

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA
FONSECA – CEFET/RJ

Estudo Numérico-Experimental de Detecção de
Bloqueios em Linhas de Gás utilizando Reflectometria
Acústica

Camila Araujo Gomes
Carlos Fernando Soares Fernandes

Prof. Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Rio de Janeiro
Dezembro de 2017

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Estudo Numérico-Experimental de Detecção de
Bloqueios em Linhas de Gás utilizando
Reflectometria Acústica**

Camila Araujo Gomes
Carlos Fernando Soares Fernandes

Projeto final apresentado em
Cumprimento às normas do Departamento
de Educação Superior do CEFET/RJ,
como parte dos pré-requisitos para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

G633 Gomes, Camila Araujo
Estudo numérico-experimental de detecção de bloqueios em
linhas de gás utilizando reflectometria acústica / Camila Araujo
Gomes, Carlos Fernando Soares Fernandes.—2017.
ix, 62f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.

Bibliografia : f. 60-62

Orientadora : Luciana Loureiro da Silva Monteiro

1. Engenharia mecânica. 2. Reflectometria acústica. 3. Análise
numérica. 4. Tubulação. I. Fernandes, Carlos Fernando Soares. II.
Monteiro, Luciana Loureiro da Silva (Orient.). III. Título.

CDD 621

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pelo dom da vida, pela família que me deu e pela força que me proporcionou, não me deixando cair, mesmo em meio a tantas tribulações e provações e à minha família, que forma a base para o que sou hoje, e em especial ao meu pai, meu principal modelo.

Agradeço a Professora Luciana Loureiro, que desde o começo aceitou nos orientar neste trabalho, por sua paciência, compreensão, disponibilidade e profissionalismo. Também, aos professores Paulo Cesar da Câmara e Theodoro Antoun Netto, por me receberem no Laboratório de Tecnologia Submarina, na COPPE/UFRJ, permitindo que usássemos a estrutura do laboratório para os ensaios experimentais deste trabalho. Além disso, agradeço aos técnicos do laboratório, que prontamente se dispuseram a ajudar na execução dos testes.

Agradeço à Camila Araujo pela amizade e auxílio durante este trabalho, foi um prazer ajudá-la a concluir esta etapa. Também, a todos os amigos que se fizeram presentes na minha trajetória no CEFET desde 2008 e aos professores do Depto. De Engenharia Mecânica e do Curso Técnico em Mecânica, que ajudaram a formar meu caráter profissional.

Carlos Fernandes

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família que, apesar de tantas dificuldades, apoiou meus estudos e fizeram com que se tornasse prioridade na minha vida e na vida deles.

Agradeço a Professora Luciana Loureiro por aceitar nos orientar e participar desse momento tão ímpar nas nossas vidas. Por ser tão presente e nos ajudar nos momentos de dúvida e dificuldade. E por todo profissionalismo que demonstrou durante todo esse trabalho.

Sou grata a equipe técnica do Laboratório de Tecnologia Submarina que permitiu a utilização da estrutura do laboratório para a realização dos ensaios experimentais do nosso trabalho.

Ao meu namorado Luiz Rocha por toda a paciência, ajuda e amor que sempre me dedicou e que me impulsionou durante todo esse ano. Todos os conselhos e horas de estudos foram muito importantes na minha formação.

Ao meu parceiro Carlos Fernandes pelo companheirismo e amizade nessa etapa das nossas vidas. Que possamos sempre ter sucesso nas nossas empreitadas.

Também as minhas amigas do CEFET/RJ que trilharam esse longo caminho comigo e aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram com a minha chegada até aqui, a contribuição de cada um de vocês foi essencial e serei sempre grata.

Camila Araujo

RESUMO

A detecção de bloqueios em tubulações de gás torna-se importante a partir do momento em que, para dutos em locais de difícil acesso, a análise se torna cara e arriscada a partir da utilização de técnicas convencionais de inspeção ou que necessitam de acesso ao local, além da necessidade de equipamentos muito sofisticados.

Um dos maiores problemas relacionados ao transporte e produção de petróleo é a ocorrência da formação de depósitos na parede interna dos dutos. Com a crescente demanda de exploração em águas cada vez mais profundas, problemas associados a depósitos de parafina, incrustações e hidratos nas tubulações se tornam cada vez mais comuns devido aos grandes gradientes de pressão e temperatura. A gravidade da diminuição, ou até mesmo interrupção do escoamento de fluido, nestas condições, pode gerar consequências como o aumento da pressão na tubulação, diminuição ou interrupção da vazão e problemas nos sistemas fluidomecânicos de transporte. Tais consequências podem ser desastrosas em âmbito econômico e ambiental, como danos permanentes às linhas e perda de material, além de custos com manutenção e inspeção frequentes, e vazamentos.

Desta forma, a técnica de reflectometria acústica mostra-se como uma interessante alternativa às técnicas atuais devido a sua praticidade, facilidade de operação e custo, sendo necessário, além de analisar a técnica, analisar diferentes condições de serviço que possam possibilitar a identificação de problemas durante o escoamento ou com este interrompido, para que assim possa ser confirmada como uma técnica efetiva na detecção de bloqueios em dutos. Assim, é proposto o desenvolvimento de um aparato experimental composto de um tubo, uma fonte acústica e microfones para identificar diferentes tipos de bloqueios utilizando as reflexões acústicas. Concomitantemente, utilizando o modelo numérico já obtido anteriormente, será explorada a técnica para uma tubulação com diferentes percentagens de bloqueios com relação ao diâmetro original do tubo.

ABSTRACT

The detection of blockages in gas pipeline becomes important as, for pipeline in hard-to-reach locations, the analysis becomes expensive and risky for the use of conventional inspection techniques or the ones that require access to the site, as well as the need of high sophisticated equipment.

One of the biggest problems related to the oil transportation and production is the occurrence of the formation of deposits in the inner walls of the piping systems. With the increasing demand for more and more deepwater exploration, issues associated with paraffin deposit, inlays and hydrates in piping systems become increasingly common due to the large pressure and temperature gradients. The severity of decrease or even interruption of the flow under these conditions can lead to consequences as the increase of the pipe pressure, reduction or interruption of the fluid flow rate and general damage in the fluid pumping systems. Such consequences can be disastrous in economic and environmental terms, such as permanent damage in pipelines and loss of material, as well as frequent maintenance and inspection costs and mainly leakage.

Thus, the acoustic reflectometry technique is shown as an interesting alternative to the current techniques due to its practicality, ease of operation and costs, being necessary, in addition to analyzing the technique, to analyze different service conditions that may allow the identification of problems during flow or with its interruption, so that it can be confirmed as an effective technique in the detection of blockages in pipeline. In this way, it is proposed the development of an experimental apparatus composed of a pipe, an acoustic source and microphones to identify different kinds of blockage using acoustic reflectometry. Concurrently, using the previous numerical model, the technique will be explored for different line configurations and geometries with varying percentage blockage with respect to the original pipe diameter.

Sumário

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 OBJETIVO.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 FORMAÇÃO DE INCRUSTAÇÕES E BLOQUEIOS	4
2.1.1 PARAFINAS.....	4
2.1.2 HIDRATOS.....	6
2.1.3 INCRUSTAÇÕES	7
2.2 REFLECTOMETRIA ACÚSTICA – DESENVOLVIMENTO PRÉVIO E APLICAÇÕES	8
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	16
3.1 INTRODUÇÃO À ACÚSTICA	16
3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS EM DUTOS	19
4. METODOLOGIA	24
4.1 TESTES EXPERIMENTAIS	24
5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	31
5.1 ENSAIO SEM BLOQUEIOS.....	31
5.2 ENSAIOS COM BLOQUEIOS.....	36
5.2.1 ENSAIOS COM 10% DE BLOQUEIO.....	36
5.2.2 ENSAIOS COM 25% DE BLOQUEIO.....	39
5.2.3 ENSAIOS COM 50% E 75% DE BLOQUEIO.....	42
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS (MICROFONE 1).....	45
5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS (MICROFONE 2).....	46
5.5 ANÁLISE NO DOMÍNIO DE FREQUÊNCIA DE SINAIS.....	47
6. ANÁLISE NUMÉRICA	50
6.1 DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO.....	50
6.2 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA.....	51
6.3 ESTUDO NUMÉRICO DE MODELO SEM BLOQUEIO	53
6.4 ESTUDO NUMÉRICO DE MODELO COM 50% DE OBSTRUÇÃO	54
7. CONCLUSÕES.....	57
8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

Lista de Figuras

Figura 1: Formação de depósito de parafina (Saraceno, 2007) Adaptado	5
Figura 2: Formação de hidrato em uma tubulação (Zarinabadi & Samimi, 2012).....	6
Figura 3: Moléculas de gás (hóspede) e moléculas de água (hospedeiro) (Zarinabadi & Samimi, 2012) Adaptado	7
Figura 4: Aparato de emissão de pulso e aquisição de dados (Teele et al, 1984).....	9
Figura 5: Sinal acústico de referência (Papadopoulou et al., 2008).....	11
Figura 6: Medição obtida após emissão de pulso para detecção de um furo (Papadopoulou et al., 2008) Adaptado.....	12
Figura 7: Sistema de tubulação de gás, com ramificações e um furo. Comprimento: 39,84 m (Papadopoulou et al., 2008) Adaptado.....	12
Figura 8: Esquema do reflectômetro utilizado no trabalho (DB Sharp et al., 1997) Adaptado.....	13
Figura 9: Água superficial de uma lagoa gerando ondas quando excitada (Carvalho, 2006).....	17
Figura 10: Oscilação harmônica (Kuttruff, 2006) Adaptado	17
Figura 11: Amplitude da onda (Kuttruff, 2006) Adaptado	18
Figura 12: Comprimento da onda (Kuttruff, 2006) Adaptado.....	18
Figura 13: Tubo cilíndrico em coordenadas polares. (McGill) Adaptado	19
Figura 14: Reflexão de uma descontinuidade simples (Sharp, 1996).....	21
Figura 15: Relação de Proporção entre as magnitudes e a Relação das áreas.....	22
Figura 16: Modelo em 3D da tubulação testada, incluindo alto-falante no início da linha, spools e trechos retos de 3 (trechos menores) e de 6 (trechos maiores) metros de comprimento.....	25
Figura 17: Spool inserido entre trechos de 6 metros de tubo – onde foram inseridos os bloqueios	25
Figura 18: Diagrama esquemático da tubulação e do aparato de testes montado.....	26
Figura 19: Inserções de parafina, para simulação dos bloqueios, por ordem: 75%, 50%, 25% e 10% de obstrução de área	27
Figura 20: Vista superior, para melhor visualização da área de bloqueio, por ordem: 75%, 50%, 25% e 10% de obstrução de área	27
Figura 21: Gerador de funções Tektronix AFG 3021B	28
Figura 22: Amplificador de sinais TS-800X4	28
Figura 23: Sistema de alta taxa de aquisição de dados NI PXIe-1071, National Instruments.....	29
Figura 24: Tela de aquisição de dados do software Signal Express, da National Instruments.....	30
Figura 25: Resultado para o teste sem bloqueios - Pressão x Distância	32
Figura 26: Resultado mostrando o tempo de reflexão do pulso	33
Figura 27: Sinal transmitido, captado ao fim da tubulação – cerca de 80 metros.....	34
Figura 28: Gráfico obtido para 1,0 ms - mesmas distâncias, porém maior pressão	35
Figura 29: Comparação entre 0,5 ms e 1,0 ms - aumento no nível de pressão captado para 1,0 ms.....	36
Figura 30: Bloqueio de 10% com ondas de 0,5ms e 1,0ms sendo transmitidas	37

Figura 31: Bloqueio de 10% com ondas de 2,0ms e 3,0ms sendo transmitidas	37
Figura 32: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 10% captado pelo microfone 1	38
Figura 33: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 10% captado pelo microfone 2	39
Figura 34: Bloqueio de 25% com ondas de 0,5 ms e 1,0 ms.....	40
Figura 35: Bloqueio de 25% com ondas de 2,0 ms e 3,0 ms sendo transmitidas	40
Figura 36: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 25% captado pelo microfone 1	41
Figura 37: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 25% captado pelo microfone 2	42
Figura 38: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 50% captado pelo microfone 1	43
Figura 39: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 75% captado pelo microfone 1	43
Figura 40: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 50% captado pelo microfone 2	44
Figura 41: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 75% captado pelo microfone 2	44
Figura 42: Gráfico com as pressões máximas de cada bloqueio em cada duração de onda	45
Figura 43: Gráfico com as pressões máximas de cada bloqueio em cada duração de onda	47
Figura 44: Sinais refletidos pelas obstruções no domínio da frequência	48
Figura 45: Sinais refletidos pelas obstruções no domínio da frequência até 300 Hz	49
Figura 46: Malha utilizada no modelo	51
Figura 47: Resultado obtido no estudo de convergência da malha no tempo.....	52
Figura 48: Comparação entre os resultados experimental e numérico, para um ensaio sem obstrução, com comprimento de onda de 1,0 ms.....	53
Figura 49: Onda de pressão avançando pela seção transversal do duto.....	54
Figura 50: Comparação entre os resultados experimental e numérico, para um ensaio com obstrução de 50% de área, com comprimento de onda de 1,0 ms.....	55
Figura 51: Parte da onda sendo refletida pelo bloqueio e outra parte da onda, com menor intensidade, avançando através do bloqueio de 50% de área.....	55
Figura 52: Área de reflexão do bloqueio de 50% da seção do duto, correlacionando o resultado experimental com o resultado numérico.....	56

1. INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na área de exploração e produção de petróleo e gás tem permitido condições de produção em condições operacionais cada vez mais severas, como, por exemplo, profundidades cada vez maiores. Por esse motivo, a avaliação do estado interno de tubos de condução de gás e demais derivados de petróleo se tornou de extrema importância na indústria da exploração e produção de petróleo e gás. Pois, qualquer bloqueio nos dutos de extração pode causar prejuízos, atrasos, acidentes e perda de equipamentos.

1.1 MOTIVAÇÃO

Com o aumento da produção de petróleo nas últimas décadas, principalmente em águas profundas, a severidade do ambiente de produção torna propensa a formação de bloqueios nos dutos que interrompem parcial ou totalmente o escoamento. Dado esse aumento de produção, os custos de operação e fabricação de materiais e equipamentos adequados a estes ambientes tornam-se cada vez maiores. Além disso, tendo em vista as condições de altas pressões e baixas temperaturas do ambiente submarino de altas profundidades, além da natureza dinâmica do oceano, torna-se necessário que os dutos sejam inspecionados de forma eficiente. Os PIGs instrumentados são as ferramentas mais comuns de inspeção que podem ser lançadas nos dutos de óleo ou gás para encontrar possíveis defeitos, falhas ou bloqueios. Contudo, nem todas as linhas são “pigáveis”. Uma solução extremamente atraente é o desenvolvimento de uma ferramenta de inspeção que possa ser instalada em um único ponto da linha que monitore as condições internas da tubulação em um trecho relativamente grande. O método de reflectometria acústica possui potencial para este fim, consistindo em um emissor acústico utilizado para gerar pulsos acústicos que se propagam pelo fluido. As reflexões causadas por variações na seção reta da tubulação podem ser captadas por microfones ou hidrofones instalados próximos do emissor.

Entretanto, esta técnica não está associada somente no âmbito da exploração e produção de óleo e gás, é possível estender a sua utilização a outras indústrias, como a de transporte e estocagem de diferentes fluidos. Portanto, torna-se necessário o entendimento e aperfeiçoamento da técnica acústica, para que se possa fazer o monitoramento adequado dos dutos, de forma não-invasiva, e também detectar e quantificar tais bloqueios, além de mensurar

sua localização, de forma rápida e prática, a fim de sanar o problema sem acidentes ou perdas de produção.

1.2 JUSTIFICATIVA

Dado que há formação de produtos como hidratos e parafinas, além da deposição de partículas sólidas nas paredes dos dutos de produção de óleo e gás, principalmente em águas profundas, há a necessidade de inspeção das linhas para a verificação da integridade do escoamento e do estado interno das paredes dos dutos. Segundo Scott et al. (1999), técnicas convencionais fazem a utilização de uma análise em tempo real, a partir da medição do escoamento por unidade de tempo, para verificar a possibilidade de bloqueios nas linhas. Este tipo de análise pode levar a interpretações equivocadas do estado da linha, como por exemplo, um bloqueio sendo interpretado como o simples esgotamento do poço de produção. Tais técnicas podem levar a intervenções de alto custo devido à ocorrência de fato, ou a má interpretação de resultados. Além disso, outras técnicas convencionais, como a utilização de radiografia, termografia e monitoramento de pressão (Silva et al., 2014) podem ser utilizadas, porém também demonstrando desvantagens, como a necessidade de acesso ao local a ser inspecionado. Portanto, a dificuldade de inspeções deste tipo aumenta com a profundidade e as condições de operação da linha, e a inspeção visual torna-se, conseqüentemente, impossibilitada de ser realizada.

Assim, a utilização da técnica de reflectometria acústica é justificada como uma forma menos custosa (Silva et al., 2014) e mais prática com relação às técnicas anteriores, uma vez que, a partir da utilização do pulso acústico, não é necessária a inspeção *in-loco*. Portanto, é dispensada a utilização de inspeções intrusivas no duto, submetendo-se menos operações às condições submarinas e/ou intrusivas à tubulação, não havendo necessidade de parada da produção para a utilização da técnica (Loureiro, 2015). Além disso, dependendo do comprimento do duto, inspeções visuais ou intrusivas podem se tornar impossíveis, o que aumenta a importância da utilização desse tipo de técnica de inspeção.

1.3 OBJETIVO

Desta forma, o presente trabalho se propõe a estudar a utilização da técnica de reflectometria acústica em dutos para avaliar diferentes condições de bloqueios em uma linha contendo ar, para avaliar a eficácia da técnica para gases em geral. Para isso, serão feitos testes práticos em laboratório que serão comparados com simulações numéricas baseadas em elementos finitos realizada no software *Abaqus*. Serão avaliados bloqueios com diferentes geometrias em diferentes layouts de tubulações.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A reflectometria acústica é uma técnica de medição não-invasiva que pode ser utilizada para medir as dimensões internas dos dutos. Um bloqueio pode ser interpretado como uma diminuição da seção reta da tubulação. Através da emissão de um pulso acústico e a análise dos sinais refletidos, é possível estimar variações de diâmetros internos em diferentes posições na tubulação. Uma vez que se conhece a velocidade do som no meio e o instante de tempo em que uma reflexão chega a um microfone/hidrofone é possível estimar a posição de um bloqueio, além disso, a amplitude do sinal refletido nos fornece informações sobre a magnitude da variação da seção reta (bloqueio). Assim, pode-se detectar qualquer anomalia nas paredes internas do duto, como incrustações ou bloqueios formados por parafinas ou hidratos.

2.1 FORMAÇÃO DE INCRUSTAÇÕES E BLOQUEIOS

A formação de incrustações em um sistema de tubulações pode ocorrer por inúmeros motivos, como por exemplo, devido a deposição de partículas sólidas que escoam junto com o produto ou ao congelamento ou condensação de óleo e gás, dependendo do gradiente de temperatura no qual o tubo está inserido, principalmente em ambientes submarinos. Conforme estas incrustações aumentam, a área transversal do tubo diminui, impedindo que o fluxo passe pela tubulação de forma adequada. (Loureiro, 2015)

A falta de escoamento nos dutos se dá basicamente pela formação de incrustações e bloqueios, parciais ou não, de parafínicos e de hidratos, nas paredes dos dutos de condução, e também pela formação de incrustações de materiais sólidos presentes no fluido durante a exploração, também nas paredes do duto. A detecção destes bloqueios se faz pela utilização de técnicas não-invasivas. O estudo de formas adequadas de detecção e quantificação destes bloqueios, portanto, é justificado pela necessidade de se detectar de forma eficiente e rápida, quando não é possível evitar, tais bloqueios no escoamento.

2.1.1 PARAFINAS

A parafina é um derivado do petróleo. O óleo cru, por sua vez, consiste de uma mistura de componentes de hidrocarbonetos, e as ceras derivadas do óleo cru são tipicamente

classificadas como ceras macrocristalinas ou microcristalinas. As ceras macrocristalinas consistem principalmente em componentes de parafina. (Paso & Scott, 2003)

A formação de depósitos de parafina nos dutos é um grande problema no transporte do petróleo. Segundo (Saraceno, 2007), quanto maior a cadeia de parafina, maior é sua temperatura de cristalização, ou seja, quanto maior a cadeia da parafina, maior a temperatura na qual ela se cristaliza, logo a parafina se deposita nas paredes internas dos oleodutos com maior facilidade. Nas temperaturas e pressões dos reservatórios, as parafinas permanecem dissolvidas no óleo cru. O produto da exploração sai do poço em torno de 70°C, podendo entrar em contato com temperaturas submarinas próximas do congelamento (Bordalo & Oliveira, 2007). Essa diferença de temperatura cria um gradiente térmico entre o ambiente no qual o duto está e o interior deste, por onde passa fluido quente.

Assim que o óleo cru deixa o reservatório e escoar pela tubulação, que está a uma temperatura menor, há um gradiente de temperatura da parede fria da tubulação para o óleo quente que está escoando, fazendo com que sua temperatura diminua e a parafina se cristalize. Pode-se observar na Figura 1 uma representação de como a parafina pode se depositar nas paredes do duto a partir do escoamento de óleo cru.

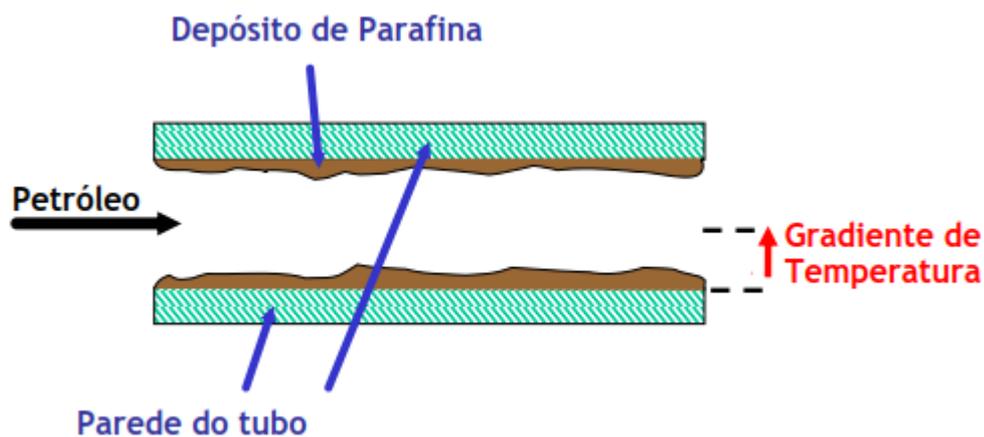


Figura 1: Formação de depósito de parafina (Saraceno, 2007) Adaptado

Segundo Bruno (2008), quando a temperatura do óleo é maior que a temperatura da parede do tubo que está abaixo da temperatura de cristalização da parafina, haverá um gradiente de concentração de cera dissolvida entre o óleo e a parede do tubo. Esse gradiente irá causar a difusão de moléculas de ceras dissolvidas em direção a parede do tubo e, posteriormente, cristalização e deposição de ceras. Esse processo de deposição contínuo reduz a área de

escoamento de fluido e pode, eventualmente, resultar em um completo bloqueio. A deposição de parafina pode ser um custoso e perigoso problema na indústria do óleo.

Sabe-se que os escoamentos de hidrocarbonetos são multifásicos. Foi observado por Bordalo & Oliveira (2007) que no escoamento de um sistema bifásico de óleo e água, a partir da saída do poço (*well-head*), no qual a água flui nas paredes do duto e o óleo escoo no núcleo, o atrito entre o óleo e a parede do duto é reduzido pela presença da água. Tal sistema ajuda no escoamento do óleo e também tende a diminuir a deposição de parafinas nas paredes do duto, uma vez que, sendo as moléculas parafínicas não-solúveis em água, a parafina formada não consegue ultrapassar a espessura de água entre o óleo e a parede, não sendo depositada na parede do duto.

2.1.2 HIDRATOS

Hidratos são estruturas sólidas formados por uma mistura de água com gases de baixo peso molecular ou com hidrocarbonetos de cadeias curtas. A sua aparência lembra neve acumulada e sua densidade é similar à do gelo, porém suas propriedades são diferentes. É possível ver na Figura 2 a aparência do hidrato.



Figura 2: Formação de hidrato em uma tubulação (Zarinabadi & Samimi, 2012)

Segundo Zarinabadi et al (2012), para que haja formação de hidratos, existem três condições:

1. Presença de água, na fase sólida ou líquida
2. A existência de pequenas moléculas de gás, como metano, etano, propano e argônio

3. Altas pressões e baixas temperaturas

Nos reservatórios subterrâneos, o gás natural e óleo cru estão em contato com a água. Como as moléculas da água tem fortes ligações de hidrogênio, os hidratos se formam quando a água se conforma de modo a produzir um retículo cristalino, fazendo com que o gás leve seja aprisionado no interior de suas cavidades. É possível ver na Figura 3 a penetração do gás nas cavidades ocultas da água.

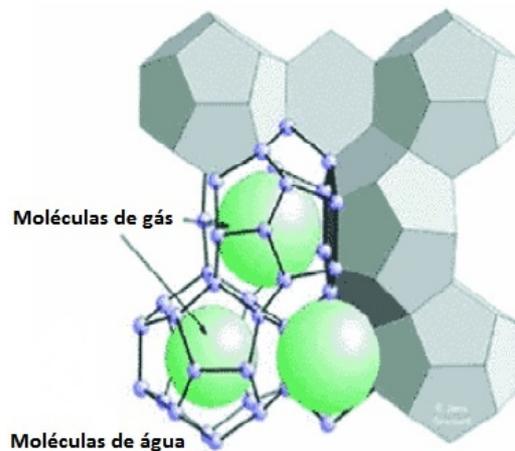


Figura 3: Moléculas de gás (hóspede) e moléculas de água (hospedeiro) (Zarinabadi & Samimi, 2012) Adaptado

A presença de vapor de água em gás natural é uma fonte de problemas na indústria do gás natural. A formação de hidratos cria blocos sólidos que impede o fluido de escoar pela tubulação, causando grandes prejuízos à indústria e podendo causar até acidentes.

Para evitar sua formação deve-se manter o escoamento fora da região de hidratos, isto é, com uma temperatura acima da temperatura de cristalização. Contudo, a solução final é a remoção da água do ambiente de transporte do gás natural. Outros métodos são a utilização de inibidores termodinâmicos, isolamento térmico, técnica de aquecimento ativo etc.

2.1.3 INCRUSTAÇÕES

Incrustações são formações de sólidos que acontecem na parte interna das tubulações. Presente em canos, tubulações etc, acontece quando há movimentação de fluidos que, atingindo o limite de solubilidade, se precipitam e se depositam na parede do tubo.

Segundo Almeida Ferreira & Cardoso (2011), incrustações advindas da produção de petróleo são inorgânicas, como carbonatos e sulfatos de metais alcalinos ferrosos, porém também podem ser compostas de complexos sais de ferro, como sulfetos, hidróxidos e carbonatos.

As incrustações formam bloqueios em sistemas de tubulações que atrapalham a produtividade da empresa, além disso, o acúmulo de ferrugem pode provocar corrosão e é alto o custo de produção devido a manutenção.

2.2 REFLECTOMETRIA ACÚSTICA – DESENVOLVIMENTO PRÉVIO E APLICAÇÕES

Antes de ter sua utilização estudada na indústria de óleo e gás, a técnica de reflectometria acústica já havia um histórico de desenvolvimento. Esta técnica passou pelo estudo de funções inversas em sismologia, medicina e no campo da acústica e construção e inspeção de instrumentos musicais de sopro.

Originalmente foi estudada por Ware et al. (1968) como técnica para obtenção de problemas inversos; Ware & Aki (1969) desenvolveram a solução para o problema inverso de cálculo de coeficientes reflectivos de interfaces entre materiais elásticos a partir do resultado obtido pela emissão de pulsos acústicos. Com isso, foi possível aproveitar a resposta na captação da reflexão dos pulsos emitidos, obtendo assim o coeficiente reflectivo das camadas pelas quais o pulso foi emitido.

Este princípio foi utilizado no estudo sismológico de camadas internas da crosta terrestre. Ao ser emitido um pulso sobre a superfície terrestre, este percorre todo o caminho entre as camadas internas, atingindo diferentes formações geológicas. Cada tipo de formação reflete o pulso de uma forma diferente, e esta reflexão pode ser analisada, obtendo assim as propriedades referentes a cada tipo de formação (Sharp, 1996).

Em 1984, Teele et al verificou a utilização de reflectometria acústica na detecção de otite média com efusão (*OME*) no espaço do ouvido médio humano. A efusão é, segundo Teele et al., o líquido presente na região média do ouvido. O método foi estudado em crianças de 7 dias a 13 anos de idade, e comprovou eficácia na detecção da patologia independente de cera no ouvido, choro, ruído, idade ou falta de cooperação da criança. Foi demonstrado também que a aplicação de pulsos acústicos para esta finalidade é portátil e de fácil aplicação. A técnica utilizou um reflectômetro composto por um microfone, um gerador de sinal, um *plotador* de

gráficos em duas dimensões e um osciloscópio para registro das aquisições. A Figura 4 mostra o aparato de emissão de pulso e aquisição de dados utilizado no estudo.

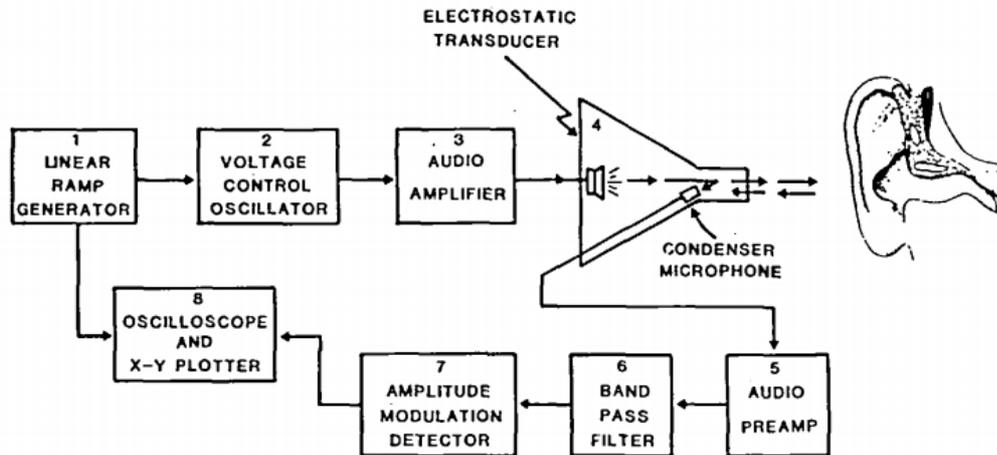


Figura 4: Aparato de emissão de pulso e aquisição de dados (Teele et al, 1984)

Sondhi & Gopinath (1971), também no campo da medicina, utilizaram pulsos acústicos para investigar a medição da seção de vias aéreas humanas. Em um estudo teórico, descreveram como a aplicação de um pulso acústico na via aérea investigada, e a aquisição da gravação do reflexo deste pulso na região labial, influenciou no cálculo da área do perfil da via aérea em investigação. O estudo, apesar de complexo, não exigiu nenhum conhecimento prévio do trato vocal humano, apesar de não considerar possíveis perdas.

Fredberget et al. (1980) realizaram com a técnica de reflectometria acústica, a primeira medição em pacientes humanos. O aparato emitiu um pulso acústico em vias aéreas, até os pulmões do paciente, através de um tubo contendo O₂ e He. O pulso foi refletido e captado por um microfone na entrada do tubo. Segundo Fredberg, o fato de ter enchido o tubo e os pulmões do paciente com O₂ e He ajudou a aumentar a velocidade do som, o que trouxe resultados comparáveis ao Raio-X, na medição das vias aéreas, porém sem resultados tão conclusivos. No entanto, o aparato experimental foi utilizado, mais adiante, com sucesso em testes clínicos, por Rubinstein et al. (1987) e Hoffstein et al. (1987).

Marshall et al. (1990) estudaram a possibilidade de diminuição do tubo de introdução do pulso acústico, aprimorando a técnica, a partir de deduções matemáticas e “sharpening” o pulso emitido, e assim diminuindo sua duração. Logo, foi possível reduzir o tubo por onde o pulso era emitido. Além disso, Marshall (1992) também estudou formas matemáticas de redução do tempo entre a reflexão do pulso emitido na via aérea e a captação deste pulso no aparato fonte

e tubo. Também obteve como resultado a redução do tubo utilizado para condução do pulso acústico até a via aérea.

A utilização da técnica de reflectometria acústica foi utilizada pela primeira vez em tubos de instrumentos musicais de sopro. Benade e Smith (1981) realizaram um estudo como tentativa de medir a resposta a um pulso de entrada em um instrumento de sopro utilizando reflectometria acústica. A medição das reflexões do pulso acústico foi feita com um microfone, a partir de um aparato emissor de pulso na região de sopro de uma tuba. A emissão do pulso foi feita a partir de um dispositivo gerador de faíscas (*sparks*).

A partir de 1981, Goodwin iniciou estudos para emissão de pulsos em instrumentos utilizando emissores de pulso diferentes dos utilizados anteriormente em estudos clínicos. A tentativa feita foi a de utilizar alto-falantes, em vez de dispositivos geradores de faíscas. Como os instrumentos medidos eram maiores, o tubo de entrada do pulso acústico também teve de ser maior para garantir que a reflexão atingisse de fato o microfone, o que implicou em um maior tempo de reflexão do pulso, para estes instrumentos.

Já no âmbito da indústria de óleo e gás, a técnica de reflectometria acústica vem sendo desenvolvida para a detecção de problemas internos em dutos de condução de fluidos, como incrustações, hidratos e parafinas, corrosão e vazamentos, com a detecção de furos e pequenos orifícios. Com equipamentos mais desenvolvidos e técnicas de análise mais refinadas, a reflectometria está sendo estudada no ramo *offshore*, apesar de ainda ser pouco aplicada em termos de mercado.

Kausel (2003) estudou a medição da impedância de entrada pela reflexão de um pulso acústico aplicado em um tubo. Utilizando a FFT (transformada rápida de Fourier), foi possível verificar o perfil interno do tubo utilizando o domínio das frequências. Assim, pode-se notar a importância da medição de impedância acústica do meio interno ao duto, o que abriu espaço para o estudo que vem sendo desenvolvido na indústria, para a caracterização da superfície interna de dutos de condução.

Papadopoulou et al. (2008) afirmam que a técnica de reflectometria acústica é eficiente na detecção de bloqueios e vazamentos em dutos de comprimento e diâmetro relativamente pequenos. Descrevendo a teoria básica por trás da técnica e de suas aplicações, se propuseram a estudar a aplicação da técnica para longos comprimentos, grandes diâmetros e diferentes arranjos. Foram testados, além de dutos em linha reta, arranjos de tubulações de gás, tendo sido estudada a viabilidade da técnica para a detecção de bloqueios, vazamentos, furos e depósitos de água. Também foi emitido, a partir do início do tubo, um pulso acústico de pressão, a partir

de um alto-falante, sendo medido por um microfone, à uma distância suficientemente grande do alto-falante, para que a reflexão do pulso pudesse ser mensurada corretamente. O estudo mostrou como a técnica pode medir a variação da impedância acústica ao longo do duto, mesmo a grandes distâncias, a partir da medição dos sinais refletidos pela extremidade do duto contrária ao ponto onde foi emitida a onda.

Ainda no mesmo estudo, Papadopoulou et al. (2008) demonstram como foram os sinais obtidos, numa relação entre tensão elétrica e tempo, com relação a sinais de referência, mostrando que pode-se medir o comprimento do duto a partir da medição de resposta da reflexão do pulso emitido. Isso quer dizer que é possível, então, segundo Papadopoulou et al. (2008), quantificar a distância do bloqueio, vazamento ou depósito de água, a partir da reflexão advinda desta anomalia, com relação à reflexão do final do duto. Então, um pulso acústico emitido a partir de um alto-falante, tendo sua entrada medida por um microfone, tem sua reflexão, após chegar ao fim do duto, medida pelo mesmo microfone. Cada anomalia reflete este pulso antes do fim do duto, o que faz com que o microfone também detecte esse sinal. Isso permite que quaisquer descontinuidades na seção do duto sejam detectadas.

Em um dos experimentos, para detecção de um furo, foi emitido um pulso em um sistema de tubulação de gás, com ramificações, curvas e um furo, com comprimento de 39,84 m. A Figura 5 mostra a forma de um sinal acústico de referência obtido por Papadopoulou.

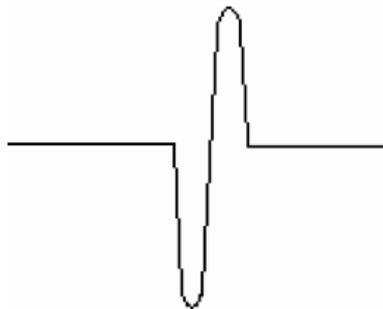


Figura 5: Sinal acústico de referência (Papadopoulou et al., 2008)

A Figura 6 mostra a relação tensão por tempo com a resposta obtida no sistema de tubulação de gás, contendo um alto-falante na entrada do duto, e um microfone a 6,11 m do alto-falante, representado na Figura 7. É possível notar, de fato, que a medição só se inicia quando o pulso passa pelo microfone, como pode ser observado na Figura 6, quando acontece o primeiro pico.

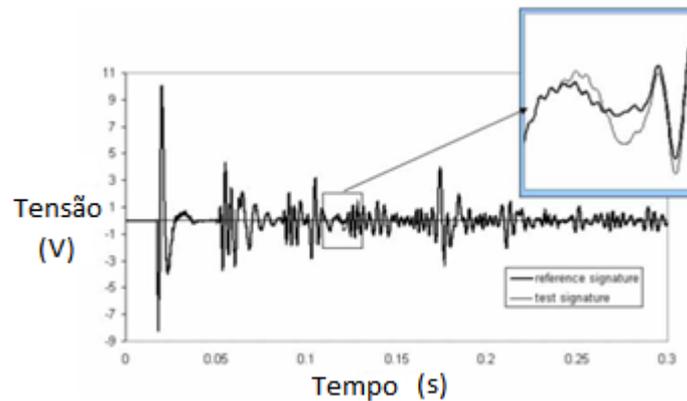


Figura 6: Medição obtida após emissão de pulso para detecção de um furo (Papadopoulou et al., 2008) Adaptado

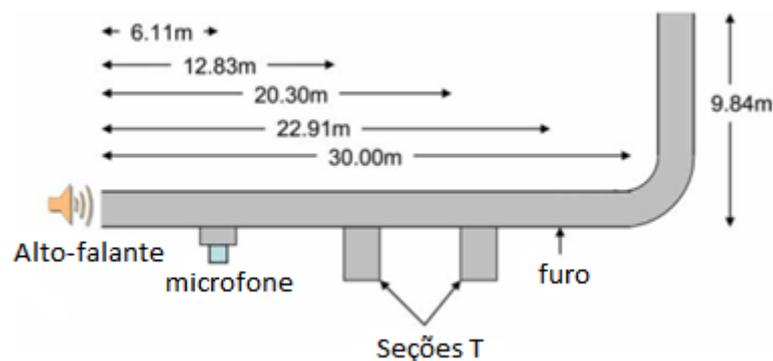


Figura 7: Sistema de tubulação de gás, com ramificações e um furo. Comprimento: 39,84 m (Papadopoulou et al., 2008) Adaptado

O estudo feito por Papadopoulou et al. (2008) também aponta que não há diferenças significativas, quando da análise por reflectometria acústica, quando se trata do material do duto analisado. Foram analisados tubos de PVC e de aço-carbono, e não foram encontradas diferenças na análise. O mesmo vale para o diâmetro. Este parâmetro não influi de forma significativa no resultado, segundo Papadopoulou et al, para diâmetros internos de 50 a 300 mm.

Ao mesmo tempo, Sharp & Campbell (1997), também estudaram a detecção de vazamentos utilizando métodos acústicos. A partir de um reflectometro formado por um tubo aparte ao duto, um alto-falante e um microfone, além do aparato de aquisição de dados, conforme mostra a Figura 8, foi emitido um pulso acústico. Foi possível então desenvolver o

perfil interno do duto a partir do pulso refletido, bem como a obtenção da curva de impedância de entrada.

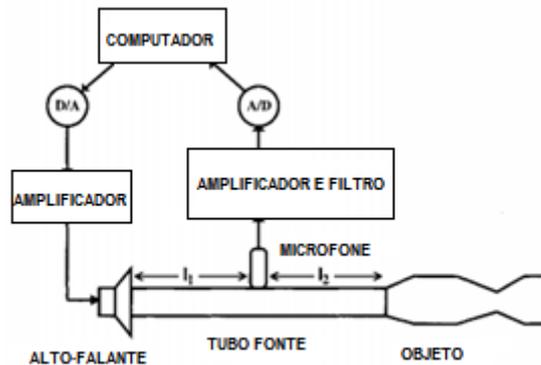


Figura 8: Esquema do reflectômetro utilizado no trabalho (DB Sharp et al., 1997) Adaptado

A partir desse sistema, foi investigada a possibilidade de detecção de vazamentos no duto medido. Especificamente para dutos cilíndricos, sem variação de seção, foi possível medir a posição do vazamento e a geometria do furo de origem. Concluiu-se então que, a partir da emissão de pulso e da medição da impedância de entrada, foi possível reconhecer o perfil do duto, sem vazamentos, e também foi possível detectar a presença de vazamentos. Em condições ideais, também foi possível detectar a posição do vazamento, bem como sua geometria.

Vilela (2005) posteriormente também estudou, em sua dissertação de mestrado, a detecção de orifícios em tubos, a partir da técnica de reflectometria acústica. Foi apresentado um estudo com o objetivo de detectar um pequeno furo, a partir de uma certa distância da fonte emissora de pulso acústico, utilizando um sistema de aquisição composto por um microfone, anexo à parede da tubulação. A presença do furo, na detecção, é demonstrada a partir de uma reflexão do sinal emitido com variação na impedância, onde é possível medir sua localização e sua geometria.

Sharp (1998) estudou a limitação de comprimento na utilização da técnica. Observando que havia a limitação de comprimento, dado que, ao ser refletido pelo fim do duto, o pulso é medido pela primeira vez no microfone e então é refletido novamente no alto-falante, este volta e é medido pelo microfone com um sinal não desejável, mostrando que existem tamanho e tempo máximos nos quais o duto pode ser medido. Assim, Sharp desenvolveu um algoritmo que recria o perfil do duto analisado, além de permitir que a análise fosse feita a partir do pulso de entrada.

Em se tratando de tubulações de gás, Wang et al. (2009) desenvolveu um sistema patenteado para a detecção de bloqueios e vazamentos em gasodutos. O sistema consiste na introdução de um pulso acústico ou de pressão em uma linha de gás. Este pulso viaja até o fim do gasoduto e é então parcialmente refletido caso haja qualquer mudança na impedância acústica, ou seja, qualquer mudança na seção do duto, sejam bloqueios ou perdas na parede, como vazamentos. A medição das reflexões produzidas pela emissão do pulso emitido, que viaja no comprimento do duto, torna possível também a localização dos bloqueios e vazamentos detectados, além de válvulas e outros acessórios presentes na linha. A técnica patenteada é não invasiva, ou seja, não há a necessidade de acesso à parte interna do duto e, posteriormente, foi verificado o comprimento no qual a técnica poderia ser utilizada com sucesso.

Wang et al. (2011) fez, então, um estudo para a aplicação da técnica de reflectometria acústica para a detecção e localização de bloqueios e defeitos em tubulações com longos comprimentos. Neste trabalho, foi estudada especificamente a formação de hidratos, simulando condições ideais de teste para tubulações submarinas de gás, ou gasodutos. A técnica foi utilizada em várias condições diferentes para as tubulações, em quatro diferentes diâmetros, variando de 0,06 m a 0,6 m, pressões de até 10 MPa e contendo gases tanto em estado estático quanto em estado dinâmico. Em todos os casos, o estudo mostrou que a técnica é capaz de detectar e localizar bloqueios nas tubulações com sucesso. Também, os resultados constataram que é possível detectar bloqueios parciais e integrais em gasodutos com comprimento de até 10 km.

Mais recentemente, Silva et al (2013) demonstrou a técnica de reflectometria acústica para a detecção de bloqueios formados por hidratos e parafinas, em tubulações de gás e de água, a partir de um aparato experimental e também por simulações numéricas em elementos finitos. Dada a importância da garantia de escoamento e operação em sistemas submarinos, é necessário evitar o aparecimento, ou crescimento de bloqueios, que aparecem nas tubulações sob certas condições. Com isso, o trabalho demonstrou a teoria acústica aplicada a dutos para montar um aparato que pudesse ser utilizado para detectar e mensurar bloqueios nos dutos. A técnica se vale de um pulso acústico de curta duração, que é inserido no duto. O pulso viaja no interior do duto e, ao encontrar qualquer variação na impedância acústica, ou seja, qualquer bloqueio, parte deste pulso direcionado ao fim do duto é refletido de volta e o reflexo é medido por um microfone, montado no aparato no início do duto junto ao emissor de pulso. O experimento indicou que é possível obter a medição do duto de forma remota, com a informação da localização e da geometria dos bloqueios identificados. Além disso, foi verificado, a partir do

experimento prático, que há a possibilidade de identificação de bloqueios da ordem de 10% da área do duto, e apesar de testes com bloqueios menores não terem sido executados, o estudo numérico por elementos finitos mostrou que é possível identificar bloqueios de até 1% da área total do duto.

Seguindo a mesma linha, Loureiro (2015), em sua dissertação de mestrado, fez uma análise com relação ao modo como ondas acústicas se propagam em gasodutos, tendo como objetivo a identificação e localização de obstruções de diferentes tamanhos, ocupando diferentes seções da área do duto, variando os parâmetros de emissão do pulso acústico. Além de testes experimentais em laboratório, foi feita também uma análise numérica em elementos finitos, visando a identificação e localização de bloqueios em dutos de até 100 m de comprimento.

Este trabalho está sendo desenvolvido com base nos estudos numérico-experimentais realizado por Silva et al. (2013) em seu artigo e Loureiro (2015), em sua dissertação de mestrado. Será, então, apresentado o resultado de testes em laboratório, utilizando o mesmo aparato experimental de emissão de pulso acústico e aquisição de dados utilizado por Silva et al. (2013), em uma tubulação contendo ar com 100 m de comprimento e bloqueios parafínicos que variam de 10% a 75% da seção do tubo utilizado, de 4 polegadas. Será feita também uma análise numérica, em elementos finitos, a fim de comparar os testes em laboratório com resultados experimentais já obtidos anteriormente, em modelos numéricos calibrados, além da possibilidade de se simular diferentes geometrias de bloqueios, além de configurações de tubulação para verificar a eficácia da técnica de reflectometria acústica em sistemas mais completos que um trecho reto, sem derivações, de tubulação.

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

A reflectometria é uma técnica que utiliza o som para verificar discontinuidades em dutos. Para que haja maior compreensão de como o som se comporta dentro dos dutos, será feito um estudo sobre a acústica e a propagação das ondas acústicas.

3.1 INTRODUÇÃO À ACÚSTICA

A definição inicial de acústica se deu com o estudo de pequenas ondas de pressão no ar que podem ser detectadas pelo ouvido humano (Rienstra & Hirschberg, 2013). Ela pode ser definida como a sensação auditiva produzida por uma variação da pressão atmosférica a partir da vibração mecânica, que se propaga em forma de ondas, através de meio elástico e denso (Simões, 2011). Ou seja, o som é toda vibração ou onda mecânica gerada por um corpo vibrante.

A propagação do som é uma variação de pressão em forma de ondas longitudinais e que é transmitida em todas as direções. Para que o som se propague é necessário haver um meio, ou seja, não existe propagação no vácuo. Este meio pode ser constituído de vários materiais, desde sólido a gasoso.

Ademais, o escopo da acústica pode ser estendido a frequências mais altas e mais baixas, conhecidas como ondas ultrassônicas e infrassônicas, que possuem frequências que estão além do que se pode escutar.

Segundo Randall (2012), pode-se definir os seguintes termos da acústica:

1. Ondas sonoras: É uma peculiaridade de um fluido como o ar, com pouca ou nenhuma resistência ao cisalhamento, que apenas pode ser propagada longitudinalmente. Toda perturbação provinda de qualquer natureza tenderá a desaparecer a uma pequena distância da fonte. Como exemplo, podemos ver na Figura 9 a água superficial de uma lagoa quando excitada gerando ondas:

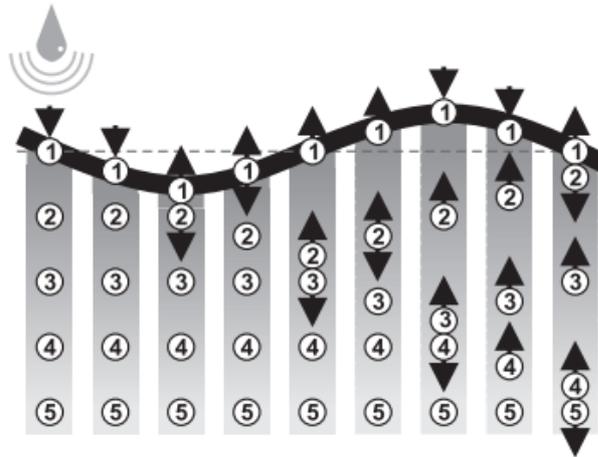


Figura 9: Água superficial de uma lagoa gerando ondas quando excitada (Carvalho, 2006)

2. **Frequência:** A frequência de uma fonte vibratória de som é a taxa de repetição de seu movimento periódico e é usualmente especificado em ciclos por unidade de tempo, ou seja, a frequência de um som corresponde ao número de ciclos de uma onda sonora por segundo. A frequência no sistema internacional é medida em Hertz, abreviatura Hz, e as baixas frequências são os sons mais graves e as altas frequências são os sons mais agudos. Na figura 10 temos uma representação de uma oscilação harmônica onde T é o período da oscilação.

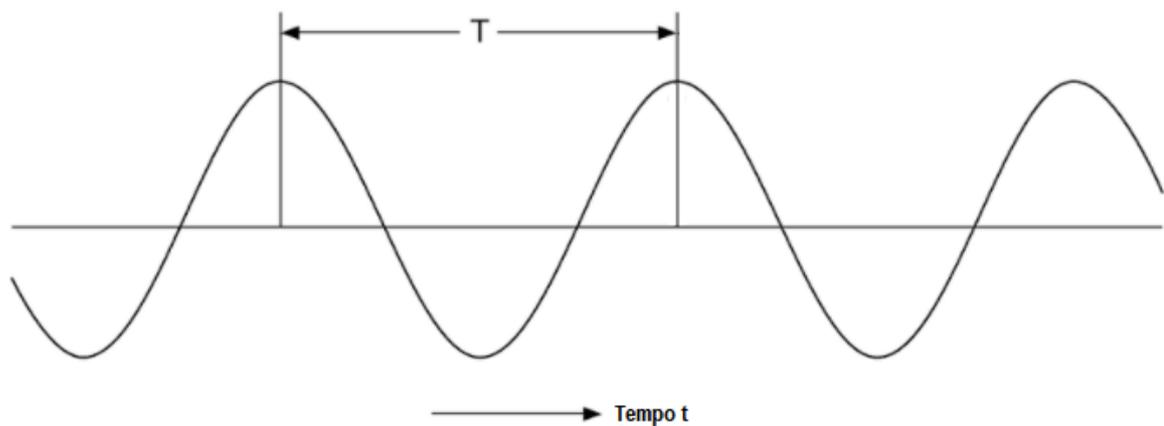


Figura 10: Oscilação harmônica (Kuttruff, 2006) Adaptado

Segundo Kuttruff (2006), o número de oscilações por segundo é chamada de frequência da vibração, como podemos ver na equação (3.1):

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (3.1)$$

3. Amplitude: A amplitude é a medida da extensão de um ciclo de onda. A amplitude de qualquer movimento vibratório é associada a um movimento simples harmônico e quanto maior for a amplitude, mais forte é o som e maior é o volume. Podemos ver uma representação de uma amplitude na Figura 11, onde y é a amplitude.

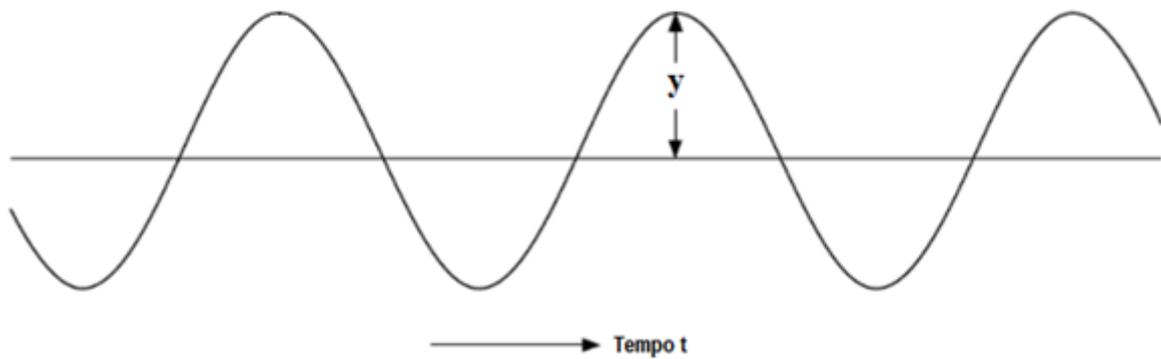


Figura 11: Amplitude da onda (Kuttruff, 2006) Adaptado

4. Comprimento de onda: O comprimento de onda é a distância entre valores repetidos sucessivos num padrão de onda, ou seja, é a distância entre os picos das ondas. Veja uma representação na Figura 12, onde λ é o comprimento de onda.

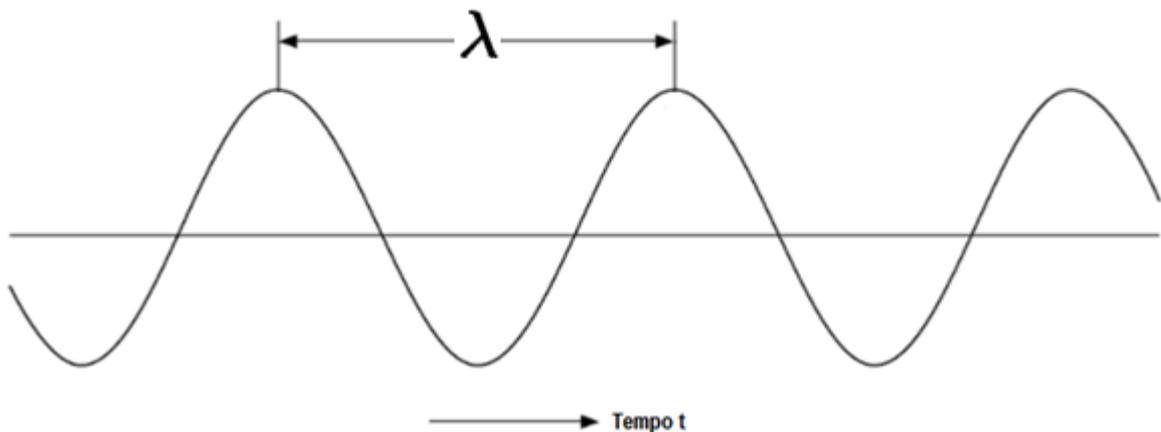


Figura 12: Comprimento da onda (Kuttruff, 2006) Adaptado

3.2 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ACÚSTICAS EM DUTOS

Ondas sonoras em um fluido são distúrbios oscilatórios gerados, por exemplo, por uma superfície vibratória. A reflectometria utiliza essas ondas sonoras para identificar possíveis bloqueios em dutos.

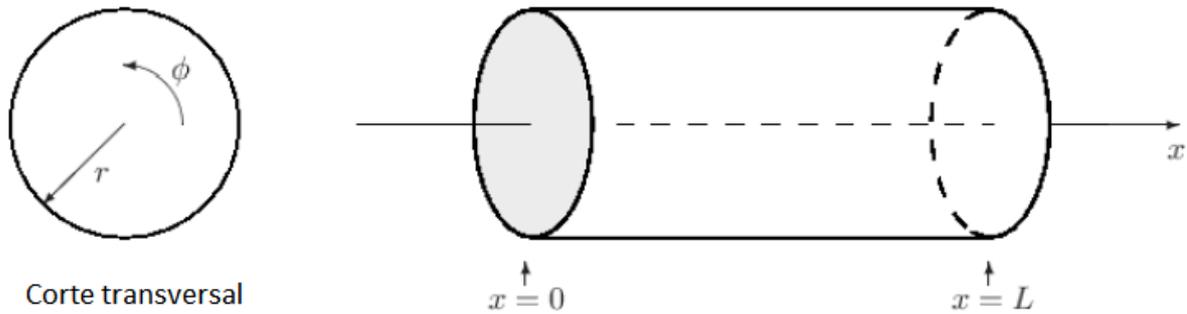


Figura 13: Tubo cilíndrico em coordenadas polares. (McGill) Adaptado

A equação de onda no limite linear é uma equação diferencial parcial linear de segunda ordem que descreve a propagação das ondas, como é possível ver abaixo:

$$\nabla^2 p(x) - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p(x)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2)$$

onde, p é a pressão sonora (Pa), t é o tempo (s), c é velocidade de propagação do som no meio (m/s) e ∇^2 é o laplaciano (m^{-2}).

O Laplaciano ∇^2 para coordenadas cilíndricas é:

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \quad (3.3)$$

onde r, θ, x são as coordenadas radial, angular e longitudinal.

Segundo Carneal et al. (2006), em baixas frequências, onde o comprimento de onda acústica é grande se comparado à seção transversal do duto, as ondas que atravessam o duto são chamadas “planas”. Nestas circunstâncias, o duto pode ser quebrado em uma série de seções com impedâncias de entrada e saída análogas aos circuitos elétricos.

Segundo Calvet (2009), os modos naturais de interesse são os que se encontram abaixo da frequência de corte. Além disso, estes modos podem ser percebidos de forma mais clara nas medições, pois as frequências destes modos são aquelas de mais fácil identificação na análise da função de transferência do duto

A frequência de corte em um duto cilíndrico preenchido por ar é determinada por:

$$\omega_c = \frac{1,84 \cdot c}{2 \cdot \pi \cdot r} \quad (3.4)$$

onde r é o raio do duto e c é a velocidade do som no ar.

A solução geral da equação (3.2) é a seguinte:

$$p(x, t) = A_0(x - c_0 \cdot t) + B_0(x + c_0 \cdot t) \quad (3.5)$$

onde A_0 e B_0 são funções que dependem do tempo e da posição e representam duas ondas que se propagam, na direção positiva e negativa do eixo x , com velocidade c_0 .

$$p(x, t) = p_1(x, t) + p_2(x, t) \quad (3.6)$$

A componente na frequência ω da solução geral pode ser descrita por:

$$p(x, t) = \alpha e^{i(\omega t - kx)} + \beta e^{i(\omega t + kx)} \quad (3.7)$$

sendo que o termo na direção positiva é o seguinte:

$$p^+(x, t) = \alpha e^{i(\omega t - kx)} \quad (3.8)$$

e o termo na direção negativa é o seguinte:

$$p^-(x, t) = \beta e^{i(\omega t + kx)} \quad (3.9)$$

os termos na direção negativa e positiva representam as ondas de pressão sonora que se propagam no eixo x , α e β são constantes complexas para cada frequência e $k = \frac{\omega}{c}$ é o número de onda.

A técnica de detecção de bloqueios utilizada por este trabalho, a reflectometria, é baseada nas variações de impedância acústica provocadas pelas perturbações (Calvet, 2009). E a impedância acústica indica a facilidade que um meio oferece à propagação de uma onda sonora (Loureiro, 2015). Na Figura 14 é possível ver um exemplo de mudança de seção transversal em um duto que possuem ondas refletidas (direção negativa) e transmitidas (direção positiva) provindas de uma onda incidente (também na direção positiva):

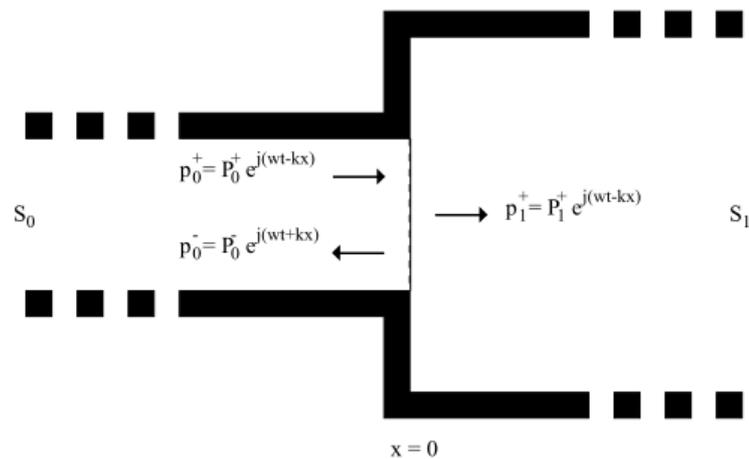


Figura 14: Reflexão de uma descontinuidade simples (Sharp, 1996)

As ondas incidentes, presentes no primeiro duto, e as ondas transmitidas, presentes no segundo duto, são representadas pela equação (3.8) enquanto as ondas refletidas no primeiro duto são representadas pelas equações (3.9). Segundo Loureiro (2015), na presença de qualquer bloqueio no tubo, uma parte da onda incidente será refletida. Essa reflexão é resultado da mudança na impedância acústica no meio e é possível observar este fenômeno na Figura 14.

A impedância acústica Z em qualquer ponto do duto é dada pela razão entre a densidade e velocidade do som no meio com a seção transversal do duto (Carneal et al., 2006). Sendo que $Z_{c0} = \frac{\rho c}{S_0}$ é a impedância característica do primeiro duto e $Z_{c1} = \frac{\rho c}{S_1}$ é a impedância característica do segundo duto. Onde S_0 é a seção transversal do primeiro tubo e S_1 é a seção transversal do segundo tubo, também representado na Figura 14.

A razão das pressões das ondas refletidas e incidentes é simplesmente a razão das amplitudes das ondas. Considerando $x = 0$, temos que:

$$r_{0,1} = \frac{p_0^-(0, t)}{p_0^+(0, t)} = \frac{\beta}{\alpha} \quad (3.10)$$

A relação da área a é dada por:

$$a = \frac{S_1}{S_0} \quad (3.11)$$

Pela teoria dos dutos, segundo Carneal et al. (2006), a relação ideal entre a relação da área, equação (3.11), e a relação de magnitude da primeira reflexão dividida pelo impulso inicial, M , é caracterizado pela seguinte equação:

$$M = \frac{(1-a)}{(1+a)} \text{ ou } a = \frac{(1-M)}{(1+M)} \quad (3.12)$$

Segundo Carneal et al. (2006), baseado na equação (3.12), se a área aumenta então a será maior que 1 e M será negativo. Isto significa que se a primeira reflexão voltar como uma reflexão negativa, então a área transversal aumentou. E se a reflexão for positiva, então a área diminuiu. É possível ver na Figura 15 o comportamento da equação (3.12). Note que esta função estimará a variação da relação da área em relação a entrada do duto.

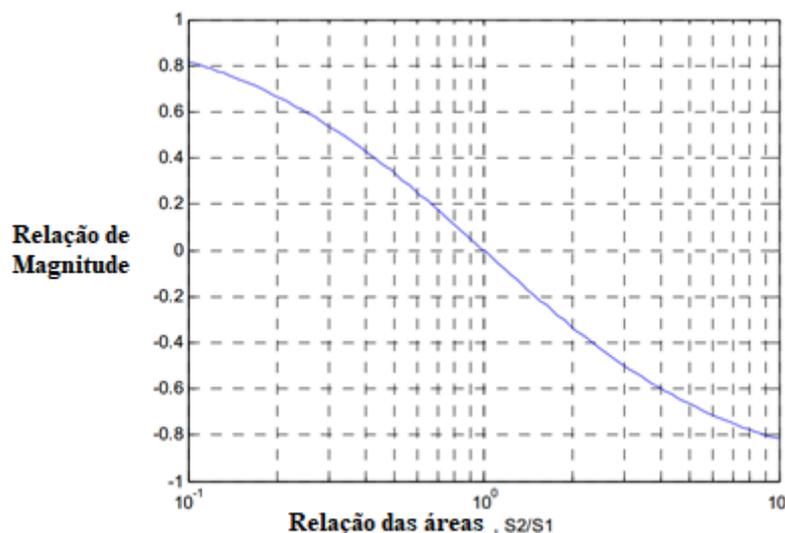


Figura 15: Relação de Proporção entre as magnitudes e a Relação das áreas

Segundo Loureiro (2015), a teoria da acústica define que a condição de uma obstrução pode ser determinada através da expressão analítica da onda plana refletida por uma obstrução utilizando a razão da pressão refletida (P_r) pela pressão incidente (P_i), e pode ser determinada através da seguinte fórmula:

$$1 - \frac{A_B}{A} = \frac{2P_r/P_i}{1+P_r/P_i} \quad (3.13)$$

4. METODOLOGIA

Este trabalho, além da abordagem numérica, também abordará a detecção de bloqueios a partir da técnica acústica de forma experimental. Serão apresentados na próxima seção alguns resultados de experimentos realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina da COPPE/UFRJ, em uma tubulação de aproximadamente 80 metros de comprimento e 4'' de diâmetro interno, mostrando diferentes condições de bloqueio de área da seção da tubulação para parâmetros de onda fixados durante o teste, bem como será feita a simulação numérica em elementos finitos, pelo software *Abaqus*, versão 6.13. Por fim, será feita uma comparação entre os resultados dos testes experimentais e da simulação numérica e, desta forma, será possível demonstrar o quão funcional a técnica é, a níveis práticos.

Portanto, aqui serão apresentados os testes experimentais realizados em laboratório, assim como a estrutura utilizada para o teste, como tubulação e sistema de emissão de pulso acústico e aquisição de dados, resultados obtidos. Também, será apresentada a forma como será feita a simulação numérica e os parâmetros a serem utilizados na simulação.

4.1 TESTES EXPERIMENTAIS

Os testes experimentais foram realizados no Laboratório de Tecnologia Submarina, do Programa de Engenharia Naval e Oceânica, situado na COPPE/UFRJ, com a ajuda dos responsáveis pelo laboratório e da equipe de técnicos. Foi utilizada uma estrutura composta por uma tubulação de aço-carbono com aproximadamente 80 metros de comprimento e 4 polegadas de diâmetro interno, dividida em pequenas seções, chamadas de *spools*, de cerca de 500 milímetros de comprimento, e trechos de tubo de 3 e 6 metros de comprimento. A figura 16 mostra um modelo em 3 dimensões da tubulação testada representando a montagem utilizada nos testes, incluindo o alto-falante utilizado na emissão de pulsos.

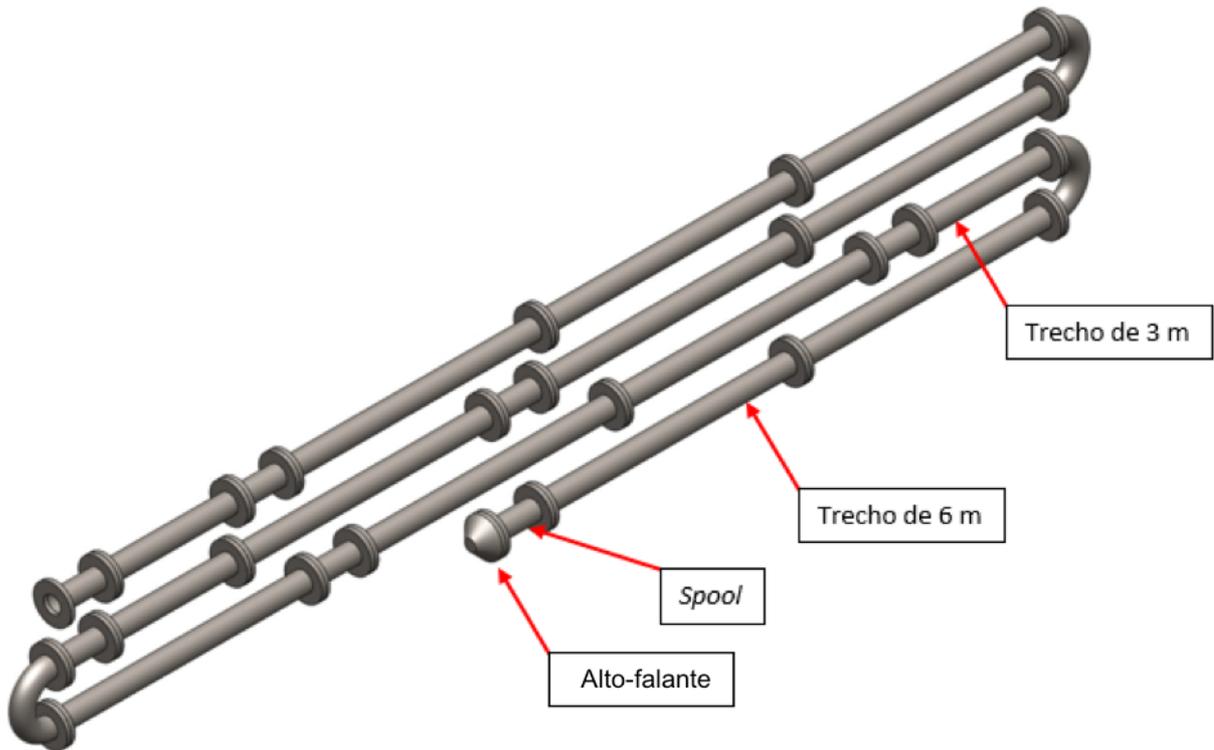


Figura 16: Modelo em 3D da tubulação testada, incluindo alto-falante no início da linha, *spools* e trechos retos de 3 (trechos menores) e de 6 (trechos maiores) metros de comprimento

Os *spools* apresentavam-se flangeados entre cada um dos trechos de 6 e 3 metros de comprimento utilizados na montagem, entre alguns dos trechos, conforme a Figura 18, onde o *spool* (sendo este o segundo *spool* da linha, chamado de *spool S02*), conforme mostra a Figura 17, encontra-se sem os parafusos e preparado para ser retirado para que pudesse ser inserido o bloqueio de parafina utilizado nos testes.



Figura 17: *Spool* inserido entre trechos de 6 metros de tubo – onde foram inseridos os bloqueios

Para a realização dos testes experimentais, foram utilizados quatro tipos de bloqueios diferentes para simulação de obstruções na linha, sendo estes: bloqueios de 10%, 25%, 50% e 75% da área total interna da tubulação. Os bloqueios utilizados têm forma cilíndrica vazada, e são feitos de parafina, conforme a Figura 19. Todos os bloqueios possuem o mesmo comprimento, de 100 milímetros, apesar das diferentes áreas percentuais de bloqueio, conforme Figuras 19 e 20, que mostram os bloqueios em comprimento, diâmetro, sua área de coroa circular e a comparação de tamanho entre eles. Além disso, foi feito um teste sem bloqueios, ou seja, com o diâmetro de 4 polegadas em sua área total no *spool*.

Os bloqueios foram inseridos no segundo *spool* presente na tubulação, chamado de *Spool S02*, situado a uma distância de cerca de 15,6 metros do ponto onde os microfones foram instalados, no *Spool S01*, conforme mostra a Figura 18, em diagrama esquemático do sistema testado. O alto-falante foi instalado no início do sistema, também conforme a Figura 18, e foi conectado ao amplificador e ao gerador de funções que deu origem ao sinal emitido, que serão apresentados posteriormente. Os conjuntos de microfones de monitoramento dos sinais acústicos foram instalados ao início e ao fim da tubulação, nos *Spools S01* e *S07*, respectivamente, também conforme o diagrama da Figura 18. Os conjuntos são chamados de MIC1, para o conjunto instalado no *Spool S01*, e MIC2, para o conjunto instalado no *Spool S07*. Os detalhes dos microfones são explorados posteriormente neste capítulo.

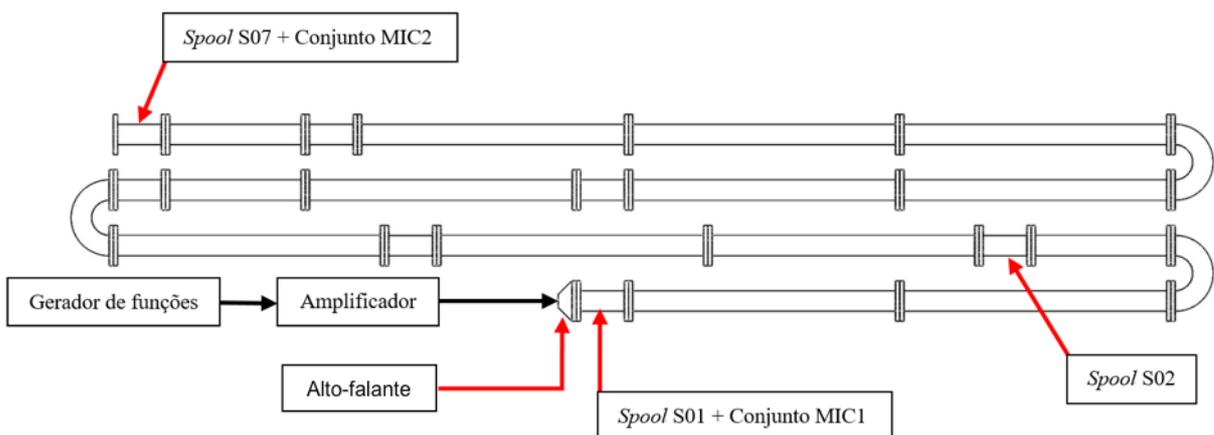


Figura 18: Diagrama esquemático da tubulação e do aparato de testes montado

A cada troca de bloqueios para a realização de um novo experimento com relação às áreas bloqueadas da tubulação, o *spool* foi retirado do sistema para a inserção dos bloqueios de parafina, e então montado novamente entre os trechos de 6 metros de comprimento.



Figura 19: Inserções de parafina, para simulação dos bloqueios, por ordem: 75%, 50%, 25% e 10% de obstrução de área



Figura 20: Vista superior, para melhor visualização da área de bloqueio, por ordem: 75%, 50%, 25% e 10% de obstrução de área

Cada um dos testes foi realizado 4 vezes, segundo parâmetros diferentes de comprimento de onda emitidos pelo alto-falante, que serão abordados com detalhes mais à frente, neste trabalho. Os parâmetros fixos são o tipo de onda emitida pelo alto-falante, inserido no início da tubulação e a frequência de onda, bem como a amplitude. Os testes foram executados com ar parado dentro da tubulação, a uma temperatura ambiente de cerca de 25°C. Conforme utilizado por Loureiro (2015), a velocidade do som no ar à temperatura de 25°C é de 346 m/s. A correta determinação da velocidade do som é importante por conta do cálculo analítico do comprimento total da tubulação e localização das obstruções, a partir dos dados adquiridos pelo sistema.

Calculou-se a velocidade do som (c) considerando que a massa específica do ar (ρ) é de 1,28 Kg/m³ e o módulo de compressibilidade, ou *Bulk Modulus* (K_C), é de $1,42 \times 10^5$ Pa, a 25°C, utilizando a equação:

$$c = \sqrt{\frac{K_C}{\rho}} \quad (4.1)$$

Com relação à realização dos experimentos no laboratório propriamente ditos, inicialmente foi feito um teste sem bloqueios e, após este, foram feitos testes com os bloqueios de 10%, 25%, 50% e 75% de área do *spool*, nesta ordem, como já mencionado anteriormente, com os *spools* onde foram inseridos os bloqueios a cerca de 15,6 metros de distância do ponto onde os microfones do início da tubulação foram situados. Serão descritos aqui, portanto, os equipamentos e recursos utilizados, bem como os parâmetros para a realização do experimento. Assim, será possível mostrar resultados previamente adquiridos antes de uma simulação numérica, bem como mostrar a forma como os resultados foram aquisitados durante os testes e a estrutura utilizada para testar a técnica.

Para a realização do teste, foi utilizado um gerador de funções, modelo *Tektronix* AFG 3021B (Figura 21), para geração do sinal a ser emitido. Este equipamento é conectado a um sistema de emissão de sinais acústicos, composto por um amplificador de sinais, modelo TS-800X4 da marca *Tramp's*, como mostra a Figura 22 conectado a alto-falante de 4'' e 250 W que é posicionado na entrada da tubulação.

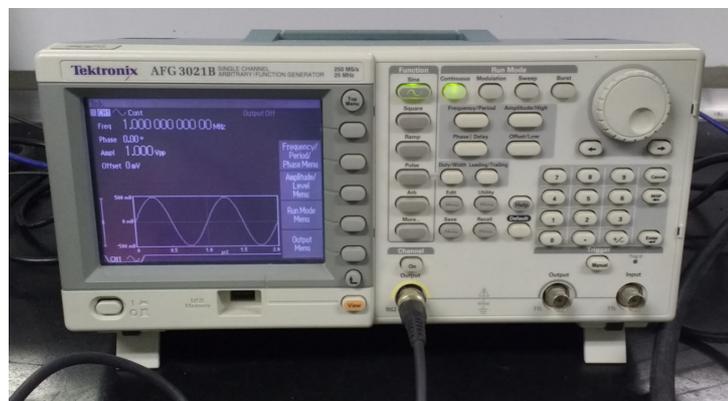


Figura 21: Gerador de funções Tektronix AFG 3021B



Figura 22: Amplificador de sinais TS-800X4

Os sinais acústicos foram monitorados por dois conjuntos de microfones da marca BSWA, modelo MPA416, sendo um posicionado em um *spool* próximo do alto-falante (início da tubulação), chamado de MIC1, e o outro em um *spool* no final da tubulação, chamado de MIC2, conforme já citado e como mostra o diagrama da Figura 18.

A aquisição dos sinais medidos pelos microfones foi feita pelo sistema de aquisição de dados PXI, modelo NI PXIe-1071, da National Instruments, conforme Figura 23. Para aquisição, foi utilizado o módulo de alta taxa de aquisição NI PXIe-4499 X-Series, acoplada ao sistema de aquisição NI PXIe-1071, com uma taxa máxima de 500 kS/s. A taxa de aquisição utilizada neste teste foi de 20 kS/s, ou seja, 20000 amostras, ou aquisições, por segundo. O software utilizado para aquisição foi o Signal Express (Figura 24).



Figura 23: Sistema de alta taxa de aquisição de dados NI PXIe-1071, National Instruments

Um dos parâmetros importantes para os testes foi a escolha do tipo de onda a ser emitida, sendo a frequência do sinal e sua amplitude relevantes para estudo de atenuação de propagação e sensibilidade na detecção de bloqueios. Para todos os ensaios realizados, utilizou-se diferentes sinais emitidos pelo alto-falante. Utilizou-se ondas quadradas com amplitude de 5 V, com diferentes durações, sendo estas de 0,5 ms, 1,0 ms, 2,0 ms e 3,0 ms. Como a aquisição de dados é feita com alta taxa de amostragem, é necessário utilizar a ferramenta de *trigger* para iniciar e finalizar a gravação dos sinais de modo a não exceder a capacidade do *buffer* do computador. O início da gravação se dava quando um sinal acústico de 50 Pa era percebido pelo primeiro conjunto de microfones (MIC1) e a gravação deveria ser interrompida a 0.5 segundos. A Tabela 1 mostra uma descrição de todos os ensaios realizados.

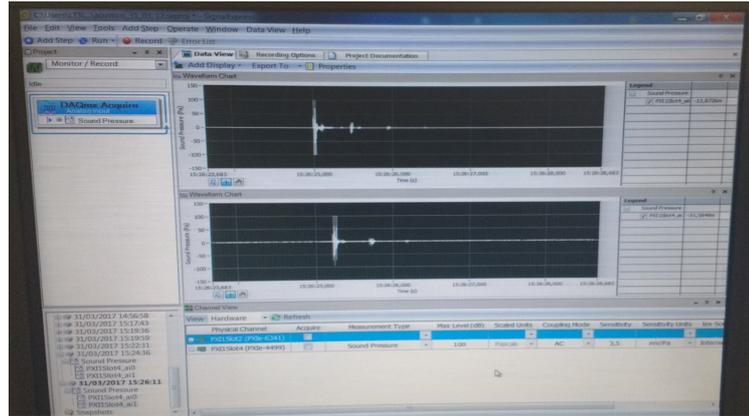


Figura 24: Tela de aquisição de dados do software Signal Express, da National Instruments

Tabela 1: Tipos de ensaios realizados

Sinal de Entrada	Tipo de Bloqueio	Número de Ensaios
Onda quadrada com duração de 0,5 ms	Sem bloqueio	4
	Bloqueio de 10%	4
	Bloqueio de 25%	4
	Bloqueio de 50%	4
	Bloqueio de 75%	4
Onda quadrada com duração de 1,0 ms	Sem bloqueio	4
	Bloqueio de 10%	4
	Bloqueio de 25%	4
	Bloqueio de 50%	4
	Bloqueio de 75%	4
Onda quadrada com duração de 2,0 ms	Sem bloqueio	4
	Bloqueio de 10%	4
	Bloqueio de 25%	4
	Bloqueio de 50%	4
	Bloqueio de 75%	4
Onda quadrada com duração de 3,0 ms	Sem bloqueio	4
	Bloqueio de 10%	4
	Bloqueio de 25%	4
	Bloqueio de 50%	4
	Bloqueio de 75%	4

5. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Dados os parâmetros utilizados para o teste em laboratório, pode-se então descrever os resultados obtidos, após compilação dos dados aqisitados pelo sistema da *National Instruments* no software *Origin Pro--*. Os resultados são mostrados em forma de gráficos, relacionando a pressão acústica medida com o tempo de viagem do pulso, do início ao fim da tubulação, e com a distância total entre microfones, na qual o pulso viajou, onde é possível observar o nível de pressão acústica captado pelos microfones com relação à distância dos picos de pressão para o início do ponto de medição na tubulação, onde encontram-se os microfones, e com o tempo entre cada pico de pressão. Cada um dos fatores será abordado com detalhes mais à frente com o desenvolvimento deste trabalho, bem como o significado de cada parâmetro dos resultados e o que estes significam, com relação à obtenção de uma conclusão para o experimento executado.

Inicialmente serão demonstrados os resultados para o ensaio sem bloqueios, que mostra o comprimento total da tubulação sem nenhum tipo de bloqueio parafínico nos *spools*, e depois os resultados para um bloqueio de 10% da área total da tubulação, sendo este localizado a cerca de 15,6 metros dos microfones no início da tubulação, logo após o alto-falante.

Além disso, para a apresentação dos resultados, escolheu-se mostrar apenas os testes com comprimentos de 0,5 ms e de 1,0 ms, dado que os comprimentos de 2,0 ms e 3,0 ms apresentaram menor clareza de identificação dos bloqueios nos gráficos, nos testes realizados. Será mostrada, então, a diferença entre cada parâmetro de comprimento de onda, e o motivo da escolha de 0,5 ms e 1,0 ms.

5.1 ENSAIO SEM BLOQUEIOS

Para o ensaio sem bloqueios, com a tubulação preenchida com ar parado, obtiveram-se duas correlações, sendo pressão (Pa) x tempo (s) e pressão (Pa) x distância (m). Para o cálculo do comprimento total da tubulação medido pelo conjunto de microfones 1 (MIC1) situado no início da tubulação, utilizou-se a mesma relação usada por Loureiro (2015), para a velocidade v do ar de 346 m/s a 25 °C, como já definido antes. A relação, então, foi:

$$\Delta S = \frac{v \times \Delta t}{2} \quad (5.1)$$

Já para o conjunto de microfones 2 (MIC2) situado no fim da tubulação, a fórmula é dada por

$$\Delta S = v \times \Delta t \quad (5.2)$$

A diferença entre eles é que o MIC1 detecta o sinal refletido e o MIC2 o sinal transmitido, ou seja, no primeiro caso a distância percorrida pelo sinal é o dobro da distância percorrida pelo sinal. As Figuras 25 e 26 mostram os resultados de pressão (Pa) x distância (m) e pressão (Pa) x tempo (s) medidos pelo MIC1, respectivamente, para a tubulação sem bloqueios utilizando como sinal emitido uma onda quadrada com duração de 0,5 ms. O primeiro pico de pressão é o sinal acústico emitido e o segundo pico de pressão é o sinal refletido pelo final da linha. Observa-se que a distância entre os picos de pressão é praticamente o comprimento total da tubulação, de cerca de 80 metros. A figura 26 mostra o tempo no qual o pulso leva para ser captado na reflexão. O tempo de reflexão é de aproximadamente 0,5 s.

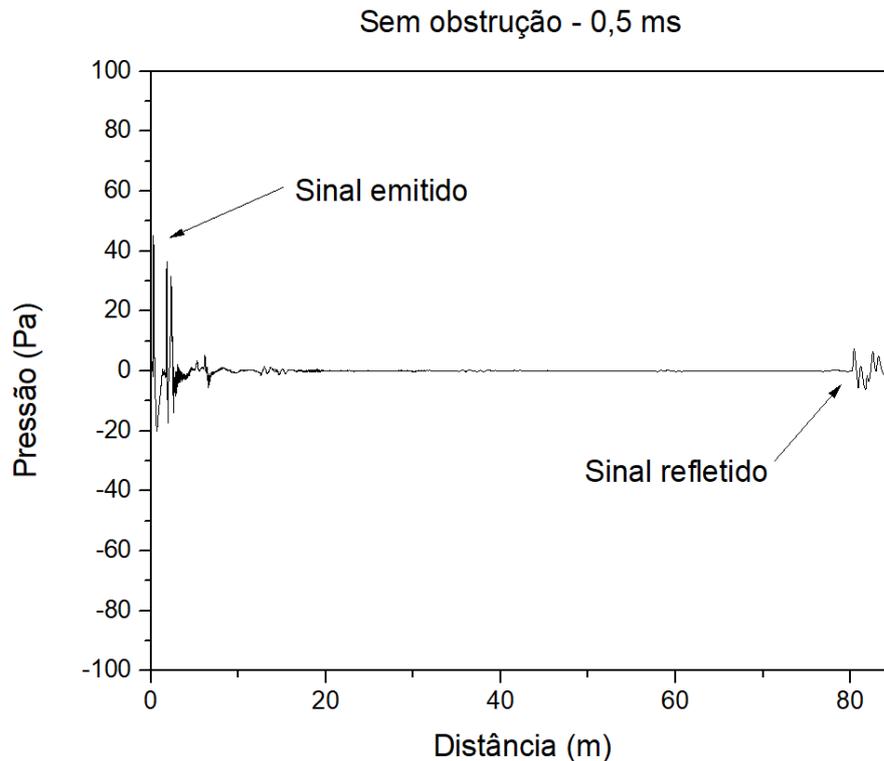


Figura 25: Resultado para o teste sem bloqueios - Pressão x Distância

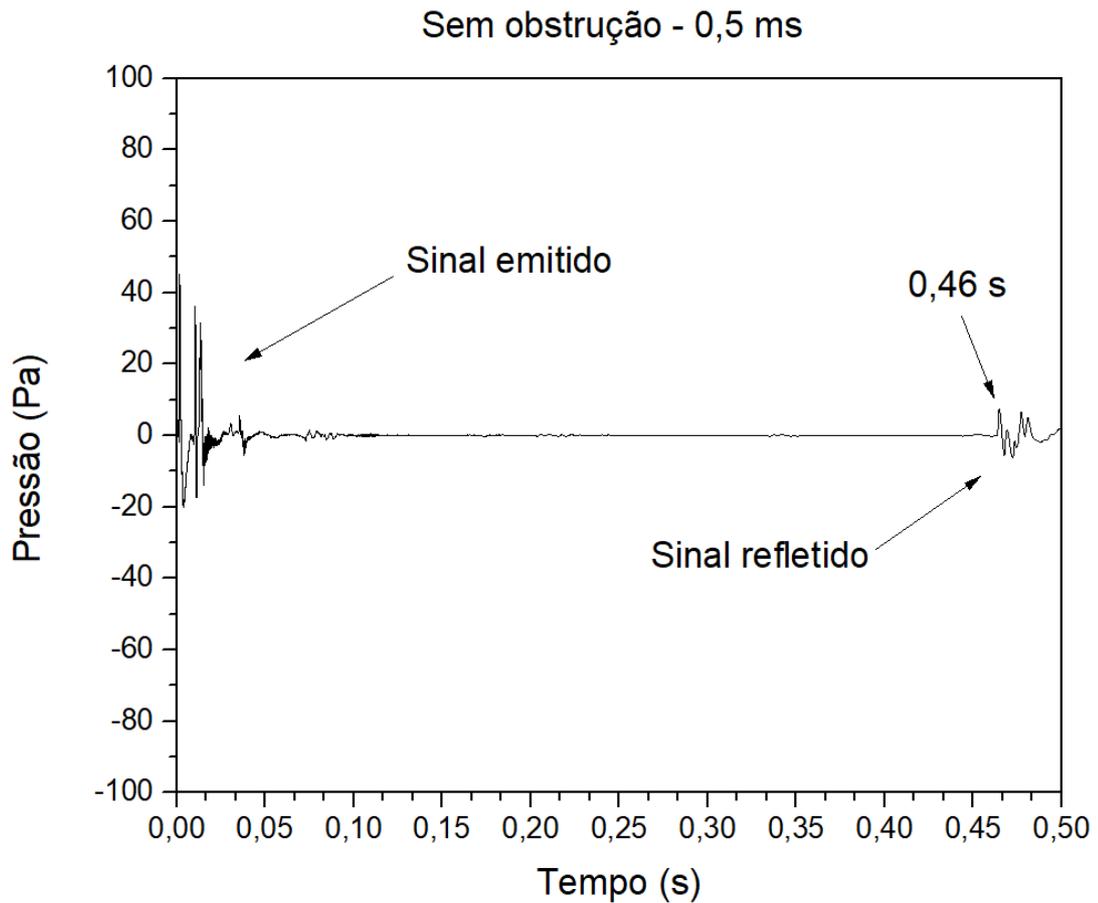


Figura 26: Resultado mostrando o tempo de reflexão do pulso

Então, pode-se observar que a técnica consegue medir de forma quase exata o comprimento da tubulação. Observa-se, portanto, que a técnica mostra que a tubulação possui aproximadamente 80 metros de comprimento, e que o sinal leva cerca de 0,46 s para ter sua reflexão captada pelos microfones no início da tubulação.

Também é possível observar a captação do sinal transmitido, medido pelo MIC2, ou seja, o sinal captado pelo microfone no final da tubulação. Essa análise mostra que o final da tubulação situa-se na cota de 80 metros, como mostra a figura 27.

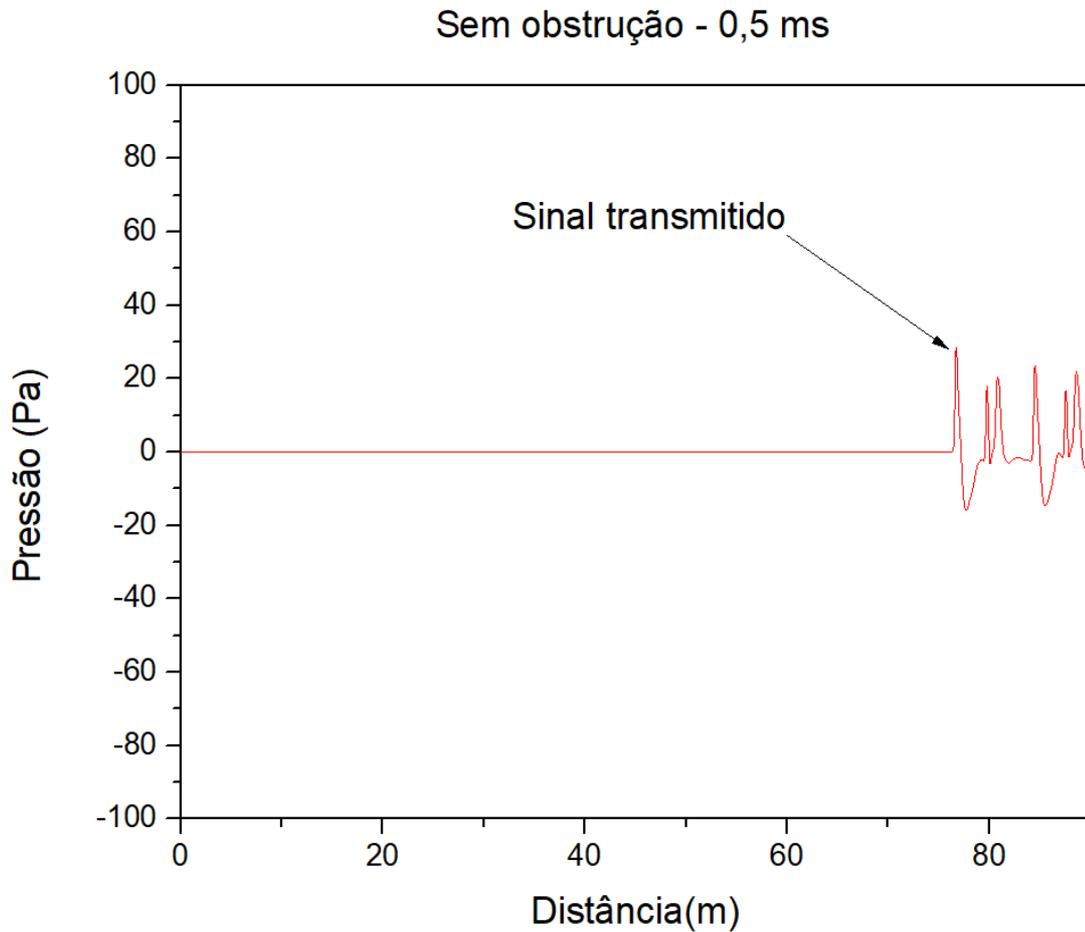


Figura 27: Sinal transmitido, captado ao fim da tubulação – cerca de 80 metros

Agora será mostrado o resultado para a tubulação sem obstrução para um sinal emitido de onda quadrada com o comprimento de 1,0 ms. Observa-se que o comportamento foi o mesmo do caso anterior, como pode-se ver na figura 28, mostrando o mesmo comprimento de tubulação, e os mesmos pontos onde aproximadamente situam-se os microfones. Para este caso, a diferença se dá apenas no nível de pressão. Para 1,0 ms, a pressão captada é maior, ou seja, há maior sensibilidade na captação dos sinais.

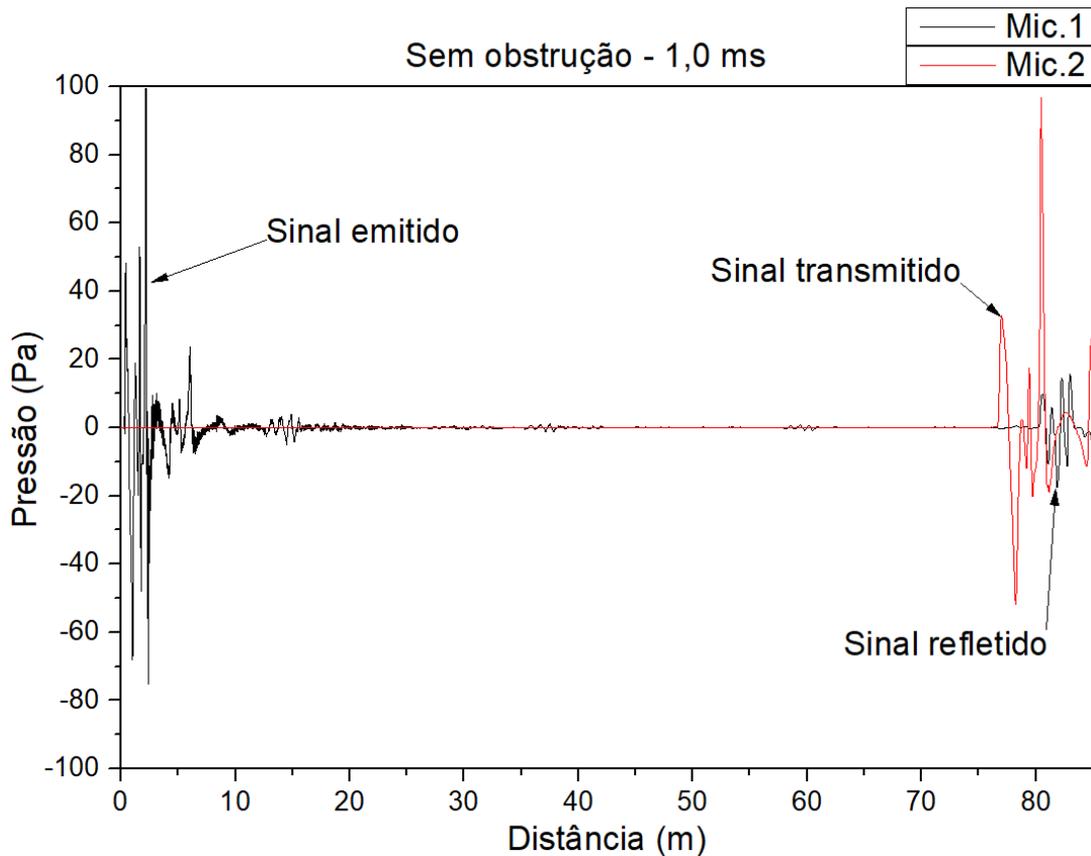


Figura 28: Gráfico obtido para 1,0 ms - mesmas distâncias, porém maior pressão

Vale ressaltar que, enquanto o conjunto MIC2 capta o sinal transmitido na cota de 80 metros, o conjunto MIC1 capta o sinal refletido pelo fim da tubulação, que mede 80 metros, mesmo estando presente no início da tubulação. Por isso, este conjunto também mostra uma distância de 80 metros, apesar do sinal ter percorrido 160 metros para chegar de volta ao início da tubulação.

Isso significa que uma possível obstrução, por menor que seja, será captada com maior facilidade pelo sinal emitido com 1,0 ms do que pelo sinal emitido com 0,5 ms, dado que a pressão emitida é mais alta com 1,0 ms, como mostra a figura 29. Este gráfico mostra os sinais emitido, transmitido e refletido no mesmo gráfico, e para fins de comparação com o resultado anterior. A linha de cor preta representa o sinal captado pelo conjunto MIC1, presente no início da tubulação, enquanto a linha de cor vermelha representa o sinal captado pelo conjunto MIC2, presente no final da tubulação, na cota de 80 metros.

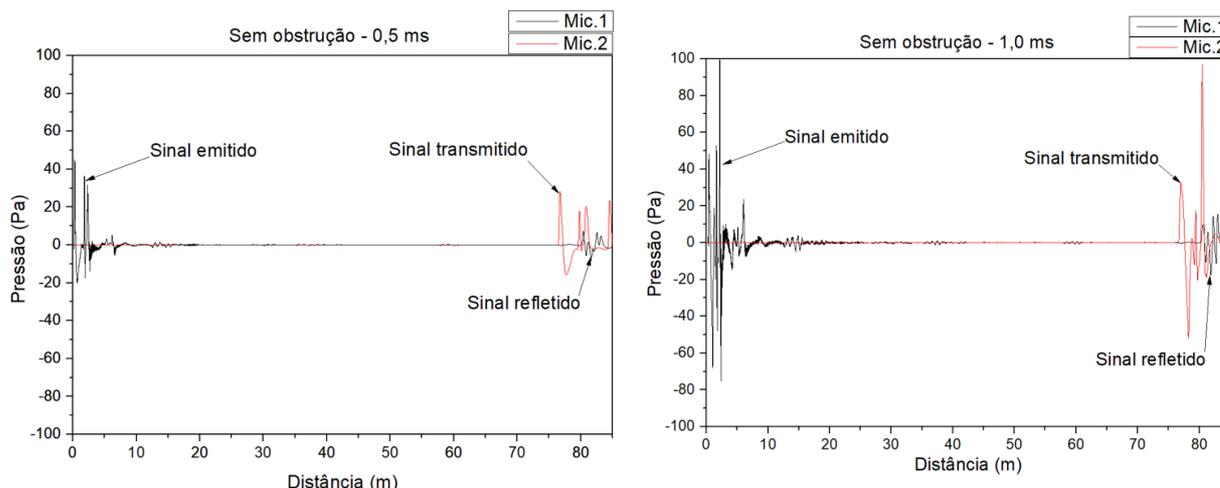


Figura 29: Comparação entre 0,5 ms e 1,0 ms - aumento no nível de pressão captado para 1,0 ms

5.2 ENSAIOS COM BLOQUEIOS

Para o ensaio com bloqueios, com a tubulação preenchida com ar estático em condição isotérmica, obtiveram-se também duas correlações, sendo pressão (Pa) x tempo (s) e pressão (Pa) x distância (m). Os bloqueios usados foram os de 10%, 25%, 50% e 75%, e cada uma delas foi exposta a uma onda quadrada com duração de 0.5 ms, 1.0 ms, 2.0 ms e 3.0 ms. Para analisar o comportamento do som passando pelo tubo, utilizou-se o software *OriginPro*, sendo feita uma comparação entre os gráficos de cada bloqueio e de cada largura de banda. Inicialmente, será feita uma comparação entre as durações da onda passando em um mesmo bloqueio, em um gráfico de Pressão x Tempo.

5.2.1 ENSAIOS COM 10% DE BLOQUEIO

Como dito anteriormente, o microfone 1 detecta o sinal refletido pelo bloqueio e o microfone 2 detecta o sinal que não foi refletido pelo bloqueio e que continuou até o fim do duto. Nas Figuras 30 e 31, é possível ver o comportamento da onda passando pelo tubo com 10% de bloqueio:

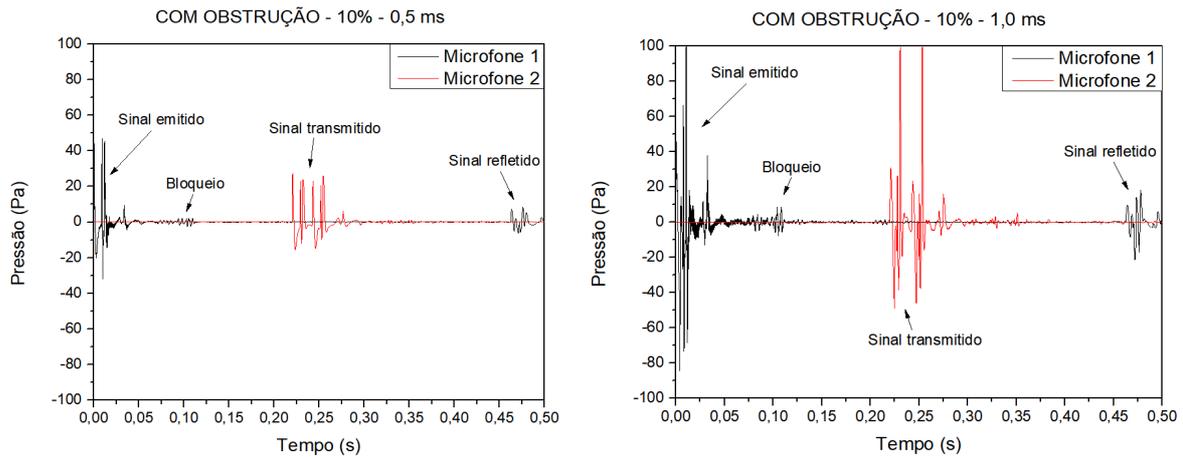


Figura 30: Bloqueio de 10% com ondas de 0,5ms e 1,0ms sendo transmitidas

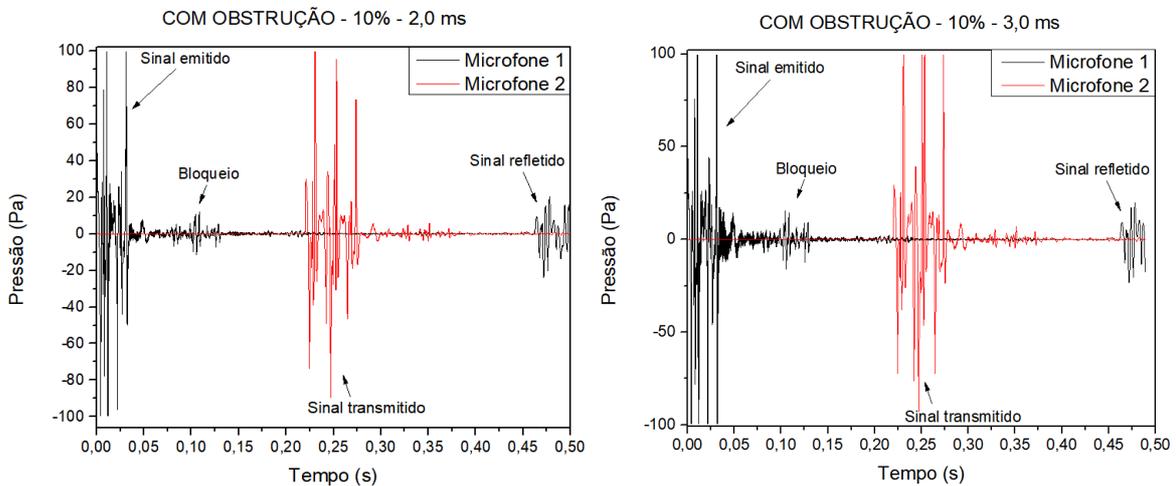


Figura 31: Bloqueio de 10% com ondas de 2,0ms e 3,0ms sendo transmitidas

Utilizando a Equação 5.1, para a velocidade v do ar de 346 m/s a 25 °C e para o tempo Δt de aproximadamente 0,093 s, pode-se verificar onde o sinal é refletido e, assim, identificar onde o bloqueio se encontra:

$$\Delta S = \frac{v \times \Delta t}{2} = 16,1 \text{ m}$$

Sabendo que o bloqueio foi colocado a 15,6 m do início da tubulação, o erro no cálculo da localização do bloqueio é de 3,2 %. Portanto, para um bloqueio grave sendo identificado no duto, é possível localizar o bloqueio de forma quase precisa, a fim de realizar as devidas intervenções.

Também, é possível observar que com o aumento da largura de banda da onda, os ruídos captados pelos microfones são maiores. Além disso, as pressões máximas captadas pelo microfone 1 na área do bloqueio aumentam conforme a largura de banda de onda aumenta.

Então, observando em um menor intervalo de tempo a área onde o bloqueio se encontra, no gráfico, e plotando todos os bloqueios em apenas um gráfico, como mostra a Figura 32, é possível confirmar como a pressão máxima aumenta com o aumento da largura de banda.

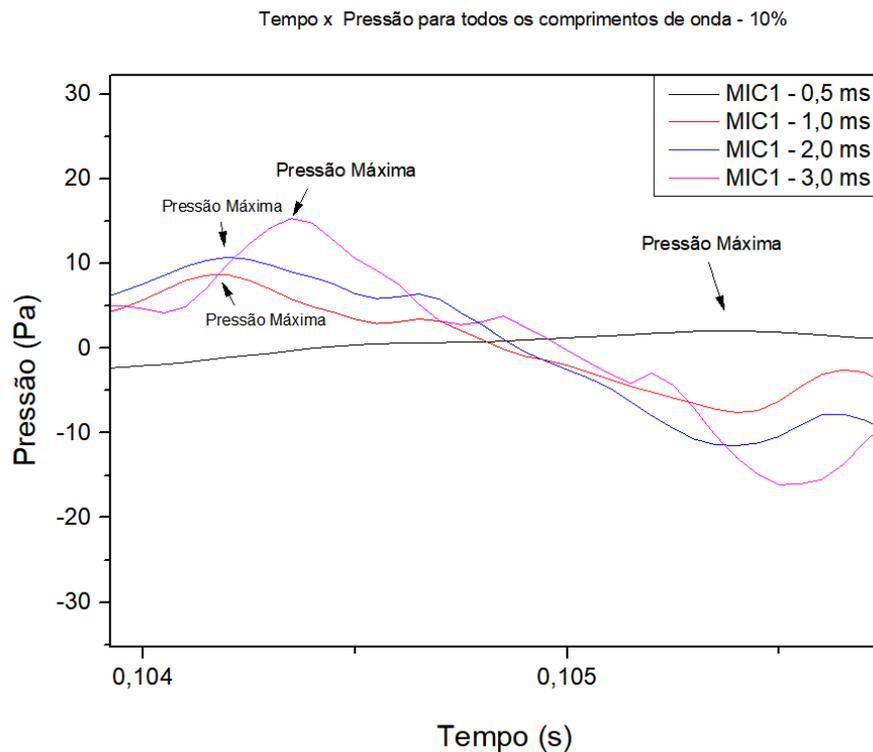


Figura 32: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 10% captado pelo microfone 1

Posteriormente, mesclando os gráficos e aproximando a área onde se localiza o sinal captado pelo microfone 2, ao fim da tubulação, conforme a Figura 33, é notável a similaridade dos perfis dos gráficos independente da duração da onda. A pressão máxima inicial se encontra na largura de 1,0 ms e o valor é 31,013 Pa.

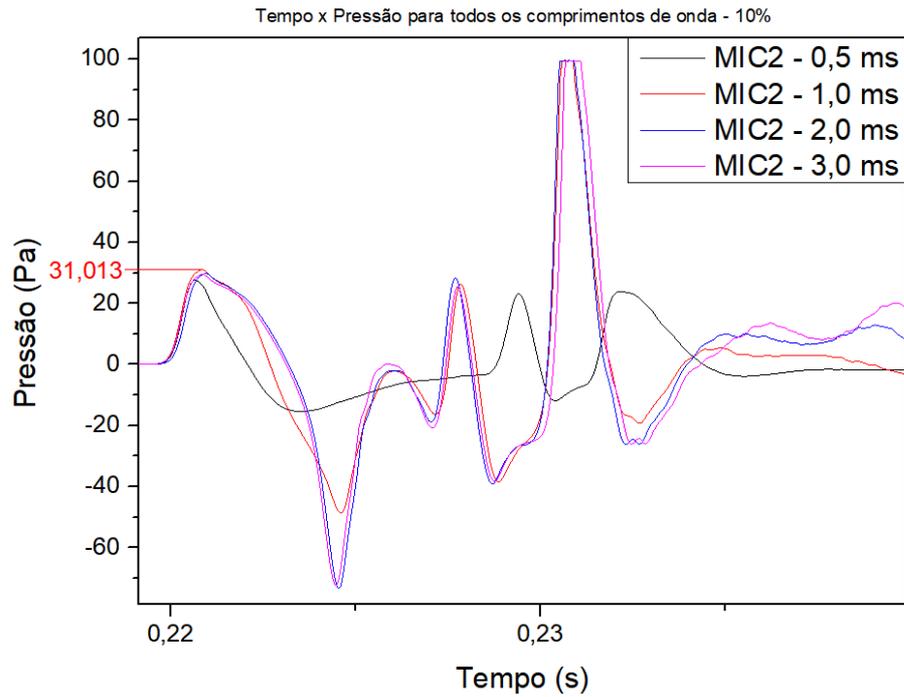


Figura 33: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 10% captado pelo microfone 2

5.2.2 ENSAIOS COM 25% DE BLOQUEIO

O mesmo ensaio foi feito para o tubo com 25% de área de bloqueio e, apesar de apresentar o mesmo perfil, a onda refletida pelo bloqueio torna-se mais notável, devido a sua maior área, conforme as figuras 34 e 35, para todos os comprimentos de onda. Sendo assim, as pressões detectadas pelo microfone ao início do tubo, para o sinal refletido pelo bloqueio, são maiores.

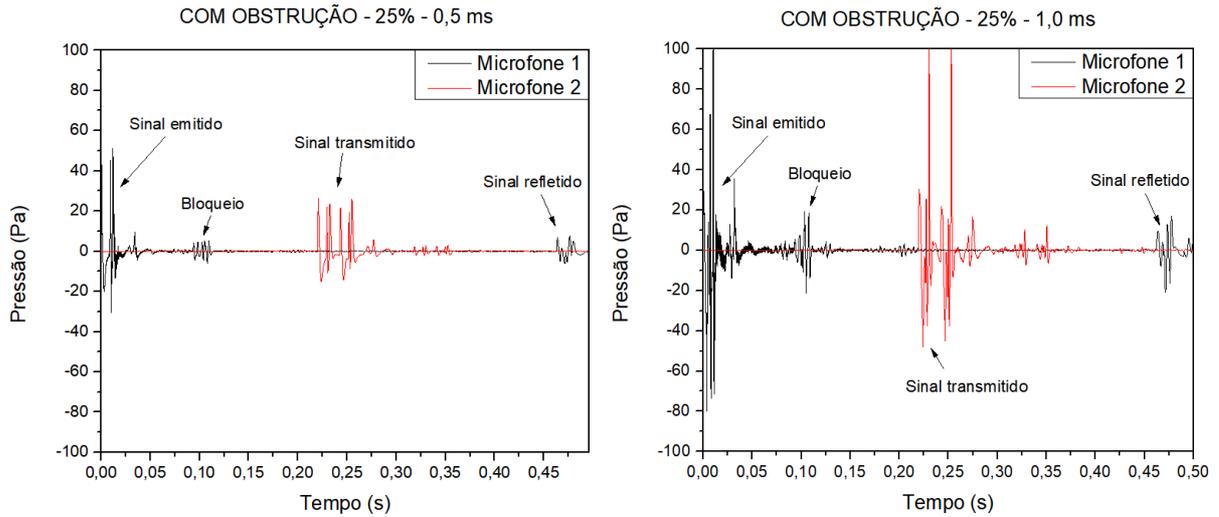


Figura 34: Bloqueio de 25% com ondas de 0,5 ms e 1,0 ms

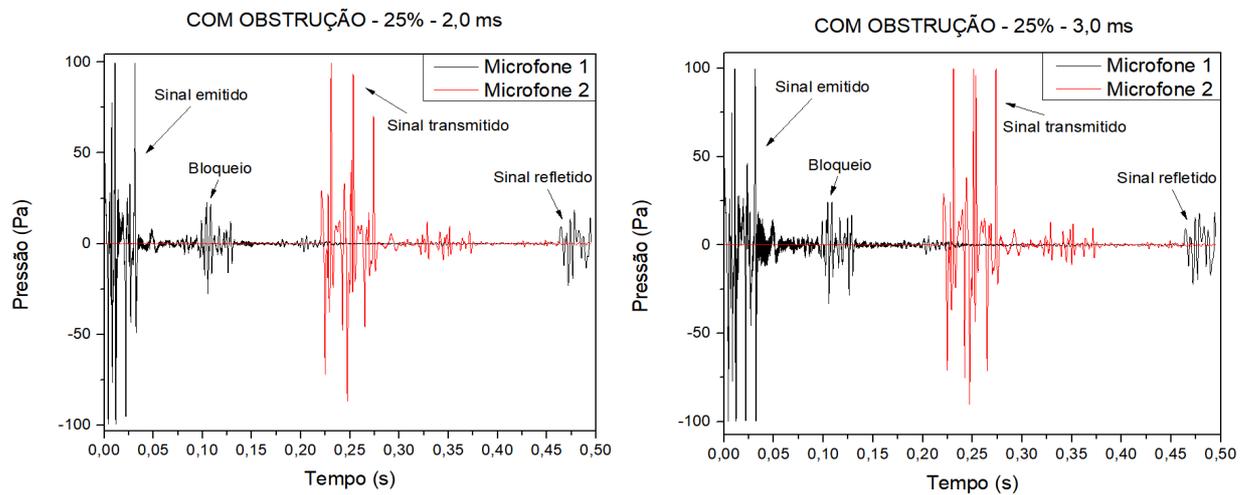


Figura 35: Bloqueio de 25% com ondas de 2,0 ms e 3,0 ms sendo transmitidas

Na Figura 36, observa-se que as pressões máximas aumentam conforme a largura de banda aumenta. Além disso, é possível notar que as pressões máximas são maiores do que as encontradas no tubo com bloqueio de 10%, devido a natureza do bloqueio, tendo este maior área de ocupação da seção do tubo, refletindo maiores partes do sinal emitido. Ainda, observa-se também que a diferença de pressão para 1,0 ms, 2,0 ms e 3,0 ms é pouco notável, com relação a largura de 0,5 ms.

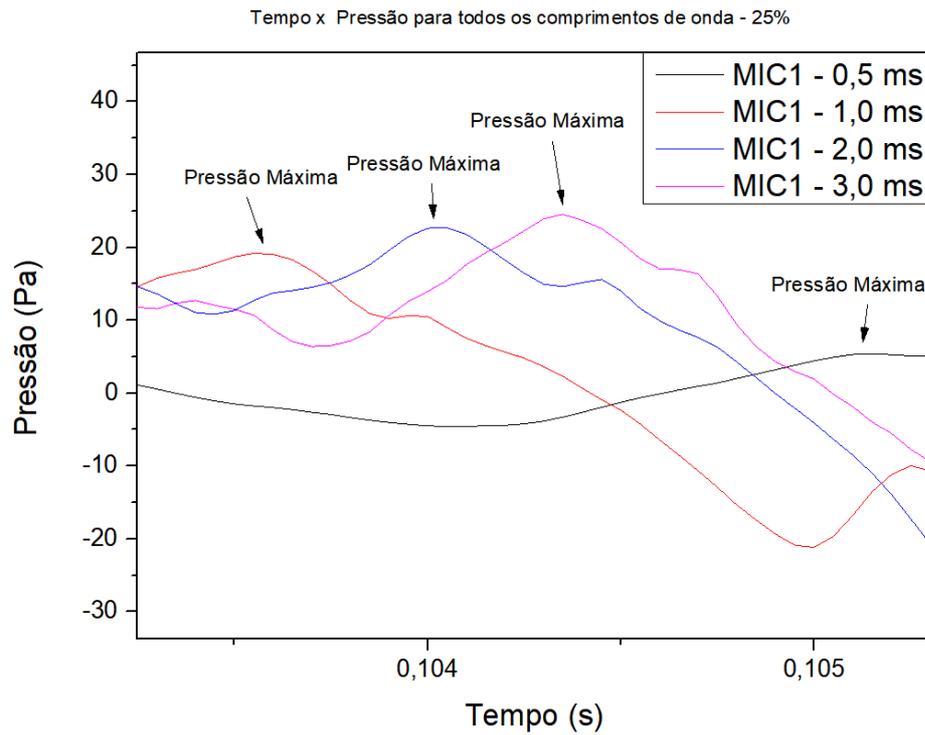


Figura 36: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 25% captado pelo microfone 1

Observando o que foi captado pelo microfone 2, conforme Figura 37, também é possível ver que não há alteração no valor das pressões conforme o valor da duração de onda muda. Porém, é possível notar que a onda inicial é menor que a onda captada no tubo com 10% de bloqueio. Exemplificando, a pressão na duração de onda 1,0 ms é 30,286 Pa com bloqueio de 25%, enquanto com bloqueio de 10% era 31,013 Pa.

Nota-se uma menor pressão no sinal transmitido, captado pelo microfone ao fim do tubo, pois uma maior parte do sinal foi de fato refletida pelo bloqueio com área maior.

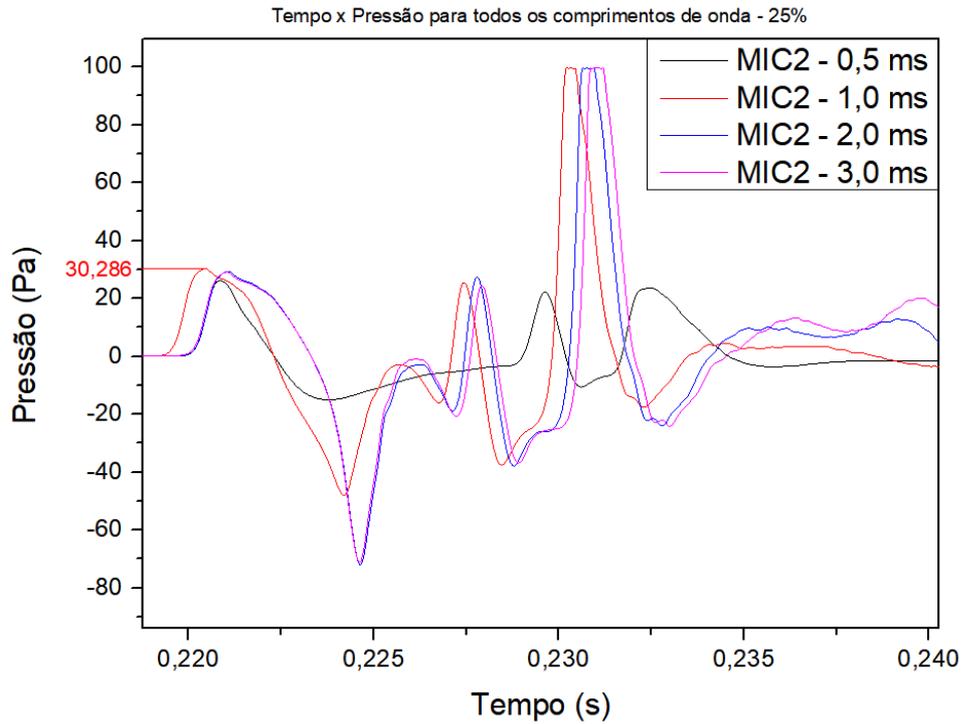


Figura 37: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 25% captado pelo microfone 2

5.2.3 ENSAIOS COM 50% E 75% DE BLOQUEIO

Os mesmos princípios percebidos nos ensaios anteriores também se aplicam nos ensaios com 50% e 75% de bloqueio. Ambos mantem o mesmo perfil e as pressões máximas detectadas aumentam conforme o percentual do bloqueio aumenta.

Nas Figura 38 e 39, pode-se observar, mais uma vez, que as pressões máximas aumentam conforme o comprimento da onda aumenta. Para ambos os casos, de 50% e 75% de área de bloqueio, há pouca diferença nas pressões para 1,0 ms, 2,0 ms e 3,0 ms, sendo que a maior diferença é relativa á largura de 0,5 ms.

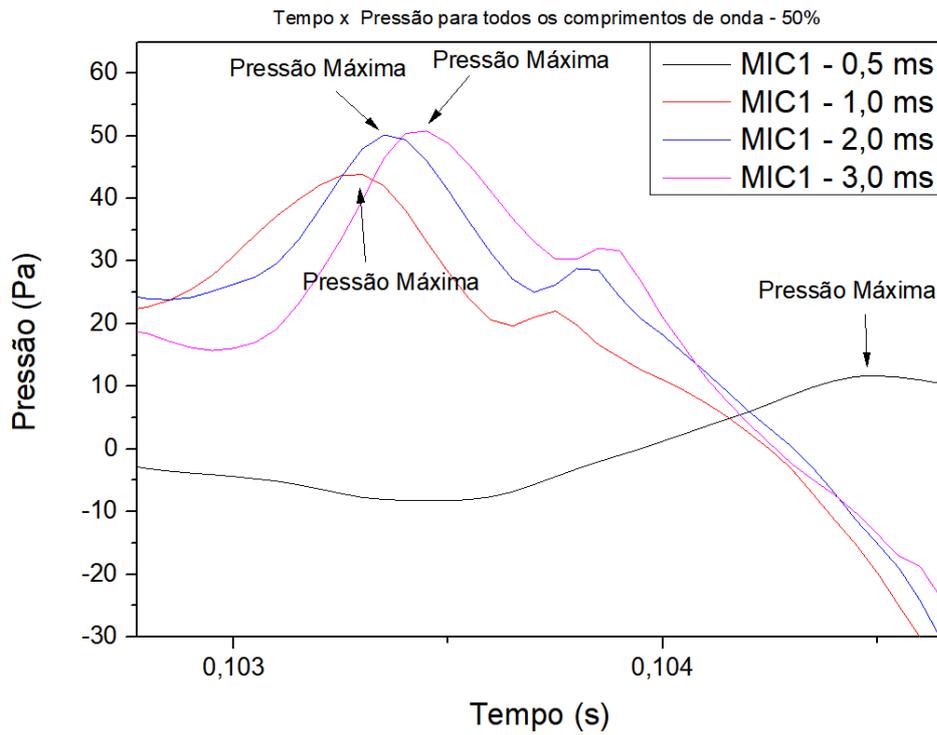


Figura 38: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 50% captado pelo microfone 1

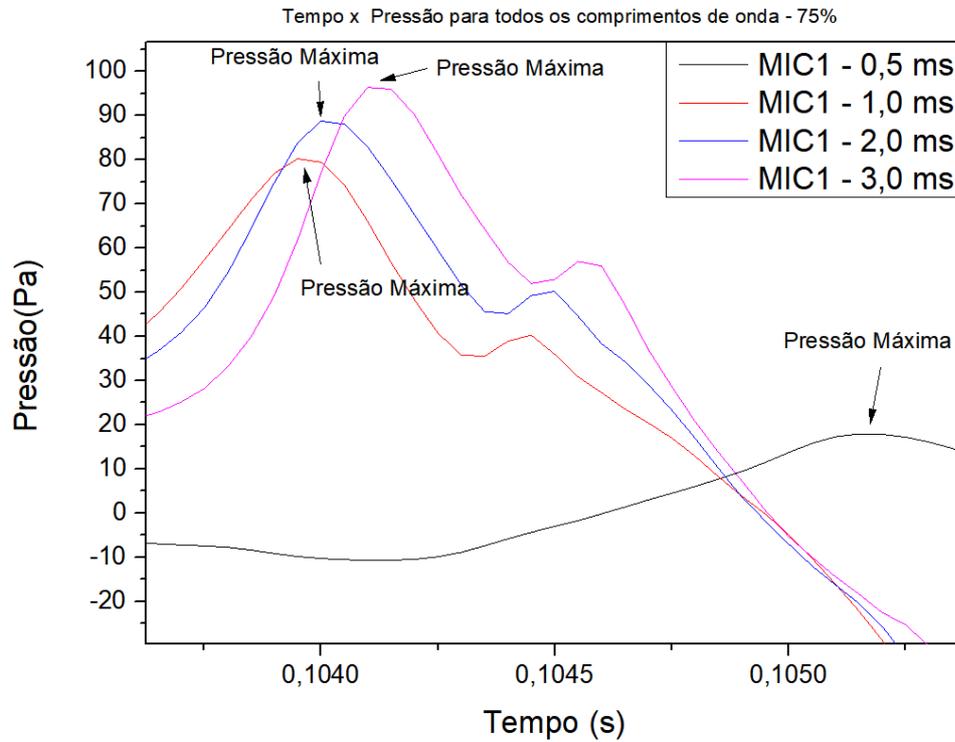


Figura 39: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 75% captado pelo microfone 1

Agora observando o que foi captado pelo microfone 2, conforme Figuras 40 e 41, o perfil também se mantém nos dois casos. Além disso, ainda é possível observar a diminuição do valor da pressão inicial quando o valor do bloqueio aumenta.

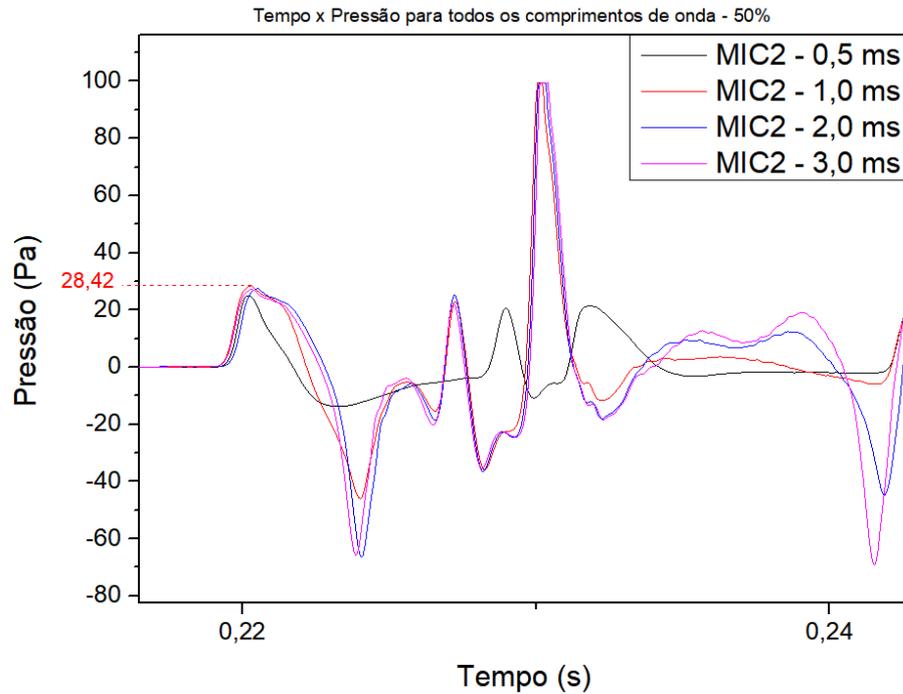


Figura 40: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 50% captado pelo microfone 2

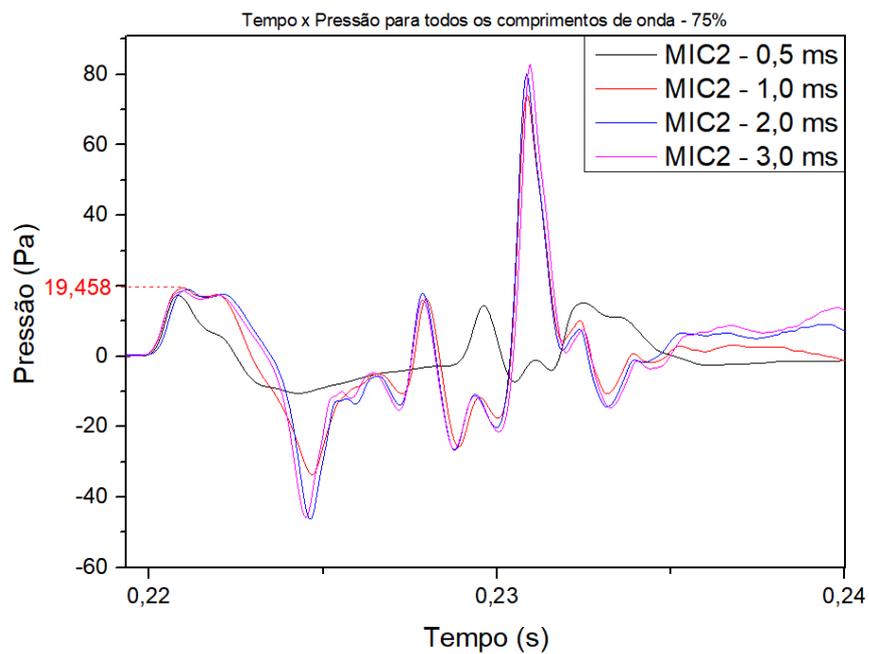


Figura 41: Gráfico das ondas passando pelo bloqueio de 75% captado pelo microfone 2

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS (MICROFONE 1)

Com os dados do microfone 1, que é responsável por captar o som emitido, é possível ver nos gráficos anteriores que quanto maior a duração de onda que passa pelos bloqueios, maior o valor da pressão máxima, isto se deve ao fato que, sinais com maior comprimento de onda possuem menor frequência, e com isto, a atenuação da onda durante a propagação se torna menor, segundo a frequência de corte apresentada na Equação (3.4). Além disso, quanto maior o bloqueio, o valor da pressão máxima também aumenta. Isso acontece porque o microfone 1 capta o sinal refletido pelo bloqueio, logo, quanto maior o bloqueio, maior é a incidência do sinal que retorna para o microfone 1.

A Figura 42 apresenta o valor da pressão máxima refletida da obstrução e captado pelo microfone 1 de cada caso apresentado acima. O gráfico feito é Pressão Máxima x Área de Bloqueio.

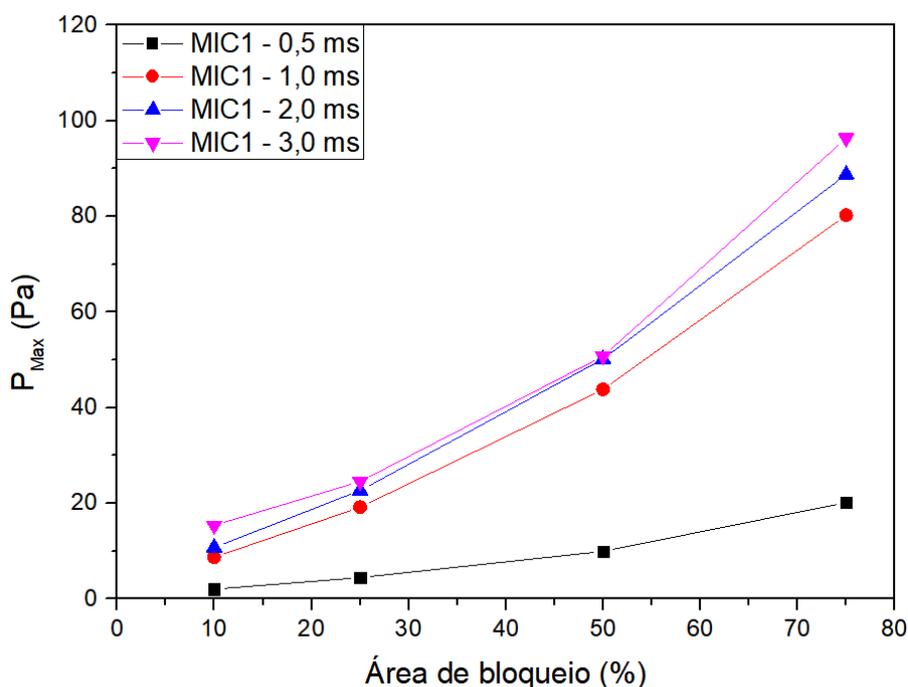


Figura 42: Gráfico com as pressões máximas de cada bloqueio em cada duração de onda

Na Figura 42 é possível analisar o conjunto de dados coletado durante o experimento para ondas emitidas com diferentes durações. Observando as linhas formadas por cada área de bloqueio, é possível confirmar o que já foi dito anteriormente, que conforme o bloqueio

aumenta, a pressão máxima também aumenta. Pois, como já verificado, uma maior parte do sinal emitido reflete e é captada pelo microfone 1.

Além disso, examinando as linhas que representam cada duração de onda, também é possível confirmar as análises anteriores. Quanto maior a largura de banda da onda emitida pelo alto-falante, maiores são as pressões captadas pelo microfone.

Ou seja, utilizando as informações coletadas pelo microfone 1, é possível identificar a posição dos bloqueios no duto, além da porcentagem de bloqueio, com relação à seção transversal do duto.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS (MICROFONE 2)

Com os dados do microfone 2, que é responsável por captar o sinal transmitido, é possível observar nos gráficos anteriores que quanto maior a largura de banda de onda, menor o valor da pressão máxima. Além disso, quanto maior o bloqueio, menor é o valor da pressão máxima. Isso acontece porque o microfone 2 capta o sinal que consegue ser transmitido através do duto após o bloqueio. Logo, quanto maior o bloqueio, maior a quantidade de som que fica retida na primeira parte do duto e menor a quantidade de som que é transmitida e captada pelo microfone 2.

Na Figura 43 foi plotado o valor da pressão máxima captado pelo microfone 2 de cada caso apresentado acima. O gráfico representa a relação de pressão máxima e área de bloqueio.

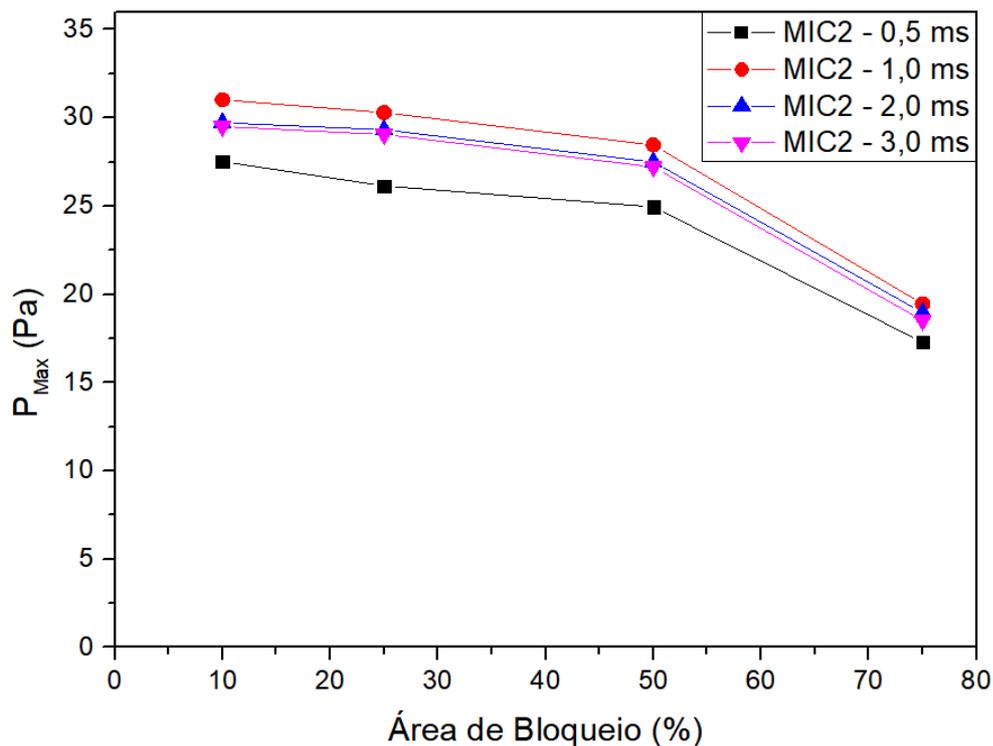


Figura 43: Gráfico com as pressões máximas de cada bloqueio em cada duração de onda

Observando as linhas formadas por cada área de bloqueio, é possível confirmar que conforme o bloqueio aumenta, a pressão máxima diminui. Pois, uma menor quantidade de sinal é transmitida pelo duto e captada pelo microfone 2.

Portanto, utilizando o microfone 2, também é possível identificar os bloqueios e a gravidade de cada um. Logo, o conjunto de dados coletados pelos microfones 1 e 2 se complementam.

5.5 ANÁLISE NO DOMÍNIO DE FREQUÊNCIA DE SINAIS

Além das análises feitas anteriormente, também foi feito um estudo no domínio da frequência de sinais na onda emitida de 1,0 ms. O som de frequência única é útil para analisar os fenômenos acústicos (Jacobsen, 2010). Utilizando a FFT, é possível decompor as funções temporais em frequências, obtendo assim, a amplitude dos sinais emitidos no duto. Isso é feito, pois praticamente sempre será mais útil analisá-lo no domínio da frequência do que olhar a pressão sonora como uma função do tempo (Jacobsen, 2010). Na Figura 44, pode-se observar os sinais refletidos por todas as obstruções, utilizando a nomenclatura SO para representar o

ensaio sem obstruções e OS para representar as obstruções. Os ruídos presentes no gráfico acontecem porque o duto possuía resíduos.

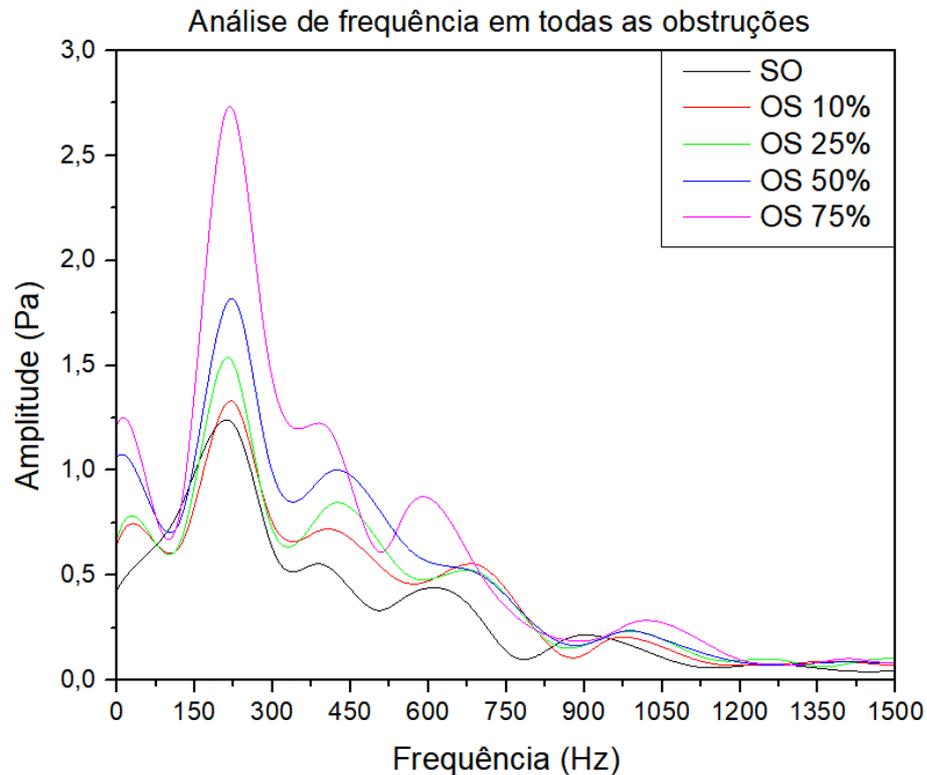


Figura 44: Sinais refletidos pelas obstruções no domínio da frequência

Além disso, é possível ver que quanto maior a área da obstrução, maior é a amplitude de pressão. O que acompanha os resultados anteriores, onde quanto maior a área da obstrução, maior a pressão acústica. Portanto, é possível também identificar bloqueios e caracterizar seu tamanho a partir da análise no domínio da frequência. Para que seja possível localizar o bloqueio, é necessário obter a assinatura do duto, ou seja, sempre será necessário realizar o ensaio no duto sem obstrução.

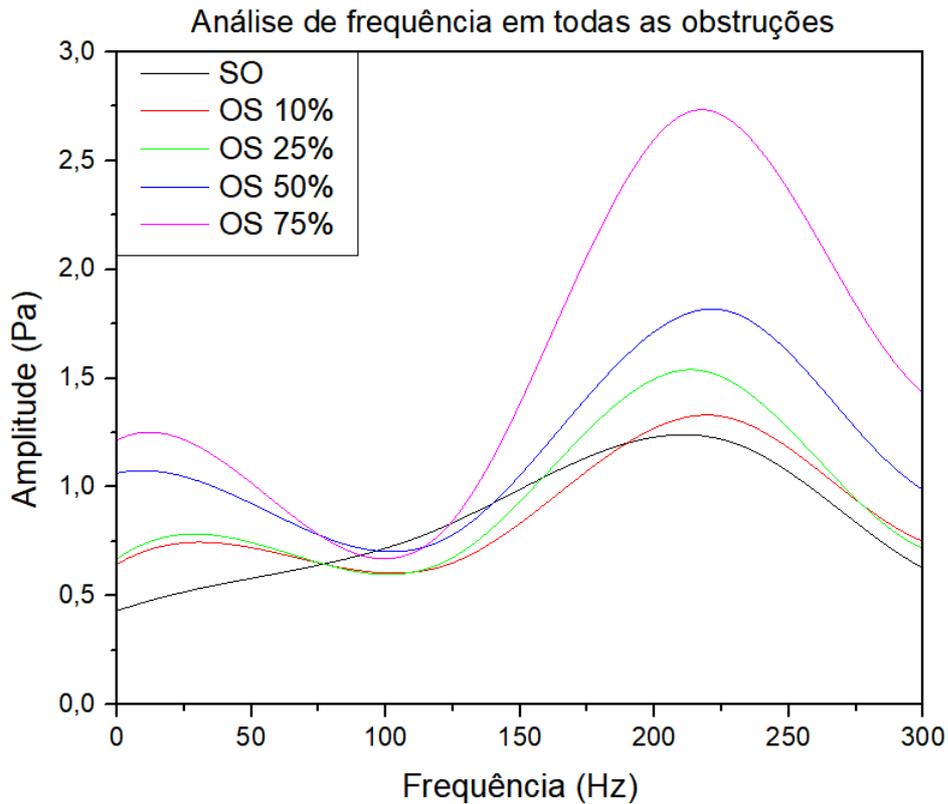


Figura 45: Sinais refletidos pelas obstruções no domínio da frequência até 300 Hz

Além disso, como visto na Figura 45 (esta figura é uma ampliação da Figura 44 no intervalo de frequências de 0 a 300Hz), é possível identificar que as amplitudes detectadas se concentram em frequências até 300 Hz. Logo, pode-se concluir que o ensaio possui maior sensibilidade na faixa de frequências de 0 a 300 Hz, sendo que a amplitude de pressão para todos os tamanhos de bloqueio ocorreu dentro da mesma faixa estreita de frequência. A maior amplitude ocorre para o maior tamanho de bloqueio, de 75%.

É importante citar que todos os bloqueios possuem o mesmo comprimento, não sendo possível analisar a influência do comprimento de bloqueio no espectro de frequência, para este caso. Para todos os efeitos, a faixa de frequência é a mesma em todos os tamanhos de bloqueio, com o mesmo comprimento.

6. ANÁLISE NUMÉRICA

Um modelo numérico, em elementos finitos tridimensionais, foi desenvolvido no software *Abaqus* (versão 6.13) para estudar a propagação da onda emitida a partir do alto-falante, em um meio contendo ar. A análise se baseou nos dados obtidos pelo microfone MIC1, situado no *spool* S1, ao início da linha, a partir de onde é possível detectar tanto a onda emitida, quanto a onda refletida pelo bloqueio, situado no segundo *spool* da linha, *spool* S2, a 15,6 metros de distância do alto-falante.

6.1 DEFINIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O modelo foi desenvolvido considerando o ar como meio fluido, despressurizado e em condições estáticas, sem interação fluido-estrutura, ou seja, a interação entre a parede interna do tubo e o fluido não foi considerada na análise, pois os sinais emitidos pelos alto-falantes possuem baixa amplitude, logo, não haverá dissipação das ondas. Isso simplifica o modelo, tornando a análise mais rápida, por conta do menor número de variáveis.

O fluido foi discretizado utilizando o elemento hexagonal do tipo AC3D8R, onde tem-se:

AC – Elemento do tipo acústico;

3D – Elemento em 3 dimensões;

8 – Numero de nós, com integração reduzida;

Direção de propagação de pulso axial, com ondas planares.

O elemento é definido por 8 nós com 1 grau de liberdade por nó. A figura 46 mostra a malha utilizada no modelo. O modelo foi inicialmente simulado sem obstruções, para verificar a adequabilidade de um modelo numérico à simulação de uma situação real de inspeção de bloqueios no duto. Para a malha em questão, foram criados 24960 elementos para o tamanho de elemento escolhido, a partir de uma análise de convergência que será abordada a seguir.

Também, o fluido modelado na análise foi o ar, dentro dos mesmos parâmetros já citados previamente, sendo estes a velocidade do som (c) considerando que a massa específica do ar (ρ) é de $1,28 \text{ kg/m}^3$ e o módulo de compressibilidade, ou *Bulk Modulus* (K_C), é de $1,42 \times 10^5 \text{ Pa}$, a 25°C , segundo Loureiro (2015) utilizando novamente a equação:

$$c = \sqrt{\frac{K_C}{\rho}} \quad (6.1)$$

O estudo numérico foi realizado com um modelo de comprimento de 15,6 metros, medida esta onde foi inserido o bloqueio para os testes experimentais. Não foi necessário modelar a tubulação inteira, no comprimento de 80 metros, por conta do alto tempo de análise e pelo fato de que o sinal emitido decai antes da região do bloqueio, sendo possível calibrar o modelo numérico a partir da análise no início do duto, conforme serão apresentados os resultados.

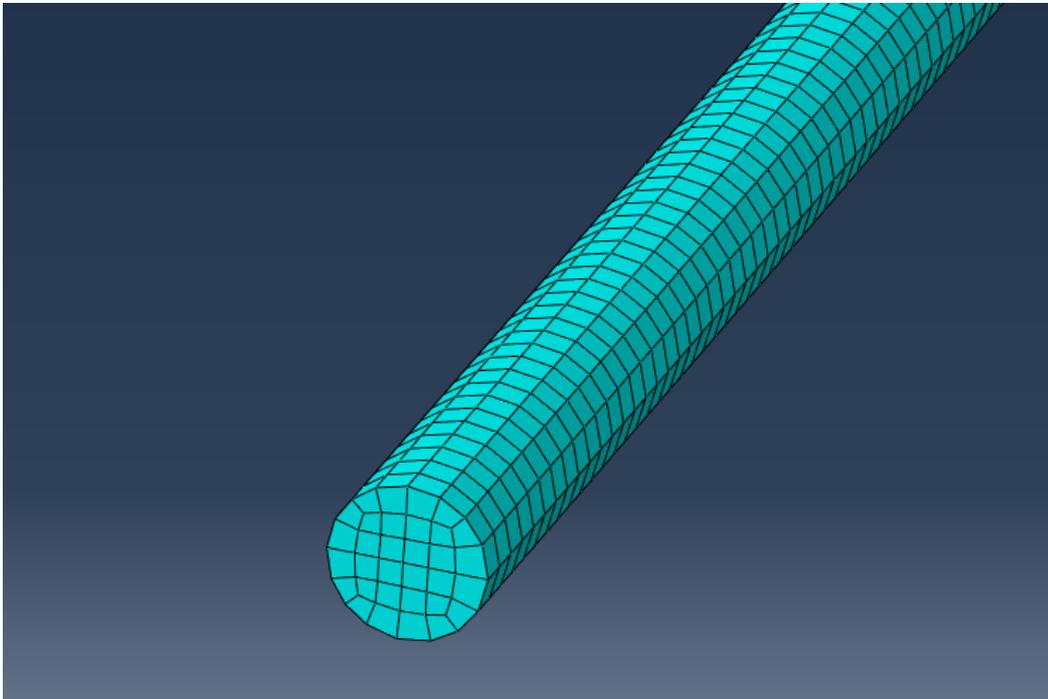


Figura 46: Malha utilizada no modelo

6.2 ESTUDO DE CONVERGÊNCIA

Foi realizado um estudo de convergência da malha, para verificar o tamanho ideal dos elementos a serem utilizados, permitindo então utilizar um refinamento adequado para mostrar resultados precisos, condizentes com os testes experimentais e que não tomassem tempo excessivo de análise numérica.

Utilizou-se um mesmo modelo geométrico, sendo a variação feita apenas no comprimento dos elementos. A tabela 2 mostra a relação dos comprimentos de elementos

analisados, bem como a pressão máxima obtida nas análises. Os dados foram obtidos a partir da análise de um nó localizado a 250 mm da superfície de incidência da onda, onde se dá a entrada do pulso acústico.

Tabela 2: Relação de tamanho e pressão para os elementos analisados

Tamanho dos elementos (m)	Pressão Máxima (Pa)
0,085	107,064
0,070	101,972
0,05	107,064
0,030	105,307
0,025	105,539
0,020	105,307

Assim, foi possível definir o melhor comprimento de elemento tridimensional como sendo 0,020 m, ou 2 mm, para o modelo, pois é um valor no qual a pressão começa a se estabilizar na análise numérica. A imagem 47 representa, de forma gráfica, o estudo de convergência mostrando que a pressão se estabiliza quanto menor for o comprimento do elemento, entre os valores de 0,030 m e 0,020 m para o tamanho dos elementos. O critério de convergência foi a estabilização da pressão dada a variação do tamanho do elemento. Portanto, o tamanho de elemento escolhido se deu pela estabilização da pressão em torno de 105 Pa.

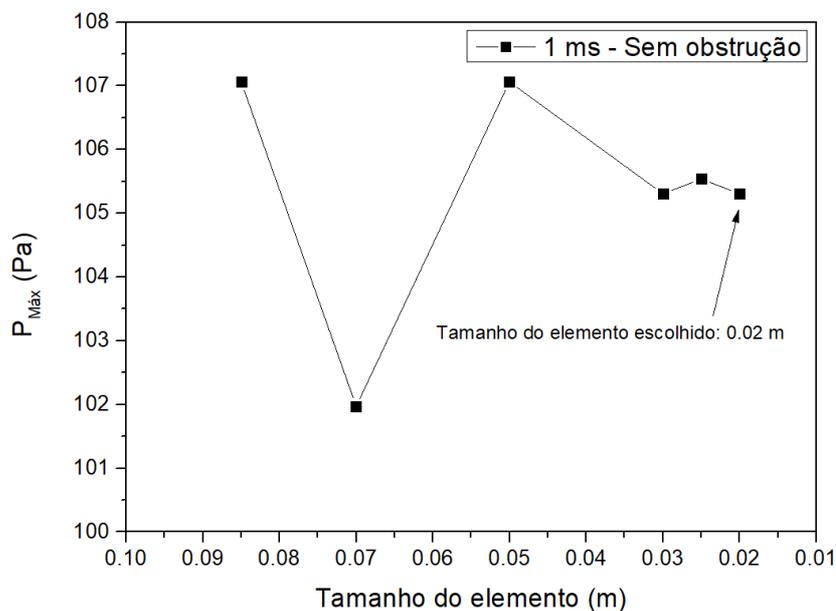


Figura 47: Resultado obtido no estudo de convergência da malha no tempo

6.3 ESTUDO NUMÉRICO DE MODELO SEM BLOQUEIO

A análise numérica, a partir da simulação de um tubo sem bloqueios, para o comprimento de onda de 1,0 ms, mostrou que o resultado da simulação aproxima-se do resultado experimental, com relação às pressões máximas obtidas e também aos picos de pressão. A Figura 48 mostra a relação, para um ensaio sem obstrução, com onda de comprimento de 1,0 ms, entre o teste experimental e a simulação numérica. O atraso da solução numérica em relação à experimental pode acontecer por causa da localização dos microfones.

Para a simulação, os dados obtidos no teste experimental foram utilizados como entrada para verificar a acuidade da simulação numérica na previsão do comportamento dos sinais na detecção de bloqueios.

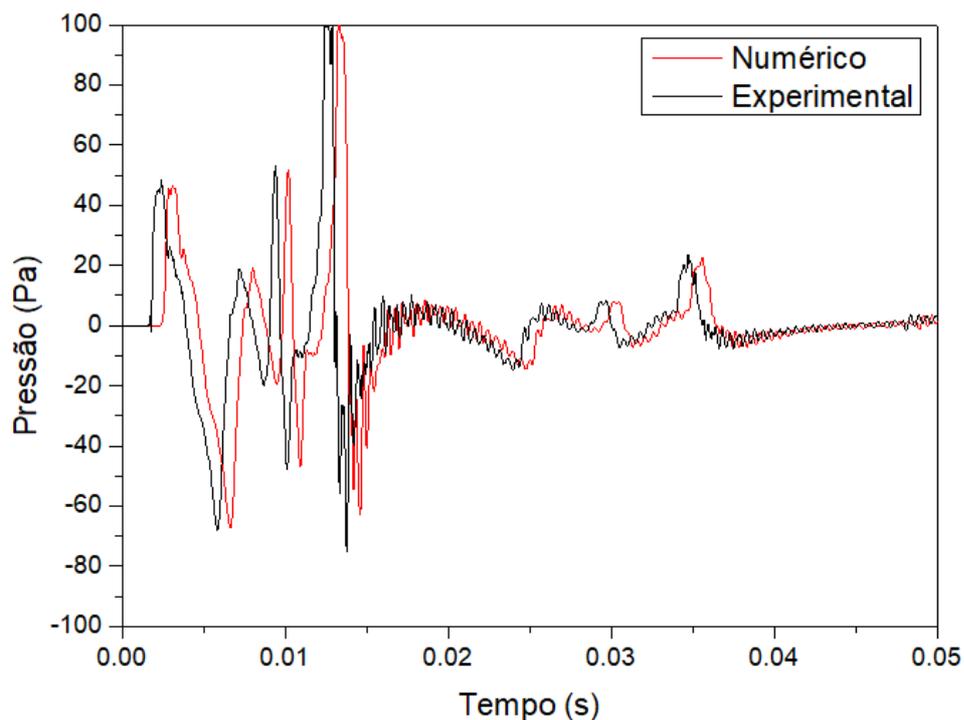


Figura 48: Comparação entre os resultados experimental e numérico, para um ensaio sem obstrução, com comprimento de onda de 1,0 ms

A partir da correlação entre o teste experimental e a simulação do modelo numérico, é possível afirmar que uma análise numérica pode ser executada para a previsão do comportamento do ensaio experimental e conseqüentemente da atuação de equipamento de emissão de sinais em campo, uma vez que o modelo demonstra estar calibrado, em comparação

ao teste experimental. A figura 49 mostra a onda de pressão, na simulação numérica, avançando pela seção transversal do duto.

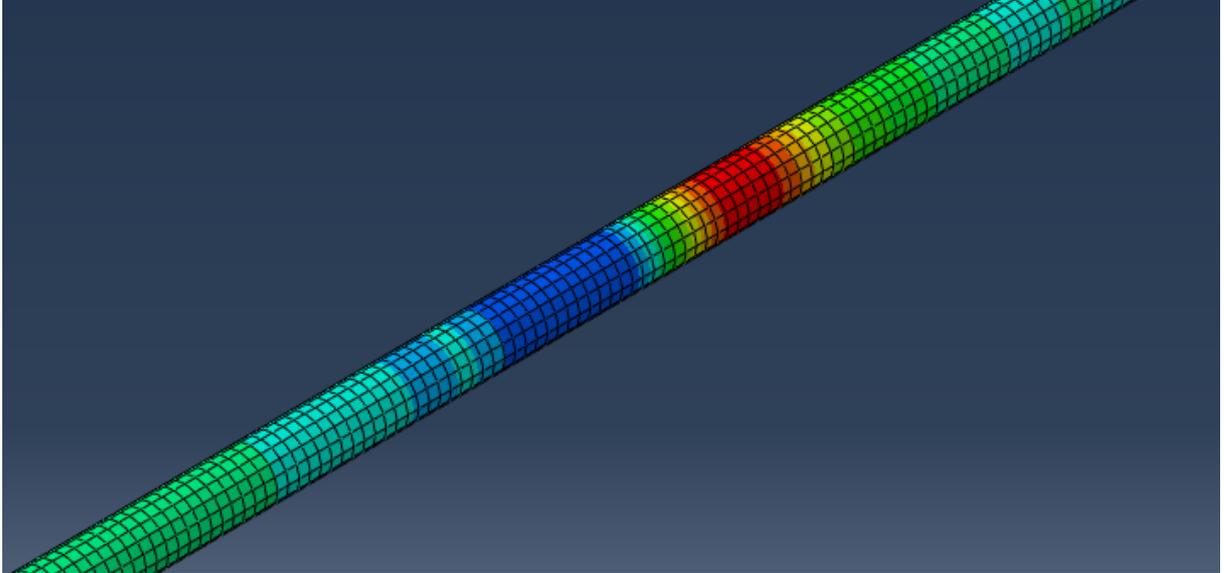


Figura 49: Onda de pressão avançando pela seção transversal do duto

6.4 ESTUDO NUMÉRICO DE MODELO COM 50% DE OBSTRUÇÃO

Para verificar a validade do estudo numérico para análises de dutos com bloqueios, foi estudado um modelo com bloqueio de 50% da área do duto, a partir de uma onda de 1 ms. Conforme a Figura 50, é possível afirmar que o modelo numérico pode ser utilizado para simular o comportamento da técnica com bloqueios no duto, confirmando a análise feita sem bloqueio, que demonstrou uma ótima correlação entre os resultados do modelo numérico e os experimentais. A análise foi feita considerando o comprimento de 15,6 metros, trecho antes do bloqueio, e o bloqueio em comprimento integral, que mede 500 milímetros. Utilizou-se o sinal até a primeira reflexão do bloqueio para fazer a correlação entre os resultados numéricos e experimentais. A Figura 50 mostra a análise feita até 0,15 segundos, momento até o qual pode-se verificar a detecção da primeira reflexão do bloqueio de 50% de obstrução de área.

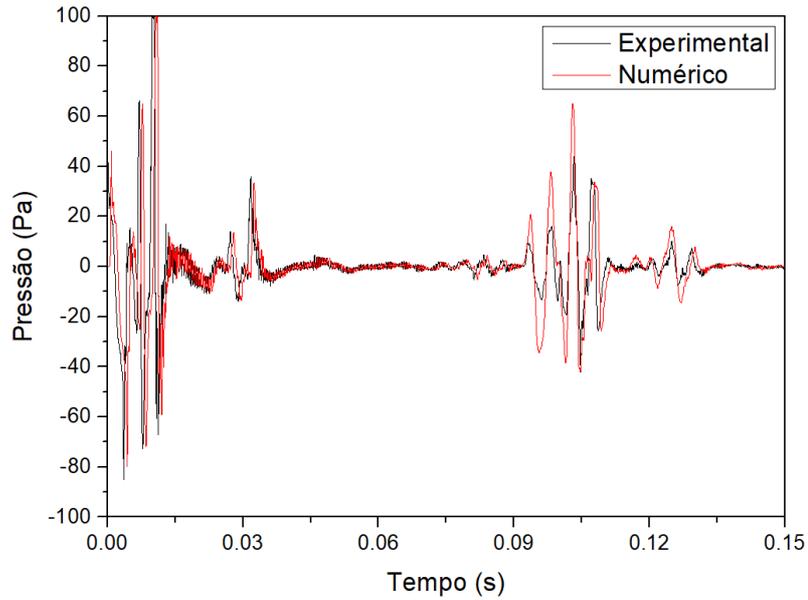


Figura 50: Comparação entre os resultados experimental e numérico, para um ensaio com obstrução de 50% de área, com comprimento de onda de 1,0 ms

A figura 51 ilustra, no modelo em 3 dimensões, o reflexo da onda de pressão após encontrar o bloqueio na tubulação, onde parte da onda continua seu trajeto através do bloqueio, representado pela diminuição na seção do modelo.

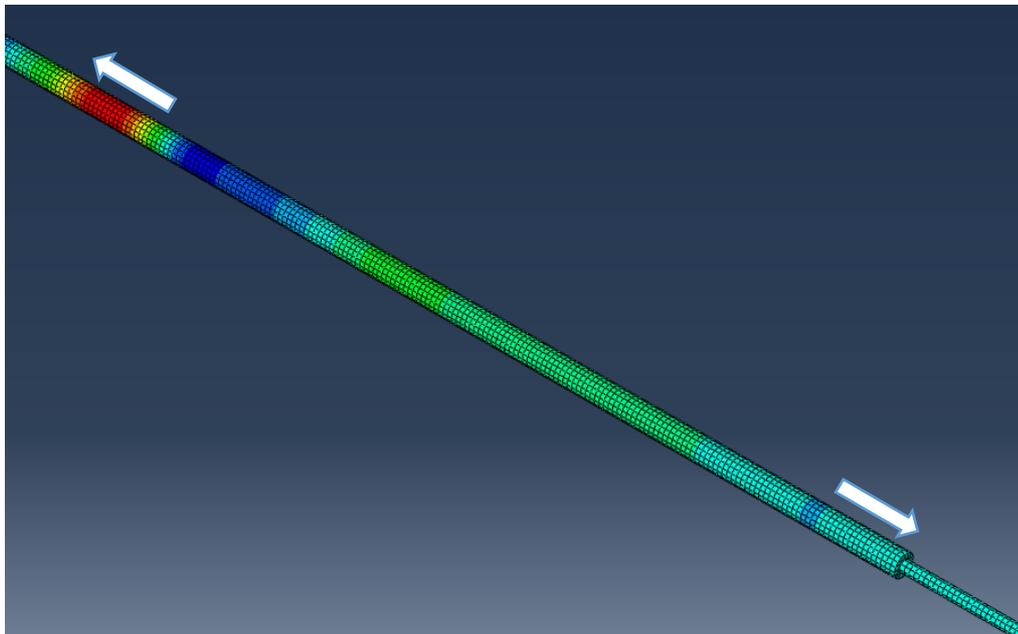


Figura 51: Parte da onda sendo refletida pelo bloqueio e outra parte da onda, com menor intensidade, avançando através do bloqueio de 50% de área.

Conforme mostra a Figura 52, que mostra a região de reflexão do bloqueio, o sinal numérico possui o mesmo perfil do sinal experimental. A diferença nas pressões detectadas pode ser atribuída a fatores como variação no posicionamento do bloqueio no spool, desgaste na parafina do bloqueio, angulação das arestas, outros fatores geométricos do bloqueio utilizado e detritos na tubulação.

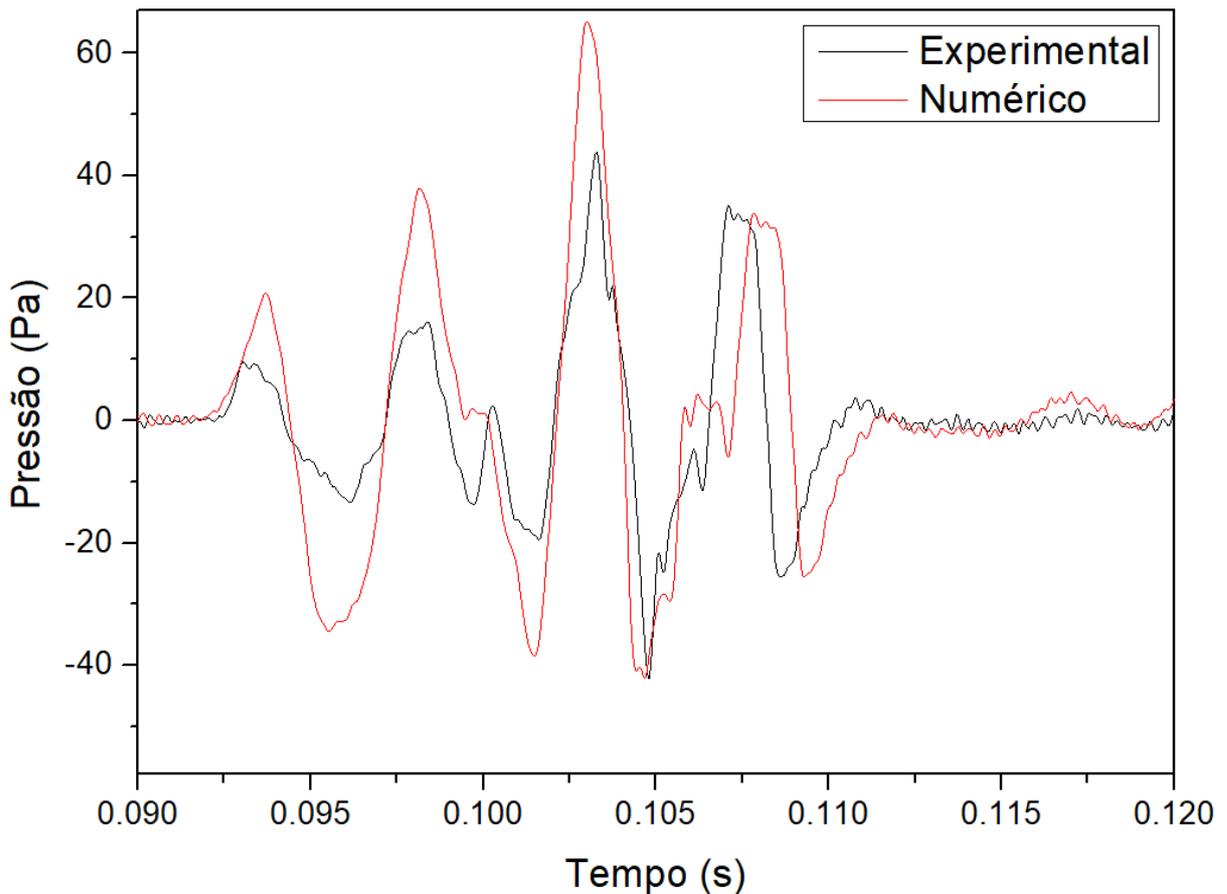


Figura 52: Área de reflexão do bloqueio de 50% da seção do duto, correlacionando o resultado experimental com o resultado numérico

Tendo o mesmo perfil e pressões máximas próximas para todos os picos, como demonstra a Figura 52, é possível verificar então, observando também a região de reflexão do bloqueio, que o estudo numérico pode, também com bloqueios, prever o comportamento do sinal acústico em aplicações práticas. Além disso, pode-se observar a maior proximidade nos últimos picos para os resultados experimental e numérico, indicando que esta região independe dos fatores supracitados, podendo então o final da reflexão ser um parâmetro positivo de previsão do comportamento prático através da simulação numérica.

7. CONCLUSÕES

O ensaio experimental e o teste via simulação numérica demonstraram, a partir dos resultados apresentados, que é possível, a partir da emissão de pulsos acústicos, detectar a existência de bloqueios, com uma grande variedade de espessuras, em tubulações industriais. Isso demonstra a possibilidade de diminuir a utilização de técnicas invasivas ou destrutivas nos dutos, além de possibilitar que o duto seja inspecionado em operação, sem a necessidade de parada para manutenção ou inspeção, o que pode gerar custos.

Para o teste sem obstrução, é possível identificar a forma como a técnica capta os resultados, a partir dos níveis de pressão dos sinais captados pelos microfones. Quando se verifica picos de pressão no gráfico, há a indicação da existência de qualquer tipo de bloqueio, seja este parcial ou total, na linha, pois isso significa que a onda refletiu em algo dentro da tubulação. Para o caso sem obstrução, o bloqueio foi total, no fim da tubulação e no início, onde a reflexão do sinal emitido foi captada.

O teste com obstrução mostra, além dos picos de pressão para bloqueio total, picos menores que decaem com o tempo, significando que foram detectados bloqueios entre o início e o fim da tubulação. A amplitude de pressão está relacionada ao tamanho do bloqueio detectado, ou seja, quanto maiores as pressões dos picos de reflexão, mais intensos são os bloqueios na tubulação.

É importante citar a conclusão obtida nos resultados numéricos. Pode-se prever o comportamento da evolução do sinal acústico dentro da tubulação a partir da execução de modelos numéricos por elementos finitos, como demonstrado ao final do trabalho. Esta previsão pode ser importante para simular o comportamento de equipamentos em campo ou para estudar diferentes configurações de bloqueio, com geometrias transversais e comprimentos variados.

Assim, no estudo da tubulação sem bloqueios é possível observar que o método utilizado é adequado. Além disso, há uma boa precisão na coleta de resultados, como por exemplo, no caso da distância. Obteve-se que o pulso refletido pelo final da tubulação foi exibido como um pico de pressão, mesmo que o sinal tenha sido mostrado já de forma decaída, e captado pelos microfones no início da tubulação. O resultado obtido foi de 80 metros, ou seja, o comprimento da tubulação entre os microfones.

Como aplicação deste resultado, estende-se esse estudo para os ensaios com bloqueios. Aplicando o mesmo princípio de verificação do sinal refletido para detectar o bloqueio na linha,

é possível identificar seu posicionamento dentro da tubulação, correlacionando o tempo no qual foi detectado com a velocidade do som no ar para a temperatura em que o teste foi feito, o que possibilita ação direta no problema, sem a necessidade de mitigação do problema a partir de observações empíricas.

Para o teste com obstrução, é possível identificar nos gráficos uma perturbação identificada pelo microfone 1 e causada pelo bloqueio existente. Além disso, é possível identificar o local onde o bloqueio se encontra. O resultado obtido foi de 16,1 m do início do duto, enquanto o resultado real é 15,6 m. O erro no cálculo da localização do bloqueio é de 3,2 %, o que corresponde a uma boa confiabilidade no resultado do ensaio, uma vez que é uma percentagem baixa, se comparada ao comprimento total do duto ensaiado.

Ademais, conforme a área de obstrução aumenta, o valor da pressão acústica também aumenta. Logo, é possível identificar a gravidade do bloqueio presente no duto. Porém, como é mostrado nas análises de frequência, para que sejam detectadas as incrustações, os sinais transmitidos devem estar na faixa entre 0 e 300 Hz de frequência, onde foi verificada maior sensibilidade na aquisição dos dados analisados no domínio da frequência.

8. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para verificação da maior aplicação da técnica apresentada neste trabalho, sugere-se que, para trabalhos futuros, sejam feitos testes em tubulações em condições reais de operação, com diferentes gases além do ar, e fluidos incompressíveis como água, óleo e em escoamentos multifásicos. Abranger a aplicação da técnica a fluidos incompressíveis aumenta a gama de aplicação da técnica, uma vez que não somente gases são transportados via tubulações. Também, a aplicação da técnica em tubulações de diferentes comprimentos e com diferentes configurações pode ser verificada, como por exemplo, testes em tubulações com acessórios, desvios, by-pass e curvas, e em diferentes tamanhos de tubulações.

Pode-se ainda verificar a aplicação da técnica em tubos flexíveis para exploração e produção de petróleo e gás em águas profundas, com ou sem carcaça interna de pressão, devido a sua característica de se manter em catenária durante a operação, além do comprimento, que pode passar de 1000 metros.

Além das sugestões acima, que verificam bloqueios na linha, pode ser possível simular a verificação de corrosão em pequenas ou grandes áreas na seção interna da tubulação, além de colapsos internos e detecção de objetos perdidos, como PIGs no comprimento das linhas, aumentando a versatilidade da técnica no que tange a identificação de defeitos internos e problemas variados em tubulações, rígidas ou flexíveis e com diferentes arranjos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fredberg, J. J., Wohl, M. E., Glass, G. M., & Dorkin, H. L. (1980). Airway area by acoustic reflections measured at the mouth. *Journal of Applied Physiology Published*, 749-758.
- Almeida Ferreira, C. D., & Cardoso, L. F. (2011). Estudo de garantia de escoamento em um campo de óleo pesado em lâmina d'água rasa. *Projeto de graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ, COPPE/UFRJ*.
- Benade, A. H., & Smith, J. H. (1981). Brass wind instrument impulse response measurements. *Journal of Acoustic Society of America*, vol 70.
- Bordalo, S. N., & Oliveira, R. C. (2007). Experimental Study of Oil/Water Flow With Paraffin Precipitation in Subsea Pipelines. *Society of Petroleum Engineers International*.
- Bruno, A. (2008). Paraffin Deposition During the Flow of Water-in-Oil and Oil-i-Water Dispersions in Pipes. 21-24, Annual Technical Conference and Exhibition held.
- Calvet, C. d. (2009). Identificação de Bloqueios e Defeitos em Tubulações Usando Sinais Acústicos. *Dissertação de Mestrado, UFRJ*.
- Carneal, J., Johnson, M. E., & Batton, B. (2006). Acoustic reflectometry for determination of waveguide geometry. *Active 2006*.
- Carvalho, R. P. (2006). *Acústica Arquitetônica*. Brasília: Arch-Tec.
- Chen, X., Tsang, Y., Zhang, H.-Q., & Chen, T. (2007). Pressure-Wave Propagation Technique for Blockage Detection in Subsea Flowlines. In: *Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference, California, USA*.
- da Silva, L. M. (2004). Análises e medições espectrais usando a FFT. *Notas de aula, Departamento de Engenharia Elétrica, UnB*.
- Filippi, P., Bergassoli, A., Habault, D., & Lefebvre, J. P. (1998). *Acoustics: Basic Physics, Theory, and Methods, 1st Edition*. Academic Press.
- Goodwin, J. C. (1981). Relations between the geometry and acoustics of brass instruments. *Tese de PhD, University of Surrey*.
- Hibitt, Karlsson, & Sorensen. (2006). Abaqus Analysis User's Manual. *ABAQUS version 6.4*.
- Jacobsen, F. (2010). *An elementary introduction to acoustics*. Technical University of Denmark.
- Kausel, W. (2003). Bore reconstruction from its acoustic input impedance curve. *IEEE Instrumentation and Measurement Conference, United States of America*.
- Kuttruff, H. (2006). *Acoustics: An Introduction*. CRC Press.

- Loureiro, J. P. (2015). Identificação e localização de obstruções em tubulações contendo gases utilizando a técnica de reflectometria acústica. *Dissertação de Mestrado apresentado à Escola Politécnica/UFRJ, COPPE/UFRJ.*
- Marshall, I. (1992). Acoustic reflectometry for airway measurement. *PhD thesis, University of Edinburgh.*
- MOHAPATRA, P. K. (2006). Detection of partial blockage in single pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering*, 200-206.
- Mussi Baptista, J. M., dos Santos Rossi, L. F., & E. M. Morales, R. (2006). Análise Termodinâmica da Formação de Hidratos em Atividades de Perfuração. *Anais do Encontro Nacional de Hidráulica de Perfuração e Completação de Poços de Petróleo e Gás Pedra Azul.*
- Papadopoulou, K. A., Shamout, M. N., Lennox, B., Mackay, D., Taylor, A. R., Turner, J. T., & Wang, X. (2008). An evaluation of acoustic reflectometry for leakage and blockage detection. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 222.6, 959-966.
- Paso, K. G., & Scott, H. (2003). Influence of n- paraffin composition on the aging of wax- oil gel deposits. *AIChE journal*, 3241-3252.
- Randall, R. H. (2012). An introduction to acoustics. Courier Corporation.
- Rienstra, S. W., & Hirschberg, A. (2013). An Introduction to Acoustics.
- Saraceno, A. d. (Abril de 2007). Estudo do fenômeno de parafinação a partir de um óleo cru. *Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.*
- Sharp, D. B. (1998). Increasing the length of tubular objects that can be measured using acoustic pulse reflectometry. *Measurement Science and Technology* v.9, 1469-1479.
- Sharp, D., & Campbell, D. (1997). Leak detection in pipes using acoustic pulse reflectometry. *ACUSTICA, acta Austica, Vol. 83*, 560-566.
- Silva, L. L., Monteiro, P., Vidal, J., & Netto, T. A. (2014). Acoustic reflectometry for blockage detection in pipeline. *Proceedings of the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.*
- Silva, L. L., Vidal, J. L., Monteiro, P. C., & Netto, T. A. (2014). Accoustic reflectometry for blockage detection in pipeline. *Proceedings 33th International Conference on Ocean, San Francisco, CA, OMAE.*
- Simões, F. M. (2011). *Acústica Arquitetônica*. Rio de Janeiro: PROCEL EDIFICA.

- Sondhi, M. M. (1974). Model for wave propagation in a lossy vocal tract. *Journal of Acoustic Society of America*, 1070-1075.
- Sondhi, M., & Gopinath, B. (1971). Determination of vocal-tract shape from impulse response at the lips. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1867-1873.
- Teele, D. W., & Teele, J. (1984). Detection of middle ear effusion by acoustic reflectometry. *The Journal of pediatrics*, v. 104, n. 6, pp. 832-838.
- Wang, X., Lennox, B., Turner, J., & Dawson, K. (2009). Blockage detection in long lengths of pipeline using a new acoustic method. *The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration, Krakow, Poland*.
- Wang, X., Lewis, K. M., Papadopoulou, K. A., Lennox, B., & Turner, J. T. (2012). Detection of Hydrate and other Blockages in Gas Pipelines using Acoustic Reflectometry. *Mechanical Engineering Science, Vol. 226*, 1800-1810.
- Wang, X., Short, G., & Dawson, K. (s.d.). Acoustic reflectometry for gas pipelines - monitoring features in gas pipelines using acoustek. *Pipeline Engineering, UL Barry Lennox, the University of Manchester, UK*.
- Ware, J. A., & Aki, K. (1964). Continuous and discrete inverse scattering problems in a stratified elastic medium. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 911-921.
- Zarinabadi, S., & Samimi, A. (2012). Problems of Hydrate Formation in Oil and Gas Pipes Deals. *Journal of American Science*, 1007-1010.