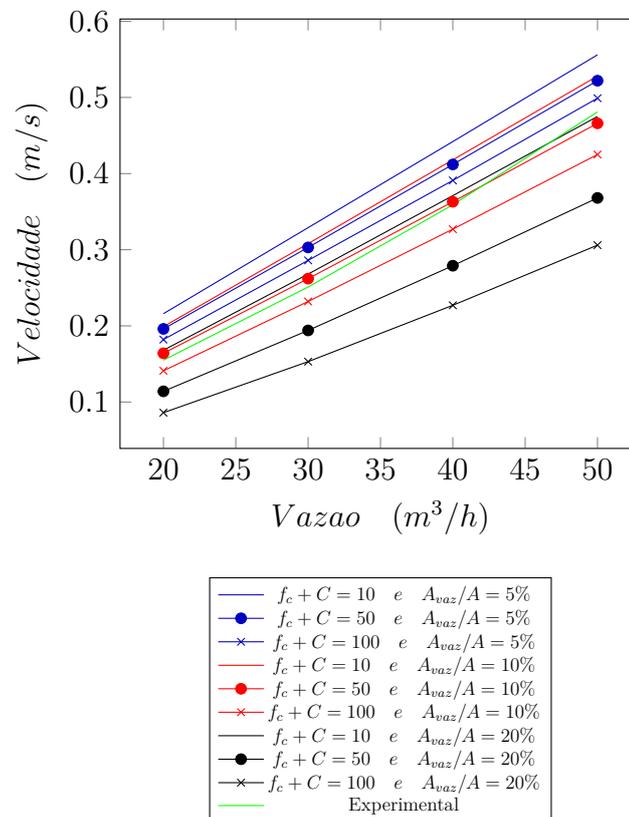
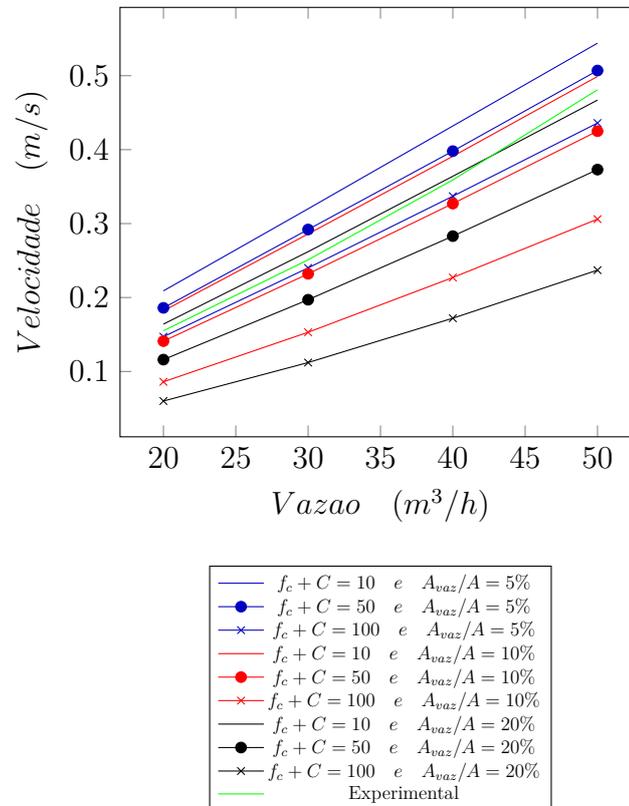


Figura 46 – Velocidades teóricas para a configuração de dois módulos e velocidades experimentais obtidas pelo *pig* no trecho reto de 7 polegadas.



4.2.2 Escoamentos ao redor do *pig*

A seguir são apresentadas as imagens dos trechos transparentes obtidas durante os testes realizados com o *pig*. Teve-se o objetivo de visualizar a dinâmica do escoamento antes, durante e depois da passagem do equipamento. Essas imagens foram tiradas da curva de 90 graus e do trecho reto de limpeza do *loop*. Todas as imagens foram obtidas de testes realizados com vazão de $30\text{m}^3/\text{h}$ para fazer um levantamento comparativo das modificações estruturais aplicadas no *pig*.

Na Figura 47 é possível visualizar as imagens do escoamento em um dos testes realizados com o *pig*, ocultado pela tarja preta. A Figura 47(a) apresenta o cenário momentos antes do *pig* chegar na curva, que apresenta poucos vazamentos, mas que são visíveis pelo jato d'água indicado pela seta vermelha. Esse jato d'água se intensifica à medida que o equipamento se aproxima da curva Figura 47(b) e Figura 47(c). O escoamento atrás do *pig* Figura 47(d) não apresentou bolhas ou outros fenômenos visíveis, sendo possível verificar que a curva ficou completamente cheia de fluido. Neste teste o equipamento apresentou um bom desempenho, uma vez que não ficou estagnado em nenhum trecho do *loop* e pôde ser retirado da cesta recebedora sem nenhuma danificação.

Figura 47 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento sem modificações na vedação.

(a) Entrada do *pig* na curva.



(b) Escoamento durante a entrada do *pig* na curva.



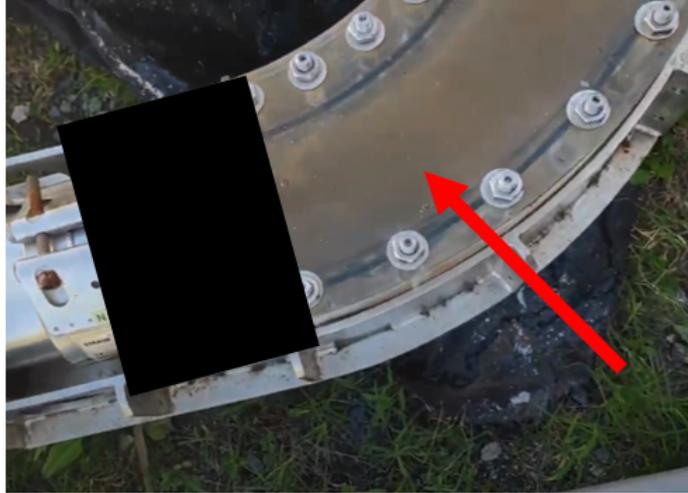
(c) Escoamento durante a passagem do *pig* na curva.



Fonte: o próprio.

Figura 47 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento sem modificações na vedação (cont.).

(d) Escoamento durante a saída do *pig* na curva.



Fonte: o próprio.

Para diminuir o vazamento, foram realizadas algumas modificações nos vedadores. A Figura 48 apresentou formas de escoamentos mais caóticos, além de um vazamento visivelmente maior que dos escoamentos da figura anterior. Na Figura 48(a) é possível verificar o escoamento pouco antes do *pig* passar pela curva com um jato d'água que passa pelo trecho, chegando a escoar pelas laterais da parede da tubulação. Na Figura 48(b) fica ainda mais claro o jato do escoamento, que é quando o equipamento já está dentro da curva. Já a Figura 48(c), que é do escoamento atrás do *pig*, não apresenta fenômenos ou bolhas de ar visíveis. Nesse teste o equipamento gastou mais tempo para chegar na cesta recebedora e ficou desalinhado no trecho reto de limpeza.

Figura 48 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento do *pig* sem modificações na vedação.

(a) Escoamento durante a entrada do *pig* na curva.



Fonte: o próprio.

Figura 48 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento do *pig* sem modificações na vedação (*cont.*).

(b) Escoamento durante a passagem do *pig* na curva.



(c) Escoamento durante a saída do *pig* na curva.



Fonte: o próprio.

Foram realizadas mais algumas modificações nos vedadores para verificar se era possível diminuir ainda mais os vazamentos. Ainda no trecho da curva de 90 graus, a Fig. 49 contém as imagens dos escoamentos de um dos testes em que o *pig* ficou entalado após passar na segunda curva de 90 graus do *loop*. Esse caso apresentou um alto vazamento, quase que inundando completamente o trecho a frente, e bolhas de ar a jusante do equipamento. Esses comportamentos podem ser visualizados na Fig. 49(a), e também pode-se ver a deformação da bolha e o escoamento na lateral da parede na Fig. 49(b). Da mesma

forma que os casos citados, a parte a montante do *pig* não apresentou fenômenos visíveis, somente o trecho todo inundado com o fluido de trabalho.

Figura 49 – Imagens do escoamento na curva de 90 graus do lançamento do *pig* com modificações na vedação.

(a) Escoamento durante a entrada do *pig* na curva.



(b) Escoamento durante a passagem do *pig* na curva.



(c) Escoamento durante a saída do *pig* na curva.



Fonte: o próprio.

Também são apresentadas as imagens dos escoamentos obtidos no trecho reto de limpeza, que corresponde ao trecho de 7 polegadas. A Fig. 50 contém os escoamentos formados na frente do *pig* sem modificações. Nesse ensaio houve um alto volume que vazou

e pode ser visualizado chegando quase que na metade do tubo Fig. 50(a). A Fig. 50(b) contém a imagem dos vazamentos passando pela parede da tubulação. O equipamento demorou para chegar na cesta recebedora e apresentou descentralização, ficando a frente abaixada, dando espaço para o escoamento passar pelos vedadores frontais.

Figura 50 – Imagens do escoamento no trecho de limpeza de 7 polegadas referente ao lançamento do *pig* com modificações.

(a) Escoamento formado na frente do *pig* no trecho reto de limpeza.



(b) Escoamento formado logo na frente do *pig* no trecho reto de limpeza.



Fonte: o próprio.

A Figura 51 apresenta os escoamentos de um dos testes em que o *pig* com modificações apresentou um bom desempenho. Durante a passagem pelo trecho reto (Fig. 51(a)), houve vazamentos por causa de uma leve descentralização, mas não houve uma inundação tão alta como no caso anterior. Atrás do equipamento o escoamento formado não apresentou mudanças e encheu totalmente a tubulação (Fig. 51(b)). Os vedadores atuaram com um bom desempenho, uma vez que é possível verificar a parte traseira do *pig* ainda mantendo um pouco da vedação mesmo chegando na cesta recebedora (Fig. 51(c)).

Figura 51 – Imagens do escoamento no trecho de limpeza de 7 polegadas referente ao lançamento do *pig* com modificações.

(a) Escoamento formado na frente do *pig* no trecho reto de limpeza.



(b) Escoamento formado atrás do *pig* no trecho reto de limpeza.



(c) Escoamento formado atrás do *pig* na cesta recebedora.



Fonte: o próprio.

5 Conclusões

No presente trabalho foi realizado o estudo da velocidade que um *pig* de limpeza multidiâmetro de 4 à 8,5 polegadas pode atingir em trechos retos de quatro e sete polegadas, como também obtidos padrões de escoamentos que ocorrem em torno do equipamento. Esse estudo foi feito experimentalmente e teoricamente e esses resultados foram comparados. Um ponto de destaque nessa análise teórica é que o coeficiente de atrito total e a relação de áreas foram considerados dentro de um intervalo estimado. Já da parte experimental, além das velocidades médias obtidas, também foram observados os comportamentos dos escoamentos que são formados nas linhas com a passagem do equipamento.

Um dos grandes desafios da presente dissertação foi o de analisar o comportamento de um *pig* multidiâmetro. Esse tipo de *pig* deve ser capaz de se adequar em tubulações que variam de diâmetros, devendo manter sua centralização, vedação e ainda realizar sua função, que no presente caso é o de limpeza. Dessa forma, para verificar a viabilidade de prever a velocidade que o equipamento pode adquirir em trechos retos de 4 e 7 polegadas, foi feita uma análise teórica através da equação do movimento e foi considerado um intervalo de coeficientes de atrito e de razão de área de vazamento. Das simulações, verificou-se que a velocidade do *pig* começa a apresentar um comportamento constante em cerca de um segundo para a configuração de 1 módulo. O mesmo acontece para a configuração de 2 módulos, mas é observável que o sistema apresenta um comportamento oscilatório devido à rigidez do acoplamento, tendo uma velocidade para cada módulo, mas essas velocidades se equalizam após esse intervalo de tempo. Além disso, verificou-se que os valores dos coeficientes de atrito interferem com maior intensidade na configuração de 1 módulo, enquanto que a razão de áreas apresentaram maiores diferenças nos resultados da configuração de 2 módulos.

Dos ensaios experimentais, com relação às velocidades atingidas pelo *pig*, verifica-se que as mesmas apresentam um comportamento linear, que quanto maior a vazão, maior também será a velocidade do equipamento. A velocidade do *pig* não é igual ao à velocidade teórica do escoamento porque o sistema apresenta atrito e outras formas de perdas de energia. Um outro fator observado é que a pressão a montante do *pig* aumenta com o aumento da vazão. Com relação aos padrões de escoamento, percebe-se que o desempenho do equipamento pode ser relacionado com as formas que o escoamento acontece em torno do mesmo. Nos testes em que não haviam sido feitas modificações no *pig*, houve um alto volume vazando pela frente, e ainda, na curva de 90 graus, os jatos d'água eram visivelmente mais intensos e caóticos. No tubo reto de limpeza, o equipamento ficou descentralizado e apresentou altos vazamentos. Com as modificações realizadas, o *pig*

apresentou poucos vazamentos visíveis na curva de 90 graus e jatos d'água mais fracos, e no trecho reto, o mesmo ficou mais centralizado, mas ainda deixou passar um pouco do fluido. Assim, pôde-se perceber os diversos fenômenos relacionados com o escoamento em função do desempenho do *pig*. Deve-se destacar que analisando essa dinâmica, pode-se verificar como o escoamento influencia na deformação dos vedadores, assim como na centralização do *pig* no *loop*.

Comparando os resultados das velocidades teóricas com as experimentais, não foi encontrado um valor definido para os coeficientes de atrito, uma vez que para as vazões de 50 e 40 m^3/h a velocidade teórica mais próxima ficou com coeficiente de atrito de 10N/ms e razão de área de vazamento de 5%, enquanto que na vazão de 30 e 20 m^3/h , ficaram com 100N/ms e 5% 50N/ms e 10%, respectivamente. O mesmo aconteceu para a configuração de dois módulos.

Dessa forma, o estudo sobre velocidades teóricas e experimentais de um *pig* multidímetro e as análises do escoamento ao redor do mesmo resultaram em conclusões que proporcionaram visualizar certos comportamentos como centralização e vazamento do equipamento e as formas do escoamento, assim como também de obter uma estimativa da velocidade que o *pig* multidímetro ensaiado possa atingir em trechos retos. De forma geral, o protótipo testado nas condições discutidas apresentou um bom desempenho quanto à velocidade, uma vez que a velocidade do *pig*, nas duas maiores vazões, ficou próxima da velocidade do escoamento, sendo maior diferença de 24%. Outra condição é que as chances de sucesso de passagens foram altas, uma vez que em 21 testes rodados, somente em 1 caso o equipamento ficou estagnado.

Dentro desse contexto, um fator promissor a se investigar em trabalhos futuros é se o comportamento do *pig* multidímetro através de uma análise diferencial levando em consideração a interação de fluido e estrutura ponto a ponto é capaz de prever com mais precisão as velocidades do *pig* e também de verificar se os escoamentos que ocorrem ao redor do mesmo são semelhantes aos visualizados experimentalmente.

Referências

- ARILD, S.; Svein Bjarte, J.-H.; ARVE, V. Operational experience with introduction of a light oil into a heavy oil pipeline system. *Pipeline Simulation Interest Group*, p. 19, 2018. 40
- AZEVEDO, L. F. A.; BRAGA, A. M. B.; NIECKELE, A. O.; NACCACHE, M. F. *the Offshore Technology Conference held in Houston Texas*. [S.l.], 1996. 69 p. 24, 40
- BOGHI, A.; BROWN, L.; SAWKO, R.; THOMPSON, C. P. An inertial two-phase model of wax transport in a pipeline during pigging operations. *International Journal of Multiphase Flow*, Elsevier Ltd, v. 94, p. 17–30, 2017. ISSN 03019322. 40
- BOGHI, A.; BROWN, L.; SAWKO, R.; THOMPSON, C. P. A non-inertial two-phase model of wax transport in a pipeline during pigging operations. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, v. 165, p. 664–672, 2018. 22
- CANAVESE, G.; SCALTRITO, L.; FERRERO, S.; PIRRI, C.; COCUZZA, M.; PIROLA, M.; CORBELLINI, S.; GHIONE, G.; RAMELLA, C.; VERGA, F.; TASSO, A.; LULLO, A. D. A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection—part a: Design and laboratory characterization. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 127, p. 311 – 317, 2015. ISSN 0920-4105. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920410515000091>>. 44
- CORDELL, J.; VANZANT, H. *"The Pipeline Pigging Handbook"*. [S.l.: s.n.], 2002. v. 1. 19, 22, 23, 25, 26, 28, 31, 33, 34, 35
- CURVELO, E. V. *ESTUDO PARA PROJETO DE MÓDULO DISCRIMINADOR DE UM PIG MFL*. 44 p. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016. 38, 39
- DAVIDSON, R.; PIPELINE, H. *AN INTRODUCTION TO PIPELINE PIGGING*. [S.l.: s.n.], 2002. 22, 23, 24
- DONG, J.; ZHANG, H.; LIU, S. 3D printed bio-inspired sealing disc of pipeline inspection gauges (PIGs) in small diameter pipeline. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2019. ISSN 18755100. 40
- DUGMORE, K.; JONSON, D.; WALKER, M. A comparison of signal consistency of common ultrasonic couplants used in the inspection of composite structures. *Composite structures*, Elsevier, v. 58, n. 4, p. 601–603, 2002. 28
- EGE, Y.; CORAMIK, M. A new measurement system using magnetic flux leakage method in pipeline inspection. *Measurement*, Elsevier, v. 123, p. 163–174, 2018. 27
- ESMAEILZADEH, F.; MOWLA, D.; ASEMAN, M. Mathematical modeling and simulation of pigging operation in gas and liquid pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering - J PET SCI ENGINEERING*, v. 69, p. 100–106, 11 2009. 24

- FALCK, C.; SVENDSEN, C.; O'DONOGHUE, A. *Multi diameter pigging for Åsgard. Commissioning and pigging the 710km 42"x 28" Åsgard Pipeline*. [S.l.], 2000. 1–16 p. 40, 41, 42
- HEIJER, A. D. *Frictional behaviour of pigs in motion*. 139 p. Tese (Master's degree program) — Delft University of Technology, 2016. Disponível em: <<http://repository.tudelft.nl/>> 40
- HENDRIX, M. H.; GRAAFLAND, C. M.; OSTAYEN, R. A. van. Frictional forces for disc-type pigging of pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 171, p. 905–918, 2018. ISSN 09204105. 44
- HILTSCHER, G.; MÜHLTHALER, W.; JÖRG, S. *Industrial pigging technology: fundamentals, components, applications*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006. 23, 31
- INLINE. *Pig Manufacturing - Pipeline Pigging Products Supplier | Inline Services*. 2018. Disponível em: <inlineservices.com/services/budgeting-planning-design/>. 30, 31
- LESANI, M.; RAFEEYAN, M.; SOHANKAR, A. Dynamic Analysis of Small Pig through Two and Three- Dimensional Liquid Pipeline. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, v. 5, n. 2, p. 1735–3645, 2012. Disponível em: <www.jafmonline.net,>. 39
- LIANG, Z.; HE, H.; CAI, W. Speed simulation of bypass hole pig with a brake unit in liquid pipe. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 42, p. 40–47, 2017. 46, 49
- LIMA, G.; FREITAS, V.; ARAÚJO, R.; MAITELLI, A.; SALAZAR, A. Pig's speed estimated with pressure transducers and hall effect sensor: An industrial application of sensors to validate a testing laboratory. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 17, n. 9, p. 2119, 2017. 45
- MAZREAH, A. A.; ALNAIMI, F. B. I.; SAHARI, K. S. M. Novel design for pig to eliminate the effect of hydraulic transients in oil and gas pipelines. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Elsevier, v. 156, p. 250–257, 2017. 19
- MINAMI, K.; SHOHAM, O. Pigging dynamics in two-phase flow pipelines: Experiment and modeling. *SPE Production and Facilities*, v. 10, n. 4, p. 225–231, 1995. ISSN 1064668X. 43
- MIRSHAMSI, M.; RAFEEYAN, M. Speed Control of Pipeline Pig Using the QFT Method. *Oil & Gas Science and Technology-Rev. IFP Energies nouvelles*, v. 67, n. 4, p. 693–701, 2012. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01936505>>. 40, 46
- MIRSHAMSI, M.; RAFEEYAN, M. Dynamic analysis and simulation of long pig in gas pipeline. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 23, p. 294 – 303, 2015. ISSN 1875-5100. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510015000621>>. 19, 22, 49
- MUSHIRI, T.; NDLOVU, S.; PLEASANT, M.; ZIMBABWE, H.; MBOHWA, C. Design of a mechanical cleaning device P.I.G (pipeline intervention gadget) connecting two transfer lines in Zimbabwe. In: *Proceeding of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Detroit: [s.n.], 2016. 38

- NGUYEN TANBONG KIM, S. T.; YOO, H. R.; RHO, Y. W. Modeling and Simulation for PIG Flow Control in Natural Gas Pipeline. *KSME International Journal*, v. 15, n. 8, p. 1165–1173, 2001. 39
- NIECKELE, A. O.; BRAGA, A. M.; AZEVEDO, L. F. Transient pig motion through gas and liquid pipelines. *Journal of Energy Resources Technology, Transactions of the ASME*, v. 123, n. 4, p. 260–269, 2001. ISSN 15288994. 47, 48
- O'DONOGHUE, A. Why pigs get stuck, and how to avoid it. *Pipes & pipelines international*, Scientific Surveys, v. 48, n. 2, p. 5–16, 2003. 20, 33, 35, 36, 37
- O'DONOGHUE, A. *MODELLING PIG TRAIN DYNAMICS IN NATURAL GAS PIPELINES*. [S.l.], 2012. 39
- OLANIYAN, Y.; LARREY, D. Bypass pig modeling-a three phase gas condensate pipeline field case. In: BHR GROUP. *9th North American Conference on Multiphase Technology*. [S.l.], 2014. 22, 28
- PATRICIO, R.; SONDERMANN, C.; FIGUEREIDO, A.; RACHID, F.; BODSTEIN, G. NUMERICAL SIMULATION OF PIG MOTION IN GAS-FLOW PIPELINES USING THE FLUX-CORRECTED TRANSPORT METHOD. In: ENGINEERING, t. B. C. o. T. S. and (Ed.). Vitória: [s.n.], 2016. p. 8. ISBN 0.001375121. 39
- RAMELLA, C.; CANAVESE, G.; CORBELLINI, S.; PIROLA, M.; COCUZZA, M.; SCALTRITO, L.; FERRERO, S.; PIRRI, C. F.; GHIONE, G.; ROCCA, V.; TASSO, A.; LULLO, A. D. A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection - Part B: Field test and data processing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 133, p. 771–775, 2015. ISSN 09204105. 44
- ROSENGROUP. *MULTI DIAMETER TECHNOLOGY IN-LINE INSPECTION SERVICES FOR PIPELINES WITH VARYING DIAMETER*. [S.l.], 2013. 2 p. Disponível em: <www.rosen-group.com>. 24
- ROSENGROUP. *ROCORR MFL-C SERVICE IN-LINE HIGH RESOLUTION METAL LOSS AND NARROW AXIAL FEATURE ANALYSIS*. [S.l.], 2013. 2 p. Disponível em: <www.rosen-group.com>. 31, 32
- ROSENGROUP. *IN-LINE HIGH RESOLUTION METAL LOSS*. [S.l.], 2016. 2 p. 32
- ROSENGROUP. *Case study - inventive solution for a crucial asset tailored approach for jet fuel feeder line*. 2018. Disponível em: <<https://www.rosen-group.com/global/solutions/industry-case-studies/oil-gas/Case-Study-Inventive-solution-for-a-crucial-asset.html>>. 22, 24
- ROSENGROUP. *Case study - Rosen proves cleaning expertise cleaning expertise in challenging pre-commissioning solution*. 2018. Disponível em: <<https://www.rosen-group.com/global/solutions/industry-case-studies/oil-gas/Cleaning-Expertise-in-Challenging-Pre-commissioning-Solution.html>>. 23, 28, 29
- SADEGHI, M. H.; CHITSAZ, S.; ETTEFAGH, M. M. Effect of PIG's physical parameters on dynamic behavior of above ground pipeline in pigging operation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, v. 132, p. 692–720, 2019. ISSN 08883270. 44

- SAEIDBAKHS, M.; RAFEEYAN, M.; ZIAEI-RAD, S. Dynamic analysis of small pigs in space pipelines. *Oil and Gas Science and Technology*, v. 64, n. 2, p. 155–164, mar 2009. ISSN 12944475. 39
- SOORGEE, M. H. A numerical study on differential pressure needed for ball pig motion in pipelines based on nonlinear hyperelastic material model. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018. ISSN 18755100. 39
- TENARIS. *Risers – Tubos offshore - Tenaris*. 2019. Disponível em: <<http://www.tenaris.com/pt-BR/Products/OffshoreLinePipe/Risers.aspx>>. 37
- TENNYSON, R. C.; MORISON, D. Long gage-length fiber optic sensors for monitoring pipeline integrity. In: INTERNATIONAL SOCIETY FOR OPTICS AND PHOTONICS. *Smart Structures and Materials 2006: Smart Sensor Monitoring Systems and Applications*. [S.l.], 2006. v. 6167, p. 61671C. 27
- TIRATSOO, J. N. *Pipeline pigging technology*. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 1992. 13, 19, 22, 24, 26, 33, 34
- VIK, M. A.; KRISTIANSEN, A. Å.; SYKES, S.; HUTCHESON, S.; O'DONOGHUE, A. *Multi-diameter, bi-directional pigging for pipeline pre-commissioning*. [S.l.], 2010. 1–15 p. 25, 42, 43
- WILLIAMSON, T. D. *Why Pig a Pipeline*. 2019. Disponível em: <<http://blog.tdwilliamson.com/why-pig-a-pipeline>>. 27
- ZHANG, H.; SANCHEZ, C.; LIU, S.; ZHANG, S.; LIANG, H. Wear of a polyurethane rubber used in dry gas pipeline as inspection gauges. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v. 41, p. 40 – 48, 2017. ISSN 1875-5100. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1875510017300884>>. 24, 39
- ZHANG, H.; ZHANG, S.; LIU, S.; WANG, Y. Collisional vibration of pigs (pipeline inspection gauges) passing through girth welds in pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Elsevier, v. 37, p. 15–28, 2017. 23

Apêndices

APÊNDICE A – Apêndice A - Código

Scilab: Configuração de 1 Módulo

A seguir é possível verificar o código utilizado para realizar as simulações do *pig*. Inicialmente são computados os parâmetros a serem utilizados, as constantes que são calculadas a partir desses parâmetros, as equações diferenciais a serem resolvidas e a estrutura do algoritmo para resolver essas equações. O passo a passo pode ser verificado nos comentários do código. Os parâmetros considerados como "Parâmetro de análise" são constantes que foram estimadas para o problema.

```

////////////////////////////////////
// Código para a resolução das equações diferenciais ///
////////// Configuração para 1 Módulo - Pig //////////
//
//
//Constantes do problema: (Inserção das constantes conhecidas)
//Massa do Pig
    m=7.524 // kg
//Atrito viscoso (Pig e fluido)
    C=0 //
//Atrito fricção (Pig e tubulação) (Parâmetro de análise)
    fc1=10 //
    fc2=50 //
    fc3=100 //
//Diâmetro da tubulação
    d=0.1013 //m
//Razão de áreas (Av/A) (Parâmetro de análise)
    b1=0.05 //-
    b2=0.1 //-
    b3=0.2 //-
//Constante de perda localizada do Pig
    Kp1=(1.42-b1^2)*(1-b1^2) // -
    Kp2=(1.42-b2^2)*(1-b2^2) // -
    Kp3=(1.42-b3^2)*(1-b3^2) // -
//Massa específica do fluido
    rho=998.2 //kg/m^3

```

```
//Vazão de trabalho
Q=20/3600 //m^3/h

//Constantes derivadas:
//Área da secção transversal
A=(%pi*d^2)/4
//Velocidade do escoamento
u=Q/A

//Equação Diferencial (Estrutura da equação diferencial)

//Funções
function vdot=fv1(t, v)
    vdot=((Kp1*rho*A)/(2*m*b1^2))*(u-v)^2-((C+fc1))/m*v
endfunction

function vdot=fv2(t, v)
    vdot=((Kp1*rho*A)/(2*m*b1^2))*(u-v)^2-((C+fc2))/m*v
endfunction

function vdot=fv3(t, v)
    vdot=((Kp1*rho*A)/(2*m*b1^2))*(u-v)^2-((C+fc3))/m*v
endfunction

function vdot=fv21(t, v)
    vdot=((Kp2*rho*A)/(2*m*b2^2))*(u-v)^2-((C+fc1))/m*v
endfunction

function vdot=fv22(t, v)
    vdot=((Kp2*rho*A)/(2*m*b2^2))*(u-v)^2-((C+fc2))/m*v
endfunction

function vdot=fv23(t, v)
    vdot=((Kp2*rho*A)/(2*m*b2^2))*(u-v)^2-((C+fc3))/m*v
endfunction

function vdot=fv31(t, v)
    vdot=((Kp3*rho*A)/(2*m*b3^2))*(u-v)^2-((C+fc1))/m*v
endfunction
```

```
function vdot=fv32(t, v)
    vdot=((Kp3*rho*A)/(2*m*b3^2))*(u-v)^2-((C+fc2))/m*v
endfunction

function vdot=fv33(t, v)
    vdot=((Kp3*rho*A)/(2*m*b3^2))*(u-v)^2-((C+fc3))/m*v
endfunction

//Condições iniciais*
v0=0
t0=0
//Tempo
t=0:0.001:2//s

//Solução (Algoritmo para a solução das equações diferenciais)
v1=ode("rk",v0,t0,t,fv1)
v2=ode("rk",v0,t0,t,fv2)
v3=ode("rk",v0,t0,t,fv3)

v21=ode("rk",v0,t0,t,fv21)
v22=ode("rk",v0,t0,t,fv22)
v23=ode("rk",v0,t0,t,fv23)

v31=ode("rk",v0,t0,t,fv31)
v32=ode("rk",v0,t0,t,fv32)
v33=ode("rk",v0,t0,t,fv33)

//Gráfico da função (Estrutura para plotar as soluções
geradas em forma de gráfico)
plot((t,v1),'b:', 'LineWidth',2.5)
plot((t,v2),'r:', 'LineWidth',2.5)
plot((t,v3),'k:', 'LineWidth',2.5)

plot((t,v21),'b', 'LineWidth',2.5)
plot((t,v22),'r', 'LineWidth',2.5)
plot((t,v23),'k', 'LineWidth',2.5)

plot((t,v31),'b--', 'LineWidth',2.5)
```

```
plot((t,v32),'r--','LineWidth',2.5)
plot((t,v33),'k--','LineWidth',2.5)

L=legend('$f_{c}+C=10 (Ns/m) ;
\frac{A_{leak}}{A}=0.05$', '$f_{c}+C=50 (Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.05$', '$f_{c}+C=100 (Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.05$', '$f_{c}+C=10 (Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.10$', '$f_{c}+C=50 (Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.10$', '$f_{c}+C=100 (Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.10$', '$f_{c}+C=10 (Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.20$', '$f_{c}+C=50(Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.20 $', '$f_{c}+C=100(Ns/m);
\frac{A_{leak}}{A}=0.20 $')

L.font_size=3

//xgrid()

xlabel('$Time \quad (s)$', 'FontSize',4)
ylabel('$v_{pig}\quad (m/s)$', 'FontSize',4)

//title('$ v_{pig}\quad (m/s)$', 'FontSize',4)
```

APÊNDICE B – Apêndice B - Código

Scilab: Configuração de 2 Módulos

A seguir é possível verificar o código utilizado para realizar as simulações do *pig*. Inicialmente são computados os parâmetros a serem utilizados, as constantes que são calculadas a partir desses parâmetros, as equações diferenciais a serem resolvidas e a estrutura do algoritmo para resolver essas equações. O passo a passo pode ser verificado nos comentários do código. A estrutura de todo o código é bastante semelhante a de um módulo, sendo diferente somente por ser um sistema de duas equações diferenciais e não somente uma. Entretanto, o algoritmo para resolver esse sistema é escrito da mesma forma que de um módulo, mas é acrescentada a outra equação correspondente.

```

////////////////////////////////////
// Código para a resolução das equações diferenciais //
///////// Configuração para 2 Módulos - Pig ///////////
//
//
//Variáveis
//Massa do Pig
    m1=5.389 //kg
    m2=2.135
//Atrito viscoso (Pig e fluido)
    C=0 //
//Atrito fricção (Pig e tubulação)
    fc1=10 //
    fc2=50 //
    fc3=100 //
//Diâmetro da tubulação
    d=0.1013 //m
//Razão de áreas (Av/A)
    b1=0.05 //-
    b2=0.1 //-
    b3=0.2 //-
//Constante de perda localizada do Pig
    Kp1=(1.42-b1^2)*(1-b1^2) // -
    Kp2=(1.42-b2^2)*(1-b2^2) // -

```

```

    Kp3=(1.42-b3^2)*(1-b3^2) // -
//Massa específica do fluido
    rho=998.2 //kg/m^3
//Vazão de trabalho
    Q=20/3600 //m^3/h
//Rigidez do acoplamento
    k=287979326 //N/m
//Pressão atmosférica
    p2=101325 //Pa

//Constantes derivadas:
//Área
    A=%pi*(d^2)/4
//Velocidade teorica do escoamento
    u=Q/A //m/s

//Equação Diferencial (Sistema de equações diferenciais)
//Função
//f1
    function ydot=fv1(t, y)
        ydot(1)=((Kp1*rho*A)/(2*m1*b1^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
        k/m1*y(4)-(C+fc1)/m1*y(1)+p2*A/m1
        ydot(2)=y(1)
        ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc1)/m2*y(3)-p2*A/m2
        ydot(4)=y(3)
    endfunction

    function ydot=fv2(t, y)
        ydot(1)=((Kp2*rho*A)/(2*m1*b2^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
        k/m1*y(4)-(C+fc1)/m1*y(1)+p2*A/m1
        ydot(2)=y(1)
        ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc1)/m2*y(3)-p2*A/m2
        ydot(4)=y(3)
    endfunction

    function ydot=fv3(t, y)
        ydot(1)=((Kp3*rho*A)/(2*m1*b3^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
        k/m1*y(4)-(C+fc1)/m1*y(1)+p2*A/m1
        ydot(2)=y(1)

```

```

        ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc1)/m2*y(3)-p2*A/m2
        ydot(4)=y(3)
    endfunction

//f2
function ydot=fv21(t, y)
    ydot(1)=((Kp1*rho*A)/(2*m1*b1^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
    k/m1*y(4)-(C+fc2)/m1*y(1)+p2*A/m1
    ydot(2)=y(1)
    ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc2)/m2*y(3)-p2*A/m2
    ydot(4)=y(3)
endfunction

function ydot=fv22(t, y)
    ydot(1)=((Kp2*rho*A)/(2*m1*b2^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
    k/m1*y(4)-(C+fc2)/m1*y(1)+p2*A/m1
    ydot(2)=y(1)
    ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc2)/m2*y(3)-p2*A/m2
    ydot(4)=y(3)
endfunction

function ydot=fv23(t, y)
    ydot(1)=((Kp3*rho*A)/(2*m1*b3^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
    k/m1*y(4)-(C+fc2)/m1*y(1)+p2*A/m1
    ydot(2)=y(1)
    ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc2)/m2*y(3)-p2*A/m2
    ydot(4)=y(3)
endfunction

//f3
function ydot=fv31(t, y)
    ydot(1)=((Kp1*rho*A)/(2*m1*b1^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
    k/m1*y(4)-(C+fc3)/m1*y(1)+p2*A/m1
    ydot(2)=y(1)
    ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc3)/m2*y(3)-p2*A/m2
    ydot(4)=y(3)
endfunction

function ydot=fv32(t, y)
    ydot(1)=((Kp2*rho*A)/(2*m1*b2^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+

```

```

    k/m1*y(4)-(C+fc3)/m1*y(1)+p2*A/m1
    ydot(2)=y(1)
    ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc3)/m2*y(3)-p2*A/m2
    ydot(4)=y(3)
endfunction

function ydot=fv33(t, y)
    ydot(1)=((Kp3*rho*A)/(2*m1*b3^2))*(u-y(1))^2-k/m1*y(2)+
    k/m1*y(4)-(C+fc3)/m1*y(1)+p2*A/m1
    ydot(2)=y(1)
    ydot(3)=-k/m2*y(4)+k/m2*y(2)-(C+fc3)/m2*y(3)-p2*A/m2
    ydot(4)=y(3)
endfunction

//Condições iniciais
y0=[0;0;0;0]
t0=0

//Tempo
//t=0:0.00001:5//s
t=0:0.0001:2//s

//Solução
y1=ode("rk",y0,t0,t,fv1)
y2=ode("rk",y0,t0,t,fv2)
y3=ode("rk",y0,t0,t,fv3)

y21=ode("rk",y0,t0,t,fv21)
y22=ode("rk",y0,t0,t,fv22)
y23=ode("rk",y0,t0,t,fv23)

y31=ode("rk",y0,t0,t,fv31)
y32=ode("rk",y0,t0,t,fv32)
y33=ode("rk",y0,t0,t,fv33)

//Gráfico da função
plot(t,y1(1,:), 'r:', 'LineWidth', 2)

```

```

plot(t,y1(3,:), 'k:', 'LineWidth', 2)

plot(t,y2(1,:), 'r', 'LineWidth', 2)
plot(t,y2(3,:), 'k', 'LineWidth', 2)

plot(t,y3(1,:), 'r--', 'LineWidth', 2)
plot(t,y3(3,:), 'k--', 'LineWidth', 2)

plot(t,y21(1,:), 'b:', 'LineWidth', 2)
plot(t,y21(3,:), 'y:', 'LineWidth', 2)

plot(t,y22(1,:), 'b', 'LineWidth', 2)
plot(t,y22(3,:), 'y', 'LineWidth', 2)

plot(t,y23(1,:), 'b--', 'LineWidth', 2)
plot(t,y23(3,:), 'y--', 'LineWidth', 2)

plot(t,y31(1,:), 'm:', 'LineWidth', 2)
plot(t,y31(3,:), 'g:', 'LineWidth', 2)

plot(t,y32(1,:), 'm', 'LineWidth', 2)
plot(t,y32(3,:), 'g', 'LineWidth', 2)

plot(t,y33(1,:), 'm--', 'LineWidth', 2)
plot(t,y33(3,:), 'g--', 'LineWidth', 2)

//xgrid()

xlabel('$Time \quad (s)$', 'FontSize', 4)
ylabel('$\frac{dx_1}{dt} \quad \text{and} \quad \frac{dx_2}{dt} \quad (m/s)$', 'FontSize', 4)

//title('$Velocidade \quad \text{do} \quad \text{Pig}$', 'FontSize', 4)
L=legend('$Mod1-f_{c}+C=10 \quad (Ns/m) \quad ; \quad \frac{A_{leak}}{A}=0.05$',
'$Mod2-f_{c}+C=10 \quad (Ns/m) \quad ; \quad \frac{A_{leak}}{A}=0.05$', '$Mod1-f_{c}+C=50 \quad (Ns/m); \quad \text{quad}''$',
'$Mod2-f_{c}+C=50 \quad (Ns/m); \quad \text{quad}''$', '$Mod1-f_{c}+C=100 \quad (Ns/m); \quad \text{quad}''$',

```

```

'$Mod2-f_{c}+C=100 (Ns/m); \quad''$',
'$Mod1-f_{c}+C=10 (Ns/m) ; \frac{A_{leak}}{A}=0.1$',
'$Mod2-f_{c}+C=10 (Ns/m) ;
\frac{A_{leak}}{A}=0.1$', '$Mod1-f_{c}+C=50 (Ns/m); \quad''$',
'$Mod2-f_{c}+C=50 (Ns/m); \quad''$',
'$Mod1-f_{c}+C=100 (Ns/m); \quad''$', '$Mod2-f_{c}+C=100 (Ns/m); \quad''$',
'$Mod1-f_{c}+C=10 (Ns/m) ;
\frac{A_{leak}}{A}=0.2$', '$Mod2-f_{c}+C=10 (Ns/m) ; \frac{A_{leak}}{A}=0.2$',
'$Mod1-f_{c}+C=50 (Ns/m);
\quad''$', '$Mod2-f_{c}+C=50 (Ns/m); \quad''$',
'$Mod1-f_{c}+C=100 (Ns/m); \quad''$',
'$Mod2-f_{c}+C=100 (Ns/m); \quad''$')

```

L.font_size=3