

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

**DETECÇÃO DE BLOQUEIOS EM LINHAS DE
TRANSPORTE DE GÁS UTILIZANDO TÉCNICA
ACÚSTICA**

Adriel Morgado de Moraes
Marcolino Einstein Bernardo Carlos

Prof. Orientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

**Rio de Janeiro
Novembro de 2016**

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

**DETECÇÃO DE BLOQUEIOS EM LINHAS DE
TRANSPORTE DE GÁS UTILIZANDO TÉCNICA
ACÚSTICA**

Adriel Morgado de Moraes
Marcolino Einstein Bernardo Carlos

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

Prof. Orientador: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

**Rio de Janeiro
Novembro de 2016**

Epígrafe

“O homem que não tem imaginação, não tem asas para voar” – Muhammad Ali

DEDICATÓRIA

Dedico àqueles que estiveram ao meu lado durante essa etapa da minha vida.

Adriel Morgado de Moraes

Este trabalho é dedicado àqueles que não obstante as circunstâncias da vida, sempre dispuseram-se em ajudar-me de formas a concluir mais uma grande etapa da minha vida acadêmica.

Marcolino Einstein Bernardo Carlos

AGRADECIMENTO

Agradeço aos meus pais por me darem suporte ao longo desses anos. Aos meus familiares que me ajudaram sempre que possível. Agradeço a minha namorada que apoiou durante todo o curso. Também, aos meus amigos que me ajudaram nesse final de curso e durante. E finalmente, ao CEFET e seus professores que me proveram com os conhecimentos e os desafios necessários para me formar como engenheiro.

Adriel Morgado de Moraes

Agradeço aos meus pais (Afonso e Madalena) por sempre acreditarem em mim e apoiarem-me nas minhas escolhas, fornecendo sempre as melhores condições possíveis para que elas se concretizem. Às minhas duas irmãs (Giza e Ginga) por estarem sempre comigo em todos momentos, principalmente a Giza que viveu comigo durante todo processo de adaptação aqui no Brasil. Agradeço ao meu amigo Dário por ter sido sempre um irmão durante estes anos que passamos longe de nossas famílias. Aos demais familiares e amigos, muito obrigado. Agradeço ao programa de estudante de convênio de graduação (PEC-G), parceria entre os governos da República de Angola e a República Federativa do Brasil, por permitirem este intercâmbio. Agradeço ao CEFET/RJ e seu corpo docente, principalmente à professora Luciana Loureiro por ter aceitado orientar-nos o projeto final. Agradeço a todos colegas de graduação (em especial aos Survivors e ao Adriel) pois sem vocês nada seria possível. Muito obrigado!

Marcolino Einstein Bernardo Carlos

RESUMO

A garantia de escoamento na indústria de óleo e gás tem sido assunto instigante nas áreas de desenvolvimento tecnológico, a fim de se possibilitar a fiel canalização da produção vinda de águas mais profundas. Consequentemente, o aumento de pressão e temperatura acarreta sérios problemas técnicos que estão relacionados à formação de hidratos e parafinas, em que a sua formação compromete a vazão da linha, culminando em aumentos de gastos energéticos com o sistema de bombeamento, redução da produção, danos nas instalações e principalmente de despenho financeiro. Apresenta-se aqui o estudo da viabilidade da técnica de detecção e localização de bloqueios de diferentes geometrias em dutos através da reflectometria acústica, com o auxílio de simulações numéricas por elementos finitos, usando-se o software Abaqus®.

Palavras-Chaves: Reflectometria Acústica, Bloqueios, Linhas de Gás, Modelo Numérico, Elementos Finitos.

ABSTRACT

Flow assurance in the oil and gas industry has been an exciting subject in the areas of technological development, in order to enable the flow assurance of oil/gas production coming from deeper water. Consequently, the increased temperature and pressure causes technical issues that are related to the initiation and growth of hydrate and paraffin blockages, wherein its growth compromises the flow, culminating in financial issues. The aim of this work is to apply and demonstrate the feasibility and reliability of acoustic pulse reflectometry technology to identify and measure blockages of different geometries in pipelines, using finite elements analyses' software named Abaqus®.

Key-words: Acoustic Reflectometry, Blockages, Gas Pipes, Numerical model, Finite Elements.

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Organização do trabalho	3
Capítulo 2	4
2 Formação de Obstrução	4
2.1 Parafinas	4
2.2 Hidratos	6
2.3 Incrustações	8
Capítulo 3	10
3 Reflectometria acústica - Aplicações	10
Capítulo 4	13
4 Fundamentos teóricos de acústica	13
4.1 Ondas Acústicas	13
4.2 Reflexão de uma única descontinuidade	17
4.3 Norma ISO 10534-2 para a técnica de acústica ativa	20
Capítulo 5	22
5 Metodologia	22
5.1 Modelo Numérico	22
5.1.1 O Fluido	23
5.1.2 Condições de Contorno	23
5.1.3 Definição da Malha	24
5.2 Parametrização	26
Capítulo 6	29
6. Resultados	29
6.1 Limite de propagação de ondas	29
6.2 Obstruções	33
6.2.1 Obstruções com o mesmo comprimento	34
6.2.2 Obstruções com a mesma espessura	39
Capítulo 7	45
7. Conclusões	45
8. Trabalhos Futuros	46
Referências Bibliográficas	47

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Parafina de cadeia normal	5
FIGURA 2.2 - Exemplo de hidrato em dutos	6
FIGURA 2.3 - Envelope de hidratos	7
FIGURA 2.4 - Exemplo de incrustações	9
FIGURA 4.1 - Onda de pressão	14
FIGURA 4.2 - Representação de descontinuidade	18
FIGURA 4.3 - Método descrito pela norma ISO 10534-2	21
FIGURA 5.1 – Obstrução de 25% da área interna da tubulação.....	23
FIGURA 5.2 – Análise de Convergência	25
FIGURA 5.3 – Malha de 8.5 mm utilizada nas simulações	25
FIGURA 5.4 – Desenho esquemático da tubulação de 4’’ de diâmetro e 50 m de comprimento.....	27
FIGURA 5.5 – Desenho esquemático das distribuições de medidas dos modelos com obstrução.	28
FIGURA 6.1 (a) – Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 300Hz.	29
FIGURA 6.1 (b) – Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 500Hz.	30
FIGURA 6.1 (c) – Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 1000Hz.....	30
FIGURA 6.1 (d) – Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 1500Hz.	31

FIGURA 6.1 (e) – Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 2000Hz.	31
FIGURA 6.1 (f) – Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 3000Hz.	32
FIGURA 6.1 (g) - Valores máximos de pressão acústica normalizada em função da distância percorrida.	32
FIGURA 6.2 – Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico medido pelo nó no início da tubulação (a) e pelo nó no fim da tubulação (b).....	34
FIGURA 6.3 (a) – Onda refletida de obstruções de 250mm	35
FIGURA 6.3 (b) – Onda transmitida de obstruções de 250mm	35
FIGURA 6.4 (a) – Onda refletida de obstruções de 500mm	36
FIGURA 6.4 (b) – Onda transmitida de obstruções de 500mm.....	36
FIGURA 6.5 (a) – Onda refletida de obstruções de 750mm.....	37
FIGURA 6.5 (b) – Onda transmitida de obstruções de 750mm.....	37
FIGURA 6.6 – Amplitude do sinal em função do percentual de área obstruída para os diferentes comprimentos de obstrução utilizando: (a) sinal refletido e (b) sinal transmitido.....	39
FIGURA 6.7 (a) – Onda refletida de obstruções de 10%.....	40
FIGURA 6.7 (b) – Onda transmitida de obstruções de 10%.....	40
FIGURA 6.8 (a) – Onda refletida de obstruções de 25%.....	41
FIGURA 6.8 (b) – Onda transmitida de obstruções de 25%.....	42
FIGURA 6.9 (a) – Onda refletida de obstruções de 50%.....	42
FIGURA 6.9 (b) – Onda transmitida de obstruções de 50%.....	43

FIGURA 6.10 (a) – Onda refletida de obstruções de 75%	43
FIGURA 6.10 (b) – Onda transmitida de obstruções de 75%	44

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Tipos de obstruções simuladas.....	28
---	----

Capítulo 1

1 Introdução

Nos dias de hoje, tem-se observado um crescimento na extração e produção de petróleo em águas profundas, sendo que as operações de produção *offshore* estão a expandir-se para profundidades cada vez maiores, fazendo com que os custos associados fiquem mais altos e fazendo-se imprescindíveis estudos detalhados de viabilização e otimização dos equipamentos e processos relacionados. No Brasil, cerca de 85% da produção de óleo bruto advém de campos de petróleo offshore QUEIROZ (2007).

A formação de hidratos e parafinas representam um grande problema nas linhas de transporte da indústria de óleo e gás, devido ao cenário da extração, devendo eles serem evitados. Cenário este que favorece à sua formação, por apresentar temperaturas baixas da vizinhança e altas pressões de escoamento.

As parafinas formam-se em diferentes fases do processo de produção, mais precisamente quando a exploração ocorre em águas profundas, e o gradiente de temperatura entre a produção e a vizinhança é elevado, causando um rápido resfriamento da produção no interior dos dutos, permitindo assim que a parafina com diferentes pontos de fusão cristalize formando uma estrutura porosa com cavidade preenchida por óleo e água, que resultará numa redução da seção transversal do escoamento, podendo chegar a bloquear totalmente a tubulação CARVALHO (2002).

Como os gases e líquidos circulam pelos dutos e qualquer interferência como obstruções e orifícios podem provocar perdas na produção ou acidentes, é necessária a monitoração da condição interna do duto. A análise dessa condição exige técnicas mais elaboradas de monitoração devido a dificuldade física de acesso. Além dessa dificuldade, o comprimento total e o roteiro dessas tubulações podem dificultar a maioria das inspeções visuais. Assim, uma técnica automatizada de monitoração da situação interna dos dutos seria útil.

As técnicas de monitoramento podem ser divididas em duas categorias, as técnicas invasivas e as técnicas não invasivas. As técnicas invasivas são aquelas em que a sonda de inspeção é passada por dentro do duto, existindo assim a necessidade de interrupção da operação. Essas técnicas são normalmente empregadas durante as paradas programadas para a manutenção preventiva das linhas e dos equipamentos; pode-se citar como exemplo a utilização dos *pigs* que limpam e inspecionam as linhas de petróleo e gás. As técnicas não invasivas são aquelas em que não existe a necessidade da introdução das sondas nos dutos, assim, essas técnicas podem ser aplicadas durante a operação das linhas OLIVEIRA (2013).

Como em complexos industriais uma parada de produção não é desejada, as técnicas não invasivas apresentam grande vantagem. As técnicas de detecção não invasivas que possam monitorar estes problemas a grandes distâncias ainda se encontram em desenvolvimento e muitas delas possuem desvantagens, como resposta lenta, falta de precisão na localização e algumas necessitam de parada de produção para serem implementadas. A técnica acústica tem demonstrado ser uma ferramenta adequada para solucionar estes problemas. Pulsos acústicos podem se propagar pelo fluido e suas múltiplas reflexões guardam a assinatura de diversos componentes. Neste trabalho serão feitas análises numéricas baseadas em elementos finitos com o objetivo de se estudar a propagação acústica em tubulações com diferentes tipos de obstruções.

1.1 Objetivo

Avaliar a viabilidade e confiabilidade da técnica de reflectometria acústica em linhas de transporte de óleo e gás possuindo bloqueios no seu interior configura o escopo deste trabalho. Serão feitas análises numéricas baseadas em elementos finitos utilizando o software comercial Abaqus 6.13, com objetivo de se estudar a propagação acústica em tubulações com diferentes tipos de bloqueios, visando a identificação e localização dos mesmos em um duto preenchido por fluido compressível.

1.2 Organização do trabalho

O presente trabalho está composto por 8 capítulos. No capítulo 1 é apresentada a introdução à técnica reflectometria acústica, relacionando-a às necessidades da indústria de óleo e gás na detecção de bloqueios em linhas de produção. No Capítulo 2 apresentam-se os mecanismos de formação de obstruções em linhas de produção, bem como os principais bloqueios ocorrentes. No capítulo 3 faz-se uma revisão bibliográfica relacionada às técnicas acústicas, tentando-se obter o máximo de informação sobre o estado da arte. No capítulo 4 é apresentado os fundamentos teóricos da acústica. O capítulo 5 aborda a metodologia do trabalho, bem como a sua parametrização para a criação de um modelo numérico, consequentemente a simulação do mesmo. O capítulo 6 é onde foram apresentados e discutidos os resultados obtidos através das simulações realizadas neste projeto, com as parametrizações apresentadas no capítulo 5. O capítulo 7 apresenta a conclusão obtida após a elaboração deste trabalho, avaliando as informações obtidas pelas simulações. O capítulo 8 propõe o melhoramento dos estudos realizados neste trabalho, mais precisamente dando diretrizes para futuros trabalhos.

Capítulo 2

2 Formação de Obstrução

No mercado atual, a demanda por tecnologias que tenham impacto no aumento do aproveitamento do tempo e, conseqüentemente, de produtividade é cada vez mais visado, objetivando o aumento do lucro aliado a uma preservação do meio ambiente. Soma-se a isso a necessidade de amplificar o rendimento dos poços de petróleo, uma vez que a demanda energética cresce. Surge, então, a necessidade de uma detecção de obstrução em oleodutos de forma mais eficiente e com menor perda de capital.

Desse modo, é indispensável ressaltar que obstruções em oleodutos consistem em perdas significativas de dinheiro e interrupção operacional, tornando fundamental detectar de forma precisa tais obstruções o quanto antes para que não haja paralisação do trabalho.

Primeiramente, será citado o mecanismo de formação de obstrução em oleodutos e em seguida os possíveis tipos de obstrução.

Quando uma solução líquida transportada por um tubo em regime laminar é resfriada, que é o caso do petróleo transportado em águas profundas, um gradiente de concentração radial é estabelecido, o que causa transferência de massa de soluto em direção à parede do tubo. O soluto precipita da solução para a vizinhança da parede e adere perfeitamente a ela. A massa gradualmente depositada obstrui o conduto, afetando os campos de pressão e escoamento MENDES e BRAGA (2008).

2.1 Parafinas

As extrações são realizadas em profundidades cada vez maiores, fazendo com que o produto quente passe pelas tubulações que possuem água fria no entorno. O óleo é extraído do reservatório à aproximadamente 60°C para as linhas de produção, as quais o transportam à plataforma. Enquanto o óleo escoar pela linha, este perde calor para a água fria circundante, que se encontra a aproximadamente 5°C. No entanto, quando o escoamento na linha é interrompido, tanto por motivos de manutenção dos equipamentos ou por algum outro motivo, o fluido fica parado no interior da linha e tende a resfriar-se até atingir um equilíbrio térmico com a vizinhança. Um dos grandes problemas encontrados atualmente na produção de

petróleo *offshore* é o resfriamento do produto, podendo levar a obstrução dos dutos responsáveis pelo transporte do mesmo. Devido a redução de temperatura durante a extração do óleo dos reservatórios compostos parafínicos que encontravam-se solubilizados dado a altas temperaturas do óleo, começam a cristalizar.

As parafinas são na verdade uma mistura de longas cadeias de hidrocarbonetos, com presença de carbono variando entre 15 e 75 átomos. Podem ser classificadas como macrocristalinas e microcristalinas MORAN (2007).

As macrocristalinas são constituídas por parafinas de cadeia normal, apresentando números de átomos de carbono entre 18 e 30. Elas possuem cristais devidamente definidos e com dimensões que possibilitam serem vistas sem aparelhos de ampliação GOMES (2009).

A Figura 2.1 mostra um exemplo de parafina macrocristalina.



Figura 2.1: Parafina de cadeia normal – GUILHERME (2011)

As microcristalinas como o prefixo diz, possuem dimensões microscópicas, não podendo ser vistas sem equipamentos de ampliação. Estas possuem um número de átomos de carbono maiores que 40.

As parafinas macrocristalinas por possuírem maior tendência à aderência em superfícies, representam a maior causa das formações de bloqueios no interior das linhas, comprometendo o escoamento da produção. Para além do equilíbrio termodinâmico entre o óleo e a vizinhança interferir na formação de parafinas macrocristalinas, o tipo de regime de escoamento da produção também compromete a sua formação GOMES (2009).

2.2 Hidratos

A extração de hidrocarbonetos em águas profundas, representa um situação propícia para a formação de hidratos, devido à baixa temperatura do meio, altas pressões, presença de água e gás. Os hidratos são compostos cristalinos que se assemelham ao gelo, cuja constituição consiste em moléculas de gás e água. A Figura 2.2 mostra um exemplo de obstrução por hidrato em um tubulação.

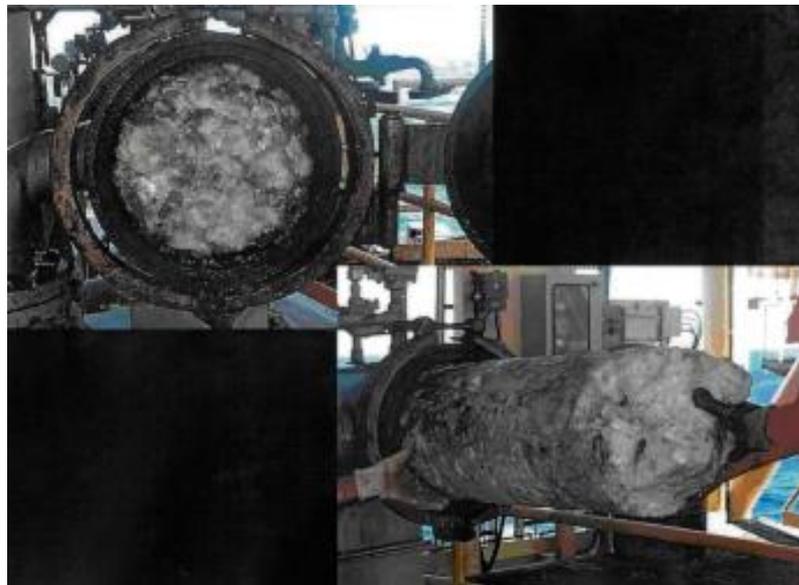


Figura 2.2 Exemplo de hidrato em dutos – *What is Chemistry* (2011)

As situações em que os hidratos são favoráveis à formação, dependem da densidade e do tipo de gás que o hidrato é formado. O envelope de hidrato ou curva de hidrato, mostra que

para cada densidade de gás o hidrato formar-se em diferente temperatura e pressão. Segue na Figura 2.3 um gráfico pressão versus temperatura, que mostra as regiões favoráveis a formação de hidrato, para diferentes densidades de gás. As regiões de formação de hidrato encontram-se entre as curvas do gás apresentado CARVALHO (2010).

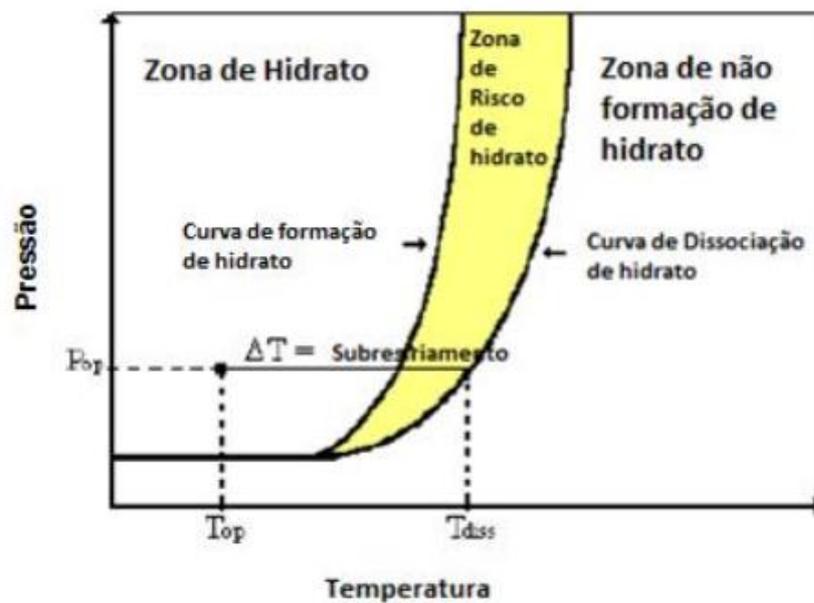


Figura 2.3: Envelope de hidratos - PAEZ (2011)

Como durante a extração de hidrocarbonetos em águas profundas a temperatura da vizinhança é mantida em torno de 5°C, o risco de formação de hidratos nestas condições é grande, pois os hidratos podem formar-se em temperaturas acima de 0°C, apenas necessitando de uma maior pressão. Neste caso, pode-se dizer que quanto maior a pressão, maior será a temperatura de formação de hidratos. Visto isso, é imprescindível usarem-se métodos de prevenção de hidratos devido às condições de operação durante a extração, pois a sua formação comprometerá o escoamento da produção CARVALHO (2010).

Nos dias de hoje são usadas diferentes medidas para a prevenção de cristalização de hidratos em campos onshore e offshore FERREIRA e CARDOSO (2011), como:

- Isolamentos térmicos – Que visam reduzir a transferência de calor entre o fluido extraído e a vizinhança, mantendo assim o fluido em um estado fora da temperatura de formação de hidratos.
- Redução da pressão de operação – Objetiva-se manter a pressão da produção fora do estado de formação de hidratos, sendo que a pressão da produção está diretamente ligada à formação de hidratos. Esta medida geralmente é inviável para operações contínuas e com reinícios.
- Remoção de Água – Partindo do princípio de que a cristalização de hidratos ocorrerá somente na presença de água, é bastante aceitável que uma redução de água na corrente de fluidos à extrair, pode inibir a formação de hidratos. Apesar de ser uma medida proeminente, ela ainda encontra-se em estado exordial no mercado de óleo e gás.

2.3 Incrustações

Na indústria de óleo e gás, as incrustações consistem na formação de depósitos inorgânicos na água, devido à baixa solubilidade de sais em água, que ao precipitarem-se podem aglomerar-se em diferentes pontos da linha, originando perdas parciais ou totais da vazão da produção, causando aumentos nos custos operacionais ou até mesmo a inoperação do poço. Elas são geralmente formadas por carbonetos de cálcio/magnésio ou sulfato de bário/estrôncio ARAI e DUARTE (2010).

As incrustações têm sido uma das mais importantes causas de intervenção de poços nos quais a água é injetada por longos períodos nos reservatórios ARAI e DUARTE (2010). A Figura 2.4 mostra a redução da seção de um escoamento devido a formação de incrustação dada a injeção de água no mesmo.



Figura 2.4: Exemplo de incrustações - *Berliner Wasserbetriebe*.

São vários os fatores responsáveis pela formação de incrustações na indústria de óleo e gás, principalmente pelo alto gradiente de temperatura e pressão no decorrer do escoamento da produção. As reações químicas resultadas de misturas de águas quimicamente incompatíveis entre si sob condições fisicamente favoráveis à formação de incrustações, também constituem um ponto chave na formação das incrustações, pois a água de formação encontra-se inicialmente em equilíbrio químico com a rocha e hidrocarbonetos presentes, possuindo uma dureza relativa, ou seja, uma concentração de íons Ca e Mg além de outros como HCO e a água de injeção, que normalmente é utilizada água do mar pela sua facilidade e abundância, como geralmente ocorre em extrações offshore. Esta incompatibilidade de águas pode assim gerar a precipitação de compostos insolúveis.

Os tipos mais comuns de incrustações em linhas de óleo e gás são: as dos sulfatos, que se dão pela incompatibilidade química das águas; as de cristais de haletos que ocorrem principalmente na forma de “halita” (NaCl) precipitada, devido a reduções na temperatura de evaporação de parte da água de formação; e a resultante da mistura de carbonetos de metais alcalinos terrosos, em que a precipitação dos carbonetos é favorecida pelo aumento de temperatura e redução de pressão da produção FERREIRA e CARDOSO (2011).

Capítulo 3

3 Reflectometria acústica - Aplicações

A reflectometria acústica foi desenvolvida originalmente como uma técnica sismológica para observação da estratificação da crosta terrestre. Dado que a crosta terrestre é estratificada, ou seja, formada por diferentes tipos de camadas de rochas, então quando é aplicado um pulso acústico sobre ela, este percorre o interior da crosta, refletindo o pulso a cada variação de impedância, neste caso, a cada variação de camada interna da crosta, sendo captados e analisados a cada reflexão à superfície SHARP (1996).

No final da década de 60, WARE e AKI (1969) desenvolveram soluções para que se conseguisse aproveitar as respostas captadas na reflexão dos pulsos, para que se achasse o coeficiente de reflexão de camadas internas da crosta terrestre, conseguindo assim calcular até a impedância de camadas mais profundas.

No início da década de 70, uma equipa de pesquisa médica observou o potencial da técnica de reflectometria acústica como um método para o dimensionamento de vias respiratórias SONDHI e GOPINATH (1971).

Na década de 80, FREDBERG *et al.* (1980) realizaram o primeiro dimensionamento usando a técnica de reflectometria acústica em seres humanos. Um pulso acústico foi aplicado nas vias respiratórias por intermédio de um tubo. O tubo possuía hélio ou oxigênio no seu interior, pois o som viaja aproximadamente duas vezes mais rápido do que no ar. As reflexões obtidas foram capturadas por microfones na parede do tubo. Este sistema posteriormente foi usado com sucesso na medicina diagnóstica durante os meados dos anos 80.

Depois do início dos testes nos anos 80, vários estudos foram realizados envolvendo a técnica de reflectometria acústica, visando um aprimoramento da técnica em seres humanos. No início da década de 90 EDINBURGH, MARSHALL (1992) investigaram equações matemáticas que possibilitassem reduzir o tempo entre a reflexão da via respiratória e a captação no tubo de fonte, fazendo com que se reduzisse o comprimento do tubo de aplicação.

O uso da reflectometria acústica vem sendo estudado para se obter os mais variados parâmetros em dutos e tubulações. VILLELA (2005) apresentou um estudo teórico e experimental acústico para a detecção de um pequeno furo em um duto, a uma certa distância da fonte emissora. Como sistema de detecção dos sinais acústicos, foi utilizado um microfone ultrasensível na parede do duto entre a fonte e o furo. A presença do furo resulta em uma onda de reflexão, sendo possível identificar e estimar a dimensão do furo na parede do duto a partir das reflexões de um sinal conhecido e das variações de impedância. Os resultados obtidos mostram que esta técnica é promissora na detecção de vazamentos em dutos.

WU e FRICK (1990) estudaram a técnica de medição acústica em dutos a partir de desvios das frequências naturais provocadas pela presença de obstruções. Como sinal de excitação foi feita uma varredura de senos. Foi possível identificar que o tamanho dessas está relacionado com a amplitude dos desvios e obstruções. DE SALLIS e OLDHAM (2000) realizaram estudos semelhantes e verificaram que, além da localização e dimensionamento de bloqueios, era possível realizar a localização e dimensionamento de orifícios em dutos.

A acústica de dutos é um área bastante estudada e tem contribuído para o desenvolvimento de técnicas não invasivas na indústria *offshore*. Em 2009, XUESONG e WANG *et al.* descreveram uma técnica de reflectometria acústica patenteada para a detecção de defeitos em dutos de gás, em que o trabalho mostrou que utilizando técnicas de processamento de sinal, a reflectometria acústica pode ser utilizada para identificar bloqueios mesmo em condutas complicadas com forte interferência de ruídos.

PAPADOPOULOU *et al.* (2012) descreveram a aplicação de uma técnica de reflectometria acústica para detectar bloqueios em longos comprimentos de dutos com gás, sendo que neste artigo a técnica foi aplicada a uma série de dutos que fornecem o leito de teste ideal para avaliar completamente as capacidades da técnica de reflectometria acústica para detectar e localizar defeitos em dutos com gás. Em particular, foi avaliada a utilização da técnica para detectar o início da formação de hidratos de gasodutos submarinos. Quatro dutos muito diferentes foram utilizados para a avaliação. Os dutos variavam em diâmetro interno de 0,06 - 0,6 m, e foram operados a pressões de até 10 MPa. Em todos os testes, a técnica de reflectometria acústica foi capaz de detectar com precisão e localizar os bloqueios dentro do duto. Os resultados sugeriram que a reflectometria acústica é capaz de detectar bloqueios totais e parciais em condutas com comprimentos de até 10 km.

SILVA *et al.* (2014) verificaram a técnica de reflectometria acústica, realizando testes experimentais e correlacionando-os com simulações numéricas. Seus testes experimentais consistiram na determinação de bloqueios no interior de dutos com ar (gasodutos), sendo capaz de identificar bloqueios com espessuras de 10% da área interna do duto. Suas simulações numéricas foram capazes de identificar bloqueios com espessuras ainda menores, como obstruções de 1% da área interna do duto. Os autores chegaram a analisar um protótipo preenchido por água, obtendo resultados satisfatórios para detecção de obstruções.

LOUREIRO (2015) realizou testes experimentais e simulações numéricas para analisar o comportamento da técnica de reflectometria acústica para a detecção de bloqueios em tubulações com ar, de cem metros (100 m) de comprimento.

O modelo desenvolvido neste trabalho teve como base os resultados obtidos por SILVA *et al.* (2014), para a calibração do modelo numérico.

Capítulo 4

4 Fundamentos teóricos de acústica

Antes de entrar no assunto propriamente dito será abordado o mecanismo da técnica de reflectometria de pulsos acústicos (RPA), suas aplicações variam desde a área industrial até a área da biomedicina, pois constitui um método não-invasivo que detecta obstruções ou mudança de geometria dentro de um objeto tubular com diâmetro interno conhecido, como por exemplo, o aparelho auditivo ou o trato vocal.

Para aprofundar no assunto é necessário entender como se comporta o som, como age dentro de dutos e, principalmente, no caso em que há obstáculos ou mudança de geometria.

4.1 Ondas Acústicas

As ondas de pressão que caracterizam o som, denominadas ondas sonoras são ondas mecânicas (necessitam de um meio material para se propagar) longitudinais (a direção de vibração coincide com a direção de propagação). O movimento da onda sonora gera regiões de alternância entre alta pressão (compressão, as partículas se comprimem) e baixa pressão (redução de densidade ou rarefação, as partículas se afastam uma das outras), sendo que a distância entre duas compressões define o comprimento de onda, como demonstrado na Figura 4.1. A estrutura do meio é o que determinará a velocidade e as características da onda.

As ondas sonoras se propagam perturbando o meio, seja por uma pequena vibração ou alguma perturbação de maior escala, essa perturbação se move entre partículas transportando energia enquanto se locomove, essa quantidade de energia transportada é o que define a intensidade da onda, por conseguinte, quanto maior for a amplitude da vibração, maior é a taxa na qual a energia é transportada.

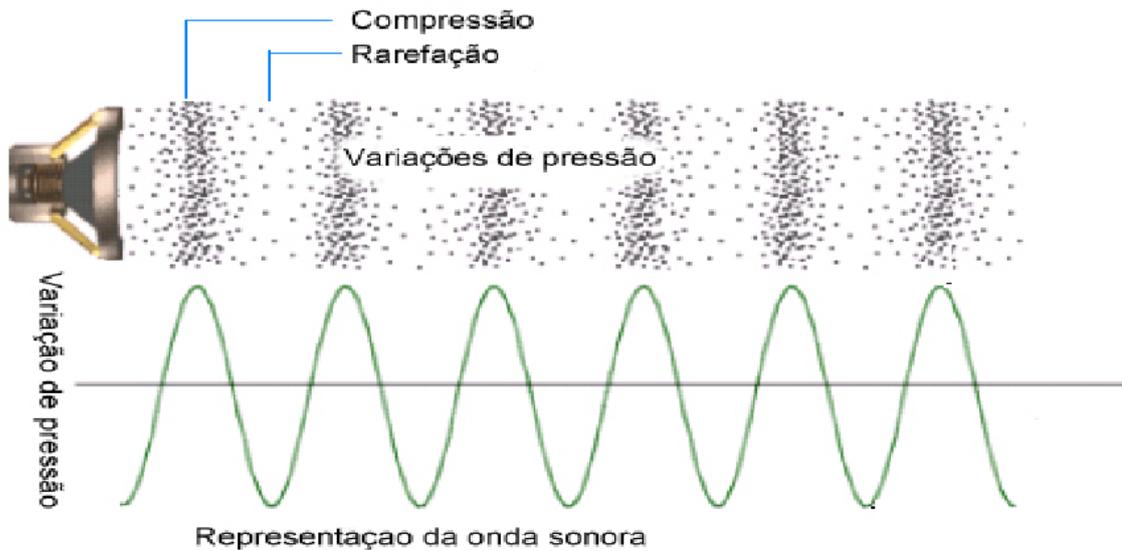


Figura 4.1: Onda de pressão – CONCORDIA (2013)

Ondas acústicas, conforme se movem através do meio, perdem energia, ou seja, perdem intensidade. Essa perda é chamada de atenuação e é causada por três fatores:

- A divergência da onda, pois conforme a onda diverge a sua energia está sendo distribuída por uma área cada vez maior, portanto sua intensidade que é medida por unidade de área diminui conforme a onda diverge.
- Absorção da energia pelo meio, é a resistência imposta pelas moléculas na onda, sua energia é absorvida pelo meio gerando calor. Quanto maior a frequência para uma certa amplitude, mais rápido as partículas se movem e mais energia é gasta para vencer este atrito, além disso a absorção depende da viscosidade do meio.
- Deflexão do som, esta depende da superfície do duto pelo qual se move, há maior reflexão em superfícies lisas e maior dispersão em superfícies ásperas.

Para o estudo da técnica de reflectometria acústica é imperativo analisar o movimento dessas ondas no ar, pois será feita uma aproximação de gases presentes em tubulações em águas profundas ou terrestres com o ar.

Para uma onda unidimensional propagando no eixo x , temos a Equação 4.1.1 de onda com p sendo a pressão:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (4.1.1)$$

Com c sendo a velocidade da onda, no ar, e aproximadamente 343 m/s, para a temperatura de 25°C. Uma solução dessa equação diferencial parcial de segunda ordem é a das equações a seguir:

$$p(x, t) = p_1(x, t) + p_2(x, t) \quad (4.1.2)$$

sendo:

$$p_1(x, t) = \alpha e^{i(\omega t - kx)} \quad (4.1.2a)$$

$$p_2(x, t) = \beta e^{i(\omega t + kx)} \quad (4.1.2b)$$

Correspondendo p_1 ao movimento de aumento de pressão com amplitude α e p_2 ao de decréscimo da mesma em amplitude β , e $\omega = 2\pi f$ a frequência angular no sistema internacional. Ainda na equação, k corresponde ao número de onda angular ou magnitude do vetor de onda que é proporcional ao seu comprimento de onda e é definido pela fórmula $K = \frac{\omega}{c}$.

Para relacionar a pressão da onda com o movimento de uma partícula de velocidade u é usado a equação diferencial parcial, Equação 4.1.3 a seguir:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} \quad (4.1.3)$$

onde ρ é a massa específica do ar, usando as equações 4.1.2a e 4.1.2b anteriores, chega-se ao resultado da velocidade da partícula:

$$u(x, t) = \frac{1}{\rho c} [\alpha e^{i(\omega t - kx)} - \beta e^{i(\omega t + kx)}] \quad (4.1.4)$$

$$u_1(x, t) = \frac{p_1(x, t)}{\rho c} \quad (4.1.4a)$$

$$u_2(x, t) = -\frac{p_2(x, t)}{\rho c} \quad (4.1.4b)$$

A razão na qual a pressão acústica da velocidade u é a impedância acústica, ou a força por unidade de área sobre a superfície dividida pelo fluxo através desta, com unidade em $kg\ s^{-1}\ m^{-4}$. Matematicamente define-se por $Z_s = \frac{p}{u}$. A importância da impedância acústica para este trabalho, baseia-se no fato de para calcular a reflexão da onda será usado a diferença de pressão entre uma de referência e a captada por um microfone, desse modo obtém-se o tipo de defeito na tubulação e sua localização.

Com u_1 para o movimento de acréscimo de pressão e u_2 para o de decréscimo desta e fazendo as devidas substituições, obtém-se:

$$Z_s = \frac{p}{u} = \pm \rho c \quad (4.1.5)$$

Desse modo, a parcela positiva é a referente ao movimento ao longo do eixo $+x$ e a parcela negativa ao longo do $-x$. A impedância acústica média para o ar como meio de propagação é dado pela parcela da direita. O produto entre a densidade do ar e a velocidade da onda em tal fluido, sendo ele $Z_c = \rho c$.

Até aqui foi elucidado como se define matematicamente a onda num espaço qualquer. Para aprofundar este trabalho e aplicá-lo em tubulações é imperativo estudar como se define a onda num tubo, para a mesma onda estudada.

No caso de um duto de seção circular, a onda é limitada por suas paredes, levando isto em conta usa-se a vazão volumétrica $U = Au$, onde A é a seção de área do tubo. Desse modo, a impedância acústica será como a anterior, porém ao invés de ser em relação a velocidade u , utiliza-se U . Assim sendo, e, combinando as equações 4.1.4a e 4.1.4b é obtido:

$$Z = \frac{p}{Au} = \pm \frac{\rho c}{A} \quad 4.1.6$$

Para a temperatura de 25° C a densidade do ar, ρ , equivale a 1,21 kg m⁻³.

4.2 Reflexão de uma única descontinuidade

Existem três fenômenos que podem ocorrer quando uma onda de pressão acústica chega ao fim do meio no qual transita, ou seja, ela não desaparece quando isto ocorre, na verdade, ela refrata, difrata ou reflete. No presente trabalho, será discutido o que ocorre na reflexão da onda. Deste jeito, este fenômeno pode ser definido como o retorno de parte ou toda onda quando em contato com uma nova resistência ou, de forma mais precisa, uma nova impedância acústica. Portanto, quando há uma variação na seção transversal a onda reflete, essa mudança pode ser causada por transição de geometria do duto ou uma obstrução.

Nesta seção é estudado como ocorre a reflexão causada por apenas uma descontinuidade na área de seção transversal de um tubo reto. Para isto temos na Figura 4.2 a representação de uma mudança na seção transversal, onde a onda caminha de A_1 para A_2 , onde $p_1^+(x, t)$ é a onda incidente no primeiro tubo e p_1^- é a onda refletida ainda no primeiro tubo. Em A_2 temos a onda incidente representada por $p_2^+(x, t)$, considerando que A_1 representa a seção transversal de um tubo e A_2 de outro, assume-se que os 2 tubos são semi-finitos, portando não há reflexão vindo de nenhum dos dois lados.

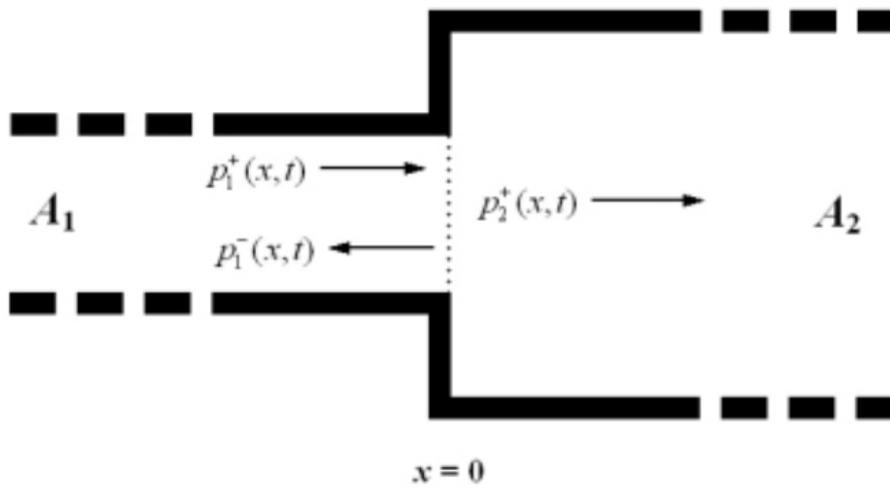


Figura 4.2: Representação de descontinuidade

A onda que incide e a que reflete no primeiro tubo são definidas, respectivamente, por:

$$p_1^+(x, t) = \alpha_1 e^{i(\omega t - kx)} \quad (4.2.1)$$

$$p_1^-(x, t) = \beta_1 e^{i(\omega t + kx)} \quad (4.2.2)$$

A onda que atravessa para o segundo tubo é descrita por:

$$p_2^+(x, t) = \alpha_2 e^{i(\omega t - kx)} \quad (4.2.3)$$

No ponto $x = 0$, tanto a vazão como a pressão são contínuas, portanto, aplicando as equações da continuidade:

$$p_1^+(x, t) + p_1^-(x, t) = p_2^+(x, t) \quad (4.2.4)$$

$$\frac{p_1^+(x, t)}{Z_{c1}} - \frac{p_1^-(x, t)}{Z_{c1}} = \frac{p_2^+(x, t)}{Z_{c2}} \quad (4.2.5)$$

Os valores Z_{c1} e Z_{c2} representam a impedância acústica para o volume 1 e 2, respectivamente. Matematicamente, $Z_{c1} = \frac{\rho c}{A_1}$ e $Z_{c2} = \frac{\rho c}{A_2}$. Combinando as equações 4.2.4 e 4.2.5, anteriores:

$$\frac{p_1^-(x, t)}{p_1^+(x, t)} = \frac{Z_{c2} - Z_{c1}}{Z_{c2} + Z_{c1}} = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \quad (4.2.6)$$

Para $x=0$, dividindo a equação 4.2.2 pela 4.2.1 consegue-se que a pressão refletida na área um sobre a pressão incidente na mesma área seja igual à razão de suas amplitudes, ou seja:

$$\frac{p_1^-(x, t)}{p_1^+(x, t)} = \frac{\beta_1}{\alpha_1} \quad (4.2.7)$$

Sendo, $r_{1,2}$ a razão entre as amplitudes da equação anterior - a razão da amplitude de pressão de onda refletida para aquela que incide. A equação 4.2.6 para o ponto de junção dos tubos, $x=0$:

$$r_{1,2} = \frac{p_1^-(0, t)}{p_1^+(0, t)} = \frac{A_1 - A_2}{A_1 + A_2} \quad (4.2.8)$$

Analisando a equação anterior, chega-se a conclusão que para um aumento de área tem-se um valor negativo do coeficiente de reflexão. Para uma redução de área, o análogo ocorre. Não há reflexão quando não há mudança de área. Por fim, o coeficiente da razão da amplitude de pressão transmitida para onda incidente, $t_{1,2}$, pode ser expressa por:

$$t_{1,2} = 1 + \frac{p_1^-(0, t)}{p_1^+(0, t)} = 1 + r_{1,2} = \frac{2A_1}{A_1 + A_2} \quad (4.2.9)$$

Portanto, tanto o coeficiente de transmissão como o de reflexão dependem apenas da mudança da área da seção transversal.

A seguir descreve-se a norma ISO 10534-2 utilizada para experimentos utilizando a técnica de reflectometria acústica.

4.3 Norma ISO 10534-2 para a técnica de acústica ativa

A norma ISO 10534-2 descreve como calcular a reflexão de ondas acústicas que se propagam em tubos de impedância. O método que é descrito para tal objetivo consiste em propagar ondas planas, por meio de um alto-falante, dentro de um tubo que contenha algum tipo de variação em sua impedância interna, como obstruções ou vazamentos. Quando o pulso acústico encontra uma descontinuidade de impedância (vazamentos ou bloqueios), uma porção do pulso é transmitida e outra é refletida de volta para o sistema de recepção acústica. Uma vez que se conhece a velocidade do som no meio e o tempo de propagação, é possível medir a distância em que a obstrução está em relação ao sistema de detecção. A decomposição das ondas resultantes deste procedimento (ondas incidentes e refletidas) é feita por meio da medição das pressões acústicas. As medições são realizadas através de dois microfones que se encontram fixados ao tubo, conforme mostra a Figura 4.3.

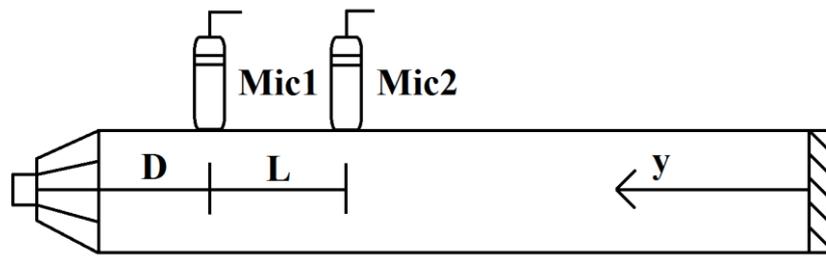


Figura 4.3: Método descrito pela norma ISO 10534-2.

O cone na extremidade esquerda do tubo é um alto-falante. A região hachurada representa uma variação de impedância dentro do tubo, a qual será interpretada como uma obstrução.

Capítulo 5

5 Metodologia

Para verificar a viabilidade técnica do sistema de detecção acústica, desenvolveu-se um modelo numérico baseado em elementos finitos utilizando o software comercial ABAQUS® (versão 6.13) para o estudo da propagação de ondas acústicas em fluidos, em tubulações com 4'' de diâmetro interno, sendo dez e cinquenta metros (10 e 50 m) de comprimento, com obstruções de diferentes espessuras e comprimentos no seu interior.

5.1 Modelo Numérico

O modelo numérico foi desenvolvido considerando somente o fluido (ar) em condição estática, isotérmica e despressurizado. Não foi considerada a interação fluido-estrutura, ou seja, o efeito de interface entre a tubulação e o fluido não foi levado em conta nas análises de propagação acústica. Sabe-se que as ondas acústicas emitidas por transdutores acústicos, como sonares e alto-falantes, possuem pequena amplitude e nenhum tipo de dissipação é esperada, evitando-se assim o acréscimo de novas variáveis ao modelo.

O fluido foi discretizado através de elementos acústicos do tipo AC3D8R (AC – modo acústico, 3D – três dimensões, 8 – número de nós com integração reduzida), sendo definido por oito nós com um grau de liberdade em cada nó dado pela pressão.

Para a construção do modelo foi considerada apenas a seção interna do duto, ou seja, apenas o fluido. Para a representação das obstruções, foi feita uma redução na seção transversal do fluido na posição desejada. A Figura 5.1 apresenta um modelo com obstrução (redução de seção transversal). As obstruções estudadas serão descritas na seção 5.2.

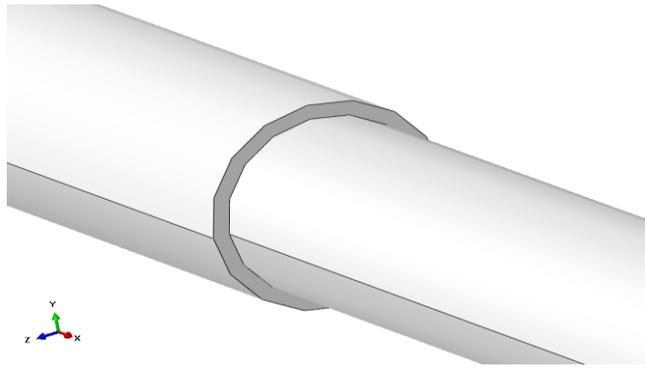


Figura 5.1: Obstrução de 25% da área interna da tubulação.

5.1.1 O Fluido

O fluido utilizado para as simulações foi o ar, considerando-se assim as suas propriedades de compressibilidade (Bulk Modulus) em condições adiabáticas, e sua massa específica a uma temperatura de 20°C.

O valor de sua massa específica (ρ) é de 1,2 Kg/m³ e seu Bulk Modulus (β) é de 1,42 x 10⁵ Pa. A velocidade do som (c) pode ser encontrada utilizando a equação 5.1. A velocidade do som utilizada nas análises é de 344m/s.

$$c = \sqrt{\beta/\rho} \quad (5.1)$$

5.1.2 Condições de Contorno

A primeira condição de contorno foi considerar uma das extremidades da tubulação como sendo a entrada de um pulso acústico emitido por uma fonte emissora (com características que serão descritas na seção 5.2).

A segunda condição de contorno utilizada considera a outra extremidade da tubulação (saída) como sendo não refletiva à onda proveniente da extremidade de entrada, estabelecendo assim uma tubulação de comprimento infinito. Visto isto, serão apenas lidos os sinais refletidos pelas obstruções.

O monitoramento da pressão acústica (POR) foi realizado através de dois nós, sendo o primeiro posicionado na entrada e o segundo na saída da tubulação, com isto é possível capturar os sinais refletidos e transmitidos por uma obstrução.

5.1.3 Definição da Malha

Foram realizadas várias simulações sem obstruções para que se chegasse ao tamanho de malha ideal (estudo de convergência), que apresentasse melhores resultados sem que acarretasse elevados tempos de simulação. Para isso, foi usado um único modelo de tubulação de 50 m de comprimento e 4'' de diâmetro interno (geometria constante) sem obstrução, variando-se apenas o tamanho do elemento e a frequência da onda do sinal acústico de entrada. Ondas senoidais com pressão acústica relativa de 1,0 Pa e com diferentes frequências: 300, 500, 1000, 1500, 2000 e 3000 Hz foram simuladas para verificação da influência da frequência do sinal propagado e o tamanho do elemento.

Para análise de convergência, foram levantados os valores da pressão acústica referentes ao nó posicionado a 50 m da entrada do pulso acústico (saída da tubulação). A Figura 5.1 apresenta os resultados das simulações, evidenciando a pressão acústica normalizada em função do tamanho médio dos elementos.

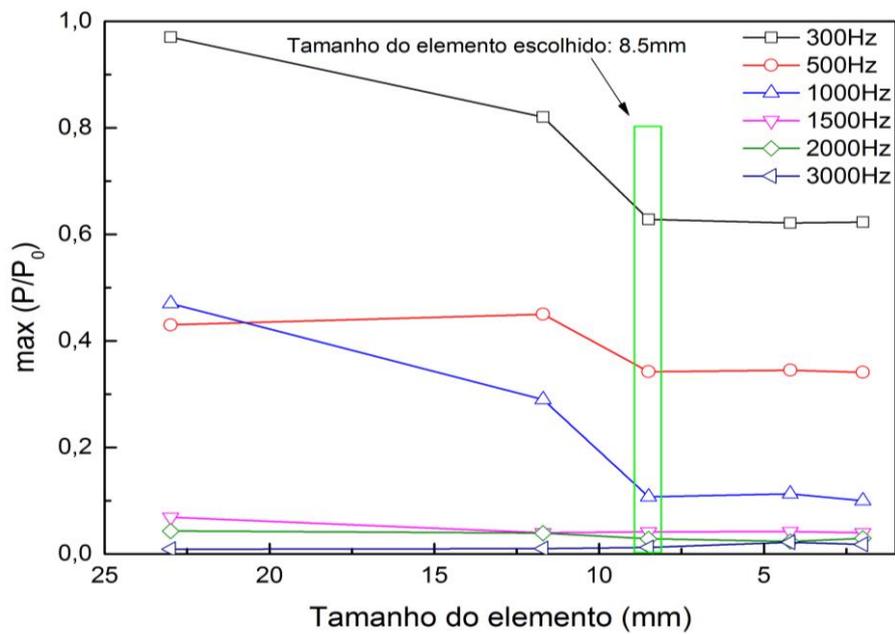


Figura 5.2: Análise de Convergência

Analisando-se os resultados apresentados na Figura 5.2 é possível verificar a estabilidade na linha de pressão acústica máxima quando o tamanho do elemento é inferior a 8,5 mm. Foi adotado o tamanho de elemento de 8,5 mm para a simulação de todas etapas subsequentes deste trabalho. A Figura 5.3 apresenta uma foto do tipo de malha usada nas simulações.

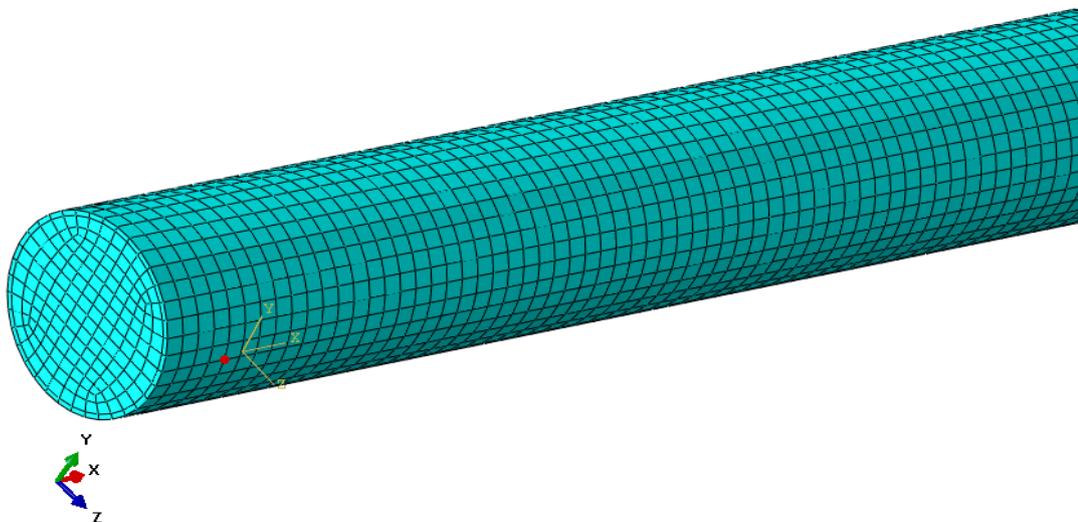


Figura 5.3: Malha de 8.5 mm utilizada nas simulações.

5.2 Parametrização

Sabe-se que, a partir da solução da equação da onda (Equação 4.1.1) apresentada na seção 4.1, é possível obter a frequência de corte para um tubo de seção transversal circular, sendo esta definida pela seguinte Equação 5.2:

$$f_u = \frac{1,84c}{\pi d} \quad (5.2)$$

A frequência de corte de um duto (f_u) define o limite para propagação de ondas planas (modo fundamental). Quando a frequência de excitação do sistema torna-se alta, conseqüentemente seu comprimento de onda torna-se comparável com as dimensões de sua seção transversal. Então, não somente ondas planas propagam-se no interior do mesmo, mas também os modos de alta ordem. Usando a Equação 5.2 para um duto com 4'' de diâmetro interno (d) e preenchido por ar, considerando-se a velocidade de propagação do som no ar (c) como sendo 344 m/s é encontrada uma frequência de corte de aproximadamente 1.96 kHz para estas condições.

Para verificar a validade da frequência de corte obtida analiticamente através da Equação 5.2, foram realizadas simulações de ondas acústicas com diferentes frequências na tubulação sem obstruções, com 4'' (polegadas) de diâmetro e comprimento de 50 m, para identificação dos sinais ótimos que irão se propagar no duto com a menor atenuação possível. Os sinais de entrada utilizados foram ondas senoidais (um período) com amplitude de 1,0 Pa e com diferentes frequências: 300, 500, 1000, 1500, 2000 e 3000 Hz. A Figura 5.4 apresenta um desenho esquemático da tubulação usada.

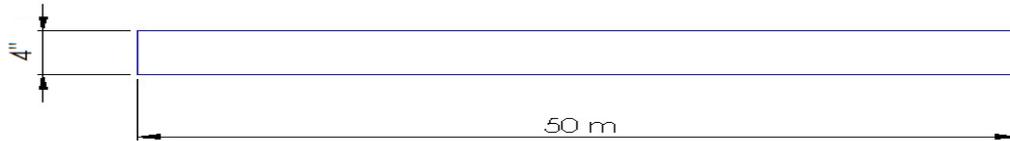


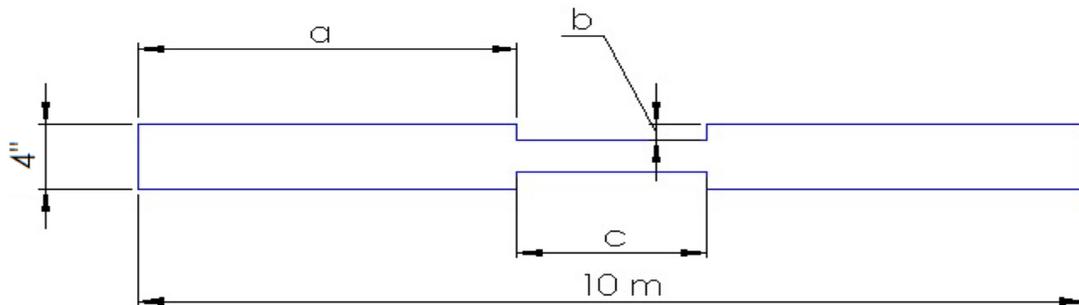
Figura 5.4: Desenho esquemático da tubulação de 4'' de diâmetro e 50 m de comprimento.

Serão apresentados no capítulo 6 os resultados das simulações realizadas para cada frequência admitida, conseqüentemente a escolha da que melhor se adequa ao modelo das simulações ulteriores com obstruções.

Após o estudo da propagação do pulso acústico na tubulação sem obstrução, foram criadas na tubulação de 10 m de comprimento e 4'' de diâmetro interno, doze diferentes tipos de obstruções simétricas, respetivamente obstruções de 10%, 25%, 50% e 75% da área interna da tubulação, com comprimentos de obstrução de 250mm, 500mm e 750mm, como mostra a Tabela 1. A Figura 5.5 apresenta um complemento à Tabela 1, com as distribuições de medidas dos modelos com obstrução, utilizados nas simulações deste trabalho. Serão apresentados os resultados das simulações com obstrução no capítulo 6.

Tabela 1: Tipos de obstruções simuladas.

	OBSTRUÇÕES				Início das Obstruções (a)
	10%	25%	50%	75%	
Comprimento da obstrução (c)	250 mm	250 mm	250 mm	250 mm	4875 mm
	500 mm	500 mm	500 mm	500 mm	4750 mm
	750 mm	750 mm	750 mm	750 mm	4625 mm
Espessura da obstrução (b)	2,65 mm	6,86 mm	14,86 mm	25,40 mm	

**Figura 5.5:** Desenho esquemático das distribuições de medidas dos modelos com obstrução.

Capítulo 6

6. Resultados

Este capítulo apresenta todos os resultados das simulações descritas no capítulo 5, bem como uma discussão sobre os mesmos.

6.1 Limite de propagação de ondas

Como apresentado na seção 5.2 deste trabalho, durante as simulações realizadas variando-se apenas a frequência das ondas transmitidas ao interior do duto de 50 m de comprimento e 4'' de diâmetro interno foi possível a obtenção de gráficos que mostrassem que quando a onda sonora se propaga em um meio, ela apresenta uma redução de sua intensidade, devido a dissipação de energia relacionada ao efeito de atenuação do som. As Figuras 6.1 (a), (b), (c), (d), (e) e (f) apresentam os resultados de pressão acústica normalizada em função do tempo para cada frequência admitida de 300, 500, 1000, 1500, 2000 e 3000 Hz, respectivamente. A pressão acústica foi monitorada a cada 5 m da tubulação. A Figura 6.1(g) mostra os valores máximos de pressão acústica normalizada em função da distância percorrida para todas as ondas simuladas.

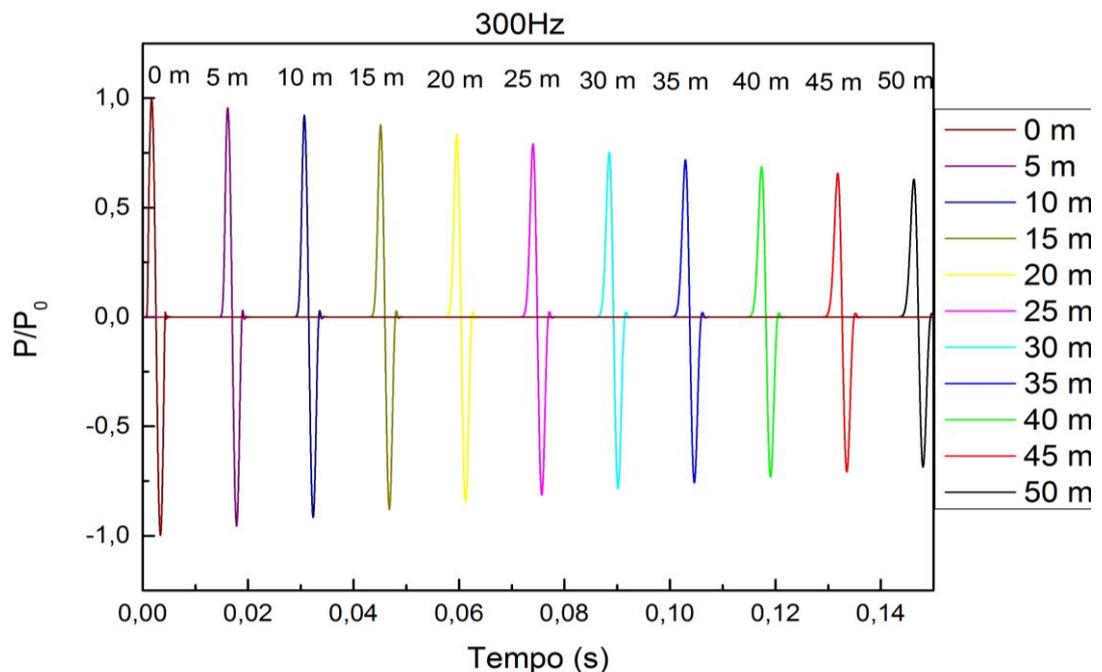


Figura 6.1a: Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 300Hz.

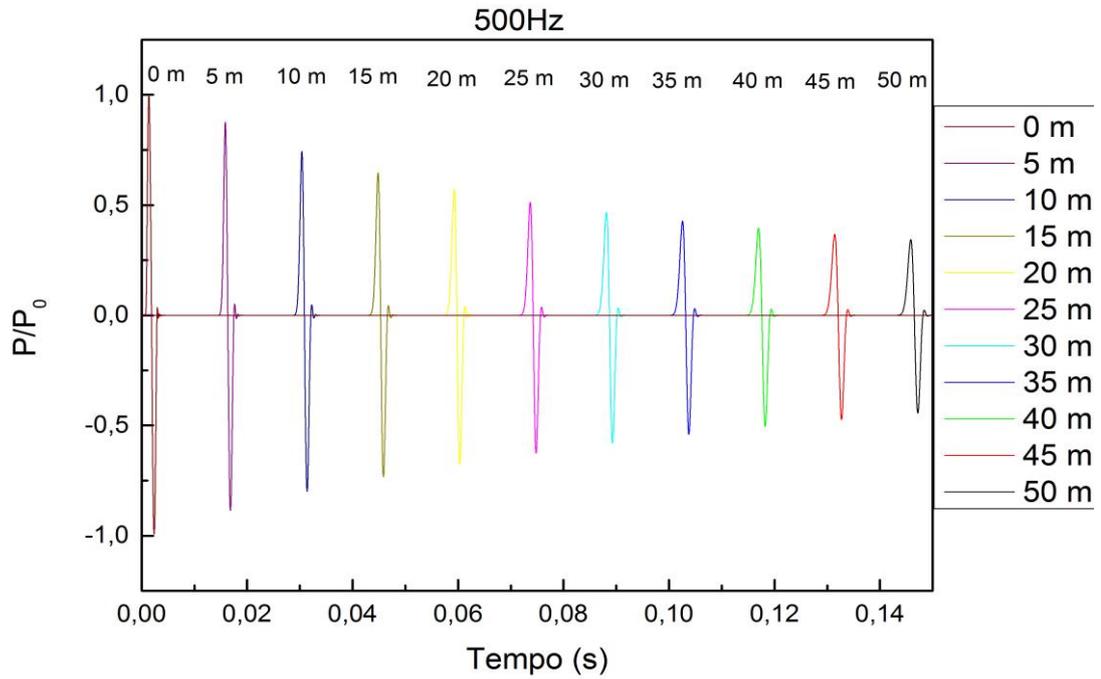


Figura 6.1b: Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 500Hz.

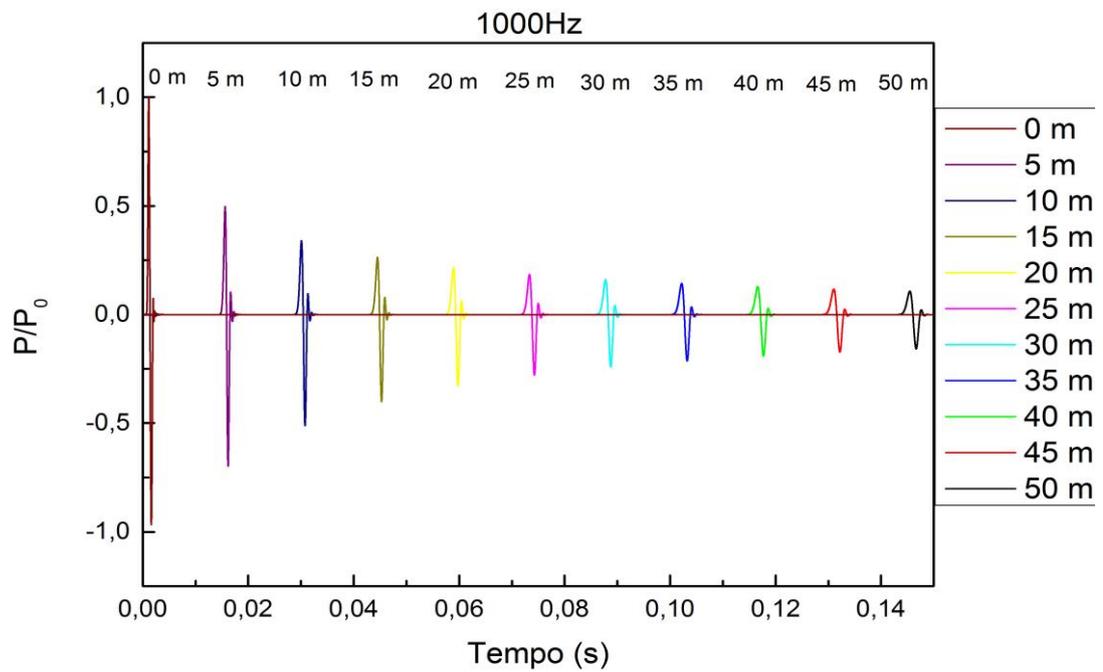


Figura 6.1c: Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 1000Hz.

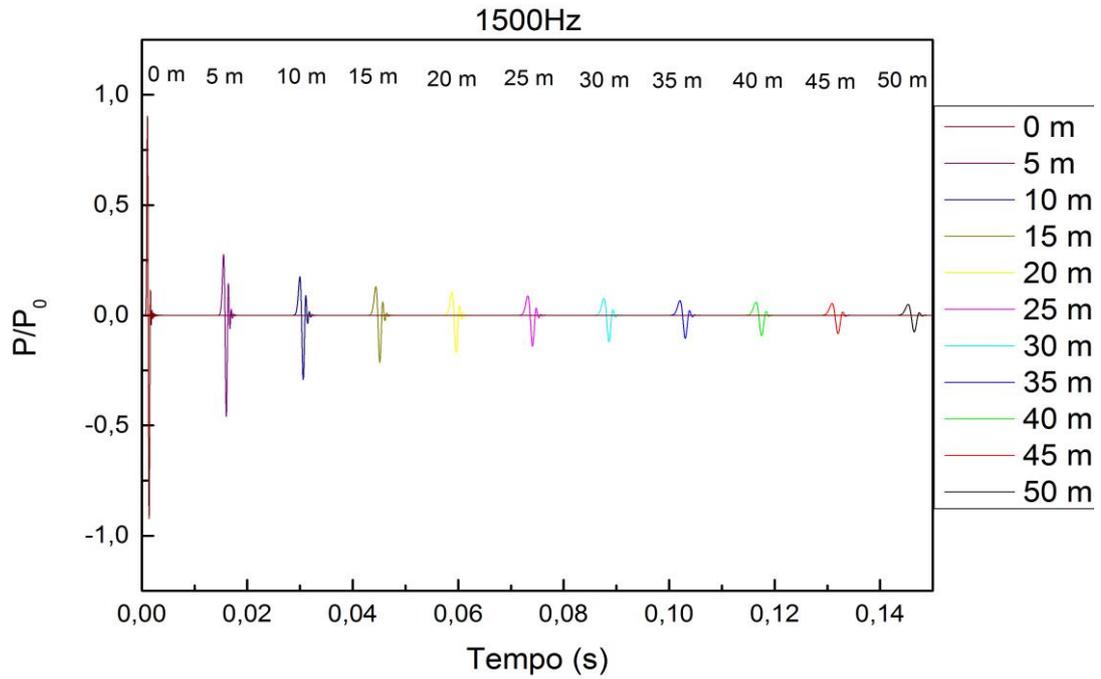


Figura 6.1d: Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 1500Hz.

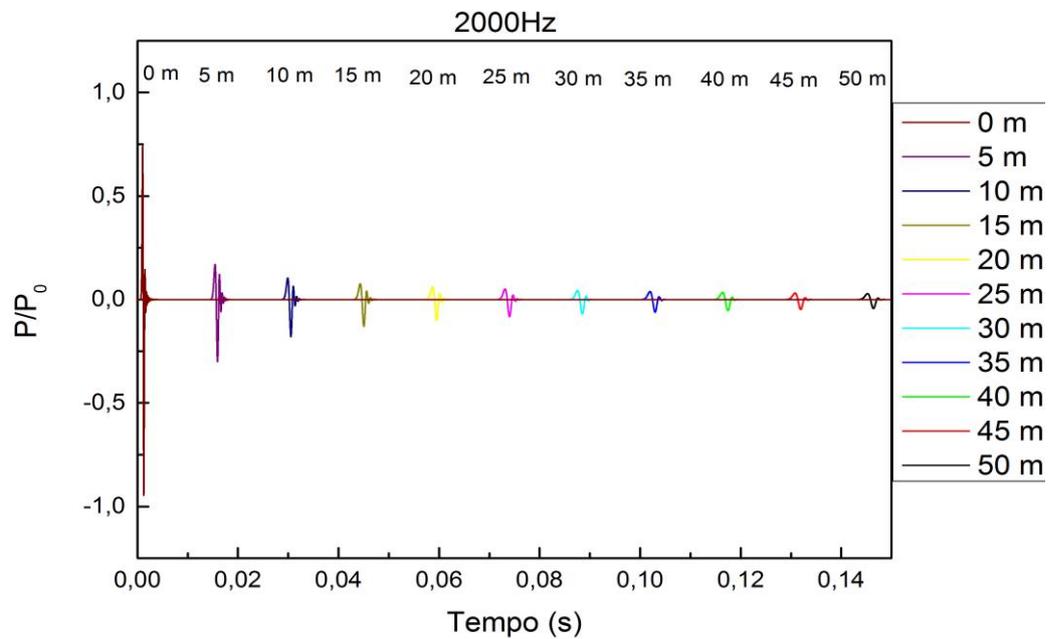


Figura 6.1e: Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 2000Hz.

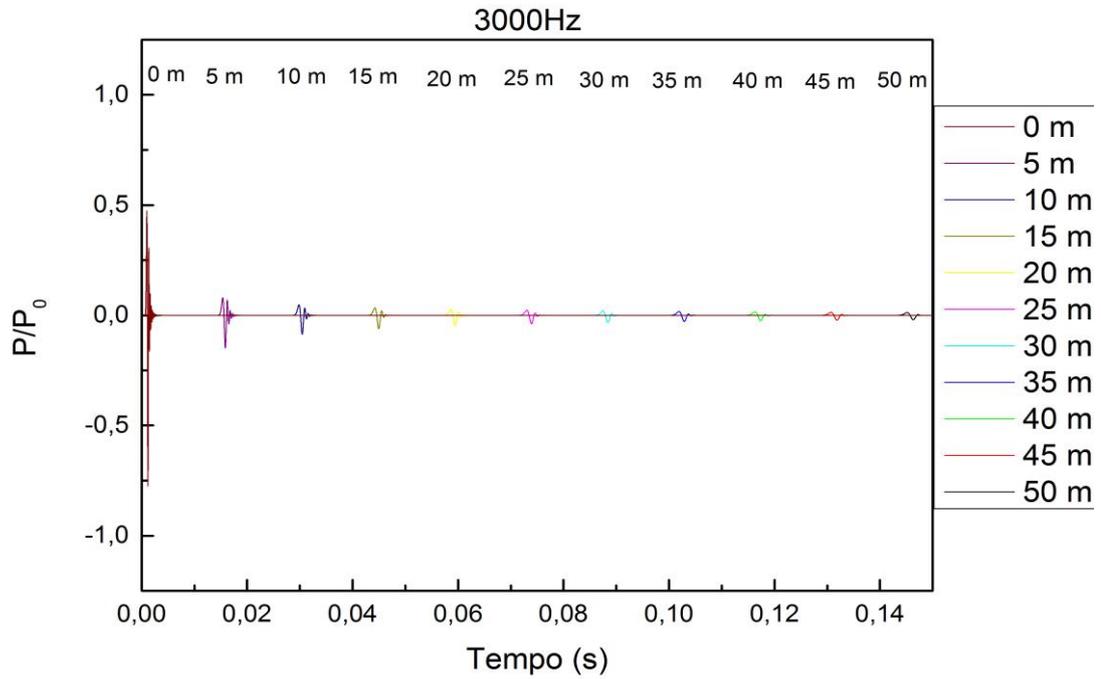


Figura 6.1f: Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico com frequência de 3000Hz.

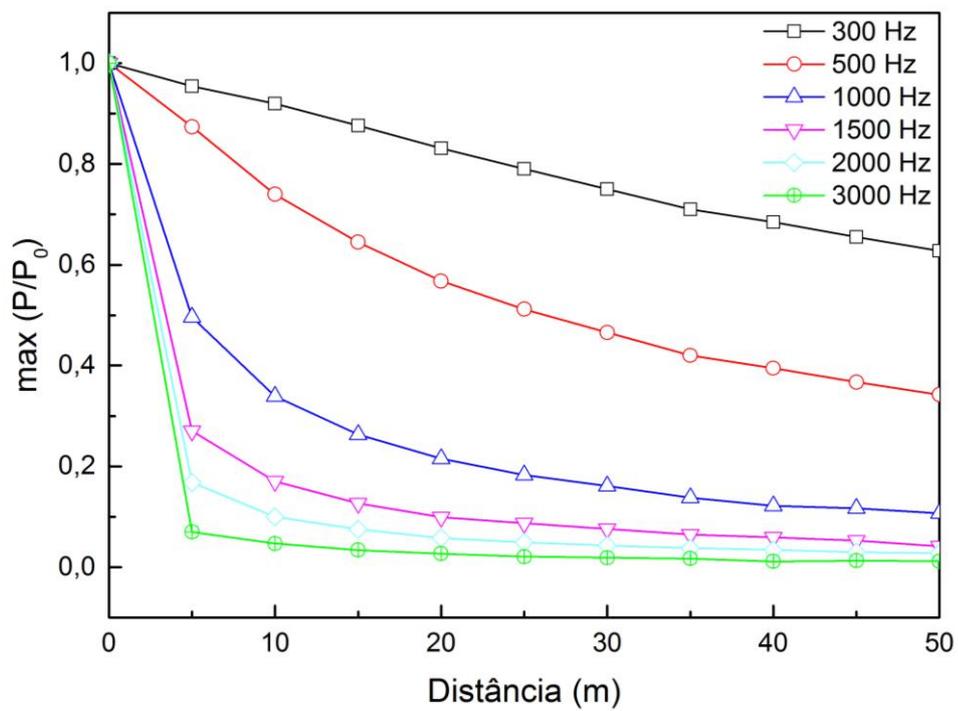


Figura 6.1g: Valores máximos de pressão acústica normalizada em função da distância percorrida.

Como se pode observar nas Figuras 6.1 (a,b,c), cada vez que se aproxima à frequência de corte, é apresentada uma elevada atenuação na propagação da onda no interior da tubulação. As Figuras 6.1 (e,f) apresentam os resultados das simulações para frequências superiores à frequência de corte explicitando a inadequação ao uso das mesmas para dutos com as dimensões assumidas. A atenuação das ondas com diferentes frequências pode ser visualizada de maneira clara na Figura 6.1 (g), evidenciando que em altas frequências, acima da frequência de corte obtida analiticamente, a atenuação é acentuada. Como critério de projeto, adotou-se a frequência de 500 Hz por esta ser inferior à frequência de corte e por existirem emissores que operam esta frequência no mercado SILVA *et al.* (2014).

6.2 Obstruções

Como apresentado nos capítulos 1 e 3, o real intuito da técnica de reflectometria acústica aplicada à tubulações consiste na determinação da existência de bloqueios bem como o seu posicionamento e dimensionamento dentro da linha. As seções subsequentes deste capítulo apresentam os resultados das simulações realizadas usando-se os parâmetros apresentados na seção 5.2, Tabela 1.

Para melhor entendimento dos sinais que serão analisados, a Figura 6.2 mostra um exemplo típico dos sinais acústicos monitorados durante toda a análise pelo nó no início da tubulação (a) e pelo nó no fim da tubulação (b) para uma tubulação com um bloqueio de 750mm de comprimento e 75% de área obstruída. É possível ver na Figura 6.2 (a) o sinal emitido e o sinal refletido pela obstrução. A distância da obstrução em relação ao microfone (nó), ΔS , pode ser calculada pela Equação 6.2.1, sendo c a velocidade do som e Δt o tempo percorrido pela onda. A Figura 6.2 (b) mostra o sinal acústico transmitido pela obstrução e distância da obstrução em relação a este microfone (nó), ΔS , podendo ser calculada pela equação 6.2.2, sendo c a velocidade do som e Δt o tempo percorrido pela onda.

$$\Delta S = \frac{c\Delta t}{2} \quad (6.2.1)$$

$$\Delta S = c\Delta t \quad (6.2.2)$$

Nas próximas análises somente os sinais refletidos e transmitidos serão mostrados, de forma a evidenciar a diferença entre as obstruções simuladas.

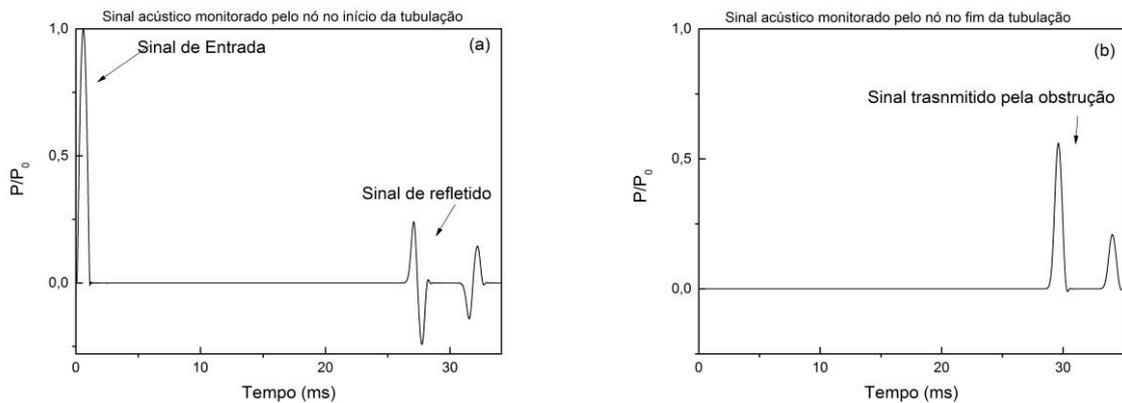


Figura 6.2: Pressão acústica normalizada em função do tempo de propagação para um sinal acústico medido pelo nó no início da tubulação (a) e pelo nó no fim da tubulação (b).

6.2.1 Obstruções com o mesmo comprimento

As Figuras 6.3 (a), 6.4 (a) e 6.5 (a) apresentam os resultados das ondas refletidas pelas obstruções (pressão acústica medida pelo nó no início da tubulação), obtidos através das simulações de 10%, 25%, 50% e 75% da área interna do duto, sendo todas obstruções com 250, 500 e 750 mm de comprimento, respectivamente. As Figuras 6.3 (b), 6.4 (b) e 6.5 (b) apresentam os resultados das ondas transmitidas pelas mesmas obstruções anteriores (pressão acústica medida pelo nó no fim da tubulação).

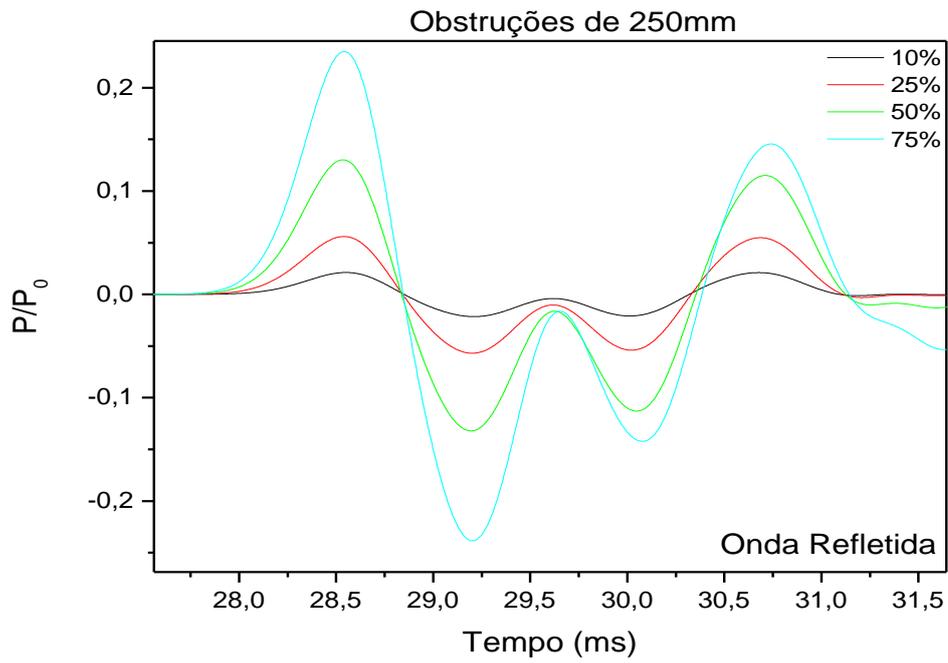


Figura 6.3 a): onda refletida de obstruções de 250mm.

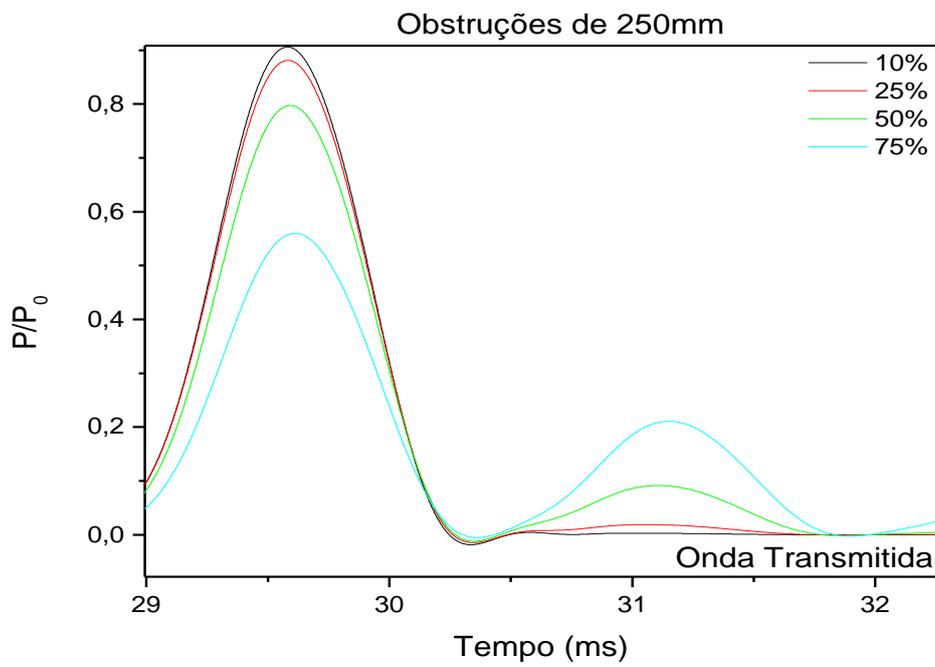


Figura 6.3 b): onda transmitida de obstruções de 250mm.

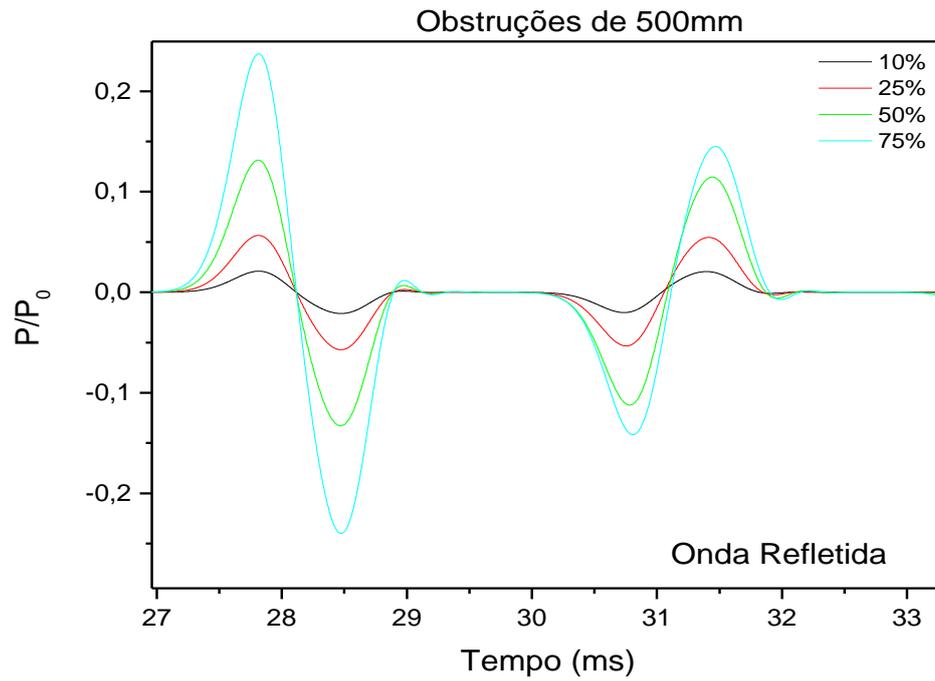


Figura 6.4 a): onda refletida de obstruções de 500mm.

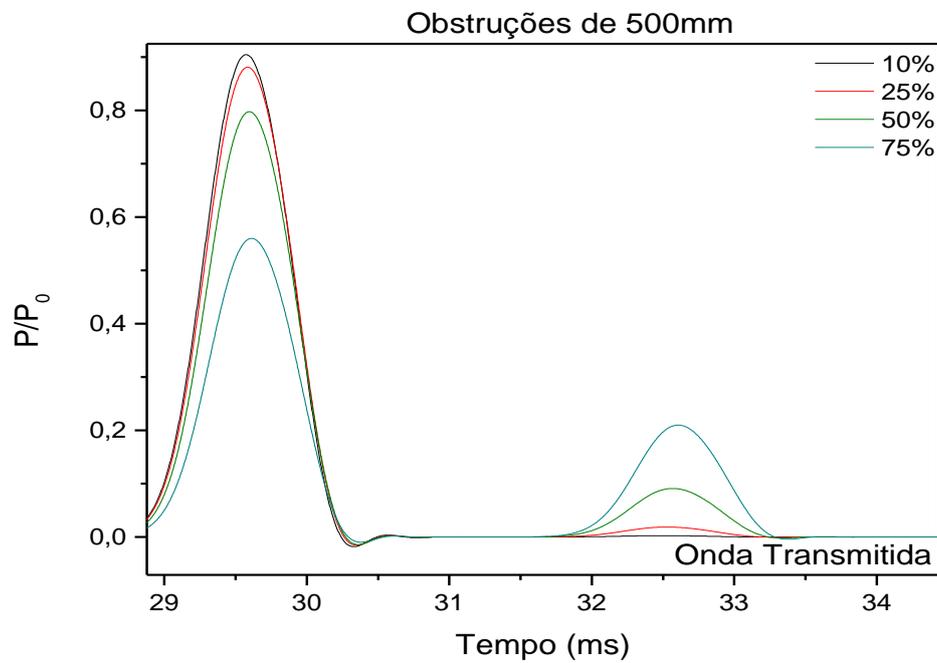


Figura 6.4 b): onda transmitida de obstruções de 500mm.

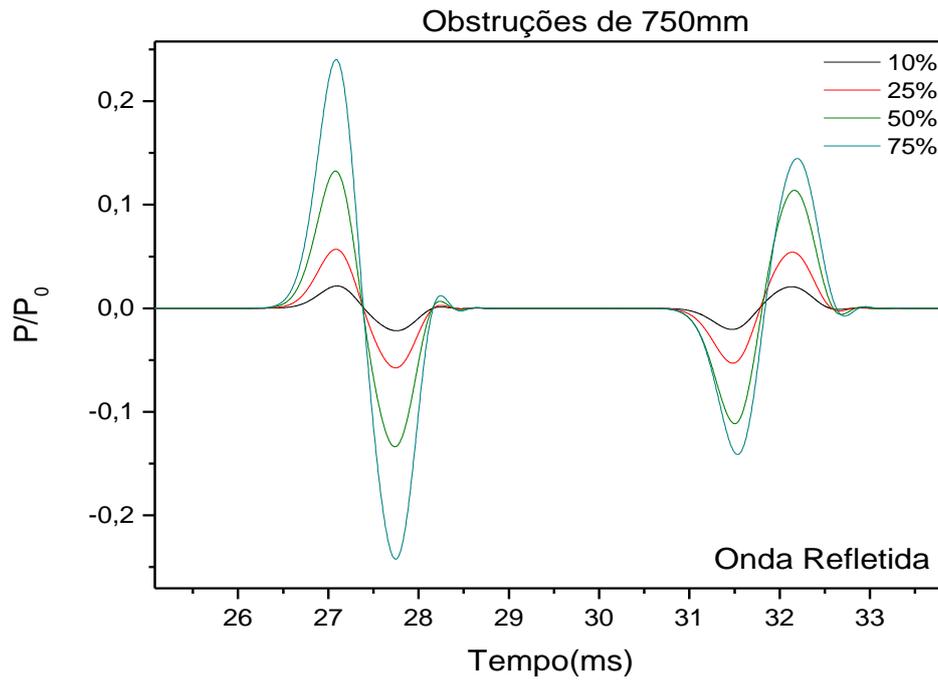


Figura 6.5 a): onda refletida de obstruções de 750mm.

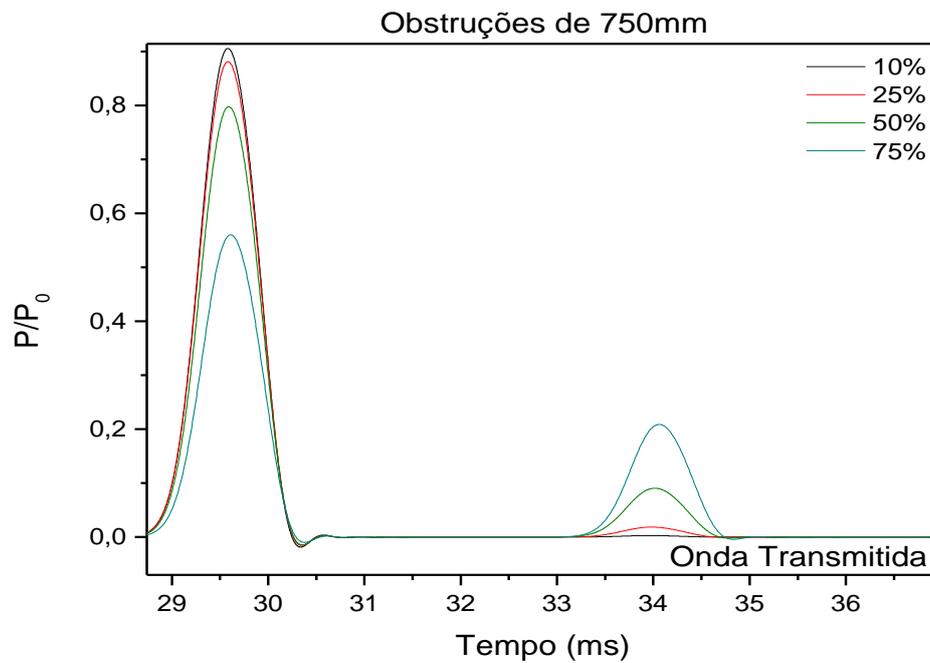


Figura 6.5 b): onda transmitida de obstruções de 750mm.

Com relação aos sinais refletidos pelas obstruções, Figuras 6.3(a), 6.4(a) e 6.5(a), é possível verificar que quanto maior a área obstruída maior o sinal refletido. Pode-se ver também a presença de dois sinais ocorrendo em tempos diferentes, isto porque cada um deles é referente a mudança geométrica do início e fim da obstrução (dois sinais refletidos). Ao se medir a diferença de tempo entre os picos é possível medir os comprimentos das obstruções. Na Figura 6.3 (a), estes sinais não são tão bem discriminados quanto nas Figuras 6.4 (a) e 6.5 (a), isto porque a obstrução é bastante curta, o que faz com que os sinais refletidos pelas extremidades das obstruções sofram superposições. Estes resultados são importantes, pois mostram que a técnica é capaz de identificar e dimensionar as obstruções.

As figuras 6.3 (b), 6.4 (b) e 6.5 (b) mostram que também é possível identificar as diferentes obstruções utilizando a onda transmitida. Agora, quanto maior a obstrução menor o sinal transmitido, o que é óbvio, pois maior parte da onda é refletida pela mudança abrupta da geometria da obstrução. É possível verificar a viabilidade de identificação, localização e dimensionamento das obstruções utilizando ambas configurações de detecção, no início e fim da tubulação. Do ponto de vista prático, a configuração desejada é que o microfone fique próximo do emissor acústico. A Figura 6.6 mostra de maneira clara os resultados encontrados acima utilizando os valores máximos de pressão normalizada em função do percentual de área obstruída para os diferentes comprimentos de obstrução utilizando: (a) sinal refletido e (b) sinal transmitido.

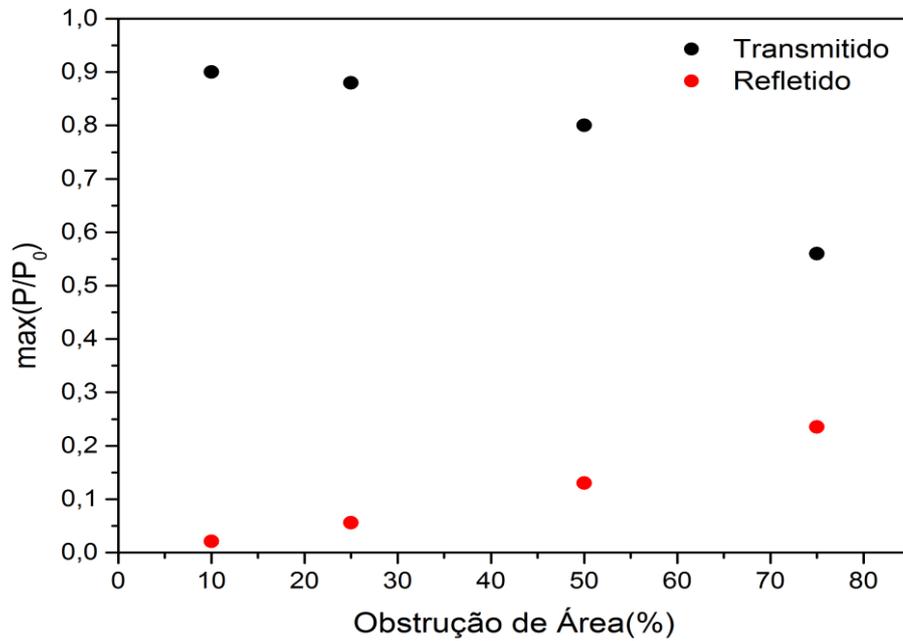


Figura 6.6: Amplitude máxima do sinal em função do percentual de área obstruída para os diferentes comprimentos de obstrução utilizando: (a) sinal refletido e (b) sinal transmitido.

6.2.2 Obstruções com a mesma espessura

As Figuras 6.7 (a), 6.8 (a), 6.9 (a) e 6.10 (a) apresentam os resultados das ondas refletidas obtidos através das simulações de obstruções com 250, 500 e 750 mm de comprimento de obstrução, sendo todas obstruções com 10%, 25%, 50% e 75% da área interna do duto, respectivamente. As Figuras 6.7 (b), 6.8 (b), 6.9 (b) e 6.10 (b) apresentam os resultados das ondas transmitidas para os mesmos parâmetros das Figuras 6.7 (a), 6.8 (a), 6.9 (a) e 6.10 (a) respectivamente.

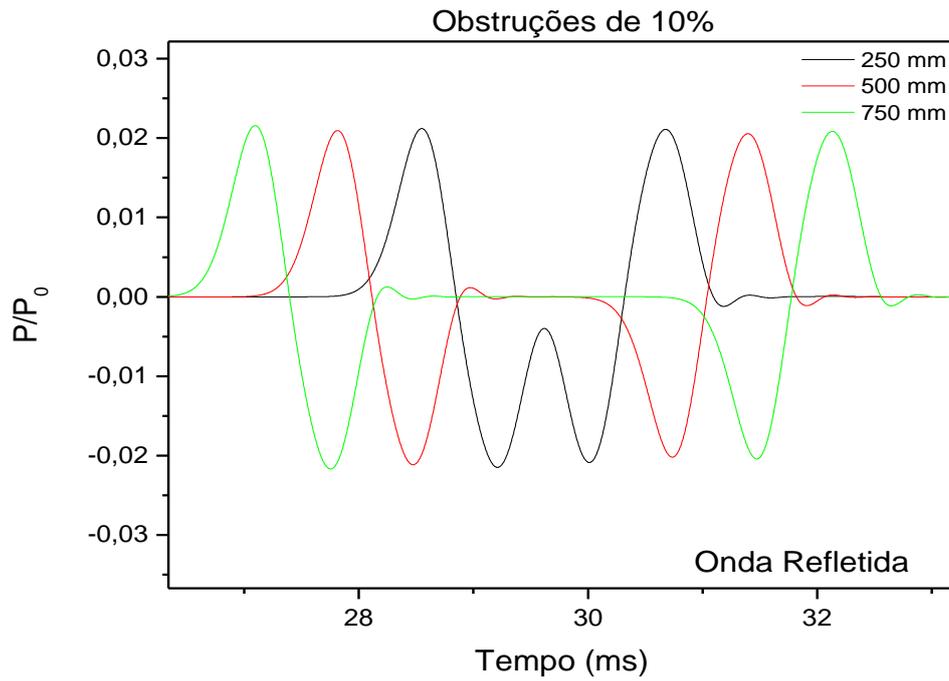


Figura 6.7 a): Onda refletida de obstruções de 10%.

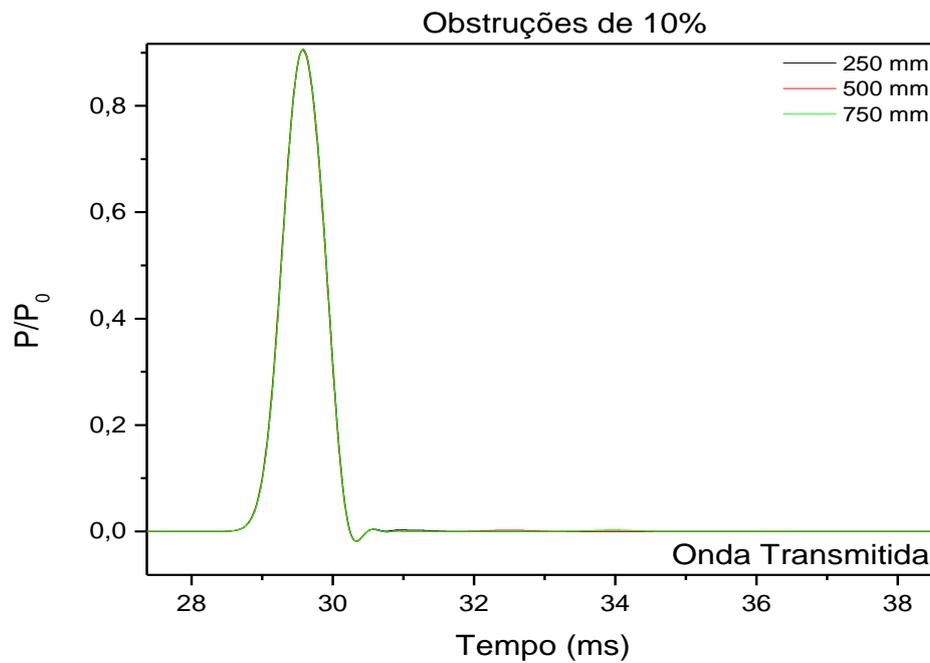


Figura 6.7 b): Onda transmitida de obstruções de 10%.

A Figura 6.9 b) apresenta um importante resultado para obstruções de espessuras menores usando-se ondas de frequências não tão grandes o suficiente, ou seja, ondas com menores resoluções para que se consiga determinar o comprimento de uma obstrução. É possível observar-se a falta de sensibilidade da onda com frequência de 500 Hz para este caso de espessura de 10% da área interna do duto.

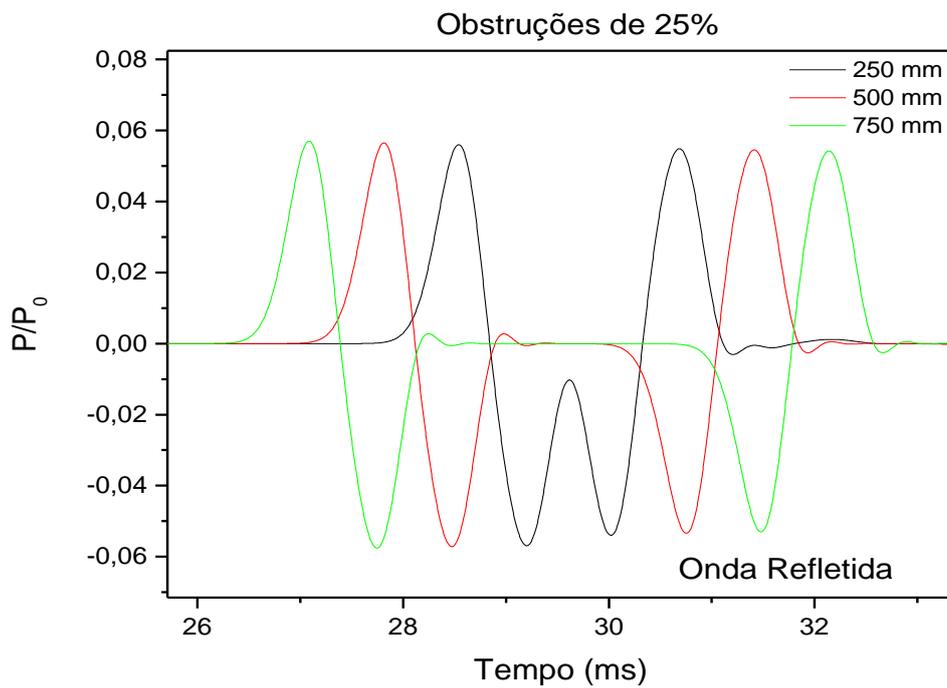


Figura 6.8 a): Onda refletida de obstruções de 25%.

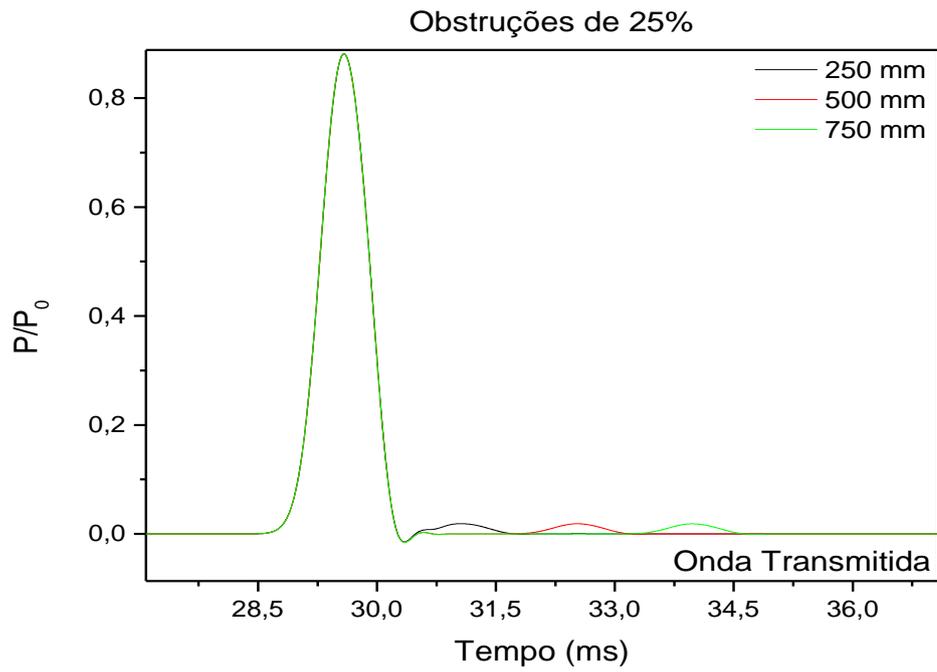


Figura 6.8 b): Onda transmitida de obstruções de 25%.

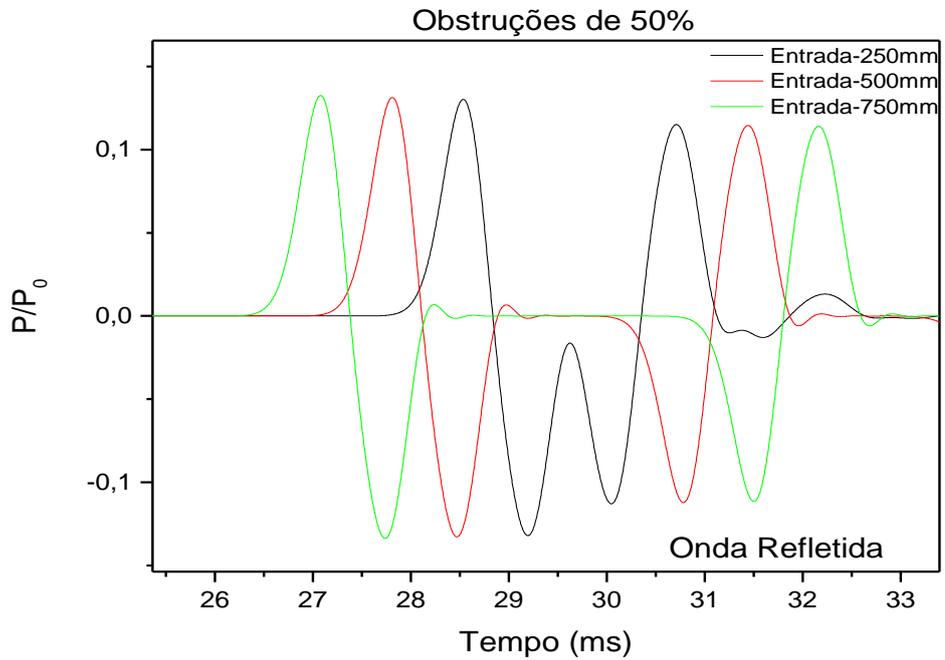


Figura 6.9 a): Onda refletida de obstruções de 50%.

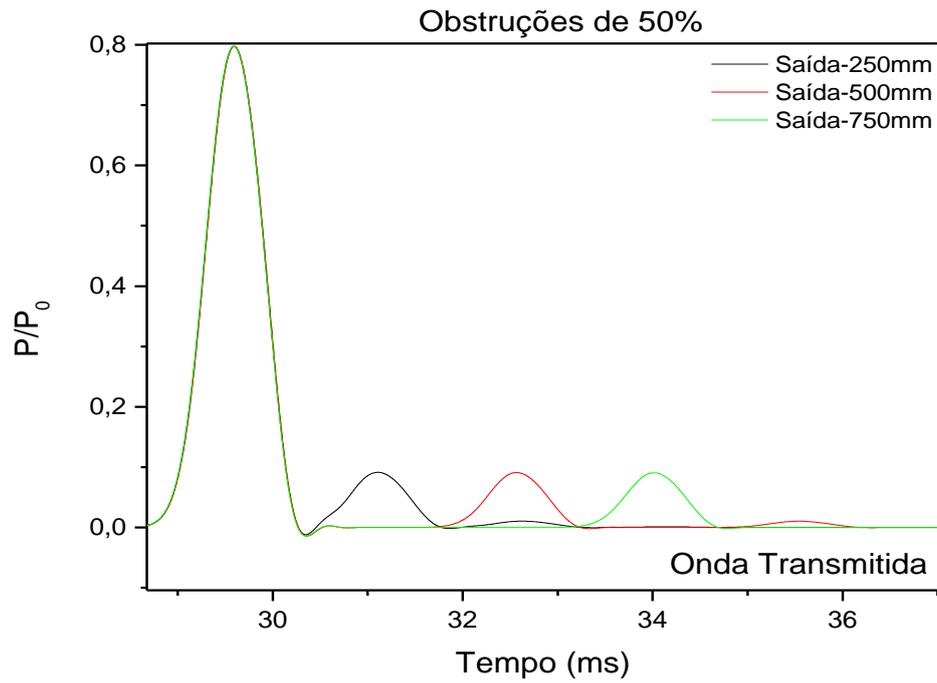


Figura 6.9 b): Onda transmitida de obstruções de 50%.

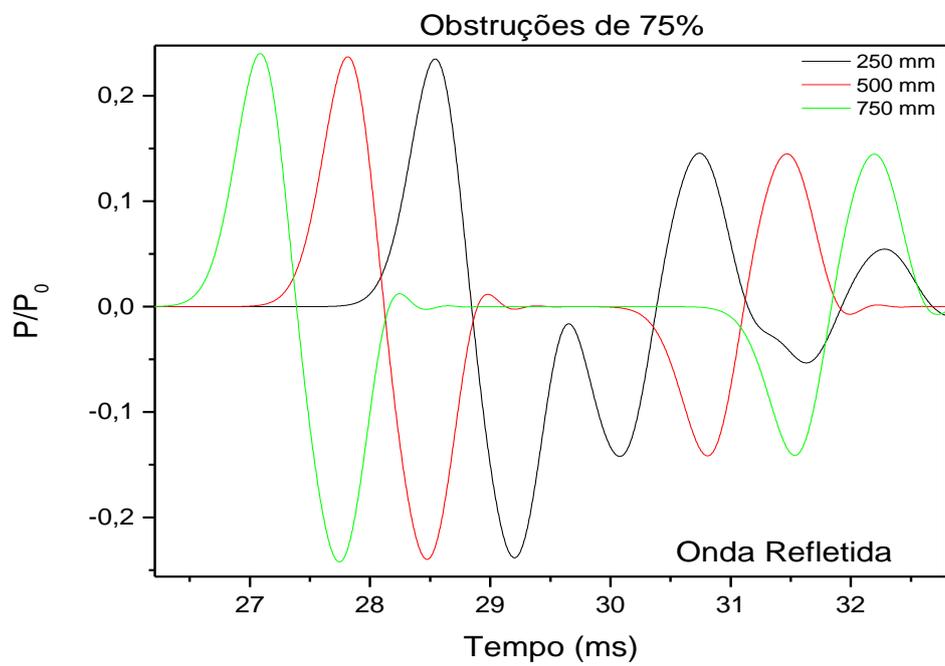


Figura 6.10 a) – Onda refletida de obstruções de 75%.

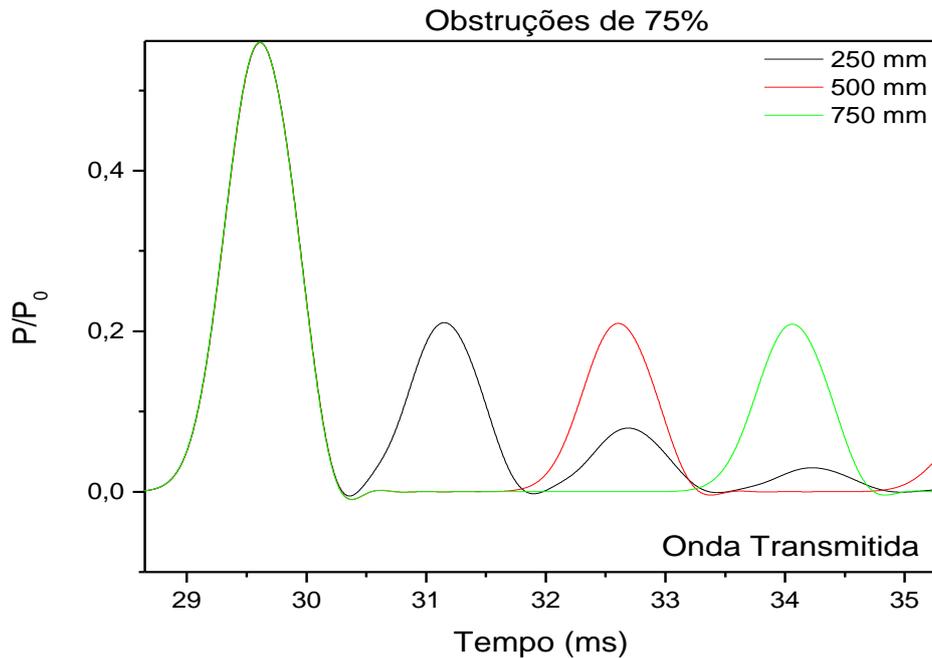


Figura 6.10 b): Onda transmitida de obstruções de 75%.

Como já esperado, é possível observar pelas Figuras 6.7 (a), 6.8 (a), 6.9 (a) e 6.10 (a) que o início de cada obstrução de comprimento diferente começa em um ponto distinto, pois o centro geométrico de cada obstrução foi posicionado coincidindo com o centro geométrico do duto, assim a diferença de tempo entre os picos é possível medir os comprimentos das obstruções. Como foi considerada a mesma espessura para diferentes comprimentos de obstrução, as ondas refletidas apresentam a mesma amplitude, pois para todas obstruções a mesma quantidade de onda foi refletida pelas obstruções.

É possível observar através das Figuras 6.7 (b), 6.8 (b), 6.9 (b) e 6.10 (b) que a amplitude da onda transmitida permanece constante (primeiro pico), pois foram plotados os resultados das simulações de mesma espessura para comprimentos de obstruções diferentes, ou seja, todas reflexões de onda enfrentaram a mesma discontinuidade. O segundo pico ocorre em tempos diferentes para obstruções com comprimentos diferentes, indicando a capacidade de medi-las.

Capítulo 7

7. Conclusões

Com base na revisão bibliográfica realizada durante a execução deste trabalho, vê-se que a técnica de reflectometria de pulsos acústicos possui potencial para a detecção e localização das obstruções ao longo de uma tubulação. O desenvolvimento de um modelo numérico baseado em elementos finitos pode fornecer informações importantes sobre os parâmetros (frequência e amplitude) que o sistema de transdução deverá ter para atender as necessidades de detecção.

Quanto a relação frequência – amplitude do sistema de transdução, podemos observar pelos resultados das simulações, que mais rapidamente o sinal é atenuado se elevarmos a frequência da onda emitida pois implicará em um comprimento de onda cada vez menor. Com o aumento da frequência da onda emitida é obtido um ganho em resolução para a detecção da obstrução, mas em contrapartida a atenuação do sinal será elevada, o que se torna impraticável quando se tem obstruções que começam em distâncias cada vez maiores da entrada do duto. Essa avaliação remete-nos a uma escolha de frequência da onda sonora emitida, fazendo assim com que se separe o que se pretende avaliar a cada momento, ou seja, se for para identificar a grandiosidade da espessura da obstrução bem como o seu início, escolheria-se uma onda com frequência menor, pois apresentaria melhor informação para o sinal refletido. Para o caso de se identificar o seu tamanho axial, já precisaria-se de uma frequência que proporcione melhor resolução da obstrução, ou seja, uma frequência mais alta que implicaria em uma onda mais baixa, para se fazer uma melhor leitura do comprimento da obstrução através da onda transmitida.

Em suma, os resultados obtidos durante as simulações deste trabalho puderam mostrar a eficiência desta técnica que muito tem sido estudada para suprir as necessidades de uma indústria que cada vez mais precisa de soluções rápidas e eficientes para seus problemas, desde que não comprometam o funcionamento de suas instalações.

Capítulo 8

8. Trabalhos Futuros

Sugere-se a implementação de modelos numéricos de tubulações com diferentes comprimentos, preferencialmente maiores que os 50 metros já simulados neste trabalho, layouts mais complexos de linhas, diâmetros internos maiores, presença de ramificações na linha, múltiplas obstruções na linha com geometrias axissimétricas, presença de obstruções localizadas no fundo da linha, o que configuram situações recorrentes em linhas de operação horizontal, objetivando-se desta forma simulações mais próximas às condições reais de gasodutos que operam à distâncias consideráveis do continente, avigorando assim a eficiência da técnica acústica para a detecção de obstruções em tubulações.

Neste trabalho foi considerado apenas o fluido como sendo ar, podendo-se trabalhar mais futuramente utilizando-se outros tipos de fluidos e em regimes de escoamentos diferentes, cada vez mais próximos aos operados na indústria de óleo e gás, como por exemplo óleos, águas e fluidos multifásicos.

É de grande relevância a criação de um modelo experimental para que se possa confrontar os resultados obtidos por intermédio de simulações numéricas, para que se firmem coerentes os resultados provenientes das simulações numéricas.

Referências Bibliográficas

ARAI, A. E.; DUARTE, L.R.; *Estudo da Formação de Incrustações Carbonáticas*, Projeto de graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

CARVALHO, R.B.; “Fotografando no escuro”. *Ciência Hoje*. V31, n.186, p.82, Set. 2002.

CARVALHO, R.B.; *Análise de metodologias de controle de hidratos de gás em águas ultra-profundas*, Projeto de graduação apresentado à Escola Politécnica/UFRJ, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2010.

CONCORDIA; If Architecture is Frozen Music, Then Music Must Be Liquid Architecture 2013. Disponível em: <<http://concordia.com/if-architecture-is-frozen-music-then-music-must-be-liquid-architecture/>> Acesso em: 08 de Jun. 2016.

DE SALIS, M.H.F.; OLDHAM, D. J.; “A rapid technique to determine the internal area function of finite-length ducts using maximum length sequence analysis”, *Journal of the Acoustical Society of America*, 108 (1), pp. 44-52, Jul. 2000.

FERREIRA, C.D.A.E.; CARDOSO, L.F.; *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, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

FREDBERG, J.J.; WOHL, M.E.B.; GLASS, G.M.; DORKIN, H.L.; “Airway area by acoustic reflections measured at the mouth”, *Journal of Physiological Measurement*. 48(5), 749-758; 1980.

GOMES, E. A. S.; *Estudo da Cristalização de Parafinas e sistema solventes/tensoativos/água*. Dissertação D.Sc., Centro de tecnologia, Departamento de Engenharia Química, UFRN, Rio Grande do Norte, RN, Brasil, 2009.

GRAY, C. D.; *Acoustic Pulse Reflectometry for Measurement of the Vocal Tract with Application in Voice Synthesis*. Dissertação Ph.D., University of Edinburgh, 2005.

GUILHERME, V.; Deposição de Parafina, 2011. Disponível em: <<http://camposmarginais.blogspot.com.br/2011/12/deposicao-de-parafina.html>> Acesso em: 10 de Jun. 2016.

HEMILÄ, S.; NUMMELA, S.; REUTER, T.; “What middle ear parameters tell about impedance matching and high frequency hearing”. *In: Hearing Research*. 85, p. 31-44, 1995.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, **ISO 10534-2**, Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes, 1998.

LOUREIRO, J.P.; *Identificação e localização de obstruções em tubulações contendo gases utilizando a técnica de reflectometria acústica*. Dissertação de M.Sc., Programa de Engenharia Oceânica /UFRJ, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2015.

MARSHALL I; *Acoustic reflectometry for airway measurement*. PhD, University of Edinburgh, 1992.

MENDES, P. R. S.; BRAGA, S.L.; “Obstruction of Pipelines During the Flow of Waxy Crude Oils” *Journal of Fluids Eng*, pp 722-728, 2008.

MORAN, L.R.M. *Simulação Numérica da Deposição de Parafina em Dutos de Petróleo: Avaliação dos Mecanismos de Difusão Molecular e Difusão Browniana*. Dissertação M.Sc., PPEM/PUC RIO, Rio de Janeiro. 2007.

OLIVEIRA, E.C.L.; *Modelagem e simulação da solubilização da parafina em tubos circulares e em regime laminar*. Dissertação de M.Sc., PPEQ/UFRN, Natal, RN, Brasil, 2013.

PAEZ, J. E.; “Problems in Hydrates: Mechanisms and Elimination Methods” Oklahoma: Production Operations Symposium held in Oklahoma City, 2001.

PAPADOPOULOU, K.A.; LEWIS, K.M.; LENNOX, B.; TURNER, J.T.; WANG, X.; “Detection of Hydrate and other Blockages in Pipelines Using Acoustic Reflectometry”, *Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 226, pp. 1800-1810, 2012.

QUEIROZ, D.L. *Influência da Convecção Natural no Resfriamento de Dutos Submarinos de Petróleo e Gás*. Dissertação M.Sc., PPEM/PUC RIO, Rio de Janeiro. 2007.

SHARP, D.B.; “Acoustic pulse reflectometry for the measurement of musical wind instruments”, 1996.

SILVA, L.L.; VIDAL, J.L.A.; MONTEIRO, P.C.C.; NETTO, T.A.; “Acoustic reflectometry for blockage detection in pipeline”, In Proceedings 33th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, San Francisco, CA, OMAE, 2014.

SONDHI, M.M.; GOPINATH, B.; “Determination of vocal-tract shape from impulse response at the lips”. *J.Acoust.Soc.Am*, 49(6), 1867-1873, 1971.

VILLELA, R. L. D.; *Detecção de Furos em Dutos por Técnica de Sondagem Acústica*. Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

WANG, X.; LENNOX, B.; TURNER, J.; LEWIS, K.; DING, Z.; “Blockage detection in long lengths of pipeline using a new acoustic method”. In: The Sixteenth International Congress on Sound and Vibration, Krakow, Poland, 2009.

WARE, J.A.; AKI, K.; “Continuous and discrete inverse scattering problems in a stratified elastic medium”. In: Planes at normal incidence. J.Acoust.Soc.Am, 45(4), 911-921,1969.

WU, Q.; FRICKE, F.; “Determination of blocking locations and cross-sectional area in a duct by eigenfrequency shifts”, Journal of the Acoustical Society of America, 87(1), 67-75, Jan 1990.