

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÃO EM TUBULAÇÕES METÁLICAS
BASEADA EM ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS E ACÚSTICAS

Luiz Carlos de Lemos Júnior

Campina Grande, Abril de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÃO EM TUBULAÇÕES METÁLICAS
BASEADA EM ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS E ACÚSTICAS

Tese de Doutorado apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande – Campus de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento da Informação

Doutorando: Luiz Carlos de Lemos Júnior

Orientadores: José Sérgio da Rocha Neto, D.Sc.
Jaidilson Jó da Silva, D.Sc.

Campina Grande, Abril de 2019

L557d Lemos Júnior, Luiz Carlos de.
Detecção de incrustação em tubulações metálicas baseada em análise de vibrações mecânicas e acústicas / Luiz Carlos de Lemos Júnior. – Campina Grande, 2019.
100 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2019.
"Orientação: Prof. Dr. José Sérgio da Rocha Neto, Prof. Dr. Jaidilson Jó da Silva".
Referências.

1. Impacto do Martelo. 2. Análise de Vibrações. 3. Detecção de Incrustação. 4. Rede de Sensores. 5. Correlação de Sinais. I. Rocha Neto, José Sérgio da. II. Silva, Jaidilson Jó da. Título.

CDU 621.644:616-007.47(043)

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECÁRIA MARIA ANTONIA DE SOUSA CRB 15/398

"DETECÇÃO DE INCRUSTAÇÃO EM TUBULAÇÕES METÁLICAS
BASEADA EM ANÁLISE DE VIBRAÇÕES MECÂNICAS E ACÚSTICAS

LUIZ CARLOS DE LEMOS JÚNIOR

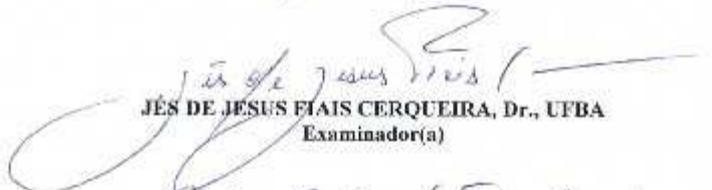
TESE APROVADA EM 24/04/2019



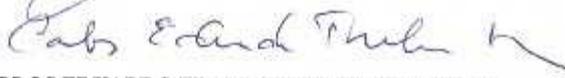
JOSÉ SÉRGIO DA ROCHA NETO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



JAILILSON JÔ DA SILVA, D.Sc., UFCG
Orientador(a)



JÊS DE JESUS FIAIS CERQUEIRA, Dr., UFBA
Examinador(a)



CARLOS EDUARDO TRABUCO DOREA, Dr., UFRN
Examinador(a)



ALEXANDRE CUNHA OLIVEIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)



GUTEMBERG GONÇALVES DOS SANTOS JÚNIOR, Dr., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*“Desejos a realizar, pois as asas de um coração sonhador ninguém irá roubar.”
(Hiroaki Matsuzawa)*

Agradecimentos

À Deus, que por intermédio de minha fé me fez superar desafios e acreditar que era possível.

Aos meus pais, Luiz e Adjane, que sempre acreditaram em mim e me inspiraram a continuar.

À minha esposa, Haysa, meu amor, meu suporte, que nos momentos mais difíceis foi minha luz para sair das trevas.

Aos meus irmãos, Luiziane e João, que compartilharam do meu sentimento e me fizeram sentir bem.

Aos meus orientadores, Professores José Sérgio e Jaidilson, um agradecimento carinhoso, por todos os momentos de paciência, dedicando parte do seu tempo, desde os últimos anos, para compartilhar comigo seus valiosos conhecimentos, não apenas na área acadêmica, mas também dando conselhos e ensinando valores humanos.

Aos membros da banca, Professores Jes de Jesus, Carlos Trabuco, Gutemberg e Alexandre, por aceitarem avaliar este trabalho, de forma a compartilhar os seus valiosos conhecimentos e acrescentar mais valor a esta pesquisa.

Aos meus amigos, Hélder, João, José Maurício, Leonardo e Marcus, pelos momentos de descontração que me ajudaram a descansar e seguir em frente.

A Simões, meu amigo, braço direito na construção dos equipamentos, sem ele não teria sido possível seguir em frente.

À COPELE, em especial Ângela e Pedro, pela disponibilidade e ajuda prestada, sem eles não seria possível concluir este trabalho.

À CAPES pelo fomento durante o período de pesquisa.

Aos meus queridos, Apolo, Atena, Aslam, Bruce, Nala e Sherlock, que me propiciaram momentos de alegria e paz, renovando valores da vida.

A todos vocês, muito obrigado!

Resumo

Diante de um problema persistente na indústria, que é a presença da incrustação nas tubulações metálicas usadas para transporte de fluidos, é necessário prever com antecedência a ocorrência dessa incrustação para evitar gastos desnecessários com a condução do fluido e até rompimento da tubulação. Porém, muitas técnicas desenvolvidas para determinar a ocorrência da incrustação são invasivas, se fazendo necessário interromper o processo produtivo para inspecionar internamente a tubulação. Outras, não invasivas, requerem um conjunto de parâmetros da tubulação que muitas vezes não são acessíveis, dificultando o uso da técnica. Com esse foco, nessa tese é apresentada uma nova técnica não invasiva na detecção de incrustação utilizando análise de vibrações mecânicas e acústicas por meio do teste vibracional mecânico baseado na detecção aos pares, permitindo identificar a presença da incrustação sem a necessidade de assinatura do tubo, e correlacionando essa vibração mecânica com o sinal sonoro emitido pela tubulação excitada pelo teste acústico, ambos os testes decorrentes do uso do impacto do martelo. É possível monitorar as ondas vibracionais e, seguido de uma análise simultânea de correlação dos dados mecânicas e sonoros, determinar a presença da incrustação sem assinatura da tubulação e evitando falsos positivos. Para validar a técnica proposta, foi construído um sistema de detecção de incrustação baseado na técnica proposta e testes foram realizados em aplicações com plantas industriais de transporte de fluido que simulam reais instalações industriais.

Palavras-chave: impacto do martelo, análise de vibrações, detecção de incrustação, rede de sensores, correlação de sinais.

Abstract

Faced with a persistent problem in the industry, which is the presence of fouling in the metallic pipes used for fluid transport, it is necessary to predict in advance the occurrence of this incrustation to avoid unnecessary expenses with the fluid flux and until rupture of the pipe. However, many techniques developed to determine the occurrence of scale are invasive, making it necessary to interrupt the production process to inspect the piping internally. Others, non-invasive, require a set of pipe parameters that are often not accessible, making it difficult to use the technique. With this focus, this thesis presents a new noninvasive technique in the detection of fouling using mechanical and acoustic vibration analysis through the mechanical vibration test based on the detection in pairs, allowing to identify the presence of the fouling without the need of pipe signature, and correlating this mechanical vibration with the sound signal emitted by the pipe excited by the acoustic test, both tests resulting from the use of hammer impact. It is possible to monitor the vibrational waves and followed by a simultaneous analysis of the correlation of the mechanical and sound data, determine the presence of unsaturated fouling of the pipe and avoiding false positives. To validate the proposed technique, a fouling detection system was built based on the proposed technique and tests were performed on applications with industrial fluid transport plants that simulate actual industrial installations.

Keywords: hammer impact, vibration analysis, fouling detection, sensor network, signal correlation,

Sumário

Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo geral	2
1.2.1 Objetivos Específicos	2
1.3 Metodologia	3
1.4 Contribuições	3
1.5 Sinopse dos capítulos	4
Capítulo 2 – Processo de Incrustação	5
2.1 Características do Processo de Incrustação	5
2.2 Técnicas de Detecção	8
2.2.1 Cupom de Perda de Massa	8
2.2.2 Sensor de Resistividade Elétrica	9
2.2.3 Ultrassom	9
2.2.4 Análise de Vibrações	9
2.3 Incrustação Absoluta e Relativa	10
Capítulo 3 – Teste de Impacto do Martelo	11
3.1 Vibrações	11
3.2 Correlação dos Dados	13
3.2.1 Análise de Correlação	14
3.2.2 Diagrama de dispersão	14
3.2.3 Covariância e Coeficiente de Correlação de Pearson	14
3.3 Teste do Martelo	17
3.3.1 Princípio de operação	18
3.3.2 Força de impacto	19
3.3.3 Testes com o acelerômetro	26
3.3.4 Testes com o microfone	27
Capítulo 4 – Plataformas e Definição de Testes	28
4.1 Princípio de Funcionamento do Sistema de Detecção	29
4.2 Sistema Implementado	31

4.2.1	Sistema de Excitação	31
4.2.2	Sistema de Monitoramento	32
4.3	Tubulações Usadas nos Testes	34
Capítulo 5	– Experimentos Realizados e Análise dos Resultados	39
5.1	Caracterização dos Testes Iniciais	39
5.2	Dados do Sistema de Aquisição	44
5.3	Detecção de Incrustação	49
5.3.1	Detecção por Vibrações Mecânicas	49
5.3.2	Detecção Acústica	60
5.4	Correlação dos Resultados	63
5.5	Detecção vibracional mecânica e acústica	70
5.5.1	Procedimento de Detecção	71
5.5.2	Testes realizados no LIEC	72
5.5.3	Testes realizados no LAMP–UFRN	77
Capítulo 6	– Conclusão	85
6.1	Trabalhos Futuros e Produção Científica	86
Referências	.....	88
Apêndice A	.....	92
Força de Impacto	.....	92
Força Magnética	.....	93
Força elástica e força resultante	.....	98

Lista de Figuras

Figura 2.1: Foto ilustrativa das paredes internas de uma tubulação de petróleo.	7
Figura 3.1: Representação de uma vibração na estrutura de um corpo qualquer sob excitação de impacto.....	11
Figura 3.2: Representação de uma vibração na estrutura de uma tubulação.	12
Figura 3.3: Estrutura do martelo eletromagnético com aplicação da força magnética.....	19
Figura 3.4: Força de impacto e corrente de entrada constante em determinados instantes de tempo.	21
Figura 3.5: Força de impacto com corrente de entrada de 200 mA de amplitude no tempo....	21
Figura 3.6: Força de impacto com corrente de entrada de 500 mA de amplitude no tempo....	22
Figura 3.7: Força de impacto com corrente de entrada pulsada de 3,9 A de amplitude no tempo	22
Figura 3.8: Medição da força de impacto.	23
Figura 3.9: Força de impacto em função da corrente de entrada para $\mu_R = 800$	24
Figura 3.10: Força de impacto em função da corrente de entrada para diferentes valores de μ_R : 800, 5000, 7000 e 10000.....	25
Figura 3.11: Representação do sinal de saída do acelerômetro.	26
Figura 3.12: Representação do sinal de saída do microfone no domínio do tempo. Fonte: Silva [2].....	27
Figura 4.1: Diagrama esquemático da representação da plataforma de testes.	28
Figura 4.2: Representação da plataforma de testes.....	29
Figura 4.3: Representação da plataforma de testes atualizada: Foto Ilustrativa da estrutura...	29
Figura 4.4: Foto do martelo magnético.	31
Figura 4.5: Diagrama elétrico do nó-sensor (acelerômetro).....	33
Figura 4.6: Diagrama elétrico do nó-sensor (microfone).	34
Figura 4.7: Foto Ilustrativa das tubulações externas: (a) Ferro galvanizado com suportes; (b) Ferro galvanizado apoiada no piso.	35
Figura 4.8: Foto Ilustrativa das tubulações da planta do LIEC: (a) Sistema de detecção montado sobre a estrutura; (b) Estrutura parcialmente desmontada para troca de tubos.....	36
Figura 4.9: Vista da área experimental do LAMP.....	37
Figura 4.10: Foto Ilustrativa das tubulações do LAMP: aço carbono suspensas.	38

Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema de medição utilizando análise de vibrações e transmissão via rede sem fio ZigBee.	44
Figura 5.2: Diagrama de blocos da representação do nó-sensor.	44
Figura 5.3: Estrutura do sistema de aquisição de dados.	45
Figura 5.4: Representação de amplitudes vibracionais para incrustação relativa.	46
Figura 5.5: Disposição dos nós-sensores equidistantes da origem dos golpes para medição aos pares.	47
Figura 5.6: Representação da amplitude vibracional para acelerômetros dispostos aos pares, equidistantes do ponto de impacto do martelo.	48
Figura 5.7: Diagrama esquemático da representação dos suportes da tubulação de teste.	49
Figura 5.8: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e suporte duplo central: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.	50
Figura 5.9: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e suporte nas extremidades: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.	52
Figura 5.10: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e sem suporte: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.	52
Figura 5.11: Comportamento vibracional baseado na disposição de suporte do tubo.	54
Figura 5.12: Comportamento uniforme nas medições da tubulação com dois suportes centrais: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.	55
Figura 5.13: Disposição dos acelerômetros aos pares nas tubulações externas.	56
Figura 5.14: Medição aos pares para tubulação sem suporte com os nós posicionados a 60 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 30 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 30 cm.	57
Figura 5.15: Medição aos pares para tubulação sem suporte com os nós posicionados a 100 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 50 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 50 cm.	57

Figura 5.16: Medição aos pares para tubulação com suporte triplo com os nós posicionados a 60 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 30 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 30 cm.	58
Figura 5.17: Medição aos pares para tubulação com suporte triplo com os nós posicionados a 100 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 50 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 50 cm.	58
Figura 5.18: Medição aos pares para tubulação com suporte triplo com os nós posicionados a 60 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 30 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 30 cm e detectada a presença de incrustação.	59
Figura 5.19: Sinais adquiridos do microfone (azul) e acelerômetro (roxo). (a) 800 mV de amplitude e 33 ms de tempo de decaimento para a camada de 0 mm de resina; (b) 700 mV de amplitude e 28 ms de tempo de decaimento para 5 mm de resina; (c) 600 mV de amplitude e 23 ms de tempo de decaimento para 10 mm de resina....	60
Figura 5.20: Detecção de incrustação acústica com ruído.....	61
Figura 5.21: Detecção de incrustação acústica filtrada.	62
Figura 5.22: Tempo de decaimento do sinal sonoro para níveis de incrustação: (a) 33 ms para 0 mm de resina; (b) 28 ms para 5 mm de resina; (c) 23 ms para 10 mm de resina.	62
Figura 5.23: Gráfico de dispersão de amplitude de deslocamento e tempo de decaimento para n=20.	65
Figura 5.24: Gráfico de dispersão de amplitude de deslocamento e tempo de decaimento para n=3.	67
Figura 5.25: Fluxograma do procedimento de detecção de incrustação.....	70
Figura 5.26: Detecção vibracional numa tubulação limpa no LIEC: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 25 cm; (b) Comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 25 cm.	73
Figura 5.27: Detecção vibracional numa tubulação limpa na qual ocorre falso positivo realizado no LIEC: (a) nó 1 após um obstáculo (junção da tubulação) posicionado entre ele e o martelo; (b) nó 2 posicionado num caminho livre entre ele e o martelo.	74
Figura 5.28: Detecção acústica para falso positivo: (a) nó 1 após um obstáculo (junção da tubulação) posicionado entre ele e o martelo; (b) nó 2 posicionado num caminho livre entre ele e o martelo.	75

Figura 5.29: Detecção vibracional para uma tubulação fortemente incrustada: (a) Nó 1 posicionado na região com menor camada de material incrustante; (b) Nó 2 posicionado equidistante ao martelo, na região de maior concentração de incrustação.	76
Figura 5.30: Detecção acústica para uma tubulação fortemente incrustada: (a) Nó 1 posicionado na região com menor camada de material incrustante; (b) Nó 2 posicionado equidistante ao martelo, na região de maior concentração de incrustação.	77
Figura 5.31: Detecção vibracional de tubulação de abastecimento no LAMP: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) Comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.	79
Figura 5.32: Detecção vibracional na tubulação central com disposição livre: (a) comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.	80
Figura 5.33: Detecção vibracional na tubulação central com um dos nós-sensores posicionado sobre uma curva: (a) comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.	80
Figura 5.34: Detecção vibracional na tubulação central com nós-sensores posicionados em junções: (a) comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.	81
Figura 5.35: Detecção vibracional na tubulação central com um nó-sensor livre e outro posicionado na junção: (a) Nó 1 disposto com caminho livre até o martelo; (b) Nó 2 posicionado sobre uma junção da tubulação.	81
Figura 5.36: Detecção vibracional na tubulação de resíduos: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.	82
Figura 5.37: Detecção vibracional na tubulação de resíduos: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 30 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 30 cm.	83
Figura 5.38: Detecção acústica na tubulação de resíduos: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 30 cm; (b) Comportamento do nó 1 posicionado a direita do martelo, distando 30 cm.	84

Figura A.1: Solenoide de partida para automóveis.....	92
Figura.A.2: Disposição do martelo magnético.	93
Figura A.3: Campo magnético no interior de um solenoide ao longo.....	94
Figura A.4: Força magnética num núcleo móvel de um solenoide.	95
Figura A.5: Funcionamento do núcleo móvel do martelo magnético acoplado a mola de retorno.....	98
Figura A.6: Diagrama de Corpo Livre para forças atuantes sobre o núcleo móvel:	99

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Valores para distribuição t de Student.....	17
Tabela 3.2: Permeabilidade magnética relativa de materiais ferromagnéticos	24
Tabela 4.1: Valores de amplitude do sinal adquirido V_a e da força F_a aplicada pelo martelo.	30
Tabela 5.1: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V com passo de 3 cm.....	39
Tabela 5.2: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V com passo de 5 cm.....	41
Tabela 5.3: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 3 cm.....	41
Tabela 5.4: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 5 cm.....	43
Tabela 5.5: Valores obtidos para medições com acelerômetro e microfone.	63
Tabela 5.6: Valores para distribuição t de Student (tabela reduzida $1 \leq n \leq 2$ e $17 \leq n \leq 19$).	66
Tabela 5.7: Valores obtidos para medições com acelerômetro e microfone.	67
Tabela 5.8: Valores para distribuição t de Student (tabela reduzida $1 \leq n \leq 5$).	69

Capítulo 1 – Introdução

A incrustação é um problema comum nas indústrias que trabalham com transporte de fluido, sejam elas farmacêuticas, alimentícias, petrolíferas, ou até no simples transporte de água. Pela deposição de componentes que formam o fluido transportado, camadas incrustantes vão se formando ao longo da tubulação, o que leva a uma redução do diâmetro dos tubos, dificultando o fluxo fluídico, podendo levar até a obstrução total [1].

É de interesse determinar a formação da incrustação antes que ocorra obstrução total da tubulação, a fim de evitar perdas produtivas ou até desastres ecológicos como rompimento da tubulação. Porém, a maioria das técnicas desenvolvidas são invasivas e acarretam na interrupção do transporte do fluido, o que não é de interesse das indústrias, pois interrompe a produção. Assim, se faz necessário o desenvolvimento de técnicas não invasivas para determinar a presença da incrustação, e saber o quão comprometida a estrutura condutora se encontra [19].

Baseando-se na técnica do impacto do martelo desenvolvida por Silva [2], que utiliza da análise de vibrações, é possível determinar a ocorrência da incrustação, observando o comportamento da estrutura golpeada e analisando os parâmetros de amplitude vibracional mecânica do tubo e som emitido pelo impacto, sem a necessidade de testes prévios numa tubulação limpa como realizados por Silva[2]. Deste modo, utilizando a técnica proposta, detecta-se a incrustação numa tubulação metálica condutora de fluido independente de sua arquitetura, apenas ajustando a intensidade do golpe.

1.1 Motivação

Por ser um problema recorrente das indústrias, detectar incrustação sem interromper o processo produtivo é um desafio para academia e para engenharia embora existam algumas técnicas que detectem a ocorrência de material incrustante, elas não são rápidas e precisas na detecção da incrustação, e por isso, diariamente são colocadas substâncias anti-incrustantes nas tubulações, sem detectar se existe ou não a presença do material incrustando nas mesmas. A utilização dessas substâncias ou de equipamentos para fazer a limpeza e inspeção interna das tubulações, acarreta gastos diários e a paralisação do processo de transporte do fluido, o que também provoca perdas financeiras [4, 20, 23].

Optando-se pela análise de vibrações devido a sua versatilidade no uso em outras áreas da engenharia como: civil, na detecção de rachaduras em estruturas, ou mecânica na verificação de falhas em motores, é possível desenvolver uma técnica não invasiva, que não interrompa o processo produtivo, ao passo que é capaz de detectar incrustação com eficiência.

A técnica não invasiva de análise de vibrações utilizando a detecção aos pares permite a detecção de incrustação em tubulações metálicas sem interromper o processo de transporte de fluidos e sem a necessidade da assinatura do tubo, observando a variação das grandezas monitoradas (vibração e som), decorrente da variação controlada da força de impacto.

Para tanto, é preciso desenvolver um sistema de excitação para força de impacto capaz de gerar sinais mensuráveis. A técnica do impacto do martelo é a mais indicada para este tipo de excitação visto que pode gerar dois tipos de sinais de saída a serem monitorados: sonoros e vibracionais, permitindo uma análise conjunta dos sinais gerados (vibração mecânica e som).

Associada a obtenção de dados simultâneos pela detecção aos pares, realiza-se um tratamento conjunto e correlato dos sinais vibracionais mecânicos e sonoros, compondo uma análise completa da tubulação em função dos valores obtidos na saída.

1.2 Objetivo geral

Desenvolver uma técnica não invasiva que possibilite detectar a incrustação, e que seja capaz de determinar sua presença na tubulação sem a necessidade de uma assinatura do tubo, ou seja, um conjunto de testes prévios que determinem a característica da tubulação.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Desenvolver uma técnica de medição baseada na análise de vibrações, que consiste em observar o comportamento da estrutura golpeada pelo impacto do martelo;
- Verificar as alterações no comportamento das vibrações:
 - Mecânicas, pelo uso do acelerômetro;
 - Acústicas, pelo uso do microfone.
- Determinar uma correlação entre a detecção acústica e vibracional para garantir a detecção de incrustação, se houver variação conjunta das grandezas.

1.3 Metodologia

Foi feita uma revisão bibliográfica sobre as técnicas já existentes na detecção de incrustação, escolhendo-se análise de vibrações, devido a sua característica não invasiva, e por permitir tratar duas grandezas distintas (vibração mecânica e sonora) usando um único princípio: a correlação de vibrações mecânicas e sonoras decorrentes do impacto do martelo. A técnica permite avaliar dois parâmetros simultâneos (amplitude do sinal vibracional mecânico e tempo de decaimento do sinal sonoro) para detecção da incrustação (uma vez que sua composição pode modificar os sinais monitorados) e a análise de apenas um parâmetro pode ser insuficiente para a detecção do material incrustante. Seguido por testes controlados (laboratório), depois de testes em aplicações de campo, baseando-se no comportamento vibracional da estrutura golpeada e no conceito de incrustação relativa de Lemos [6], foi possível analisar o sinal sonoro (medições utilizando microfone) e mecânico (medições com acelerômetro), verificando um alto grau de correlação entre ambos, permitindo indicar a ocorrência da incrustação, se e somente se, variarem conjuntamente.

1.4 Contribuições

A contribuição desta tese foi o desenvolvimento de uma técnica não invasiva capaz de detectar incrustação sem a necessidade de interromper o processo produtivo, e implementá-la num sistema de detecção utilizado em testes de situações reais. O fato de não precisar da assinatura do tubo é um ponto positivo, pois permite que a técnica seja utilizada numa tubulação metálica sem a necessidade de ensaios prévios ou conhecimento das características de uma tubulação limpa. Com os resultados obtidos nos testes, foi comprovado que é possível determinar incrustação de forma não invasiva.

Usando da definição de incrustação relativa apresentada por Lemos [6], é possível atribuir um novo significado para o termo, e aplicá-lo de maneira adequada na padronização da detecção vibracional, tornando-se a base para a técnica de detecção aos pares, o que dispensa a necessidade de assinatura do tubo.

1.5 Sinopse dos capítulos

O texto desta tese está organizado da seguinte maneira:

Neste capítulo, foi realizada uma introdução do trabalho, sendo apresentados a motivação, os objetivos e as contribuições.

No capítulo 2, está apresentada uma revisão bibliográfica, apontando características gerais sobre o processo de incrustação, origem do processo, problemas causados, fatores que contribuem para o seu surgimento, algumas técnicas utilizadas na detecção de incrustação e conceito de incrustação relativa.

No capítulo 3, está apresentada a fundamentação teórica sobre a vibração e as propriedades utilizadas para desenvolvimento da técnica, a distribuição t de Student e o uso da correlação de grandezas, o princípio do teste de impacto do martelo e dos testes com acelerômetro e microfone.

No capítulo 4, estão apresentadas as plataformas de testes e o sistema implementado para detecção de incrustação.

No capítulo 5, estão apresentados os experimentos realizados para validação da técnica proposta em testes realizados, utilizando os sistemas de detecção desenvolvidos com a técnica proposta implementada e a análise dos resultados obtidos.

As conclusões gerais em relação ao trabalho realizado e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

Capítulo 2 – Processo de Incrustação

Quando substâncias são transportadas em tubulações metálicas, materiais indesejados são acumulados em suas paredes internas com o passar do tempo. Esses acúmulos são conhecidos como incrustação [13].

A fim de prever os problemas provocados pela incrustação em processos industriais se faz necessário primeiro entender como ocorre e quais as causas do processo de incrustação. Para isto é preciso examinar cuidadosamente todos os dados e condições operacionais nos processos industriais para determinar quais variáveis são relevantes no processo. O objetivo do estudo prévio das características da tubulação é minimizar a limpeza total do tubo para reduzir a frequência de parada das plantas e reduzir o custo, já que se fazem modificações mínimas nos processos [34].

Como as incrustações são formadas, predominantemente, devido à separação da parte condensada de um fluido (gás ou líquido), seus mecanismos são totalmente diferentes e muitas vezes únicos. Geralmente, os problemas de incrustação são consequência das alterações que a incrustação causa no interior das tubulações metálicas, obstruindo a passagem do fluido. Um ou mais dos efeitos ou mecanismos podem ser responsáveis pela incrustação nos processos industriais [24].

A dificuldade de modelar a incrustação se dá pelo fato deste processo não ocorrer de forma uniforme, ou seja, seu surgimento pode ocorrer em diferentes pontos da tubulação.

2.1 Características do Processo de Incrustação

Dentre os fatores que originam a incrustação, pode-se destacar [21, 25]:

- Sedimentação: processo provocado pela ação da gravidade sobre as partículas suspensas no meio líquido.
- Cristalização: neste processo, os hidrocarbonetos de origem parafínica quando resfriados tendem a depositar cristais no interior da tubulação. Este processo também é conhecido como solidificação.
- Reações Químicas: processo que leva à incrustação decorrente da corrosão de outras partes da tubulação.

- Crescimento biológico: processo decorrente do crescimento de microrganismos (fungos, bactérias ou algas) na superfície interna da tubulação. Esses organismos tomam a superfície das paredes internas como fonte de nutrientes.

Dados inadequados e a falta de informação sobre o mecanismo de incrustação têm inibido o desenvolvimento de passos preventivos que precisam ser levados em conta na fase do projeto dos sistemas com fluxo de fluido. Três fatores podem ser considerados para a redução ou prevenção da incrustação [13]:

- A resistência de fluxo devido a incrustação é um valor que varia com o tempo;
- A capacidade para caracterizar as condições do início do processo de incrustação;
- A monitoração do sistema baseado nas variáveis e mecanismos do processo de incrustação.

Compostos orgânicos denominados pesados, tais como: cera, resina, asfaltene, diamandóide e compostos organometálicos, podem existir num determinado tipo de óleo em quantidades e formas distintas. Tais compostos podem ainda se precipitar na mistura devido a várias forças que causam bloqueio no reservatório de óleo, no poço, no oleoduto, na produção e nas instalações de processamento [16].

Partículas sólidas suspensas no óleo podem aderir às paredes dos canais e reservatórios. Compostos orgânicos pesados e a deposição de sólidos durante a produção de óleo, transporte e processamento são um problema sério em muitas áreas. A precipitação de materiais orgânicos pesados percorre desde o poço até a linha de produção, bombas, filtros e outros equipamentos de ajustes causando a formação de incrustação em todas as etapas do processo [24].

Os materiais de deposição propensos à incrustação podem ser controlados usando várias técnicas de tratamento químico e mecânico, tais como [13]:

- Mudanças no fluxo do fluido transportado;
- Eliminação de materiais incompatíveis com o fluxo;
- Variação da queda de pressão na instalação;
- Minimização da mistura de fluxos incompatíveis durante processos de transferência.

Em alguns casos, o processo de incrustação ocorre junto com o de corrosão, como ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Foto ilustrativa das paredes internas de uma tubulação de petróleo.



Fonte: Silva [2]

No caso específico do petróleo, os principais fatores são [21, 25]:

- Efeito da solubilidade: por apresentar uma mistura de vários componentes dispersos, o petróleo se torna estável se houver um equilíbrio de solubilidade entre todos os componentes. Do contrário, ocorre precipitação de um ou mais componentes desequilibrados.
- Agregação ou floculação: moléculas de asfaltene, presentes na composição do fluido, podem agregar-se as paredes internas uma vez que ocorra uma diminuição na polaridade no meio do óleo.
- Efeito coloidal: efeito decorrente da combinação de asfaltenos floculados com resinas presentes no petróleo.

Por ser a incrustação um dos principais desafios da indústria petrolífera, a produção, transporte e processamento do petróleo e outros compostos pesados contendo hidrocarbonetos, são afetados significativamente pela incrustação, com sérias consequências econômicas.

Visto que a limpeza dos tubos é realizada com o objetivo de remover as incrustações acumuladas nas paredes internas da tubulação, o uso de agentes químicos levaria muito tempo, gerando um gasto ainda maior com a manutenção. Por isso, é necessária uma detecção rápida da incrustação para evitar a ocorrência de problemas maiores, e que as manutenções sejam preventivas e corretivas, já que se sabe a localização da incrustação [9].

2.2 Técnicas de Detecção

Visando contornar os problemas causados pela incrustação, técnicas de detecção foram desenvolvidas. Elas são classificadas em invasivas e não invasivas. As técnicas invasivas são aquelas baseadas na interrupção do processo de transporte do fluido para medir os parâmetros da estrutura internamente, enquanto as não invasivas consistem na medição externa à tubulação analisada. Dentre elas pode-se destacar: o cupom de perda de massa e o sensor de resistividade elétrica como técnicas invasivas, e as que utilizam ultrassom e análise de vibrações como técnicas não invasivas. Utilizando análise vibracional, destaca-se o teste de impacto do martelo desenvolvido por Silva [2], o qual gera vibrações de ondas sonoras e mecânicas na tubulação para análise conjunta de duas grandezas distintas [2,6].

2.2.1 Cupom de Perda de Massa

Baseado no princípio da ocorrência da incrustação ser decorrente da corrosão interna da tubulação, o cupom de perda de massa é uma placa feita do mesmo material que o da tubulação, na qual a placa é instalada dentro do tubo, e após um período de aproximadamente três meses, é retirada, tratada e pesada. Como é feita do mesmo material da fabricação da tubulação, e esteve sob as mesmas condições, a placa apresenta as mesmas deteriorações que a tubulação. A diferença de massa obtida na pesagem da placa, após o tratamento químico para eliminação dos óxidos formados na sua superfície, permite estimar uma taxa de corrosão ligada à tubulação. Assim, considera-se que a taxa de corrosão do cupom é a mesma sofrida pelo duto, e o seu uso permite inferir na detecção de incrustação na tubulação ao avaliar a variação de sua massa num determinado período de tempo [11]. O grau de corrosão existente depende do tipo de dutos envolvidos, de modo que se deve usar o cupom no mesmo estado em que se encontra a tubulação, ou seja, utilizar um cupom novo numa tubulação antiga indicaria uma medida errônea do grau de corrosão, pois a tubulação já estaria previamente desgastada. Esta técnica torna-se imprecisa ao ser utilizada em tubulações em que a incrustação não decorrer da corrosão das paredes internas da tubulação.

2.2.2 Sensor de Resistividade Elétrica

O sensor de resistividade elétrica possui um valor de resistência padrão conhecido. Assim, quando implantado dentro da tubulação e submetido às mesmas ações químicas que o interior do tubo, o sensor apresenta um valor de resistência diferente do padrão, indicando a presença de corrosão, já que a resistência do material oxidado será diferente da original nas mesmas condições normais [2]. Similar ao cupom de perda de massa, o sensor de resistividade elétrica tem seu funcionamento baseado na presença da incrustação ser decorrente da corrosão interna da tubulação. Assim, estas duas técnicas são mais indicadas para avaliar o desgaste da estrutura interna da tubulação que a ocorrência da incrustação em si.

2.2.3 Ultrassom

As ondas guiadas ultrassônicas podem se propagar por longas distâncias em tubos, apresentando uma alta sensibilidade para detecção de descontinuidades internas. A detecção de incrustação será indicada pela variação da amplitude do sinal ultrassônico, ou ainda pela alteração na velocidade da onda guiada [12, 35, 36]. Todos os parâmetros que apresentam alterações são comparados com os valores de referência obtidos previamente para uma tubulação limpa. Esses valores padrões são chamados de característica ou assinatura do tubo. Quando o valor de um parâmetro difere da assinatura do tubo, então há uma descontinuidade (incrustação ou corrosão) na tubulação.

2.2.4 Análise de Vibrações

Essa técnica consiste em analisar as alterações nas ondas vibracionais, mecânicas captadas pelo acelerômetro e sonoras captadas pelo microfone, para uma tubulação excitada pelo golpe do impacto do martelo. Quando estes valores diferem dos valores padrões previamente medidos para uma tubulação limpa ou, para o nosso caso de estudo, apresentam comportamento distinto da referência adotada, constata-se a presença de incrustação [11].

Para tal, é preciso compreender o conceito de incrustação relativa trazido por Lemos [6], que servirá como base para o teste vibracional mecânico utilizando um par de acelerômetros.

2.3 Incrustação Absoluta e Relativa

Em 2011, Lemos [6] apresentou um conceito sobre incrustação, uma abordagem relativizada sobre o termo, o que possibilita um tratamento diferenciado para o problema: conceitos de incrustação absoluta e incrustação relativa.

“Para a incrustação absoluta é preciso obter a assinatura do tubo. Essa característica consiste em garantir alto grau de confiabilidade do sistema de medição, tratando-se de obter o nível de tensão da onda vibracional sem incrustação. Assim, esses testes devem ser realizados visando o alcance das vibrações e seus valores de amplitude para que não seja erroneamente confundida uma atenuação no valor da amplitude do sinal medido pela presença da incrustação com uma diminuição na amplitude do sinal medido oriunda da longa distância da fonte geradora de impulsos e o sistema de medição. Já para a incrustação relativa, não precisamos da assinatura do tubo, pois é baseada na medição simultânea em múltiplos pontos distintos na tubulação. Assim, os valores de amplitudes obtidos simultaneamente são comparados e observados se há atenuação entre eles, ou seja, um sinal será atenuado em relação ao outro, o que implicaria na presença de incrustação.”

Porém, há um equívoco a ser corrigido no próprio conceito apresentado: nas medições relativas os pontos têm de estar submetidos à mesma distância do impacto, do contrário, pode-se obter falsos positivos, pois não se saberá se as atenuações nos parâmetros são decorrentes da incrustação ou da distância da origem da onda.

Partindo desse princípio, é possível determinar a incrustação pela medição simultânea de pontos equidistantes para vibração mecânica e comparar os sinais adquiridos pelo acelerômetro com os sinais do microfone, e, se forem correlatos, a incrustação é detectada.

Para compreender melhor a análise de vibrações, se faz preciso entender as características vibracionais das estruturas. No capítulo 3, é apresentada a fundamentação teórica sobre a vibração e as propriedades utilizadas para desenvolvimento da técnica, a distribuição t de Student e o uso da correlação de grandezas, o princípio do teste de impacto do martelo e dos testes com acelerômetro e microfone.

Capítulo 3 – Teste de Impacto do Martelo

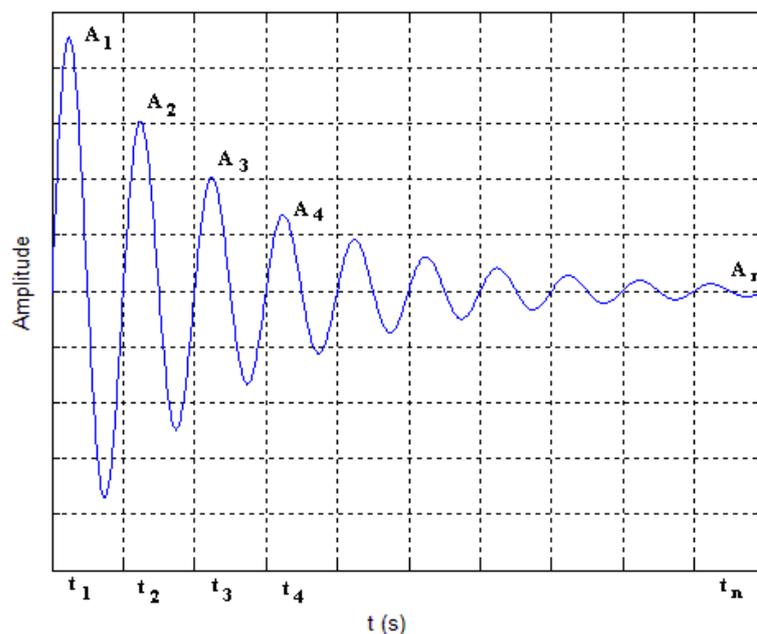
Para medir os parâmetros de uma estrutura é necessário utilizar ferramentas experimentais para facilitar o controle e a repetibilidade das medidas de vibrações. Usualmente isto é feito com o uso do impacto do martelo [4]. A técnica do teste de impacto do martelo é utilizada por sua característica de gerar vibrações, pois ao golpear a tubulação, esta vibra gerando ondas (mecânicas e sonoras) a serem analisadas.

3.1 Vibrações

Alguns corpos submetidos a excitações tendem a vibrar durante um período de tempo em função da excitação inicial, caracterizando um movimento harmônico. Quanto maior for o impulso para o início do movimento, maior será o tempo de duração das oscilações periódicas (vibrações) [4].

Essas vibrações continuarão até que toda energia fornecida inicialmente ao sistema para sua movimentação seja dissipada, o que acarreta um comportamento vibracional periódico na estrutura do corpo, porém de amplitudes suavemente amortecidas [5]. Esse comportamento pode ser observado pelo gráfico da Figura 3.1.

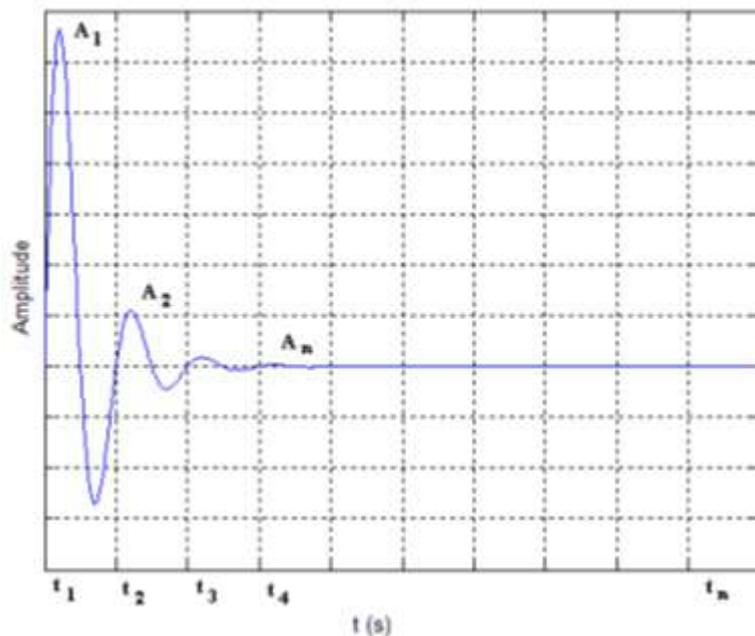
Figura 3.1: Representação de uma vibração na estrutura de um corpo qualquer sob excitação de impacto.



Fonte: Silva [2]

Observa-se que a amplitude da onda diminui ao longo do tempo, e além de um tempo t_n , a amplitude do sinal é aproximadamente nula. Este período de amortecimento não é interessante, pois pode ser demasiado longo, o que não serviria a um sistema de sucessivas medições e resposta rápida. Todavia, considerando o peso do corpo, sua estrutura interna e a maneira como a energia é dispersa, pode-se estimar o comportamento da tubulação a ser estudada como uma senoide amortecida de atenuação rápida, de modo que a primeira amplitude, o impulso de excitação, seria a oscilação destacada [22]. Tal comportamento pode ser observado pelo gráfico da Figura 3.2.

Figura 3.2: Representação de uma vibração na estrutura de uma tubulação.



Fonte: Silva[2]

Nota-se que $A_1 \gg A_2$, de forma tal que as amplitudes seguintes não influenciarão na medição do sistema, devido aos seus valores muito pequenos, desprezíveis para o sistema de medição. Além disso, A_n possui um tempo de decaimento muito pequeno em relação a estrutura que vibra naturalmente, o que indica um sistema com resposta rápida, pois não é necessário esperar um longo período até que o sistema estabilize. Tal comportamento das ondas vibracionais pode ser explicado devido as características referentes a tubulação como massa, distribuição do suporte, presença de obstáculos como sensores e válvulas, incrustação, ou seja, qualquer parâmetro que interfira na propagação das ondas, exigindo uma maior quantidade de energia fornecida pelo impacto inicial para que a vibração do tubo tenha

comportamento semelhante à vibração natural de uma tubulação livre. Como A_I é o valor de amplitude de destaque nas oscilações do corpo, o conjunto destes impulsos caracteriza um valor médio das amplitudes máximas para a tubulação limpa (o que seria a assinatura do tubo), de forma tal que se houver atenuação significativa neste valor, isto indicaria a presença de incrustação naquele ponto.

As técnicas que utilizam vibrações têm sido usadas desde a década de 90 em diversas aplicações [2]. Essas técnicas apresentam alta sensibilidade na detecção de pequenas discontinuidades internas, e não requerem planos especiais de segurança como o caso de algumas técnicas que utilizam radiação como a técnica apresentada por Soares [38]. As técnicas com análise de vibrações são utilizadas, geralmente, para detectar falhas ou rachaduras em estruturas que podem ser de concreto (aplicação de engenharia civil) ou metálicas (aplicação de engenharia mecânica) [3, 16].

Analisando as vibrações sonoras e mecânicas, é possível verificar uma correlação entre elas que implique na ocorrência da incrustação, decorrente da forte variação conjunta dos parâmetros monitorados: amplitude do sinal de vibração mecânica e tempo de decaimento do sinal da vibração sonora.

3.2 Correlação dos Dados

Em probabilidade e estatística, correlação é qualquer relação dentro de uma ampla classe de relações estatísticas que envolva dependência entre duas variáveis. Embora seja comumente denotada como a medida de relação entre duas variáveis aleatórias, correlação não implica causalidade. Em alguns casos, correlação não identifica dependência entre as variáveis. Em geral, há pares de variáveis que apresentam forte dependência estatística, mas que possuem correlação nula. Para estes casos, são utilizadas outras medidas de dependência [37].

Para aumentar o grau de confiabilidade das medições, introduz-se uma análise de correlação de sinais (vibração mecânica e som). Com o monitoramento de duas grandezas distintas detectando a resposta do tubo para mesma força de impacto, analisa-se, baseado na correlação de Pearson [31, 37], o comportamento simultâneo de ambas, para garantir que a variação detectada implique na ocorrência da incrustação.

3.2.1 Análise de Correlação

Muitas vezes precisamos avaliar o grau de relacionamento entre duas ou mais variáveis. É possível descobrir com precisão, o quanto uma variável está correlacionada à outra, ou seja, se o grau de relacionamento das variações entre si é forte, fraco, direta ou inversamente proporcional. As técnicas associadas à análise de correlação representam uma ferramenta fundamental de aplicação nas ciências sociais e do comportamento, na engenharia e nas ciências naturais. A importância de se conhecerem os diferentes métodos e suas suposições de aplicação é exatamente pelo cuidado que se deve ter para não se utilizar uma técnica inadequada. Existem diversos critérios de avaliação desta relação, alguns próprios para variáveis que seguem uma distribuição normal e outros para variáveis que não seguem uma distribuição teórica conhecida [31].

É comum a utilização do coeficiente de correlação de Pearson. No entanto, existem situações em que o relacionamento entre duas variáveis não é linear, ou uma delas não é contínua ou as observações não são selecionadas aleatoriamente. Nestes casos, outras alternativas de coeficientes deverão ser aplicadas [31, 37].

3.2.2 Diagrama de dispersão

Um dos métodos mais usados para a investigação de pares de dados é a utilização de diagramas de dispersão cartesianos. Geometricamente, um diagrama de dispersão é simplesmente uma coleção de pontos num plano cujas duas coordenadas Cartesianas são os valores de cada membro do par de dados. Este é o melhor método de examinar os dados no que se refere à ocorrência de tendências lineares, mudanças de espalhamento de uma variável em relação à outra e verificar a ocorrência dos valores discrepantes [28].

3.2.3 Covariância e Coeficiente de Correlação de Pearson

Quando se estuda a relação entre duas variáveis X e Y deve-se primeiramente compreender o conceito de covariância. Se a variância é uma grandeza estatística através da qual se chega ao desvio padrão que é uma medida de dispersão, da mesma maneira a covariância é uma grandeza estatística através da qual se obtém o coeficiente de correlação

que mede o grau de associação linear entre duas variáveis aleatórias X e Y. Assim, covariância significa a forma como as duas variáveis variam de forma conjunta [29].

Apesar da covariância ser uma estatística adequada para medir relação linear entre duas variáveis, ela não é adequada para comparar graus de relação entre variáveis, dado que ela está influenciada pelas unidades de medida de cada variável, que podem ser metros, quilômetros, centímetros, etc. Para evitar a influência da ordem de grandeza e unidades de cada variável, divide-se a covariância pelo desvio padrão de X e de Y, dando origem ao coeficiente de correlação de Pearson [30]:

$$r = \frac{C(X,Y)}{S_x * S_y} \quad (3.1)$$

Em que r é coeficiente de correlação de Pearson. Sendo $C(X,Y)$ a covariância das variáveis x e y representado pela equação (3.2), e S_x e S_y os desvios padrões de x e y respectivamente dados pela Equação (3.3).

$$C(X,Y) = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) * (y_i - \bar{y})}{n} \quad (3.2)$$

$$S_x^2 = \frac{\sum D_x^2}{n} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n} \quad S_y^2 = \frac{\sum D_y^2}{n} = \frac{\sum(y_i - \bar{y})^2}{n} \quad (3.3)$$

Com \bar{x} o valor médio das variáveis apresentadas, dado por:

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} \quad (3.4)$$

Como o coeficiente de correlação é adimensional e independe da ordem de grandeza das variáveis, este toma valores entre -1 e 1 .

- Quando a relação é positiva r tomará o valor 1 quando a relação é perfeita.
- Quando a relação é negativa r tomará o valor -1 quando a relação é perfeita.
- Quando a relação é difusa ou não linear r será igual a 0 .

Ainda pode-se analisar de maneira mais detalhada o valor do coeficiente da seguinte forma [30]:

- $0,9$ para mais ou para menos indica uma correlação muito forte.
- $0,7$ a $0,9$ positivo ou negativo indica uma correlação forte.

- 0,5 a 0,7 positivo ou negativo indica uma correlação moderada.
- 0,3 a 0,5 positivo ou negativo indica uma correlação fraca.
- 0 a 0,3 positivo ou negativo indica uma correlação desprezível.

3.2.3.1 Significado do coeficiente de correlação

A distribuição t de Student é uma distribuição de probabilidade publicada por um autor que se chamou de Student, pseudônimo de William Sealy Gosset, que não podia usar seu nome verdadeiro para publicar trabalhos enquanto trabalhasse para a cervejaria Guinness [37].

A distribuição t é uma distribuição de probabilidade semelhante à curva normal padrão, porém com caudas mais largas, ou seja, uma simulação da t de Student pode gerar valores mais extremos que uma simulação da normal. O parâmetro ν que caracteriza a sua forma é o número de graus de liberdade, definido como $\nu = n - 2$, sendo n o número de amostras utilizadas. Quanto maior for o valor de ν , mais próxima da normal ela será [37]. Sua caracterização é dada por t_c representado na Equação (3.5).

Para comprovar se o coeficiente de correlação é significativo, realiza-se o seguinte teste de estatística do coeficiente de correlação, desde que este não seja nulo:

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (3.5)$$

Na Tabela 3.1, apresenta-se a distribuição t de Student. Caso o valor de t_c seja superior ao valor crítico de t na tabela, conclui-se que efetivamente existe uma relação significativa entre as variáveis [30].

A fim de ilustrar o uso da tabela de distribuição t de Student, considere, por exemplo, um conjunto de 15 amostras com valor de t_c de 1,5. Pela tabela, observa-se o valor na linha 13 ($\nu = 15 - 2$) e segue-se a direita enquanto os valores forem menores que o t_c obtido, ao achar um valor maior, volta-se a posição imediatamente anterior, e este será o valor a ser utilizado da tabela. Segue-se acima na coluna para então determinar o grau de confiança das medições correlacionadas. Neste exemplo dado, na linha 13 segue-se até o valor de 1,771, então o grau de confiança das medições corresponderá a 90%. Para o mesmo número de amostras, agora com valores de t_c de 1,0 e 3,0, obtém-se graus de confiança para as medições de 60% e 98%

respectivamente. Utilizando os mesmos valores de t_c anteriormente (1,5, 1,0 e 3,0) agora para um conjunto de 20 amostras ($\nu = 20 - 2$), obtém-se respectivamente os graus de confiança das medições correlacionadas de 80%, 60% e 99%.

Tabela 3.1: Valores para distribuição t de Student.

Bicaudal	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99,5%	99,8%	99,9%
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869
6	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	4,317	5,208	5,959
7	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	4,029	4,785	5,408
8	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	3,833	4,501	5,041
9	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	3,690	4,297	4,781
10	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,764	3,169	3,581	4,144	4,587
11	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	3,497	4,025	4,437
12	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	3,428	3,930	4,318
13	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	3,372	3,852	4,221
14	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	3,326	3,787	4,140
15	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	3,286	3,733	4,073
16	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	3,252	3,686	4,015
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883
20	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,153	3,552	3,850

Uma vez compreendido o comportamento vibracional da estrutura, e sabendo que é possível analisar a correlação entre as grandezas som e vibração, precisa-se entender o princípio de funcionamento do impacto do martelo, para observar como este permite o uso das vibrações na avaliação comportamental da estrutura.

3.3 Teste do Martelo

O comportamento do martelo é eletromecânico: aplicada uma tensão nos seus terminais, a corrente elétrica induz um campo magnético em seu interior que desloca seu núcleo metálico, golpeando a estrutura com uma força de impacto que faz a tubulação vibrar.

Durante a fase de impacto, o sistema é tratado como um acoplamento único entre o martelo e a estrutura. No fim do impacto, o martelo perde o contato com a estrutura e esta última vibra livremente de acordo com suas frequências naturais [5].

Quando o sistema é excitado pelo impacto de um martelo, esse vibra por um momento e reduz sua agitação até parar. O tempo de duração da vibração livre depende das características físicas do sistema, especificamente, do coeficiente de amortecimento [16, 17, 26].

3.3.1 Princípio de operação

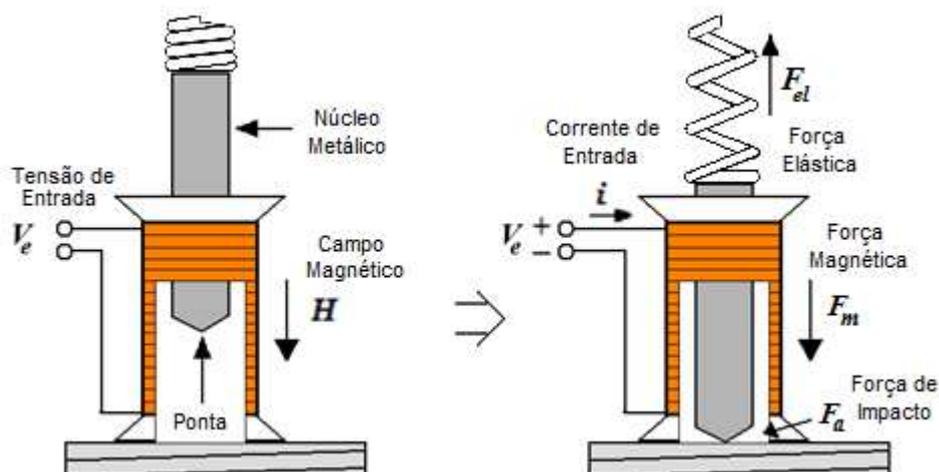
A excitação por impulso é uma técnica usada em testes convencionais com vibração para determinar o comportamento dinâmico das estruturas. O impacto de um martelo é usado para gerar a excitação por um impulso após golpear a estrutura. O impulso com uma amplitude específica A_n e com uma duração Δt_n pode vibrar a estrutura dentro de uma certa faixa de frequência. Para uma carga constante, a faixa de frequência efetiva é inversamente proporcional à duração de Δt_n . É necessário induzir um pulso com um Δt_n menor para aumentar a faixa de frequência do teste [12, 15, 19].

Em muitas situações a carga atuando sobre a estrutura é dinâmica. Como a resposta do sistema não depende apenas dos parâmetros do sistema como massa, dureza e umidade, mas também da duração do impulso e do ponto de aplicação da carga, alguns estudos têm sido desenvolvidos para investigar a influência destes parâmetros na detecção de falhas em estruturas [21].

A ocorrência de falhas em estruturas produz mudanças em suas características dinâmicas como frequências naturais, modos de forma, amortecimento modal, resposta ao impulso e funções de resposta em frequência. Um entendimento dessas modificações pode levar a detecção, localização e caracterização do tamanho da falha. O princípio fundamental é comparar o comportamento das estruturas num estado sem falhas e com falhas. O problema de detecção de falhas tem sido discutido como um problema de reconhecimento de padrões estatísticos e utiliza a análise de múltiplas assinaturas do sistema [14, 22, 24].

O funcionamento do martelo, é descrito pelo acionamento da bobina, por uma tensão de entrada V_e , e por consequência uma corrente elétrica i , fazendo com que o campo magnético mova o núcleo metálico e golpee a estrutura com uma força F_a , Essas representações podem ser observadas na Figura 3.3.

Figura 3.3: Estrutura do martelo eletromagnético com aplicação da força magnética.



Fonte: Próprio autor.

Para evitar uma construção empírica, se faz necessária uma simulação de seu comportamento. Quanto maior for o número de espiras do solenoide, maior será o valor da resistência, conseqüentemente maior será a tensão necessária para se atingir o valor de *i* desejado. Assim é possível estimar o valor da força de impacto, ou ainda ajustar a tensão de entrada em decorrência da força necessária para cada tubulação sob teste.

3.3.2 Força de impacto

A força de impacto estimada é a base do funcionamento do sistema de excitação, destacando sua utilização nos testes com acelerômetros para as vibrações, e nos testes com microfone para os sinais sonoros.

Primeiramente, determinou-se uma expressão para a intensidade da força de impacto F_a do martelo na tubulação, representada pela Equação (3.6), estimando-se o valor do golpe na estrutura [33].

$$F_a = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{2} + \left[\frac{1}{4 \cdot (r^2 + l^2)} + \frac{1}{4r^2 + l^2} \right] - k \cdot l \quad (3.6)$$

Em que:

- N é o número de espiras do solenoide;
- i é a corrente de entrada do sistema que controla a força de impacto resultante;
- X_m é a susceptibilidade magnética do núcleo;
- μ_0 é a permeabilidade magnética do ar;
- A é a área da secção transversal do núcleo magnético;
- r é o raio da base do núcleo cilíndrico ferromagnético;
- l é o comprimento do solenoide;
- k é a constante elástica da mola.

Simulou-se no MATLAB o comportamento desta durante o tempo, destacando parâmetros importantes para caracterização do funcionamento do martelo como: intensidade da corrente elétrica, permeabilidade magnética do núcleo, número de espiras e dimensões do solenoide e núcleo móvel.

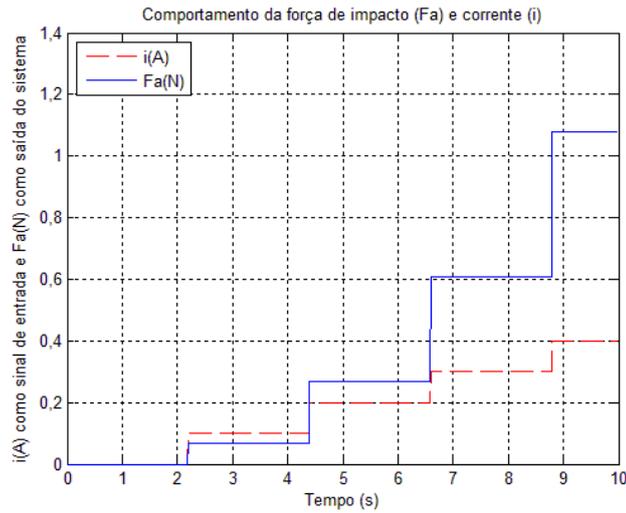
3.3.2.1 Simulação da Força de Impacto

Os resultados obtidos foram analisados mediante a variação da corrente de entrada do martelo. O comportamento da força de impacto F_a pode ser observado no tempo e em função da corrente, como também de outros fatores determinantes tais quais número de espiras do solenoide e permeabilidade magnética do núcleo. Para obtenção dos resultados simulados de F_a foram adotados os seguintes valores, os mesmos utilizados na construção do martelo magnético no Laboratório de Instrumentação, para os parâmetros de descrição do martelo na utilização da Equação (3.6):

- $k = 15 \text{ N/m}$, constante elástica da mola;
- $N = 300 \text{ espiras}$, número de espiras que compõem o solenoide;
- $L = 0,05 \text{ m}$, comprimento do solenoide;
- $r = 0,005 \text{ m}$, raio do núcleo cilíndrico móvel;
- $\mu_r = 800$, permeabilidade relativa do núcleo para ferro puro.

O sinal de F_a possui a mesma forma de onda do sinal da corrente de entrada i , de modo que se esse valor for constante, a força atuante no núcleo também será, com a devida proporção quadrática para o valor de corrente elétrica, como pode ser observado na Figura 3.4.

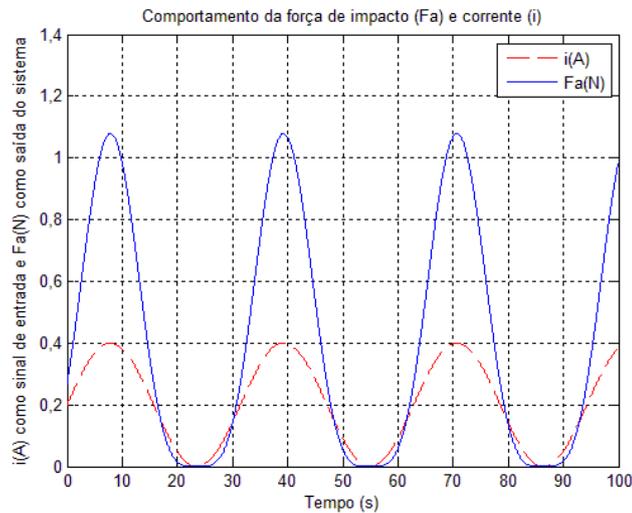
Figura 3.4: Força de impacto e corrente de entrada constante em determinados instantes de tempo.



Fonte: Próprio autor.

Porém, este comportamento da força não é interessante já que ele manterá o núcleo estático e o desejado é seu movimento para o golpe. Assim, aplica-se um novo sinal, desta vez periódico, implicando num comportamento pulsado para a força de impacto (Figura 3.5).

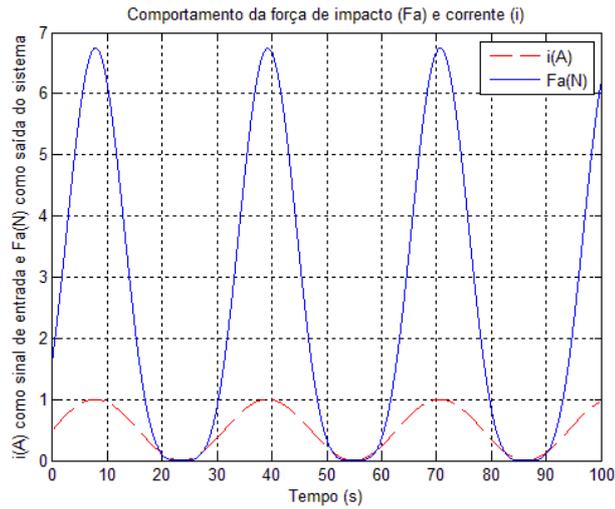
Figura 3.5: Força de impacto com corrente de entrada de 200 mA de amplitude no tempo.



Fonte: Próprio autor.

A amplitude da corrente utilizada para esta simulação foi de 200 mA, sendo 400 mA de pico a pico. Ao aumentar o valor da corrente fornecida ao martelo para 1 A pico a pico, mantendo os mesmos parâmetros, tem-se uma alteração no comportamento da força de impacto, elevando-se consideravelmente seu valor máximo como representado na Figura 3.6.

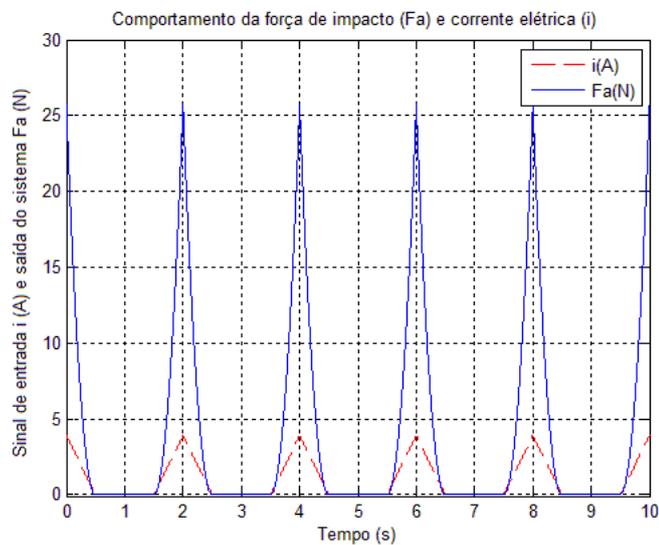
Figura 3.6: Força de impacto com corrente de entrada de 500 mA de amplitude no tempo.



Fonte: Próprio autor

Alterando o valor da corrente de entrada para 3,9 A e utilizando uma sequência de pulsos de duração mínima, adquire-se o comportamento para o sinal de saída do martelo como apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7: Força de impacto com corrente de entrada pulsada de 3,9 A de amplitude no tempo

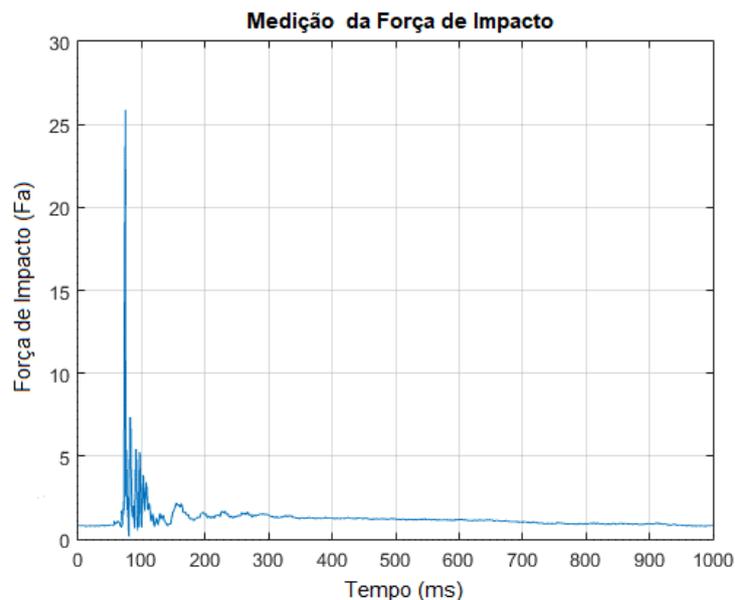


Fonte: Próprio autor.

Para confirmar os valores estimados, a força de impacto do martelo construído foi medida no Laboratório de Vibração e Instrumentação (LVI) no Departamento de Engenharia Mecânica da UFCG, por meio de uma célula de carga PCB 086D05 e um Analisador de Sinais Dinâmicos da Agilent 35670A. O resultado da medição foi uma força de impacto com pico de 25,78 N. Na Figura 3.8 é possível observar o valor experimental de pico obtido com o impacto do martelo.

O valor de pico da força de impacto obtido usando a Equação 3.6 do modelo foi 25,72 N para um corrente de entrada de 3,9 A, este foi o valor de corrente consumida pelo martelo durante a medição, considerando uma fonte de alimentação de 12 V DC, enquanto na medição experimental o valor medido pelo martelo construído foi 25,78 N, gerando um erro de aproximadamente 0,233%.

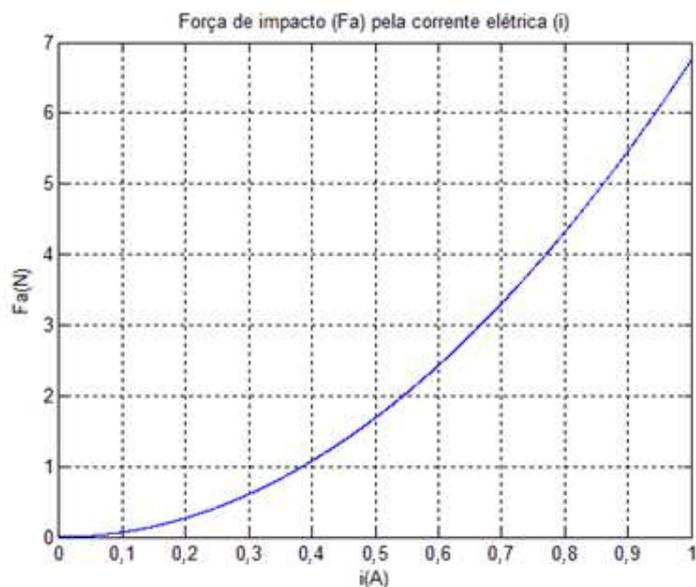
Figura 3.8: Medição da força de impacto.



Fonte: Próprio autor.

O valor da força de impacto aumenta consideravelmente com o aumento da corrente, porém isto requer um maior consumo do sistema. Assim, de acordo com a aplicação a ser implementada e com os recursos disponíveis, pode-se achar um valor intermediário para potência fornecida pela fonte e força de impacto desejada. Na Figura 3.9, observa-se o comportamento da força de impacto pelo valor da corrente elétrica fornecida ao sistema.

Figura 3.9: Força de impacto em função da corrente de entrada para $\mu_R = 800$.



Fonte: Próprio autor.

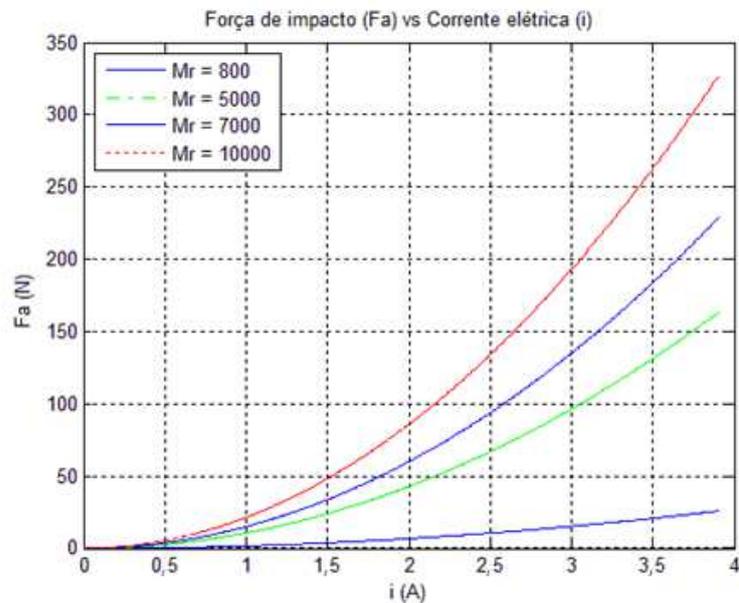
As simulações foram realizadas para um núcleo móvel constituído de ferro puro, no entanto, mudando-se o tipo de material do núcleo altera-se o comportamento de F_a por i com base nos diferentes valores de permeabilidade magnética relativa de materiais ferromagnéticos conforme valores da Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Permeabilidade magnética relativa de materiais ferromagnéticos

Material	Permeabilidade Magnética Relativa (μ_R)
Ferro Fundido	800
Aço	5000
Ferro puro	7000
Aço doce	10000

Variando-se os valores de μ_R de acordo com os valores da Tabela 3.2, obtém-se o comportamento da força de impacto pela corrente. Este comportamento pode ser visualizado na Figura 3.10.

Figura 3.10: Força de impacto em função da corrente de entrada para diferentes valores de μ_R : 800, 5000, 7000 e 10000.



Fonte: Próprio autor.

O comportamento da força de impacto depende apenas do valor da corrente de entrada fornecida ao martelo. No entanto, sua intensidade pode ser alterada variando os demais parâmetros do sistema como permeabilidade magnética, número de espiras e dimensões do solenoide e do núcleo ferromagnético.

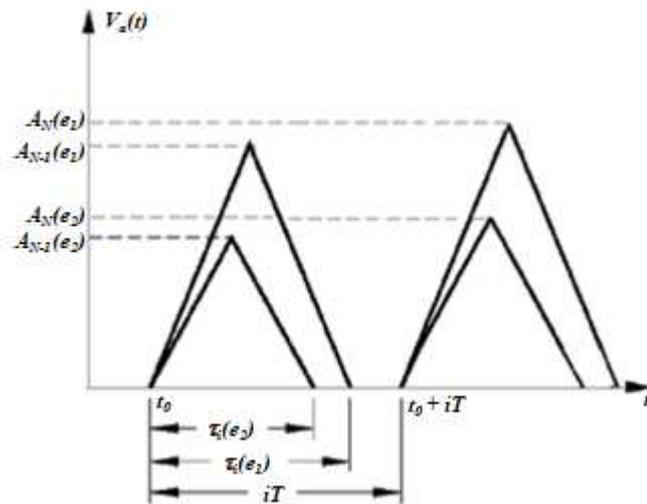
Os parâmetros utilizados como referência para este modelo foram baseados no martelo magnético já utilizado nos teste de Lemos [6], um dispositivo compacto com a finalidade de ter um bom desempenho e baixo consumo de energia para a construção de um sistema de detecção de incrustação portátil para análises de campo.

Outros parâmetros, como permeabilidade magnética, número de espiras e dimensões do solenoide e núcleo do martelo, também se mostraram manipuláveis na composição da força, embora não analisados neste trabalho, eles podem ser escolhidos mediante adaptações necessárias a construção do martelo magnético de acordo com o desejado a sua finalidade.

3.3.3 Testes com o acelerômetro

A força de impacto obtida é aplicada neste teste. O impacto do martelo é usado para gerar uma vibração mecânica a ser captada pelo acelerômetro, e a depender da intensidade do golpe, estimar a presença da incrustação. Segundo Silva [2], o sinal de saída utilizando o acelerômetro pode ser modelado a partir da representação ilustrada na Figura 3.11:

Figura 3.11: Representação do sinal de saída do acelerômetro.



Fonte: Modificada de Silva [2].

Em que e_i é a espessura da incrustação, $V_a(t)$ é o sinal de saída do sistema de detecção utilizando o acelerômetro e $A_i(e)$ é a amplitude máxima do sinal $V_a(t)$. Assim, o valor médio das amplitudes máximas $A(e)$ (obtidas em função da incrustação) detectadas será dado por [2]:

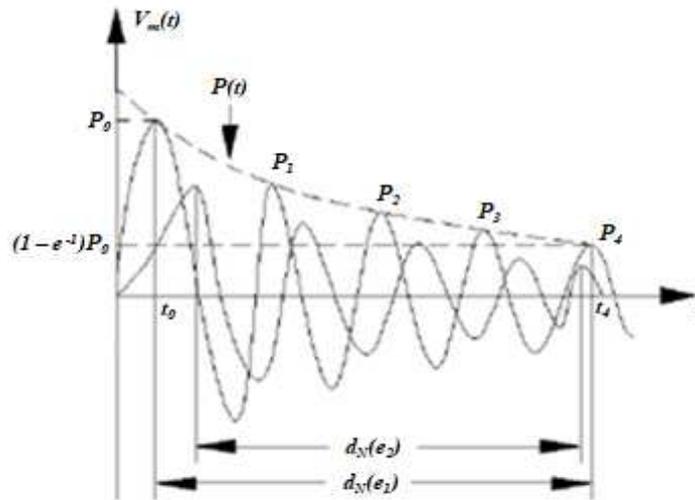
$$A(e) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_i(e) \quad (3.7)$$

onde n é o número de medições realizadas em cada experimento. O aumento na espessura da incrustação (e) provoca uma redução no valor máximo da amplitude no sinal de saída (A_i) nos testes realizados com o acelerômetro.

3.3.4 Testes com o microfone

A força de impacto obtida é aplicada neste teste com a mesma intensidade do teste anterior. O impacto do martelo é usado para gerar uma vibração sonora a ser captada pelo microfone, e a depender do sinal sonoro emitido pelo som do golpe, estima-se a presença da incrustação. Ainda segundo Silva [2], o sinal de saída utilizando o microfone no domínio do tempo pode ser representado como visto na Figura 3.12.

Figura 3.12: Representação do sinal de saída do microfone no domínio do tempo. Fonte: Silva [2].



Fonte: Modificada de Silva [20].

onde $V_m(t)$ é o sinal de saída do sistema de detecção utilizando o microfone e d_i é o tempo de decaimento do sinal $V_m(t)$. Assim, o valor médio $D(e)$ dos tempos de decaimento detectados será dado por [2]:

$$D(e) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i(e) \quad (3.8)$$

onde n é o número de medições realizadas em cada experimento. O aumento na espessura da incrustação provoca uma redução no valor do tempo de decaimento (d_i) do sinal $V_m(t)$.

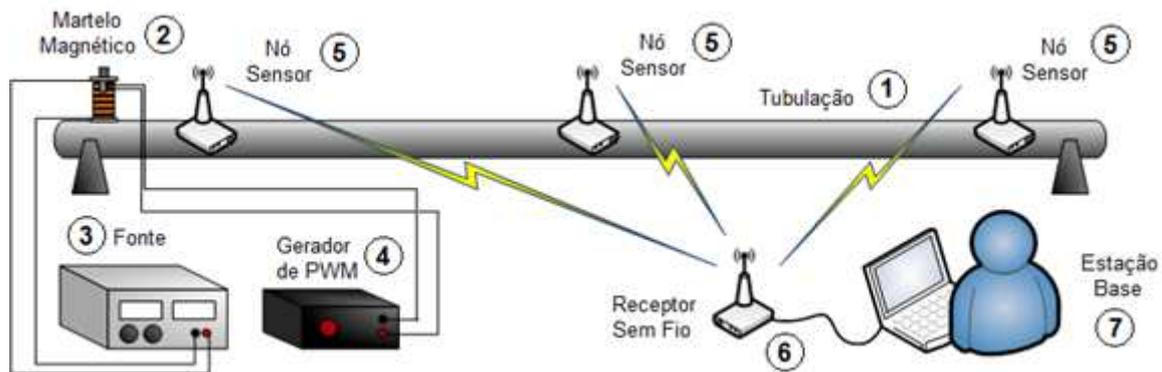
Uma vez conhecido o princípio de funcionamento da técnica de detecção e as características dos sinais, apresentam-se no capítulo 4, as plataformas de testes e o sistema implementado para detecção de incrustação.

Capítulo 4 – Plataformas e Definição de Testes

A plataforma de teste é formada por três blocos: tubulação, sistema de excitação e sistema de monitoramento.

O diagrama esquemático da plataforma de testes pode ser observado na Figura 4.1. A tubulação é representada na figura pelo número 1; o sistema de excitação, composto de martelo magnético, fonte de alimentação e gerador PWM, tem suas representações nos números: 2, 3 e 4 respectivamente; o sistema de monitoramento é composto pelos nós-sensores, receptor sem fio e estação base, representados pelos números: 5, 6 e 7.

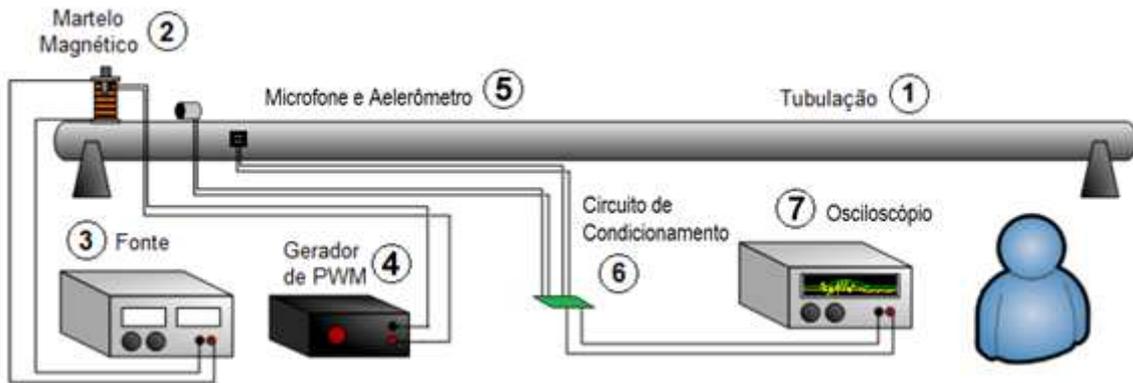
Figura 4.1: Diagrama esquemático da representação da plataforma de testes.



Fonte: Próprio autor.

Foram realizados ensaios para adquirir os parâmetros da tubulação de teste para posterior correlação dos dados. O diagrama esquemático da plataforma de testes pode ser observado na Figura 4.2. As alterações realizadas foram nos itens 5, 6 e 7, onde foram substituídos respectivamente pelo acelerômetro e microfone, circuito de condicionamento e osciloscópio digital.

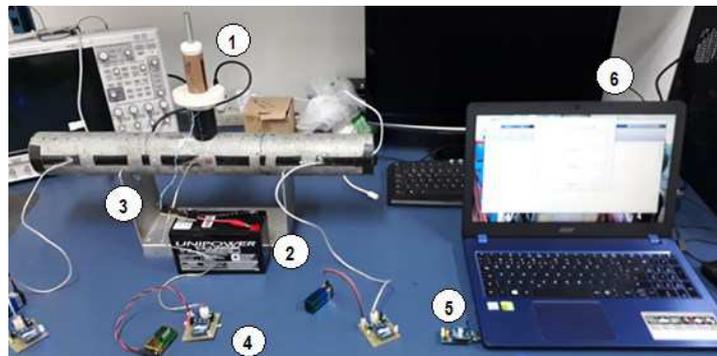
Figura 4.2: Representação da plataforma de testes.



Fonte: Próprio autor.

No decorrer da pesquisa, se fez necessário tornar o sistema de medição portátil para testes de campo, levando a uma alteração do sistema de excitação, no qual a fonte de alimentação foi substituída por uma bateria de 12 V, e o gerador de PWM foi substituído por um circuito oscilador alimentado por esta bateria como pode ser visto na Figura 4.3. Assim, tornou-se possível realizar testes de campo devido a completa portabilidade do sistema de medição.

Figura 4.3: Representação da plataforma de testes atualizada: Foto Ilustrativa da estrutura.



Fonte: Próprio autor.

4.1 Princípio de Funcionamento do Sistema de Detecção

As vibrações da tubulação são captadas pelo acelerômetro e representadas como saída de tensão V_a , que são digitalizadas pelo conversor A/D do módulo transceptor (módulo XBee que implementa a tecnologia ZigBee) e enviadas por um canal de comunicação sem fio para o

computador. Neste ponto, os dados serão processados e convertidos em valores passíveis de leitura e os gráficos em tempo real do comportamento vibracional da tubulação.

Para a rede com múltiplos nós, cada um enviará um valor distinto de tensão, e a interpretação dos respectivos valores, assim como a correspondência dos mesmos aos nós transmissores é feita pela rotina que está sendo executada no computador. O módulo transmissor verifica a disponibilidade do canal antes da transmissão, evitando a colisão de pacotes, armazenando os dados num buffer para serem reenviados assim que liberado o canal. O nó transmissor tentará reenviar o dado, e caso durante suas tentativas verifique que o canal não está liberado, esse valor será descartado seguindo para o valor seguinte. Nota-se que esta configuração pode acarretar perda de pacotes pela ocupação do canal de comunicação, e ao adicionar mais nós sensores a rede, aumenta-se as chances de ocorrência de perda de dados por obstrução da transmissão. Esta configuração de intervalos e tentativas de transmissão pode ser configurada alterando os parâmetros de funcionamento do módulo transceptor XBee.

A amplitude do sinal V_a adquirido pelo acelerômetro no nó-sensor é diretamente proporcional a força aplicada pelo impacto do martelo F_a . Quanto maior for F_a , maior será a intensidade do golpe na estrutura, e maior será a quantidade de energia fornecida ao sistema e transmitida a tubulação, gerando vibrações de grande intensidade com um pico de amplitude A elevado, de modo que se $F_a > F'_a$, então $V_a > V'_a$. Na Tabela 4.1 são apresentados valores do sinal V_a para distintos valores de F_a .

Tabela 4.1: Valores de amplitude do sinal adquirido V_a e da força F_a aplicada pelo martelo.

F_a (N)	V_a (mV)
0,4	200
1,6	500
4,4	800
6,5	1200

Esses valores foram obtidos medindo-se a intensidade da força F_a aplicada pelo martelo com um dinamômetro e comparando o valor do sinal V_a adquirido pelo nó sensor através da vibração da tubulação. O conjunto de valores da força é obtido pela variação do sinal de excitação do martelo, a tensão de entrada V_e . Assim, quanto maior for a tensão de excitação, maior será o campo magnético B e consequentemente, maior será a força aplicada F_a .

Para o ponto em que for determinada a incrustação são repetidos os testes, só que desta vez utilizando microfone, para aquisição do sinal acústico, a fim de correlacionar as medições vibracionais e sonoras e confirmar a incrustação detectada. Assim, aumenta-se o grau de confiabilidade do sistema de medição mediante utilização de grandezas distintas para determinar o mesmo parâmetro.

4.2 Sistema Implementado

O sistema implementado é a utilização da técnica desenvolvida na detecção de incrustação sem necessidade da assinatura da tubulação implementada num sistema eletrônico de medição. Ele é composto do sistema de excitação (martelo eletromagnético) e sistema de monitoramento (nós sensores e computador). Sua utilização foi fundamental na validação da técnica, realizando testes reais em aplicações de campo.

4.2.1 Sistema de Excitação

Inicialmente, composto por um martelo magnético, uma fonte de tensão contínua (para garantir a alimentação da bobina) e um gerador de PWM (para garantir a periodicidade dos impactos), foram substituídos por uma bateria de 12 V e um circuito oscilador, uma melhoria que permitiu os testes de campo. Na Figura 4.4 pode ser visto o martelo magnético utilizado nos testes de detecção de incrustação.

Figura 4.4: Foto do martelo magnético.



Fonte: Próprio autor.

Esse sistema é responsável por excitar a tubulação através de golpes periódicos. Nele também é possível o ajuste da força de impacto, alterando o valor de sua alimentação. Para excitação do martelo, é aplicado um sinal periódico de 5 s e amplitude de 12 V.

As características do sinal de excitação são definidas a fim de evitar que haja sobreposição das ondas vibracionais, acarretando numa medição errônea da vibração do tubo. Por isso, o sinal de excitação deve possuir pulsos igualmente espaçados de modo que a vibração $n+1$ não seja influenciada pela vibração da onda n ; o ciclo de trabalho deve possuir duração suficiente para garantir o tempo mínimo de excitação do martelo sem consumir muita energia, e uma corrente elétrica que gere um campo forte o suficiente para mover o núcleo e golpear a tubulação, gerando vibrações no tubo. Os sinais da saída monitoradas com o acelerômetro e microfone são enviados ao computador pelos nós sensores para processamento de dados no MatLab, permitindo uma análise da presença ou não de incrustação.

Cada impulso do sinal de excitação, implicará numa força F_a , aplicada pelo martelo à tubulação, com o valor de aproximadamente 4,4 N (posteriormente 25 N). Essa força será responsável pela vibração na tubulação, e de acordo com o nível da amplitude do sinal de tensão adquirido pelo acelerômetro (nó-sensor), saber-se-á se há incrustação.

4.2.2 Sistema de Monitoramento

São os nós-sensores, compostos por acelerômetros e microfone, módulos transceptores XBee (que implementam a tecnologia ZigBee) e um computador terminal executando uma rotina de aquisição e tratamento de dados.

A técnica avalia variações nas amplitudes das vibrações mecânicas da tubulação, sem a necessidade de usar como base tubulações limpas medidas previamente. Assim, uma diferença em relação ao valores máximos médios medidos, pode indicar a presença de incrustação [6], que deve ser comprovada mediante as variações medidas nos testes com microfone num segundo momento. O ZigBee permite transmissões entre nós, sem perdas de dados, com um alcance de até 100 m para locais abertos ou 30 m para locais fechados, garantindo assim uma comunicação menos suscetível a falha do nó-sensor com o computador, ou ainda, uma comunicação entre nós, prolongando ainda mais o alcance da rede [7,8].

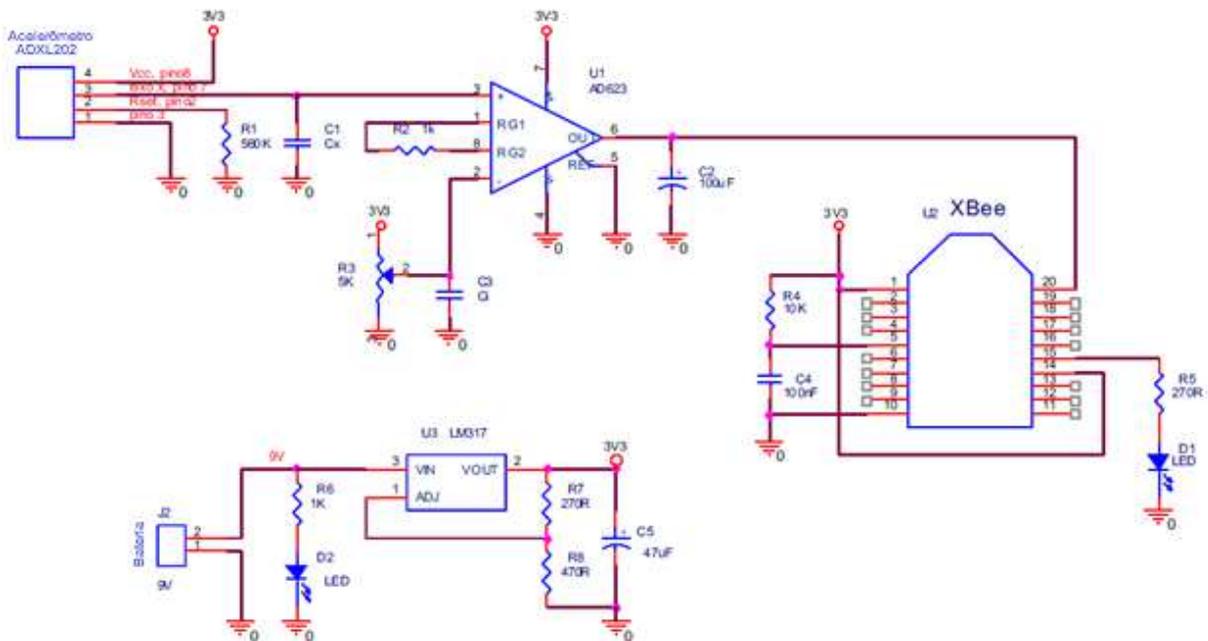
4.2.2.1 Nó-Sensor

O ZigBee permite o gerenciamento e controle desses dispositivos. Foi desenvolvido para se tornar uma alternativa de comunicação em redes que não necessitem de soluções mais complexas para seu controle, barateando assim os custos com a aquisição, instalação de equipamentos, manutenção e mão de obra. Trata-se de uma tecnologia relativamente simples, que utiliza um protocolo de pacotes de dados com características específicas, sendo projetado para oferecer flexibilidade quanto aos tipos de dispositivos que pode controlar. Tendo como uma de suas principais características o baixo consumo de energia em seu modo *sleep* e sua baixa taxa de transmissão (o limite superior da taxa de transmissão é de 250 Kbps)[27].

Devido a suas características, o ZigBee é uma tecnologia bastante utilizada por apresentar baixo consumo de energia, longo alcance para transmissão de dados e uma malha de rede bastante flexível, permitindo rotas alternativas na transferência de informações para que sempre haja tráfego na informação sem queda da rede.

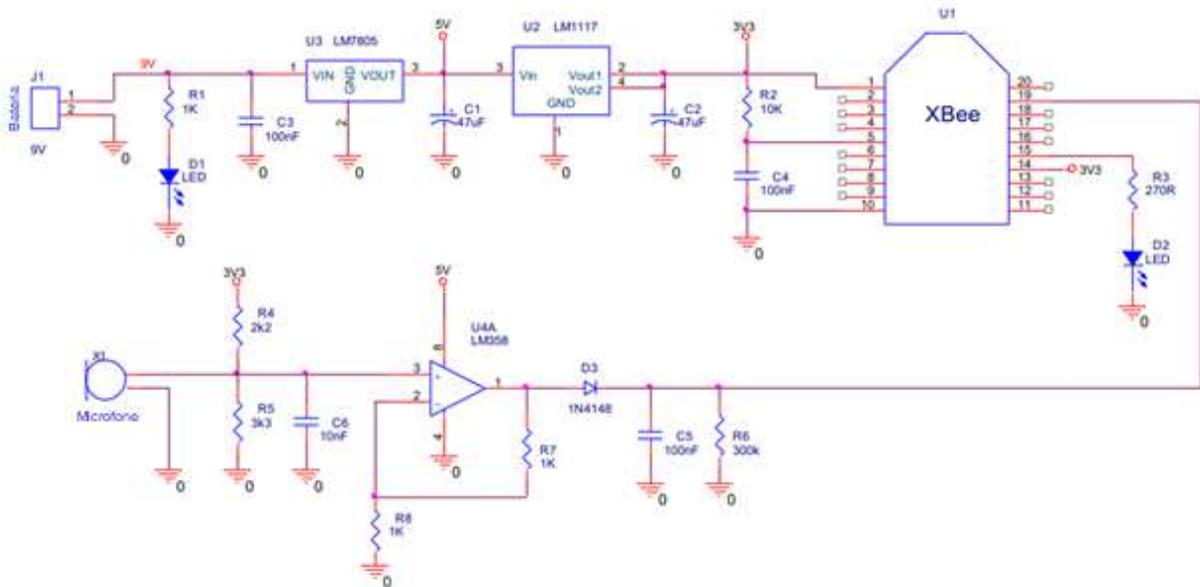
Nas Figuras 4.5 e 4.6 observa-se o esquema elétrico do nó-sensor: acelerômetro, microfone, circuito de condicionamento e XBee.

Figura 4.5: Diagrama elétrico do nó-sensor (acelerômetro).



Fonte: Próprio autor.

Figura 4.6: Diagrama elétrico do nó-sensor (microfone).



Fonte: Próprio autor.

É possível observar pelo diagrama elétrico do circuito (Figura 4.5) que a saída analógica do acelerômetro (X_{FILT}) é a entrada do amplificador de instrumentação, o AD623, enquanto a saída deste último é a entrada do módulo transceptor XBee pelo pino 20, representando o canal 0 do conversor analógico-digital de 10 bits. LED's foram utilizados como indicadores para o nó-sensor: quando estiver ligado e associando e transmitindo.

Já para o microfone (Figura 4.6), temos o mesmo princípio de funcionamento: a saída do microfone é a entrada do amplificador, o LM358, enquanto a saída deste último é entrada do módulo transceptor XBee pelo pino 19, representando o canal 0 do conversor analógico-digital.

4.3 Tubulações Usadas nos Testes

Foi utilizada inicialmente uma tubulação cilíndrica, de ferro galvanizado com espessura de 2,5 mm, um diâmetro de 63,5 mm e 600 mm de comprimento, composta por dois tubos: um limpo, sem nenhuma incrustação e um com três camadas de parafina no interior, simulando a incrustação com diferentes espessuras 0 mm, 5 mm e 10 mm respectivamente.

A tubulação limpa foi utilizada nos testes com acelerômetro e microfone para obter as assinaturas do tubo, ou seja, os valores de amplitude e tempo de decaimento quando não há

incrustação no tubo. Já o segundo tipo de tubo é utilizado para obter o nível de tensão do sinal adquirido pelo nó sensor correspondente para cada espessura de camada de incrustação. Esses testes precederam os testes sem assinatura da tubulação para comprovar a validade da técnica, e essa configuração inicial se fez necessária para validar os testes baseados em incrustação relativa, e comparar os resultados obtidos nos dois ensaios.

Posteriormente, foram feitos testes em tubulações reais (Figura 4.7) numa área externa do LIEC-UFCG, a fim de verificar o comportamento do sistema de medição.

Figura 4.7: Foto Ilustrativa das tubulações externas: (a) Ferro galvanizado com suportes; (b) Ferro galvanizado apoiada no piso.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor.

Foram realizados também testes em uma planta que simula uma instalação industrial, e também simula a presença da incrustação, permitindo bombeamento de água, para que torne o experimento mais próximo do real: uma tubulação com material incrustado e presença de fluido corrente, além do ruído ambiente. A representação desta plataforma é apresentada na Figura 4.8.

Figura 4.8: Foto Ilustrativa das tubulações da planta do LIEC: (a) Sistema de detecção montado sobre a estrutura; (b) Estrutura parcialmente desmontada para troca de tubos.



(a)

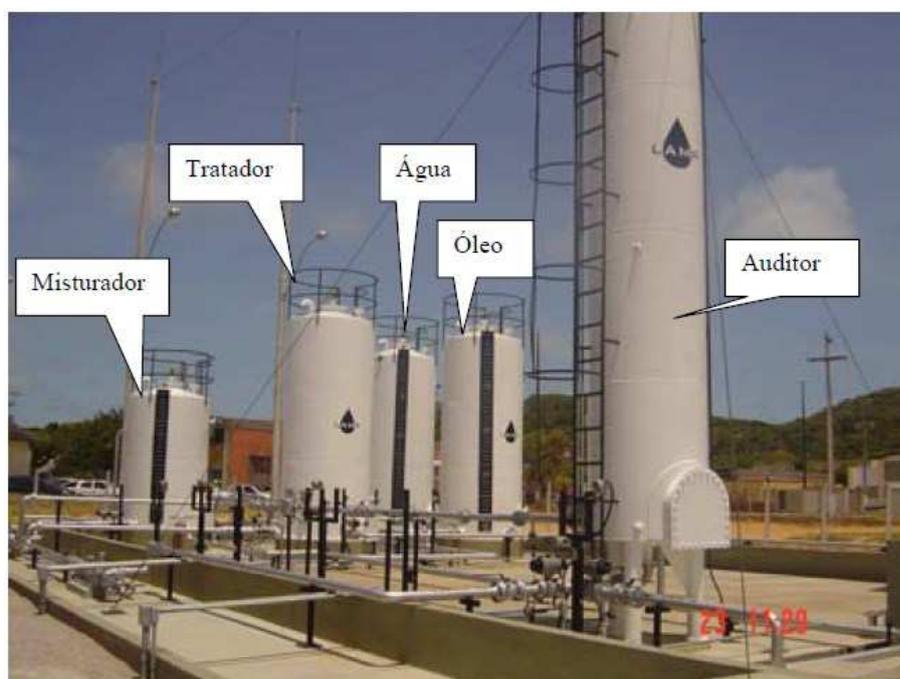


(b)

Fonte: Próprio autor.

Foram realizados testes no Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo (LAMP) na Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), numa planta que simula diferentes condições de operação de medidores de campo por meio de mistura de água e óleo em proporções e vazões variadas. O laboratório possui 6 tanques (água, óleo, misturador, resíduos, auditor e tratador) e tubulações, em aço carbono com 30 cm de diâmetro e 5 cm de espessura, que possibilitam a reutilização da água e do óleo em diversos testes, evitando descartes [32]. Na Figura 4.9, pode-se observar parte da área externa do laboratório correspondente a planta de simulação, onde os testes foram realizados. Na Figura 4.10, pode-se observar a aplicação do sistema de detecção numa tubulação do LAMP.

Figura 4.9: Vista da área experimental do LAMP.



Fonte: Quintaes[32]

Figura 4.10: Foto Ilustrativa das tubulações do LAMP: aço carbono suspensas.



Fonte: Próprio autor.

Uma vez descrito o funcionamento da técnica, as especificações dos nós-sensores e as tubulações analisadas, pode-se prosseguir para descrição dos experimentos realizados e análise dos resultados. No capítulo 5, são apresentados os experimentos realizados para validação da técnica proposta em testes realizados no LIEC-UFCG, utilizando os sistema de detecção desenvolvido com a técnica proposta implementada e a análise dos resultados obtidos.

Capítulo 5 – Experimentos Realizados e Análise dos Resultados

A técnica desenvolvida utiliza o teste com o impacto do martelo para detectar incrustação em tubulações, com isso avaliam-se as modificações nos sinais monitorados e verificam-se as modificações quando ocorrer a incrustação. A transmissão sem fio é feita via ZigBee, o que permite uma simples configuração para alcançar distâncias longas e com baixo consumo de energia. Entretanto, é preciso ajustar o sistema de excitação antes do início do monitoramento. Isto se deve ao modo como a estrutura se apresenta, determinando que para cada tipo de tubulação e disposição desta no solo, haverá uma força de impacto ótima para obtenção de melhores resultados.

5.1 Caracterização dos Testes Iniciais

Foi realizada uma série de experimentos agrupados em quatro categorias para garantir que o nível de tensão obtido pelo acelerômetro fosse o mesmo ao longo de toda a tubulação (tubulação limpa, idêntica a tubulação de teste, porém sem nenhuma camada de resina e com 1 m de comprimento). Esse ensaio foi realizado para observar a atenuação da vibração em decorrência apenas da distância da origem dos golpes na estrutura, e consistiu em fornecer uma tensão de entrada V_e fixa ao martelo de impacto posicionado na extremidade do tubo e variar paulatinamente a posição do nó sensor em relação a origem. Primeiramente, alimentou-se o martelo com uma tensão de entrada V_e no valor de 6 V e variou-se o nó-sensor com o passo de 3 cm, em seguida repetiu-se o teste com o passo de 5 cm. Num segundo momento, fixou-se o valor de tensão de entrada em 5 V, e novamente obteve-se o conjunto de medidas para cada um dos ensaios de passos distintos. Todos os testes de assinatura do tubo foram realizados numa tubulação lisa, similar a utilizada no transporte de fluidos em processos industriais, com um comprimento de 100 cm. Os resultados obtidos se encontram nas Tabelas 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

Tabela 5.1: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V com passo de 3 cm.

Posição (cm)	Amplitude (mV)
3	1375
6	1332
9	1375

12	1344
15	1288
18	1238
21	1225
24	1325
27	1382
30	1113
33	1182
36	1293
39	1363
42	1382
45	1303
48	1300
51	1298
54	1333
57	1307
60	1289
63	1200
66	1228
69	1225
72	1288
75	1295
78	1370
81	1300
84	1275
87	1320
90	1254
93	1107
96	1019
99	1032

Observa-se, um valor médio em torno de 1300 mV com atenuação acentuada a partir de 90 cm. Porém, nos pontos em torno das posições 30 cm, 33 cm, 63 cm e 66 cm, observa-se

valores destoantes dos demais, uma atenuação mais acentuada fora do decaimento esperado. Este fator decorre do posicionamento dos suportes do tubo nesses pontos, acarretando falsos positivos na medições por introduzir mais rigidez na estrutura neste local.

Tabela 5.2: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 6 V com passo de 5 cm.

Posição (cm)	Amplitude (mV)
5	1333
10	1270
15	1269
20	1282
25	1269
30	1382
35	1225
40	1313
45	1219
50	1250
55	1325
60	1200
65	1238
70	1232
75	1282
80	1307
85	1263
90	1225
95	1025
100	1057

Obtém-se um valor médio de 1300 mV com atenuação acentuada a partir de 90 cm.

Observa-se o comportamento da tubulação para uma tensão de alimentação menor nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.3: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 3 cm.

Posição (cm)	Amplitude (mV)
3	855

6	801
9	832
12	795
15	783
18	820
21	817
24	800
27	814
30	803
33	798
36	793
39	780
42	807
45	814
48	814
51	803
54	778
57	789
60	792
63	810
66	811
69	790
72	815
75	813
78	796
81	803
84	802
87	812
90	801
93	772
96	732
99	704

Tabela 5.4: Valores obtidos para tensão de entrada V_e de 5 V e o passo de 5 cm.

Posição (cm)	Amplitude (mV)
5	823
10	791
15	792
20	805
25	793
30	807
35	797
40	799
45	803
50	804
55	785
60	813
65	806
70	823
75	832
80	822
85	791
90	752
95	707
100	724

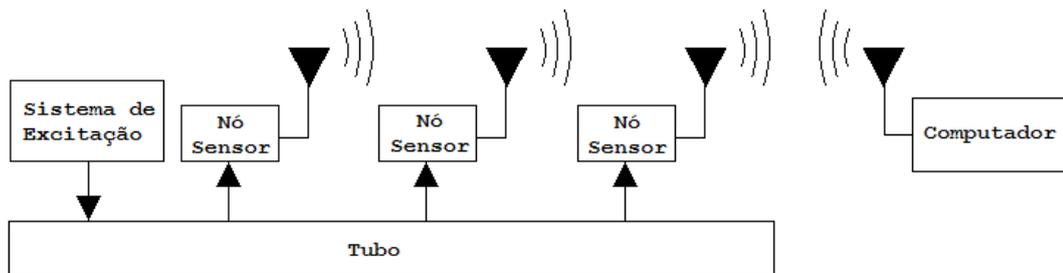
Nota-se, para os valores obtidos nas Tabelas 5.3 e 5.4, um valor médio de 800 mV, com uma atenuação acentuada a partir de 90 cm.

Deve-se observar que o comportamento da amplitude do sinal é praticamente o mesmo ao longo do tubo para todos os ensaios realizados até uma distância de 90 cm aproximadamente. Isso se deve ao fato que a partir deste ponto, a amplitude da onda mecânica vibracional começa a diminuir consideravelmente devido a dissipação de energia, de modo tal que poderá acarretar numa leitura errada de uma falsa presença de incrustação. Assim, para ter segurança nas leituras, deve-se trabalhar com uma margem de confiabilidade de no máximo 85 cm, para garantir a funcionalidade do sistema de medição para essa tubulação. Em uma nova estrutura, deve-se redefinir uma nova região segura de medição, observando o ponto em que a amplitude do sinal começa a atenuar.

5.2 Dados do Sistema de Aquisição

Na Figura 5.1 é mostrada a topologia utilizada com esta técnica. A técnica do impacto do martelo é usada como forma de excitação, e é responsável por gerar as vibrações na tubulação, enquanto um sistema de aquisição de dados com uma rede de nós-sensores para condicionamento do sinal é utilizado para capturar os parâmetros da vibração. Os sinais obtidos são enviados via comunicação sem fio pelos módulos ao computador o qual os processa e exibe em tela o comportamento das vibrações.

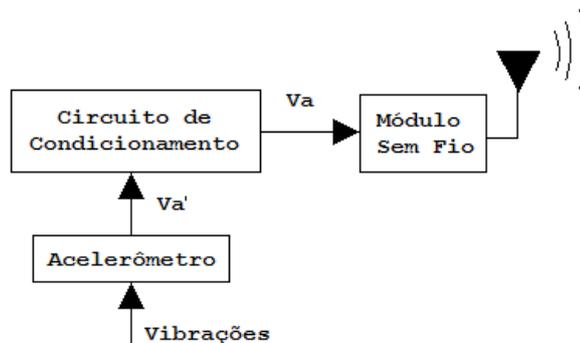
Figura 5.1: Diagrama de blocos do sistema de medição utilizando análise de vibrações e transmissão via rede sem fio ZigBee.



Fonte: Próprio autor.

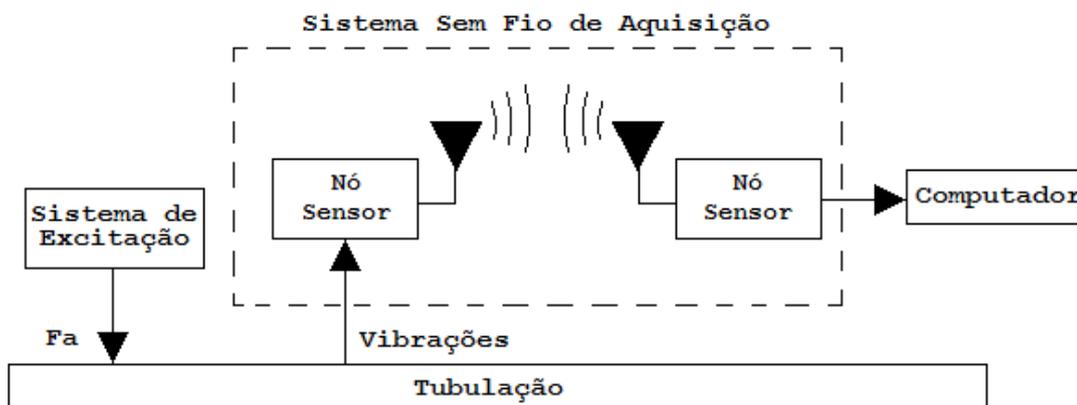
Na Figura 5.2, pode-se observar o detalhamento da estrutura do nó-sensor, que compõe o sistema de aquisição de dados, o qual possui seu esquema representado na Figura 5.3.

Figura 5.2: Diagrama de blocos da representação do nó-sensor.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.3: Estrutura do sistema de aquisição de dados.

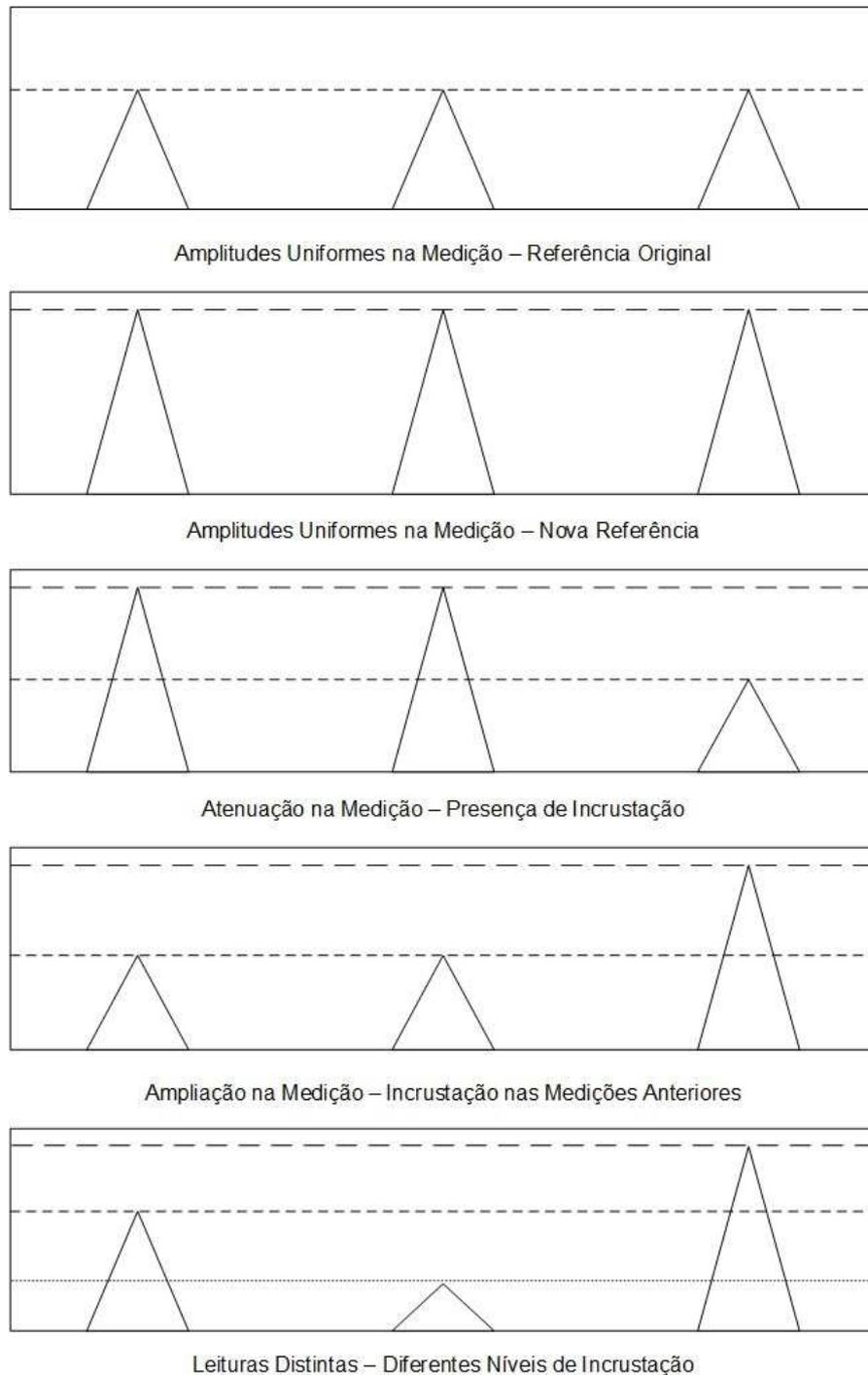


Fonte: Próprio autor.

É possível obter os parâmetros de monitoramento do tubo baseado em sua vibração por excitação do martelo. Entretanto, não se faz necessário um ensaio prévio para determinar a assinatura do tubo, visto que é possível estimar a presença de incrustação com um ensaio relativo, baseando-se no conceito de incrustação absoluta e relativa.

Os valores de amplitudes obtidos simultaneamente são comparados e observados se há atenuação entre eles, ou seja, um sinal será atenuado em relação ao outro, o que acarretaria a presença de incrustação como pode ser observado na Figura 5.4. Vale destacar que para este caso, é possível obter valores de mesma amplitude em toda extensão do tubo o que levaria a concluir que não há incrustação na tubulação ou que a mesma se apresenta em toda a tubulação. Essa segunda alternativa pode ser descartada, salvo que o processo de incrustação não é contínuo e nem uniforme, descartando a possibilidade de haver uma amplitude constante do sinal adquirido devido a uma incrustação padrão em todo o tubo.

Figura 5.4: Representação de amplitudes vibracionais para incrustação relativa.



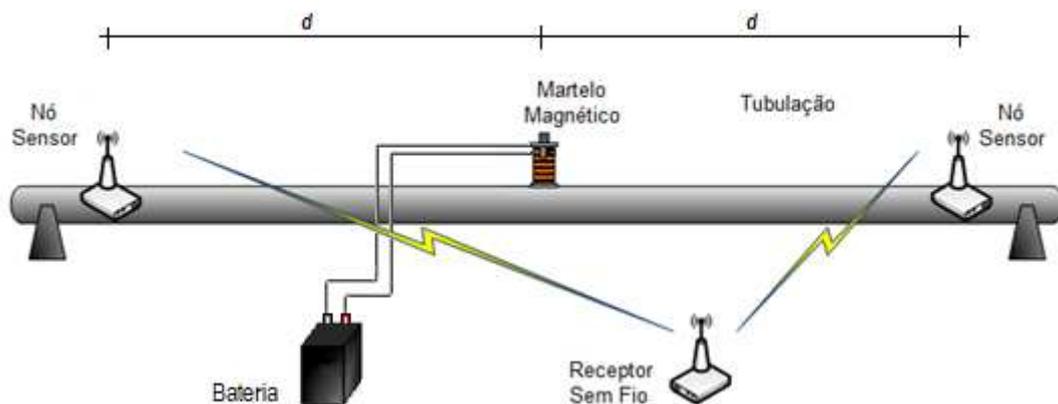
Fonte: Próprio autor.

Vale ressaltar que a configuração de rede sem fio, para uma rede de nós-sensores no monitoramento, é para uma única região de medição, ou seja, dentro da margem confiável de distância da origem da excitação. Para aumentar o alcance da rede, não basta apenas introduzir novos nós-sensores, é preciso também caracterizar as regiões de atuação desses novos nós, ou seja, colher a assinatura do tudo para esta nova região posicionamento dos

sensores, no caso da detecção de incrustação absoluta, ou manter os nós dentro da região de confiança para comparação de seus valores adquiridos, no caso da detecção relativa. Assim, um tubo apresentará diversas assinaturas, cada qual variando em função das distâncias dos nós-sensores a origem das vibrações. Este fator é fácil de ser observado, já que a medida que a distância aumenta em relação a origem das vibrações, as amplitudes das ondas tendem a diminuir, devido a dispersão de energia da onda ao longo da tubulação. Portanto, quanto mais longe da origem, menor será a amplitude da vibração.

Entretanto, para que este método de medição funcione, é preciso trabalhar dentro de uma região segura, e isto só é possível se esta for determinada para cada nova tubulação sobre teste. Assim, introduzimos a técnica de medição aos pares, que consiste em deslocar os nós-sensores 2 a 2 equidistantes da origem do golpe, observando sua atenuação. Esta disposição pode ser vista na Figura 5.5.

Figura 5.5: Disposição dos nós-sensores equidistantes da origem dos golpes para medição aos pares.



Fonte: Próprio autor.

A detecção de incrustação baseada na análise de vibração aos pares, consiste em utilizar sempre dois pontos de referência equidistantes do martelo para determinar a região segura de medição, ou a incrustação propriamente dita. Isso é fácil observar porque pontos a mesma distância da força de impacto, local de maior amplitude vibracional, estarão submetidos a mesma amplitude, salvo que sofrem a mesma atenuação por amortecimento da estrutura em virtude do alcance do sistema de excitação. Assim, os pares são separados até que se determine uma região segura de medição.

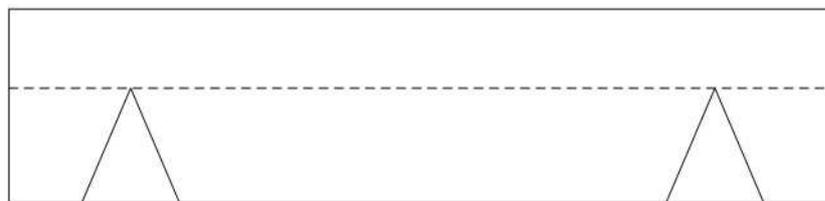
Caso um dos pontos de medição apresente uma amplitude diferente, aquele em que se observar a menor delas, será o local da presença da incrustação. De fato, pontos de medição idênticos, dispostos simetricamente ao martelo de impacto e sob o mesmo fator de

amortecimento da estrutura, deverão apresentar a mesma leitura. Caso haja diferença, a incrustação terá sido detectada. Esses comportamentos podem ser observados como representado na Figura 5.6. Assim, aumenta-se a capacidade de detecção do sistema sem a necessidade de alterar o sistema em si, mas a forma como as medições são feitas e interpretadas.

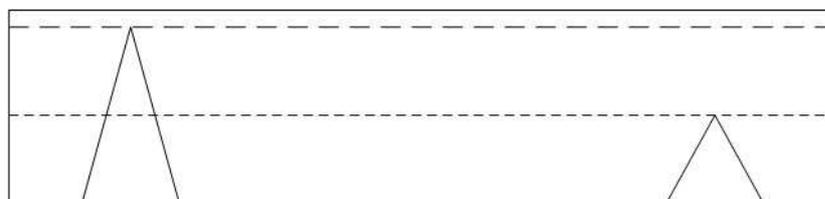
Figura 5.6: Representação da amplitude vibracional para acelerômetros dispostos aos pares, equidistantes do ponto de impacto do martelo.



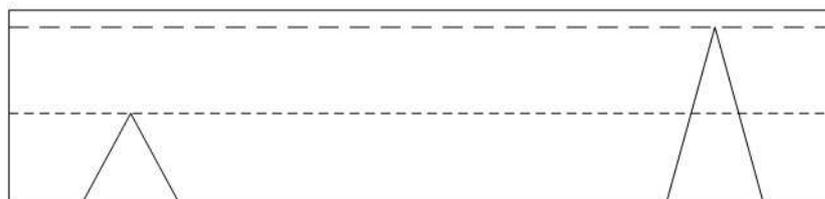
Pontos Equidistantes do Martelo



Pontos Equidistantes do Martelo Atenuados Pela Distância ou Incrustação



Pontos Equidistantes do Martelo Atenuados Pela Presença de Incrustação à Direita



Pontos Equidistantes do Martelo Atenuados Pela Presença de Incrustação à Esquerda

Fonte: Próprio autor.

5.3 Detecção de Incrustação

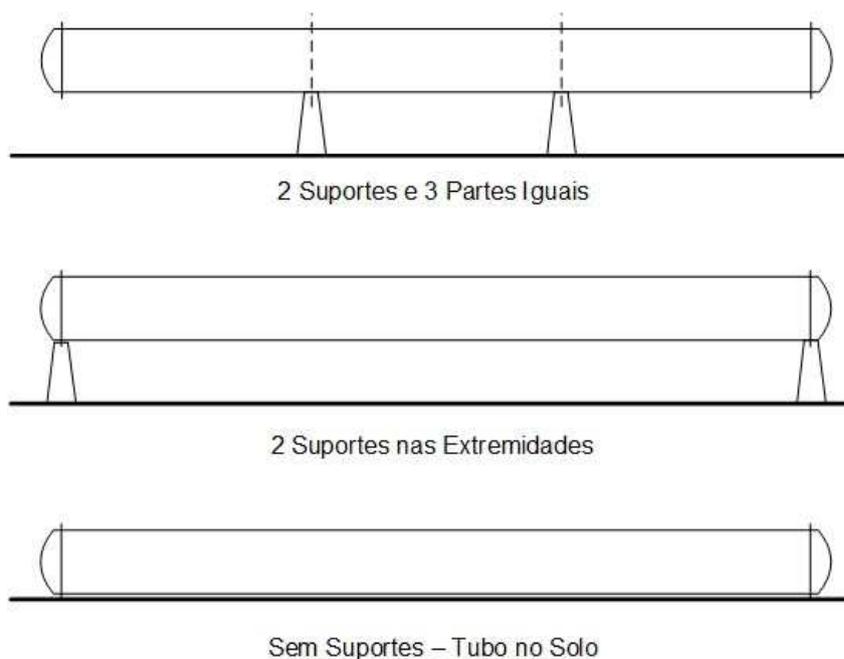
A detecção de incrustação é feita baseada em dois testes: teste vibracional decorrente da variação dos níveis de tensão do acelerômetro nas vibrações mecânicas monitoradas; e teste acústico baseado na redução do tempo de decaimento do sinal sonoro adquirido pelo microfone. Este último é utilizado para confirmar a detecção obtida no primeiro teste, e será realizado caso o teste vibracional mecânico detecte variação nos parâmetros monitorados.

5.3.1 Detecção por Vibrações Mecânicas

Os testes iniciais foram realizados no Laboratório de Instrumentação, na tubulação teste, sobre uma bancada de experimentos a fim de verificar o funcionamento da técnica. Posteriormente, o sistema de medição foi levado a realizar medições nas áreas externas.

Sobre a plataforma de testes, foram observado três comportamentos distintos para sua resposta em decorrência da forma como esta foi disposta nos suportes para realização das medições. Foram feitos testes sob três maneiras de suportar a tubulação de teste: suportes nas extremidades do tubo, localizados a $1/3$ e $2/3$ do comprimento do tubo e sem suporte, apoiada sobre o piso. O esquema referido está ilustrado na Figura 5.7.

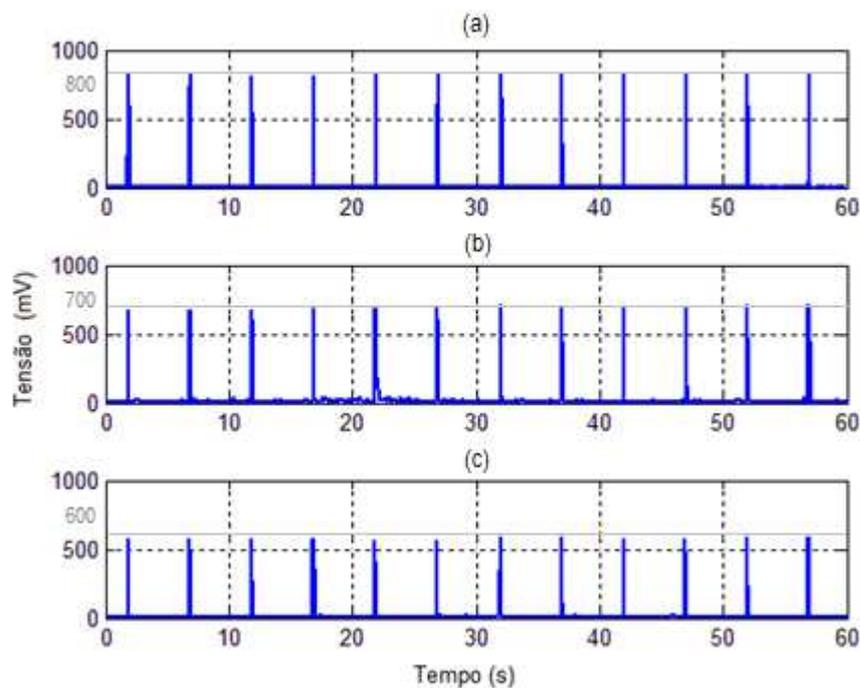
Figura 5.7: Diagrama esquemático da representação dos suportes da tubulação de teste.



Fonte: Próprio autor.

Todos os dados foram adquiridos durante um período de 60s, esse parâmetro é ajustado na rotina de aquisição de dados. O comportamento dos sinais adquiridos pode ser observado na Figura 5.8. Os nós-sensores foram posicionados nas partes centrais de cada uma das regiões (sem incrustação, com uma camada de 5 e 10 mm de parafina respectivamente) de modo que, considerando a origem do espaço a parte sem incrustação, ficaram, distando 20 cm entre si, posicionados: nó 1: 10 cm; nó 2: 30 cm; nó 3: 50 cm.

Figura 5.8: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e suporte duplo central: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.



Fonte: Próprio autor.

A saída do acelerômetro é monitorada pelo nó sensor que envia os dados para a estação base. Os dados recebidos são representados graficamente em tempo real, de modo que a imagem obtida no monitor representa o comportamento momentâneo do tubo sob a influência do impacto do martelo.

Mesmo fazendo variar a frequência de pancadas do martelo, o sinal adquirido não muda, ou seja, a detecção de incrustação não depende da frequência do sinal de excitação, mas a intensidade do impacto. Assim, não é necessário fazer testes extensivos, já que com algumas amostras você pode determinar se existe material depositado no interior do tubo.

Para validar as medições, foi comparado o sinal recebido pelo sistema de medição sem fios com o sinal adquirido pelo osciloscópio para a mesma plataforma para a aquisição dos dados do acelerômetro e verificou-se que ambos tinham forma e os valores correspondentes.

Neste caso, o sinal de resposta do acelerômetro está em torno de 800 mV, ou seja, essa é a assinatura para a tubulação através da excitação do martelo. Como a amplitude é afetada pela presença da camada de incrustação, com o aumento da espessura desta camada, a amplitude do sinal torna-se a característica mais importante, decaindo para, aproximadamente, um valor de 700 mV e 600 mV de pico para 5 mm e 10 mm de espessura de incrustações, respectivamente.

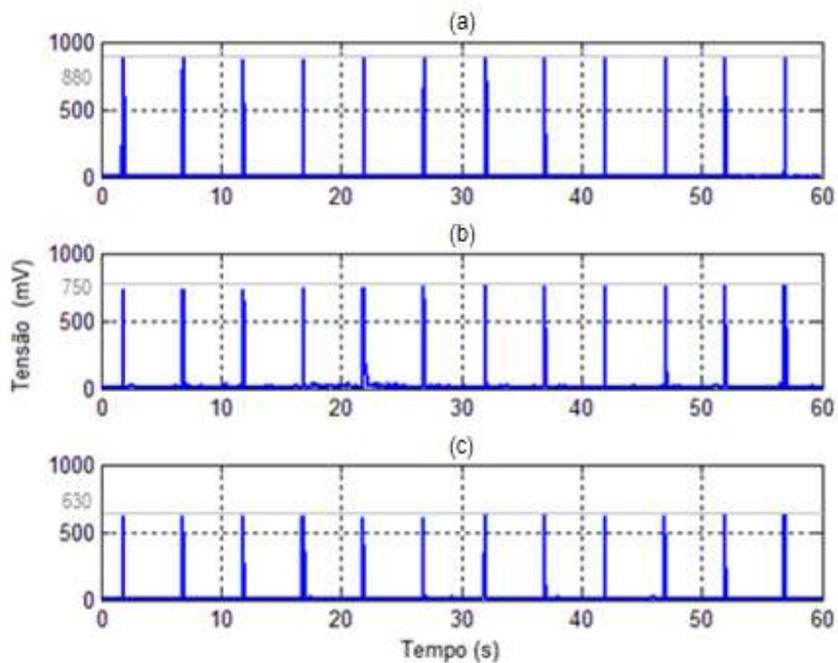
Nota-se que, mesmo que não soubéssemos o valor de sua assinatura, por este ser o menor valor monitorado, seria tomado como a referência, a atenuação em relação a esse valor indicaria a presença de incrustação, pelo conceito de uma atenuação relativa referente ao valor medido.

Observa-se que o comportamento da incrustação relativa é o mesmo da absoluta. Tal fato é dado porque os pontos utilizados para obtenção da incrustação relativa coincidem com o ponto referente a assinatura do tubo. Assim, ainda que não se conheça a assinatura da tubulação, é possível obter a incrustação absoluta, caso um dos pontos de comparação seja de uma localidade sem o material incrustante.

Deve-se destacar que, independente de se utilizar a detecção de incrustação absoluta ou relativa, a expressão obtida será a mesma, desde que se mantenha o comportamento linear. Porém, esse comportamento linear se dá devido a uniformidade da incrustação produzida pela resina dentro dos tubos de testes. Na prática, a incrustação apresentará um comportamento irregular.

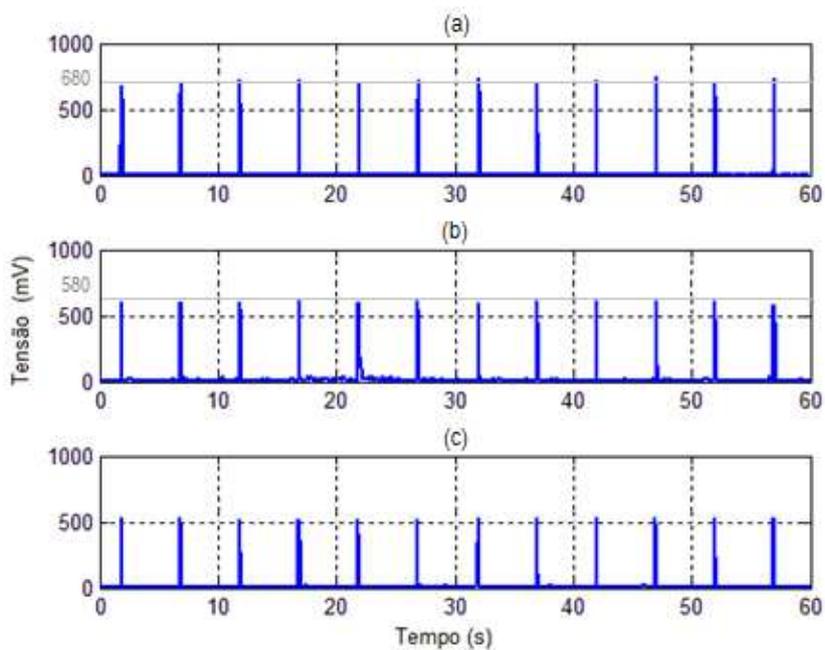
Os resultados observados na Figura 5.8 estão relacionados a primeira disposição de suporte da Figura 5.7. Nas Figuras 5.9 e 5.10, tem-se ensaios para medições realizadas de acordo com a disposição de suporte, respectivamente, nas extremidades e apoiada no solo.

Figura 5.9: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e suporte nas extremidades: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.10: Representação dos sinais de saída monitorados pelos acelerômetros para uma rede com três nós-sensores e sem suporte: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.



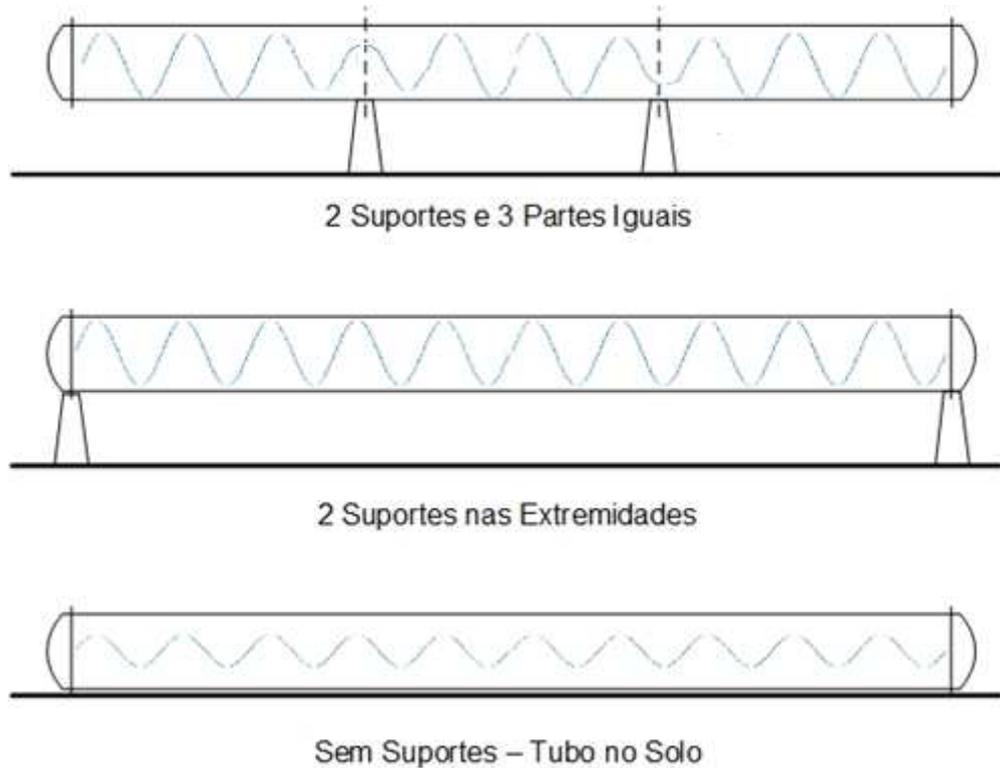
Fonte: Próprio autor.

É possível concluir que a disposição do suporte interfere diretamente no modo de propagação do sinal, de modo que a tubulação se torne mais ou menos sensível a vibração, e isso afeta diretamente nos valores das amplitudes médias do sinal monitorado no acelerômetro. De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 5.8, 5.9 e 5.10, observa-se:

- Com os suportes nas extremidades, as ondas mecânicas se propagam mais facilmente, além do que esta disposição permite uma melhor oscilação do tubo;
- O suportes centrais amortizam as vibrações, e nos pontos de contato geram falsos positivos para incrustações,
- O tubo apoiado no piso possui a menor amplitude dentre os demais, devido a todos os pontos da estrutura estarem apoiados, dificultando a oscilação da tubulação e facilitando a dissipação de energia para o meio;
- O conjunto de valores médios de amplitudes máximas obtidos pelos nós-sensores para as camadas de 0 mm, 5 mm e 10 mm de resina foram em torno de: 880 mV, 750 mV e 630 mV para os suportes nas extremidades, 800 mV, 700 mV e 600 mV para os suportes centrais, e 680 mV, 580 mV e 500 mV para o tubo sem suporte.

Essas alterações nas amplitudes dos sinais vibracionais mecânicos podem ser representadas na Figura 5.11. Elas podem ser explicadas devido a dissipação de energia que ocorre na propagação da onda, ou seja, nos pontos de suporte, parte da energia da onda vibrante é deslocada pelo caminho alternativo, implicando numa atenuação do sinal medido. Já para a tubulação totalmente apoiada no piso, todo o solo se comporta como único corpo com a tubulação, deixando assim mais resistente a vibrar, implicando num sinal de menor amplitude.

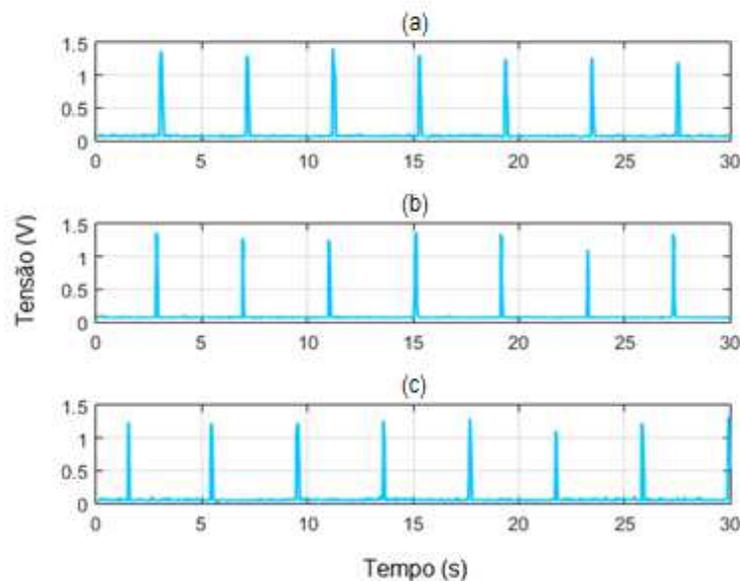
Figura 5.11: Comportamento vibracional baseado na disposição de suporte do tubo.



Fonte: Próprio autor.

No entanto, ao serem realizados novos testes na estrutura do laboratório com o novo sistema de excitação, utilizando uma força de impacto maior, de 4,4 N para 25 N, observou-se uma resposta praticamente uniforme em todo o tubo como pode ser visto na Figura 5.12.

Figura 5.12: Comportamento uniforme nas medições da tubulação com dois suportes centrais: (a) nó 1 posicionado a 10 cm de extremidade do tubo; (b) nó 2 posicionado a 30 cm de extremidade do tubo; (c) nó 3 posicionado a 50 cm de extremidade do tubo.

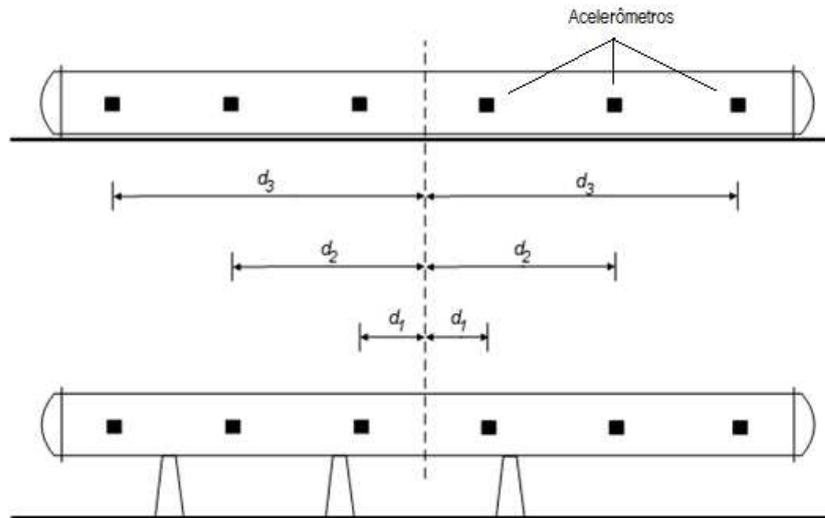


Fonte: Próprio autor.

Esse comportamento pode ser atribuído ao uso inadequado da força de impacto para o sistema de excitação, ou seja, os golpes na estrutura a faziam vibrar completamente como se estivesse livre dos suportes e até da incrustação. Por isso se faz necessário dimensionar a força de impacto a ser utilizada nos testes, se fazendo necessária uma regulagem nos valores de corrente de entrada do martelo, e em alguns casos até, um redimensionamento em sua estrutura (comprimento e número de espiras da bobina ou comprimento e diâmetro do núcleo cilíndrico).

Seguindo com os testes, agora nas tubulações externas (Figura 4.7), foram realizadas medições utilizando disposição aos pares como disposto na Figura 5.13.

Figura 5.13: Disposição dos acelerômetros aos pares nas tubulações externas.



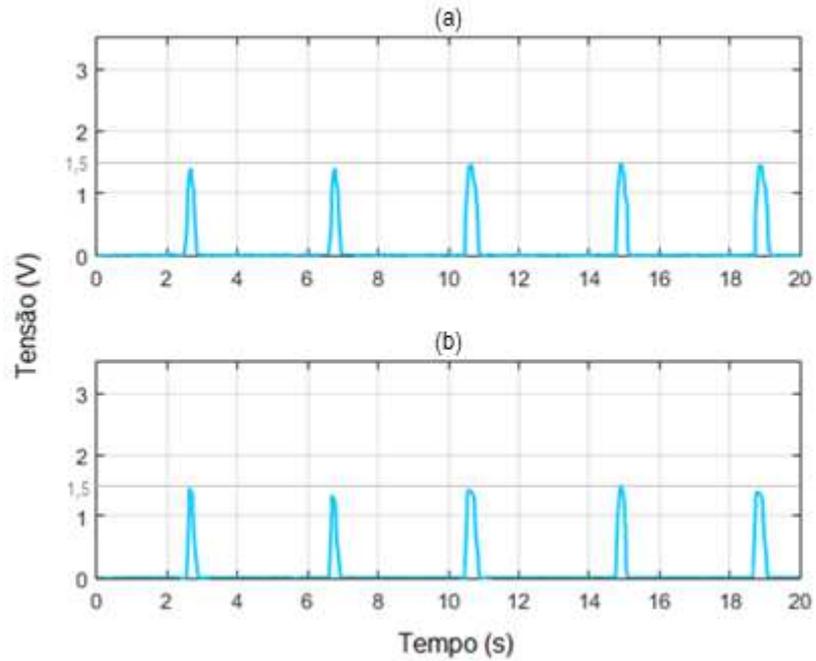
Fonte: Próprio autor.

As medições foram feitas sempre utilizando a disposição 2 a 2: primeiramente com os acelerômetros posicionados a 30 cm do centro da tubulação, em seguida a 50 cm do centro, de modo que ficassem 60 e 100 cm distantes entre si. Essas distâncias foram utilizadas para as duas formas de tubo apresentadas: sem suporte, apoiado no chão; e com suporte triplo. Em que:

- Tubo com suporte triplo apresenta 24 cm de diâmetro com 0,5 cm de espessura;
- Tubo sem suporte apresenta 17 cm de diâmetro com 1 cm de espessura.

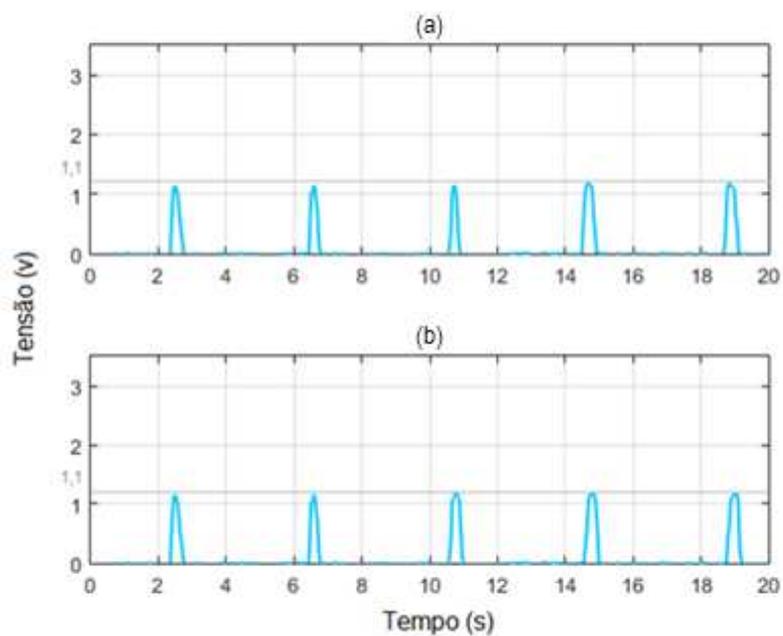
Embora o tubo com suporte triplo apresente uma configuração de suporte que não impacte tanto em atenuação do sinal monitorado quanto o exemplar apoiado no solo, seu maior volume justifica uma maior atenuação no sinal coletado, isto devido a dissipação de energia sofrida pelo maior caminho percorrido pela onda, uma vez que ambos os tubos são do mesmo material. Os resultados estão apresentados nas Figuras 5.14 e 5.15 para o tubo sem suporte, e nas Figuras 5.16 e 5.17 para o de suporte triplo.

Figura 5.14: Medição aos pares para tubulação sem suporte com os nós posicionados a 60 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 30 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 30 cm.



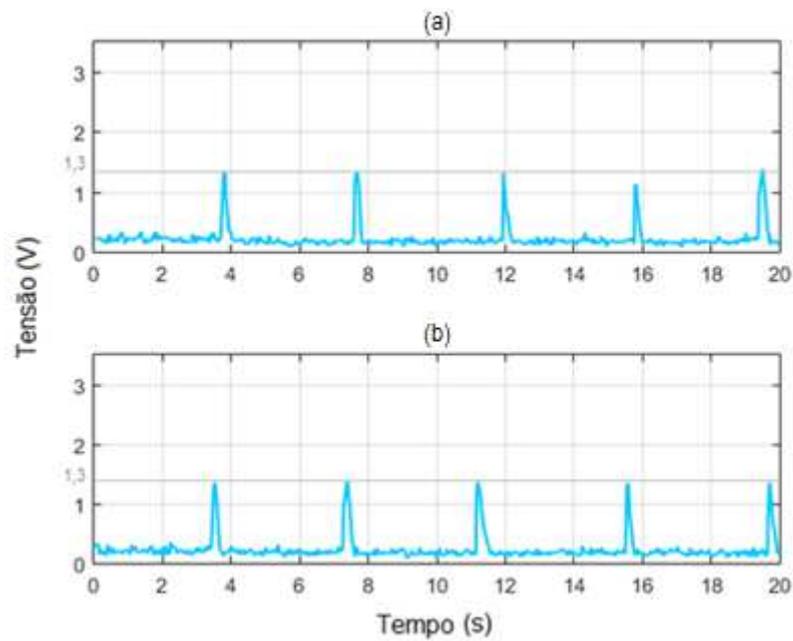
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.15: Medição aos pares para tubulação sem suporte com os nós posicionados a 100 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 50 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 50 cm.



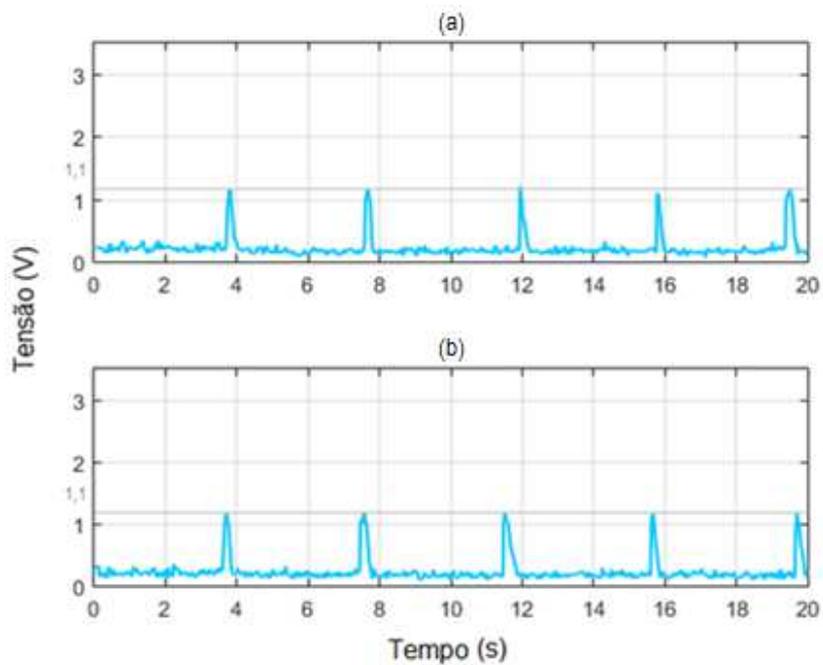
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.16: Medição aos pares para tubulação com suporte triplo com os nós posicionados a 60 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 30 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 30 cm.



Fonte: Próprio autor.

Figura 5.17: Medição aos pares para tubulação com suporte triplo com os nós posicionados a 100 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 50 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 50 cm.

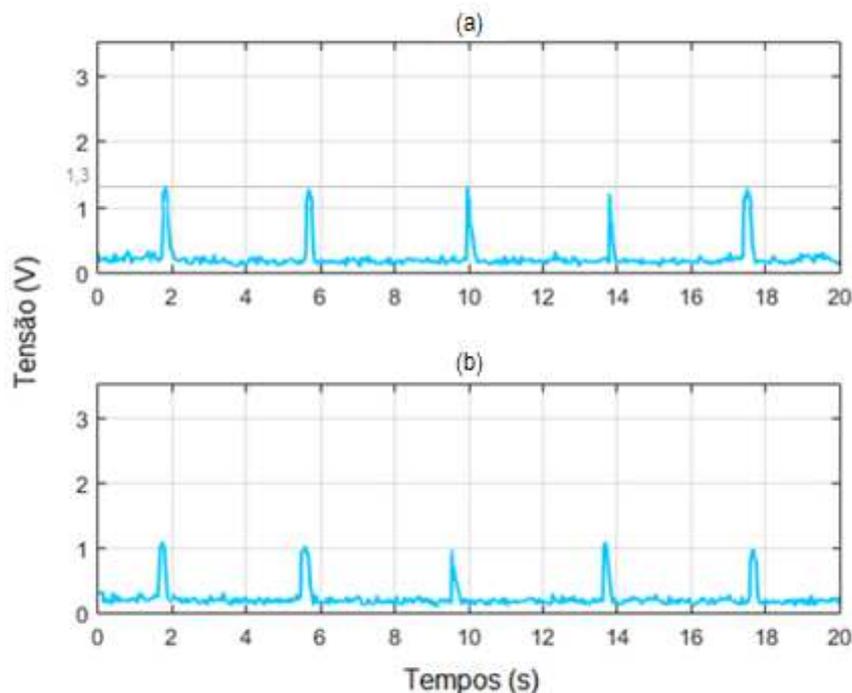


Fonte: Próprio autor.

Deve-se observar que ao se aumentar a distância dos nós-sensores a origem dos golpes do martelo, há uma atenuação na amplitude do sinal monitorado decorrente do amortecimento da estrutura, e não pela presença da incrustação, como era o esperado. Observa-se também, neste caso, que os sinais obtidos da tubulação com suporte apresentaram valores médios de amplitudes menores do que o tubo apoiado no solo. Tal fato pode ser explicado pela massa da tubulação sem suporte, embora apresente uma maior espessura e menor diâmetro do tubo, e pelo fator da tubulação está apoiada no solo, o que facilita a dissipação da energia, dificultando a propagação da onda. Isto reforça o conceito de reajustar a força de impacto para um valor mais adequado sempre que for se testar uma nova estrutura.

Entretanto, mesmo para nós-sensores posicionados equidistantes do martelo (ambos a 30 cm) na tubulação de suporte triplo, observou-se uma atenuação nos valores obtidos no nó 2, o que implica na presença da incrustação nesse ponto (Figura 5.18). Esta foi simulada utilizando-se uma pedra de calcário, similar ao material incrustante encontrado em algumas tubulações que transportam água.

Figura 5.18: Medição aos pares para tubulação com suporte triplo com os nós posicionados a 60 cm entre si: (a) nó 1 posicionado a esquerda do martelo distando 30 cm; (b) nó 2 posicionado a direita do martelo distando 30 cm e detectada a presença de incrustação.



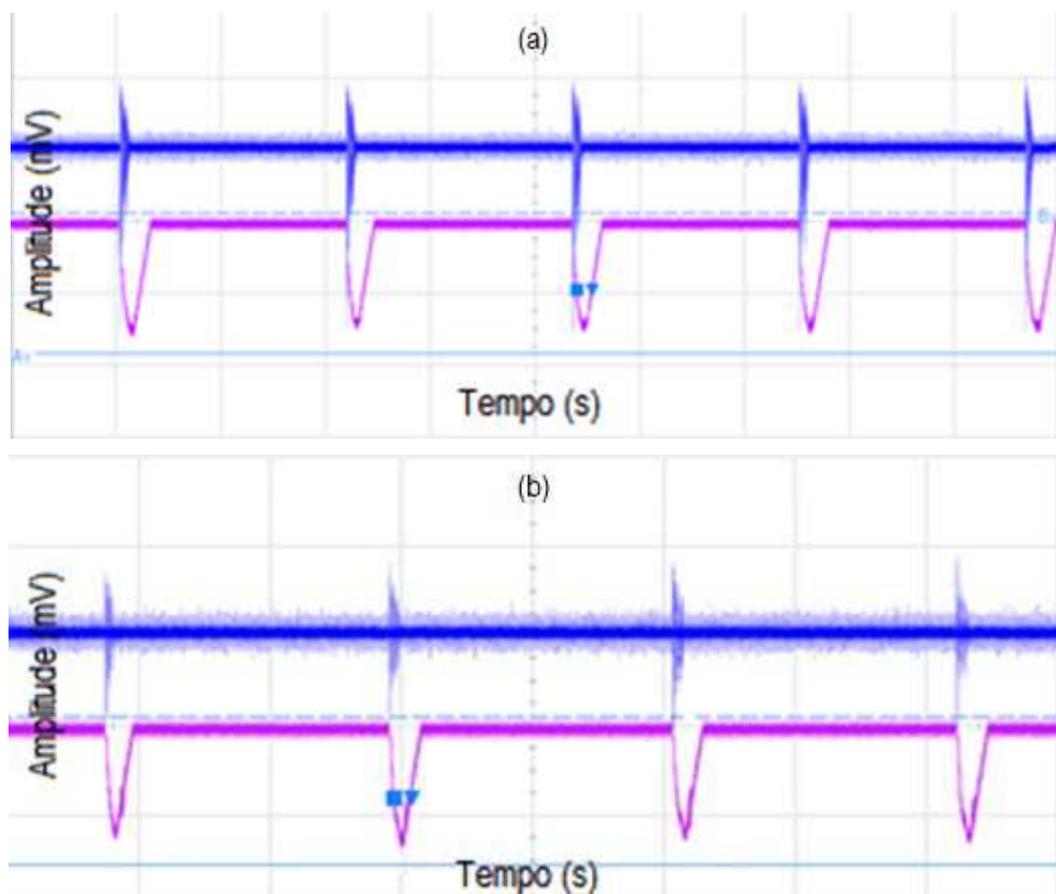
Fonte: Próprio autor.

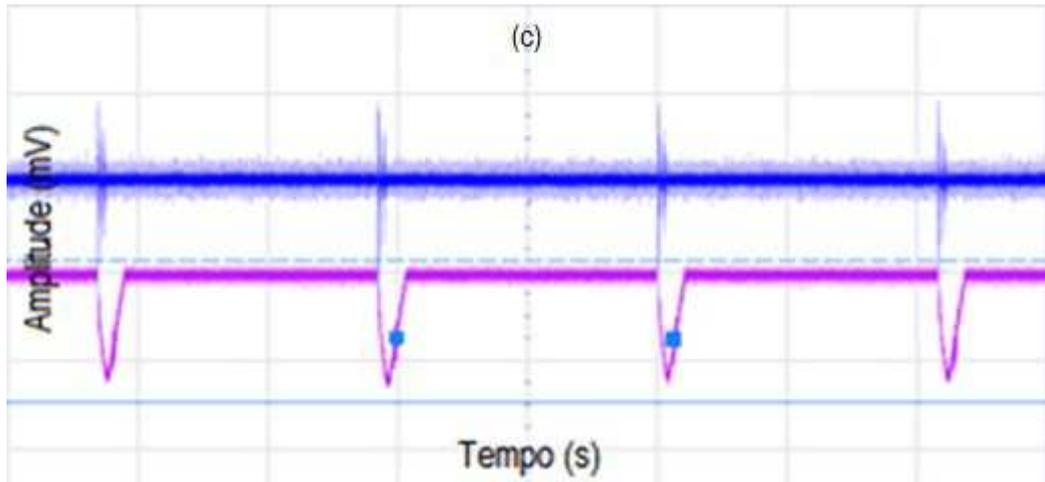
Observando a redução nas amplitudes dos sinais adquiridos, pode-se detectar a presença da incrustação, desde que se tome como referência o sinal de maior amplitude, ou seja, o valor máximo da amplitude do sinal de vibração na tubulação. De tal forma, uma atenuação no valor do sinal monitorado no outro nó, indicará a presença de uma camada de incrustação, que quanto maior for, menor será o valor máximo do sinal observado.

5.3.2 Detecção Acústica

Com metodologia análoga ao teste com acelerômetro, o martelo golpeia a estrutura sob teste e os sinais de saída são capturados, porém substituindo o nó-sensor pelo microfone, os resultados foram obtidos através do osciloscópio digital, e seus comportamentos estão ilustrados na Figura 5.19.

Figura 5.19: Sinais adquiridos do microfone (azul) e acelerômetro (roxo). (a) 800 mV de amplitude e 33 ms de tempo de decaimento para a camada de 0 mm de resina; (b) 700 mV de amplitude e 28 ms de tempo de decaimento para 5 mm de resina; (c) 600 mV de amplitude e 23 ms de tempo de decaimento para 10 mm de resina.



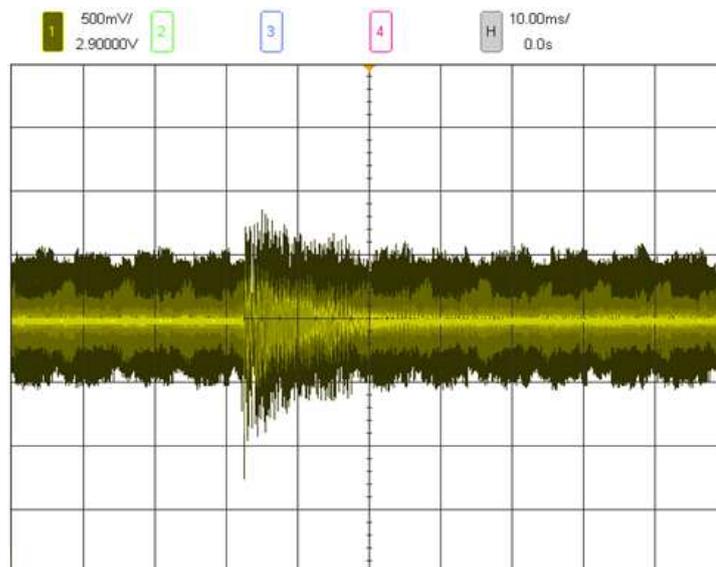


Fonte: Próprio autor.

Neste caso, o sinal sonoro captado pelo microfone apresenta tempo de decaimento de 33 ms, ou seja, essa é a assinatura para a tubulação através da excitação do martelo. Como o tempo de decaimento é afetado pela presença da camada de incrustação, com o aumento da espessura desta camada, o tempo de decaimento do sinal torna-se a característica mais importante, reduzindo para, aproximadamente, um valor de 28 ms e 23 ms de tempo de decaimento para 5 mm e 10 mm de espessura de incrustações, respectivamente.

Entretanto, ao se realizar experimentos com a planta de simulação industrial, o ruído proveniente do funcionamento do motor dificultou a leitura do tempo de decaimento, como pode ser visto na Figura 5.20.

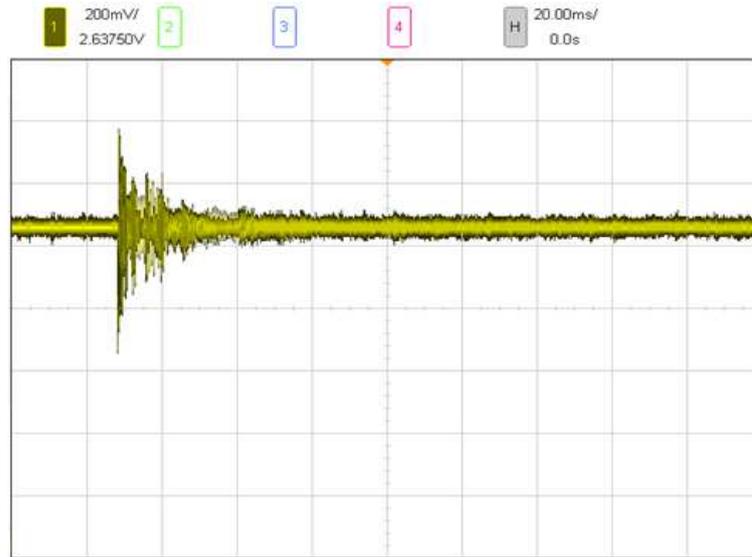
Figura 5.20: Detecção de incrustação acústica com ruído.



Fonte: Próprio autor.

Para eliminar o ruído ambiente, aplicou-se um filtro passa baixa na entrada do próprio microfone. E a saída obtida voltou a apresentar uma leitura sem ruídos e passível da detecção de envoltória como pode ser visto na Figura 5.21.

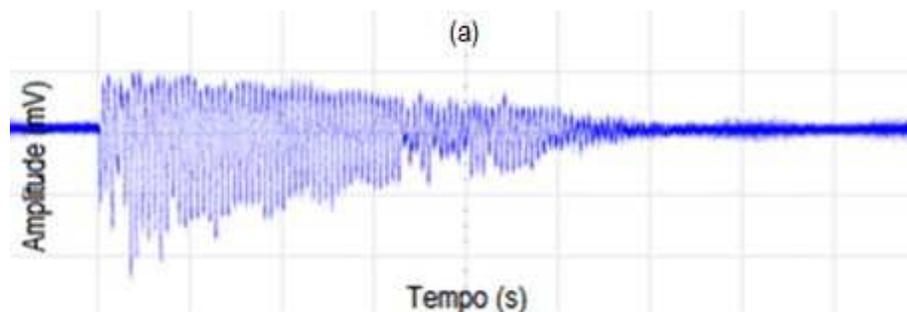
Figura 5.21: Detecção de incrustação acústica filtrada.

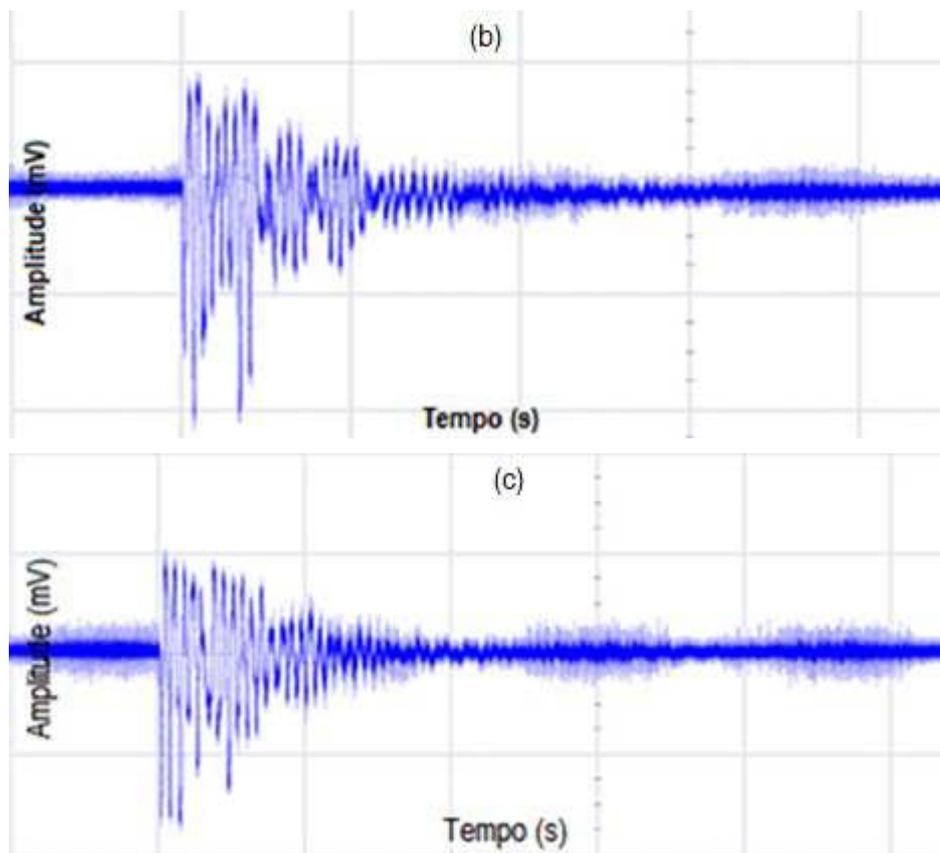


Fonte: Próprio autor.

Para o microfone, o período de decaimento do sinal sonoro considerado será quando a envoltória do sinal atingir 87% do valor máximo da amplitude, assim tem-se 33 ms para a tubulação limpa, sem incrustação, sendo esta sua assinatura. Ao passo que as camadas de incrustação aumentam para 5 e 10 mm, este tempo cai para 28 e 23 ms respectivamente. Estes valores foram obtidos a partir de uma série de experimentos e da Equação (3.8). Este comportamento pode ser observado na Figura 5.22, na qual pode-se ver uma redução no tempo de decaimento do sinal sonoro a medida que se aumenta a camada incrustante.

Figura 5.22: Tempo de decaimento do sinal sonoro para níveis de incrustação: (a) 33 ms para 0 mm de resina; (b) 28 ms para 5 mm de resina; (c) 23 ms para 10 mm de resina.





Fonte: Próprio autor.

Uma vez coletados os tempos de decaimentos do sinal sonoro obtidos pelo microfone e amplitude do sinal vibracional mecânico obtidos pelo acelerômetro, é feita uma análise conjunta dos mesmos para verificar seu grau de correlação, e confirmar sua forte variação conjunta.

5.4 Correlação dos Resultados

Para um experimento com 20 repetições, foi traçado o gráfico de dispersão entre as variáveis, tempo de decaimento do sinal sonoro e amplitude do sinal vibracional. Estes valores estão representados na Tabela 5.5:

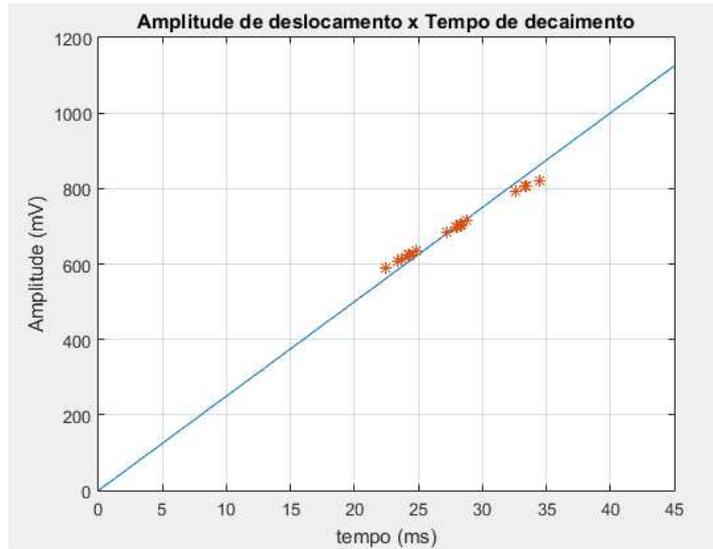
Tabela 5.5: Valores obtidos para medições com acelerômetro e microfone.

n	A (mV)	d (ms)
1	822	34,5
2	791	32,63

3	792	32,63
4	805	33,36
5	793	32,66
6	806	33,42
7	697	27,92
8	699	28,07
9	703	28,25
10	704	28,26
11	685	27,22
12	714	28,78
13	706	28,35
14	623	24,16
15	615	23,72
16	622	24,34
17	591	22,43
18	635	24,82
19	607	23,36
20	624	24,28

Observa-se pelo gráfico representado na Figura 5.23 que a relação entre as variáveis apresenta uma distribuição linear entre si, o que nos permite o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

Figura 5.23: Gráfico de dispersão de amplitude de deslocamento e tempo de decaimento para n=20.



Fonte: Próprio autor.

Calcula-se a correlação das variáveis por Coeficiente de Pearson para os parâmetros medidos na detecção de incrustação pela análise de vibrações. Utilizam-se os valores de amplitude do impacto para o acelerômetro e tempo de decaimento para o microfone. Utilizando da Equação (3.4) obtém-se os seguintes parâmetros para os valores esperados para amplitude e decaimento:

$$\bar{a} = \frac{\sum a_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{20} a_i}{n} = \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_{20}}{20} = \frac{822 + 791 + \dots + 624}{20} = 701,7 \quad (5.1)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{20} d_i}{n} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_{20}}{20} = \frac{34,5 + 32,63 + \dots + 24,28}{20} = 28,16 \quad (5.2)$$

Da Equação 3.2, obtém-se:

$$\begin{aligned} C(A, D) &= \frac{\sum (a_i - \bar{a}) * (d_i - \bar{d})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{20} (a_i - \bar{a}) * (d_i - \bar{d})}{20} = \\ C(A, D) &= \frac{(a_1 - \bar{a}) * (d_1 - \bar{d}) + (a_2 - \bar{a}) * (d_2 - \bar{d}) + \dots + (a_{20} - \bar{a}) * (d_{20} - \bar{d})}{20} = \\ C(A, D) &= \frac{(822 - 701,7) * (34,5 - 28,16) + (791 - 701,7) * (32,63 - 28,16) + \dots + (624 - 701,7) * (24,28 - 28,16)}{20} = \\ C(A, D) &= \frac{762,7 + 399,2 + \dots + 299,2}{20} = \frac{5703}{20} = 285,15 \quad (5.3) \end{aligned}$$

Da Equação 3.3, chega-se a:

$$S_a^2 = \frac{\sum D_a^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{20} (a_i - \bar{a})^2}{20} = \frac{14472 + 7974,5 + \dots + 5944,4}{20} = \frac{112650}{20} = 5632,5 \Rightarrow$$

$$S_a = \sqrt{5632,5} = 75,05 \quad (5.4)$$

$$S_t^2 = \frac{\sum D_t^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^{20} (t_i - \bar{t})^2}{20} = \frac{40,2 + 19,98 + \dots + 15,05}{20} =$$

$$S_t^2 = \frac{288,9}{20} = 14,44 \Rightarrow$$

$$S_t = \sqrt{14,44} = 3,801 \quad (5.5)$$

E por fim, de Equação 3.1, obtém-se o coeficiente de correlação de Pearson:

$$r = \frac{C(A,T)}{S_a * S_t} = \frac{285,15}{75,05 * 3,801} = 0,9996 \quad (5.6)$$

Nota-se que por seu valor obtido, as variáveis em questão são altamente correlacionadas. No entanto ainda pode-se avaliar o grau de confiabilidade do coeficiente de Pearson, verificando seu valor segundo o teste de estatística dado pela Equação 3.5:

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,9996\sqrt{20-2}}{\sqrt{1-0,9996^2}} = \frac{4,2409}{0,02} = 212,05 \quad (5.7)$$

Sendo ν o grau de liberdade e n o número de amostras adotado, tem-se $\nu = n - 2$, ou seja, grau de liberdade 18, já que utilizou-se 20 amostras, e de acordo com a tabela de t Student observada em sua representação reduzida na Tabela 5.6, as variáveis são altamente correlacionadas para uma confiabilidade acima de 99,9%.

Tabela 5.6: Valores para distribuição t de Student (tabela reduzida $1 \leq n \leq 2$ e $17 \leq n \leq 19$).

Bicaudal	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99,5%	99,8%	99,9%
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
(...)											
17	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,222	3,646	3,965
18	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,197	3,610	3,922
19	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,174	3,579	3,883

De fato, constata-se que as medições são altamente correlacionadas, de modo que se tornaria dispendioso repetir os testes para mais amostras, visto que os valores de correlação das variáveis são altamente relacionados, acima de 99,9%, para apenas 20 amostras.

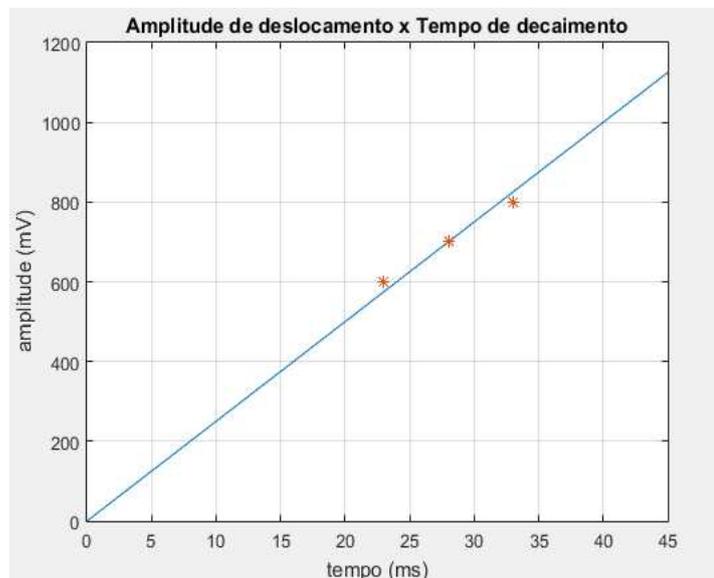
Repete-se então a análise dispondo de apenas 3 amostras, ou seja, é feita uma avaliação tomando-se como base os 3 valores médios correspondentes de amplitude vibracional e tempo de decaimento. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Valores obtidos para medições com acelerômetro e microfone.

n	A (mV)	d (ms)
1	800	33
2	700	28
3	600	23

Observa-se pelo gráfico representado na Figura 5.24 que a relação entre as variáveis apresenta uma distribuição linear entre si, o que nos permite o cálculo do coeficiente de auto correlação de Pearson.

Figura 5.24: Gráfico de dispersão de amplitude de deslocamento e tempo de decaimento para n=3.



Fonte: Próprio autor.

Obtém-se a correlação por Coeficiente de Pearson para os parâmetros medidos na detecção de incrustação pela análise de vibrações. Utilizam-se os valores de amplitude do impacto para o acelerômetro e tempo de decaimento para o microfone. Utilizando a Equação

3.4 obtém-se os seguintes parâmetros para os valores esperados para amplitude e tempo de decaimento:

$$\bar{a} = \frac{\sum a_i}{n} = \frac{\sum_i^n a_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^3 a_i}{n} = \frac{a_1+a_2+a_3}{3} = \frac{800+700+600}{3} = 700 \quad (5.8)$$

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n} = \frac{\sum_i^n d_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^3 d_i}{3} = \frac{d_1+d_2+d_3}{3} = \frac{33+28+23}{3} = 28 \quad (5.9)$$

Da Equação 3.2, obtém-se:

$$\begin{aligned} C(A, D) &= \frac{\sum (a_i - \bar{a}) * (d_i - \bar{d})}{n} = \frac{\sum_{i=1}^3 (a_i - \bar{a}) * (d_i - \bar{d})}{3} = \\ C(A, D) &= \frac{(800-700)*(33-28) + (700-700)*(28-28) + (600-700)*(23-28)}{3} = \\ C(A, D) &= \frac{100*5 + 0 + (-100)*(-5)}{3} = \frac{1000}{3} = 333,3 \end{aligned} \quad (5.10)$$

Da Equação 3.3, chega-se a:

$$\begin{aligned} S_a^2 &= \frac{\sum D_a^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^3 (a_i - \bar{a})^2}{3} = \frac{10000+0+10000}{3} = 6666,7 \Rightarrow \\ S_a &= \sqrt{6666,7} = 81,65 \end{aligned} \quad (5.11)$$

$$\begin{aligned} S_t^2 &= \frac{\sum D_t^2}{n} = \frac{\sum_{i=1}^3 (t_i - \bar{t})^2}{3} = \frac{(33-28)^2 + (28-28)^2 + (23-28)^2}{3} = \\ S_t^2 &= \frac{25+0+25}{3} = \frac{50}{3} = 16,67 \Rightarrow \\ S_t &= \sqrt{16,67} = 4,083 \end{aligned} \quad (5.12)$$

E por fim, da Equação 3.1, obtém-se o coeficiente de correlação de Pearson:

$$r = \frac{C(A, T)}{S_a * S_t} = \frac{333,3}{81,65 * 4,083} = 0,9997 \quad (5.13)$$

Nota-se que por seu valor obtido, as variáveis em questão são altamente correlacionadas. No entanto ainda pode-se avaliar o grau de confiabilidade do coeficiente de Pearson, verificando seu valor segundo o teste de estatística dado pela Equação 3.5:

$$t_c = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{0,9997\sqrt{3-2}}{\sqrt{1-0,9997^2}} = \frac{0,9997}{0,0245} = 40,80 \quad (5.14)$$

Com $\nu = n - 2$, ou seja, grau de liberdade 1, já que utilizou-se 3 amostras, e de acordo com a tabela de t Student observado em sua representação reduzida na Tabela 5.8, as variáveis são altamente correlacionadas para uma confiabilidade de até 98%.

Tabela 5.8: Valores para distribuição t de Student (tabela reduzida $1 \leq n \leq 5$).

Bicaudal	50%	60%	70%	80%	90%	95%	98%	99%	99,5%	99,8%	99,9%
1	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,71	31,82	63,66	127,3	318,3	636,6
2	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	14,09	22,33	31,60
3	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	7,453	10,21	12,92
4	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	5,598	7,173	8,610
5	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	4,773	5,893	6,869

Observa-se que ao aumentar o número de amostras, o valor obtido para a estatística de teste necessário para superar o valor da tabela de Student, se torna cada vez menor. Portanto, ao aumentar o número de amostras, diminui-se o número de exigência do grau de correlação.

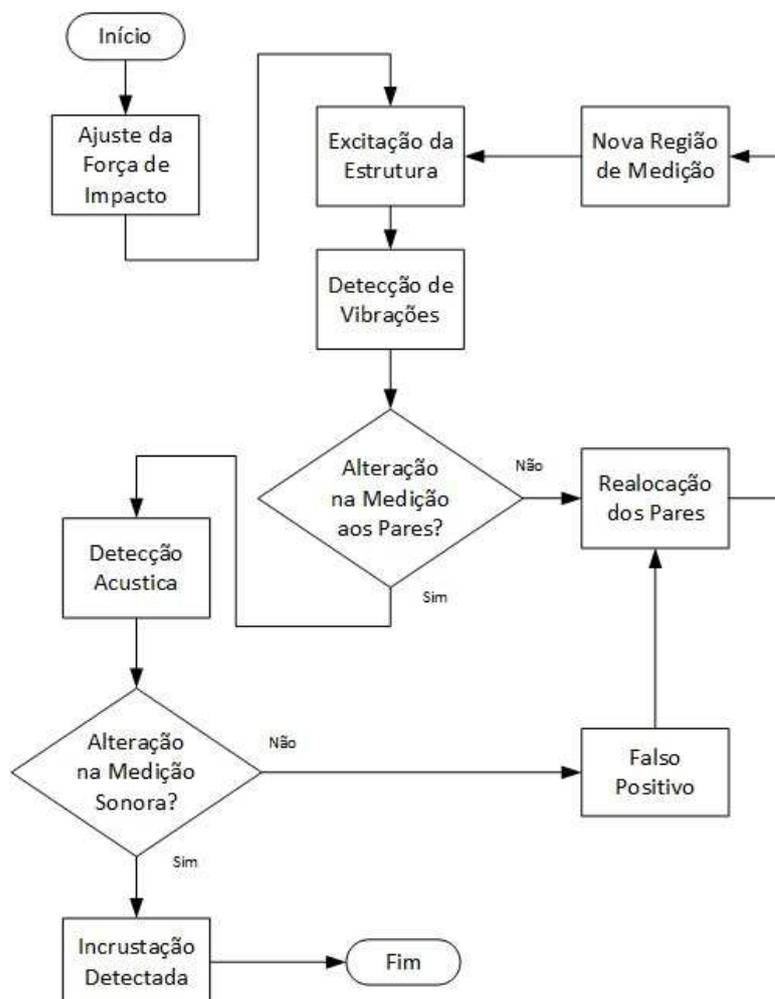
Com 3 amostras apenas, tomando por base os valores referência de período de decaimento e amplitude vibracional, já obteve-se uma correlação de 98%. Nesse ponto, não adianta repetir o teste para um grandioso número de amostras, salvo que uma vez comprovada o alto grau de correlação das grandezas, aumentar o número de amostras só vai corroborar que suas variações são intrinsecamente conjuntas.

Este parâmetro nos dá embasamento para o passo seguinte: uma vez que as grandezas são correlatas, suas variações implicarão na presença da incrustação, e mais, além da especulação de incrustação absoluta e relativa, pode-se agora detectar a presença da incrustação. Isto se dá pelo fato de possuírem alto grau de variação conjunta o que implica numa ocorrência simultânea do fenômeno.

5.5 Detecção vibracional mecânica e acústica

O procedimento de detecção de incrustação é dado em duas etapas: primeiro verifica-se a medição aos pares para agilizar as aferições e verificar se há alterações na tubulação. Em seguida, se necessário, realiza-se o teste acústico para confirmar se as alterações observadas no sinal do acelerômetro é um falso positivo ou presença de incrustação. Esta última apenas será confirmada se houver alteração conjunta em ambas as grandezas monitoradas: amplitude vibracional do acelerômetro e tempo de decaimento do sinal sonoro do microfone. O procedimento de detecção está apresentado no fluxograma na Figura 5.25.

Figura 5.25: Fluxograma do procedimento de detecção de incrustação



Fonte: Próprio autor.

5.5.1 Procedimento de Detecção

O procedimento de detecção, apesar de não utilizar assinatura da tubulação, segue um passo a passo para ajustar sistema de monitoramento. Uma vez que este é adaptável para qualquer tubulação metálica, se faz necessário um ajuste inicial de calibração do sistema de monitoramento, para iniciar as medições com referências iniciais que podem ser alteradas no decorrer dos testes com as variações das grandezas medidas. Os passos, ilustrados na Figura 5.25, são descritos a seguir:

1. *Ajuste da força de impacto*: fixa-se o martelo à tubulação utilizando sua braçadeira ajustável de velcro, aplica-se a força padrão de 25 N. Se necessário for, aumenta-se ou diminui a força aplicada a depender da fragilidade da tubulação, ou se os valores gráficos dos sensores monitorados estiverem ilegíveis (sinais lidos na tela do computador passíveis de reconhecimento das variações do sinais pelo operador);
2. *Excitação da estrutura*: posiciona-se os pares de nós-sensores com acelerômetros equidistantes do martelo de impacto a uma distância variável, que dependerá do alcance obtido pelos sensores para que se tenha uma leitura dos gráficos legível. Em seguida, golpeia-se a tubulação com o martelo;
3. *Detecção de vibração*: obtém-se os níveis de amplitude do sinal de vibração mecânica monitorados pelos acelerômetros posicionado aos pares equidistantes do martelo. Caso não haja alteração nos sinais obtidos, segue-se para realocação dos pares, se houver, segue-se para detecção acústica afim de confirmar a leitura obtida;
4. *Realocação dos pares*: caso os pares de acelerômetros não tenham detectado alterações na medição diferencial, serão realocados para outra área da tubulação, de modo a cobrir a maior distância possível alcançada pelo martelo;
5. *Nova região de medição*: uma nova área de testes diferente da área anterior em que não se obteve diferença nos sinais obtidos pelos acelerômetros;
6. *Detecção acústica*: após detectada alteração nos sinais monitorados pelo acelerômetros, realiza-se essas medições em dois instantes: coloca-se o martelo e o microfone (este a uma distância máxima de 2 mm do martelo e direcionado ao local do golpe) no ponto de cada nó-sensor com acelerômetro para medir, em dois momentos distintos, o sinal sonoro emitido nos locais de medição. Se não houver variação no sinal sonoro, implica-se num falso positivo, voltando o processo de medição para nova realocação dos pares. Em caso de variação nas medições do microfone, confirma-se a detecção de incrustação;

7. *Incrustação detectada*: por ter-se medido a variação dos parâmetros amplitude e tempo de decaimento dos sinais de vibração mecânica e sonora, conclui-se que há incrustação pela variação conjunta das grandezas monitoradas, já que variam fortemente de maneira conjuntas, a presença do material incrustado tem que levar a alteração das grandezas medidas.

Deve-se destacar que a detecção é dada de maneira direta pela observação dos gráficos em tempo real obtidos das medições aos pares pelos sensores utilizados. O objetivo não é obter valores específicos para amplitude e tempo de decaimento, mas verificar graficamente de maneira rápida e efetiva que há material incrustante dentro da tubulação. Por isso, distância entre os pares e intensidade da força de impacto são variáveis e ajustáveis pelo operador, e para uma mesma região, podem ser feitos diversos testes comparativos alterando esses valores.

5.5.2 Testes realizados no LIEC

Os testes foram realizados na plataforma de testes do LIEC–UFCG, nestes testes, é simulada uma instalação industrial com áreas de tubulação com e sem incrustação. Neste teste, também é possível realizar com o fluido em movimento, no caso, água, para validar o funcionamento da técnica com uma instalação em funcionamento.

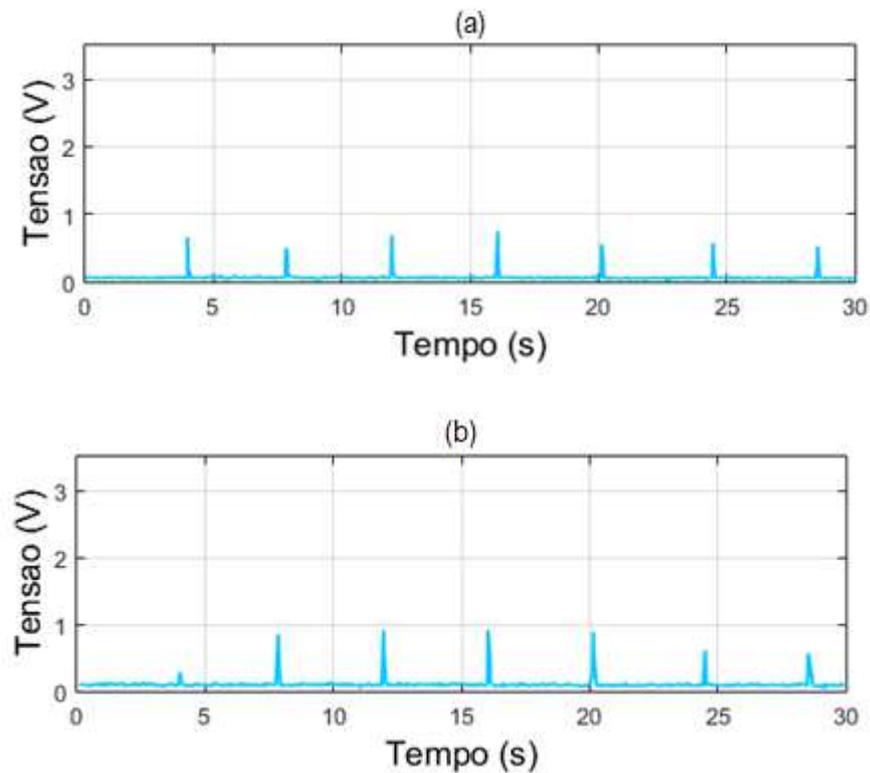
Os testes foram realizados em 3 momentos: tubulação limpa; falsos positivos e presença de incrustação. Em todos, utilizou-se o fluxo máximo de água corrente, na expectativa de simular ao máximo um ambiente de fábrica: vibração da tubulação pelo condução do líquido e ruído originário dos equipamentos em execução.

O objetivo deste teste é confirmar a teoria da técnica, verificando que a incrustação ocorrerá apenas com a variação das duas grandezas medidas. Para os casos de tubulação limpa obtém-se sinais sem variações para os pares de sensores com acelerômetro utilizados e alterações apenas no sinal vibracional para a situação de falso positivo.

Tubulação limpa

Ao ser realizado a medição com o par de acelerômetros, os sensores foram postos distando de 25 cm da origem dos golpes do martelo, e o resultado obtido pode ser visto na Figura 5.26.

Figura 5.26: Detecção vibracional numa tubulação limpa no LIEC: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 25 cm; (b) Comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 25 cm.



Fonte: Próprio autor.

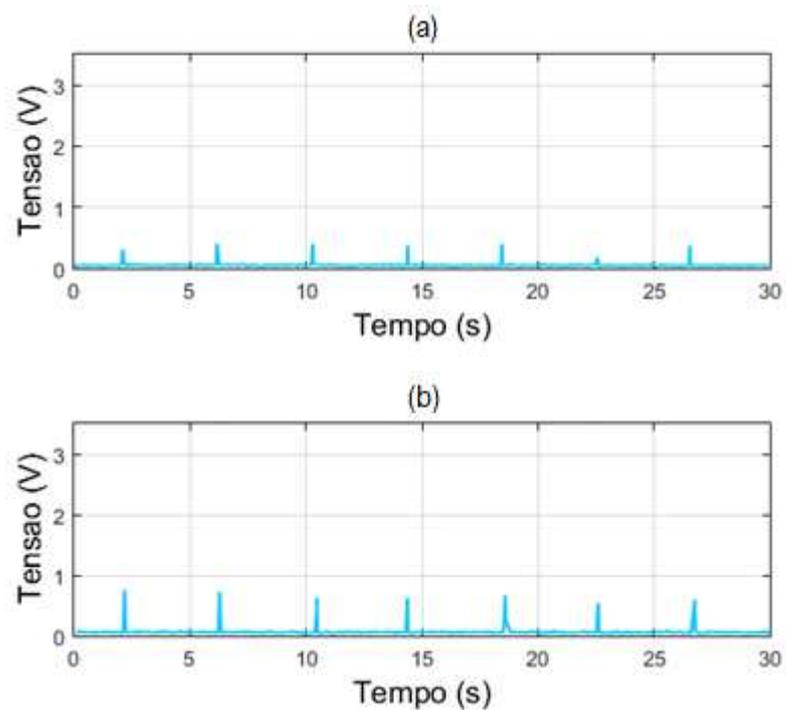
Desconsiderando-se os valores discrepantes, provavelmente decorrentes de uma possível perda de dados durante a transmissão sem fio, ambos possuem a mesma leitura por apresentarem a média dos valores máximos dentro da tolerância, e portanto a tubulação está limpa ou com a mesma camada incrustante. Porém como a incrustação não ocorre de modo homogêneo, desconsidera-se a segunda opção, concluindo-se assim que o tubo está limpo. Desse modo, não se faz necessário a medição acústica. Os valores discrepantes apresentados nos gráficos, como o primeiro pico na Figura 5.26 (b), são desconsiderados, pois apresentam comportamento diferente dos demais picos obtidos no mesmo nó.

Tubulação limpa e falso positivo

É possível que se obtenha falsos positivos na leitura. Fatores que podem levar a uma detecção errônea da incrustação são disposições da tubulação, como a localização dos suportes, mencionado anteriormente, junções, pontos de solda e a presença de válvulas ou

sensores ao longo do tubo entre os acelerômetros e o martelo. Portanto, deve-se evitar esses pontos ao se realizar a medição. Porém, nem sempre é possível, e neste teste, foi realizado uma detecção de falso positivo originada pelo posicionamento do segundo nó sensor após a junção da tubulação, com ambos distando 37,5 cm do golpe do martelo. O resultado está ilustrado na Figura 5.27.

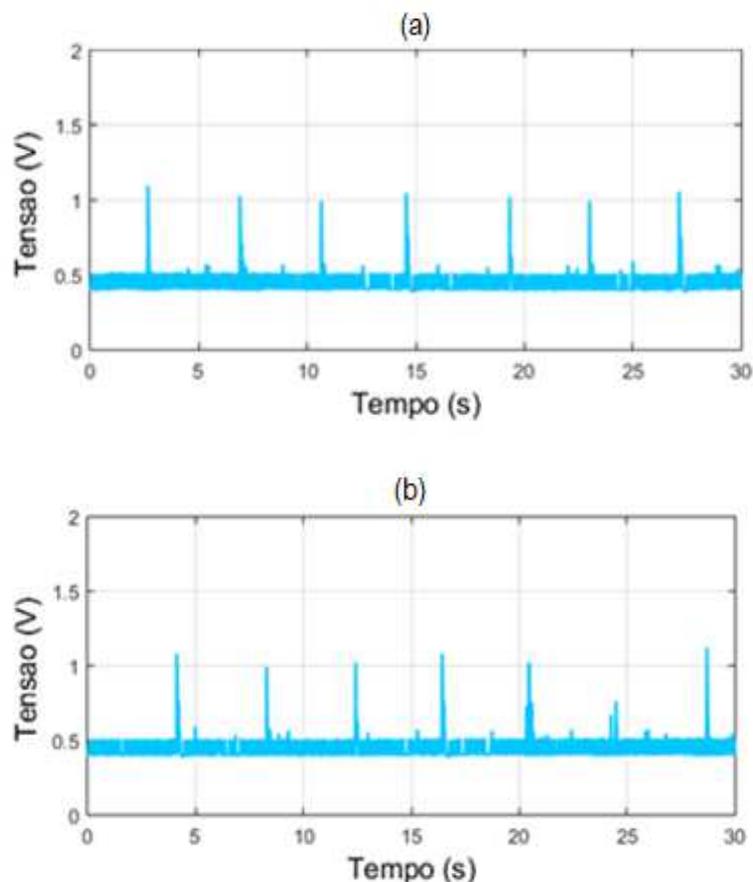
Figura 5.27: Detecção vibracional numa tubulação limpa na qual ocorre falso positivo realizado no LIEC: (a) nó 1 após um obstáculo (junção da tubulação) posicionado entre ele e o martelo; (b) nó 2 posicionado num caminho livre entre ele e o martelo.



Fonte: Próprio autor.

Assim, segundo o método da detecção de incrustação pela medição dos pares de acelerômetros, por apresentar média das amplitudes máximas variadas, conclui-se que há presença de incrustação. Entretanto, para confirmar se de fato há incrustação, repete-se o teste acústico com a detecção pelo microfone, e o resultado obtido está apresentado na Figura 5.28:

Figura 5.28: Detecção acústica para falso positivo: (a) nó 1 após um obstáculo (junção da tubulação) posicionado entre ele e o martelo; (b) nó 2 posicionado num caminho livre entre ele e o martelo.



Fonte: Próprio autor.

Como foi apresentado o mesmo comportamento da medição acústica para ambos os casos, conclui-se que não há incrustação e foi detectado um falso positivo, pois, foi visto que por serem medidas fortemente correlatas, quando ocorrer alteração na detecção da vibração mecânica, deve-se também ocorrer alteração no sinal sonoro captado pelo microfone. Do contrário, não há incrustação. Aqui deve-se destacar alguns pontos:

- A amplitude vibracional obtida pela detecção com acelerômetros foi menor que o caso anterior, de fato, desta vez os nós se posicionam mais distantes dos golpes do martelo: de 25 para 37,5 cm;
- Ocorre atenuação do sinal medido pós junção devido a energia fornecida pelo golpe não percorrer o tubo até chegar no ponto de detecção do nó, pois ela possui uma parte dissipada na junção;
- Embora o nó-sensor do acelerômetro detecte um falso positivo, o microfone não o faz, pois o sinal sonoro emitido pelo tubo é o mesmo em toda a tubulação, visto que

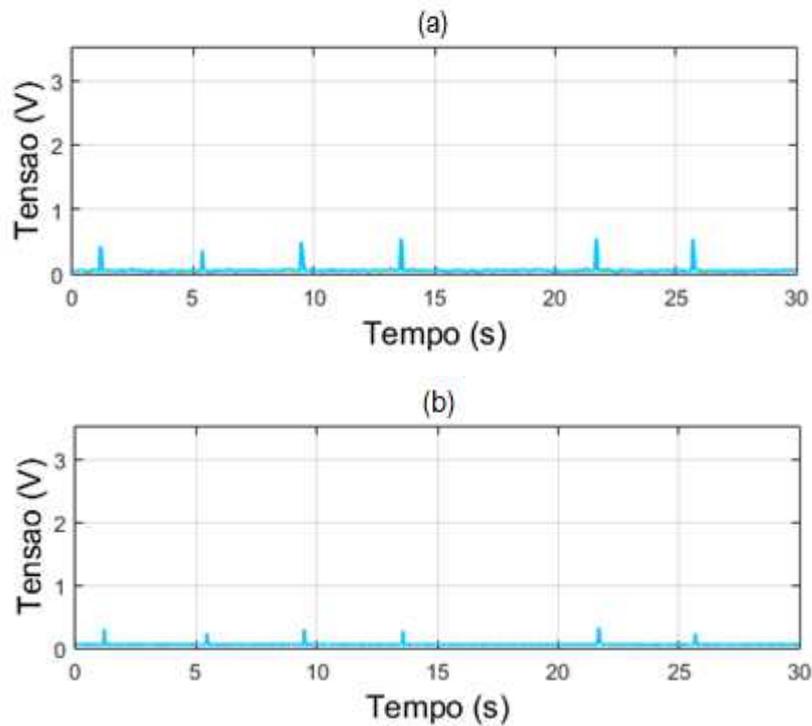
depende apenas de seu material constituinte e não há material incrustante que mude sua composição;

- No gráfico da Figura 5.28 (b) nota-se uma medida obtida pelo microfone distinta demais, este comportamento pode ser explicado por uma perda na medição do microfone, por não estar direcionado ao local do golpe e ter sido necessário reajustá-lo.

Teste com material incrustante

O tubo limpo foi substituído pelo tubo com material incrustado. A distribuição do incrustante internamente é feita de modo irregular, de forma tal que seu acúmulo se deu crescente e contínuo de uma extremidade a outra da secção tubular, quase que preenchendo o interior do tubo. Os resultados obtidos neste teste são apresentados na Figura 5.29.

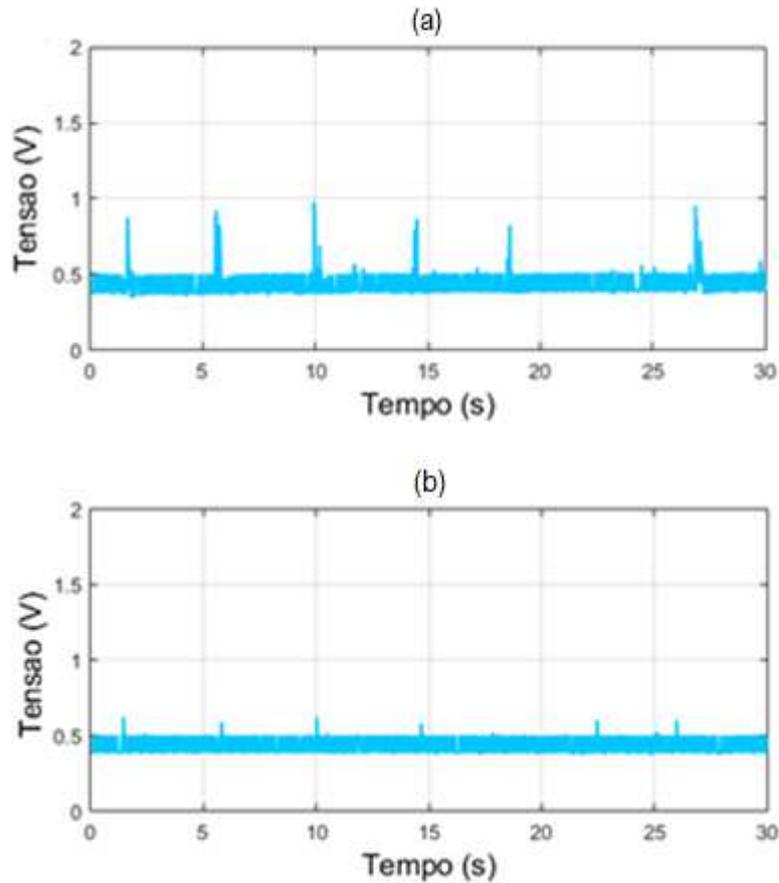
Figura 5.29: Detecção vibracional para uma tubulação fortemente incrustada: (a) Nó 1 posicionado na região com menor camada de material incrustante; (b) Nó 2 posicionado equidistante ao martelo, na região de maior concentração de incrustação.



Fonte: Próprio autor.

Pela detecção com acelerômetro, pode-se observar a presença da incrustação, neste instante, verifica-se o teste de detecção acústica, para comprovar a presença da incrustação (Figura 5.30).

Figura 5.30: Detecção acústica para uma tubulação fortemente incrustada: (a) Nó 1 posicionado na região com menor camada de material incrustante; (b) Nó 2 posicionado equidistante ao martelo, na região de maior concentração de incrustação.



Fonte: Próprio autor.

Observa-se que há grande atenuação no sinal sonoro na segunda medição, por consequente, forte atenuação do tempo de decaimento. Assim, confirma-se a hipótese de presença de incrustação, pois ambos os parâmetros variaram conjuntamente.

5.5.3 Testes realizados no LAMP-UFRN

Os testes do LAMP foram realizados na UFRN, com uma planta industrial em tamanho real. Agora, a técnica é utilizada numa estrutura que simula uma aplicação industrial real, com fluxo de fluido interno e um teste inteiramente cego, já que não tem-se acesso as estruturas internas da planta e não se sabe da ocorrência da incrustação.

Os testes seguiram o mesmo procedimento realizado no LIEC: uma vez determinada variação nos valores médios das máximas amplitudes do acelerômetro, verificar-se-á o sinal sonoro para confirmar a presença da incrustação.

Todas as medições foram realizadas com a tubulação em funcionamento, onde a vazão preenchia 50% da tubulação durante o processo. Os nós-sensores dos acelerômetros se dispuseram equidistantes 50 cm do martelo de impacto.

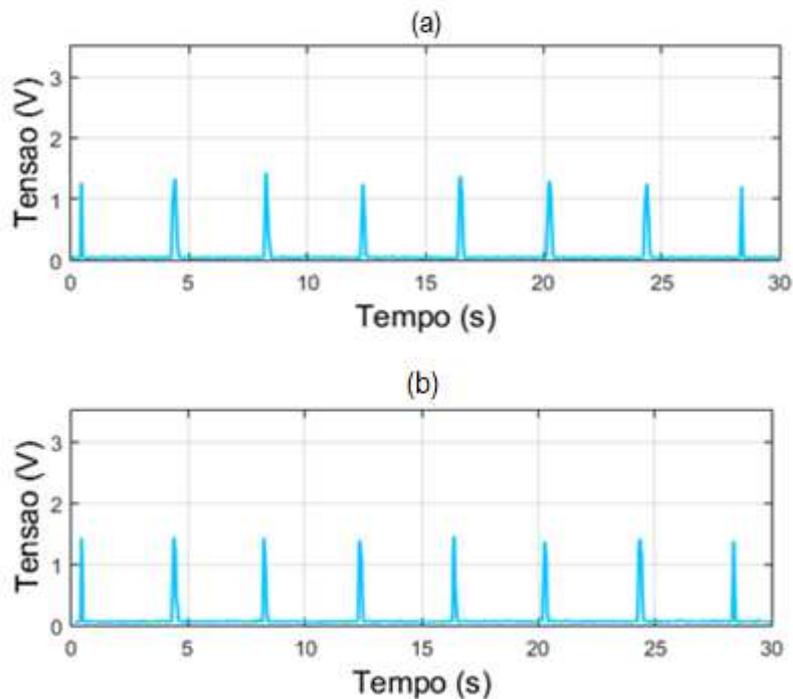
As localidades escolhidas foram estratégicas de modo que pudesse observar o comportamento da tubulação em diversos pontos da estrutura. Foram escolhidos 3 regiões: abastecimento, condução central e duto de resíduos. Em todas, foram realizados testes na tubulação livre, ou seja, distante de suportes e obstáculos como junções e sensores. Já na tubulação central, mais duas disposições dos nós foram adicionadas: nós-sensores posicionados em cima das junções ou após as mesmas.

O objetivo desse teste é verificar a funcionalidade da técnica em funcionamento numa tubulação de tamanho real, realizando testes numa tubulação totalmente desconhecida a fim de detectar se há regiões incrustadas ou se apenas tubulação limpa.

Abastecimento

Os testes nesta área da tubulação foram realizados numa disposição livre entre os nós sensores e o martelo. Os resultados são apresentados na Figura 5.31.

Figura 5.31: Detecção vibracional de tubulação de abastecimento no LAMP: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) Comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.



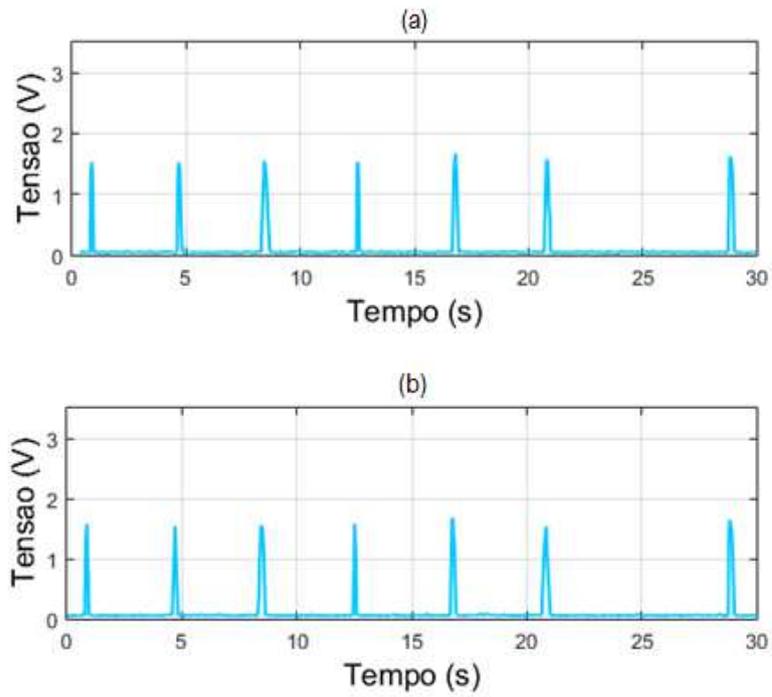
Fonte: Próprio autor

Como os sinais obtidos apresentam o mesmo comportamento, conclui-se que neste ponto da tubulação não há incrustação, e por isso não há necessidade do uso da detecção acústica.

Tubulação central

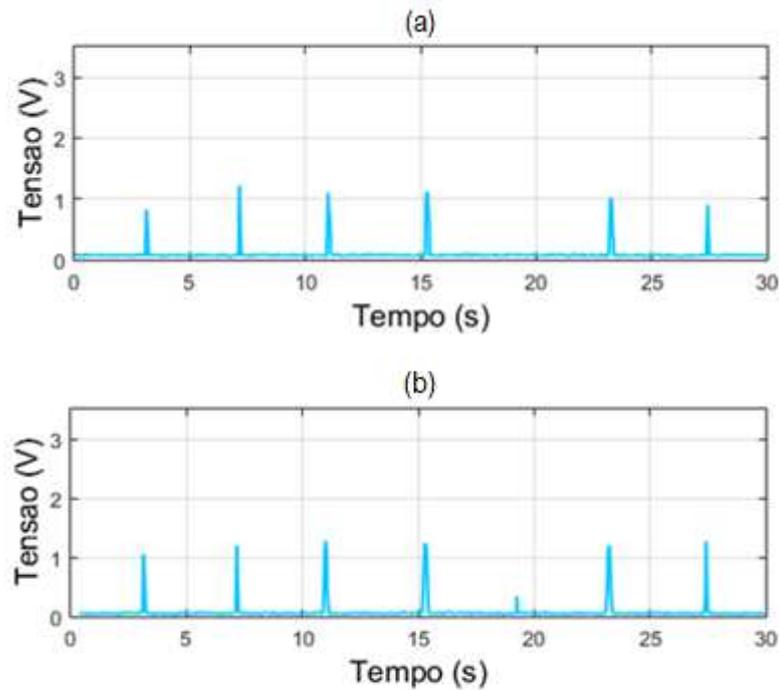
Os testes nesta área da tubulação foram realizados em diferentes configurações devido a disposição de sensores de pressão e junções apresentados ao longo do duto. Novamente, os resultados obtidos não apresentaram alterações e portanto, não houve necessidade de realizar a detecção acústica. Os resultados são apresentados na Figura 5.32 para disposição livre entre os nós sensores e o martelo, na Figura 5.33 para um dos nós posicionado numa curva da tubulação e na Figura 5.34 para os nós posicionados sobre junções na tubulação.

Figura 5.32: Detecção vibracional na tubulação central com disposição livre: (a) comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.



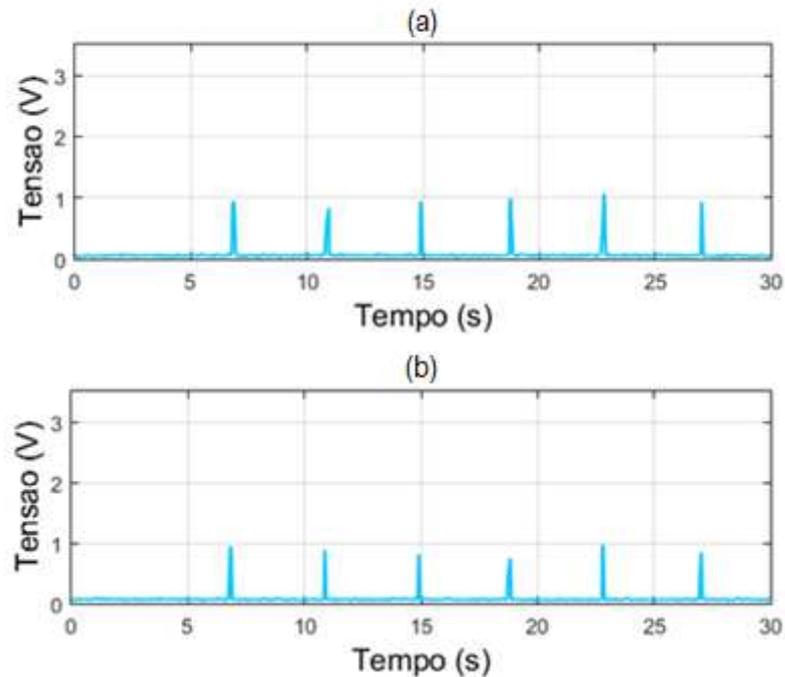
Fonte: Próprio autor.

Figura 5.33: Detecção vibracional na tubulação central com um dos nós-sensores posicionado sobre uma curva: (a) comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.



Fonte: Próprio autor.

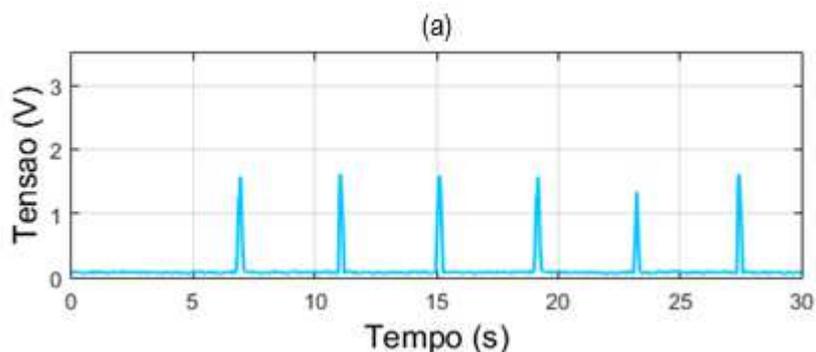
Figura 5.34: Detecção vibracional na tubulação central com nós-sensores posicionados em junções: (a) comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.

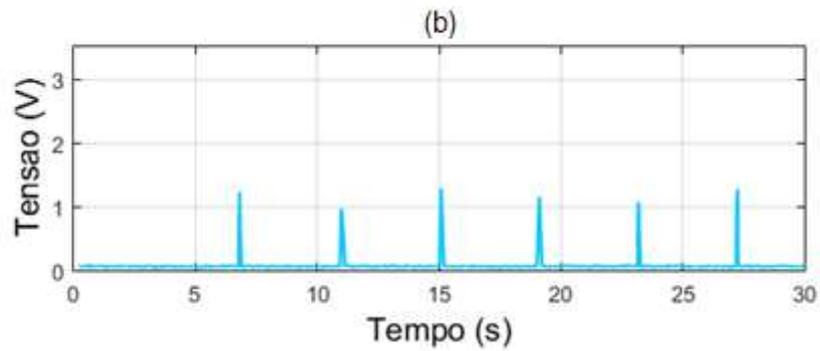


Fonte: Próprio autor.

Foi realizado um teste em que o nó 2 é posto sobre um obstáculo, no caso uma junção da tubulação. O outro nó ficou disposto num caminho livre até o martelo. Mesmo antes de ser executado o teste, já era de se esperar que a amplitude vibracional monitorada no nó 2 (representado na Figura 5.35 (b)) fosse atenuada. Isto se dá devido a dissipação de energia ocorrida nesta região do tubo, por possuir um formato e distribuição de massa diferente do restante da estrutura, afetando a propagação da onda. Portanto, regiões com obstáculos devem ser evitadas para não gerar falsos positivos, embora estes sejam identificados pelo teste acústico, não é interessante gerar esforço desnecessário.

Figura 5.35: Detecção vibracional na tubulação central com um nó-sensor livre e outro posicionado na junção: (a) Nó 1 disposto com caminho livre até o martelo; (b) Nó 2 posicionado sobre uma junção da tubulação.





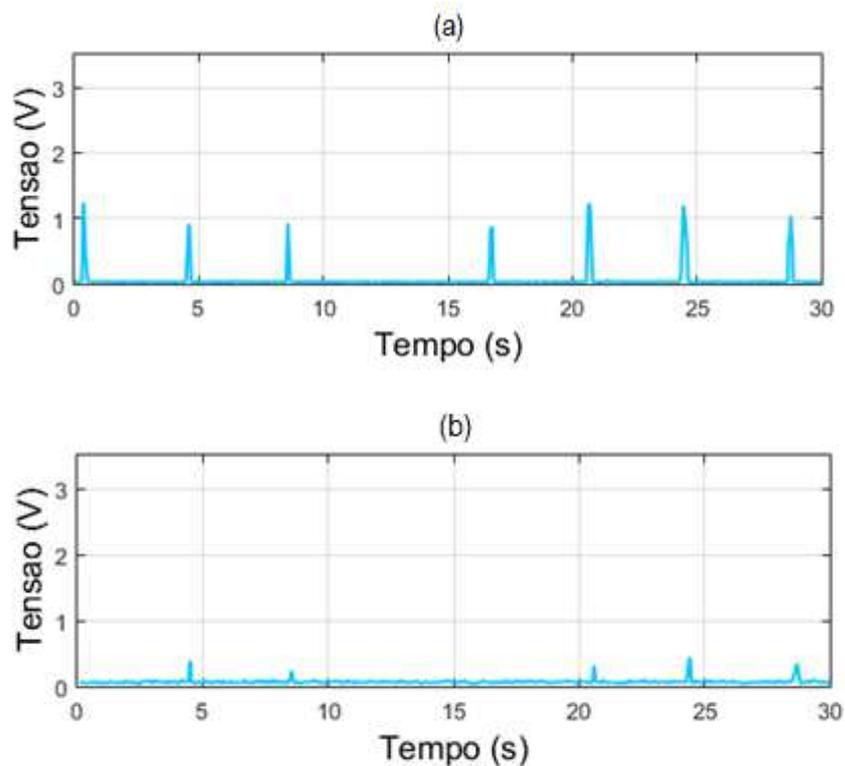
Fonte: Próprio autor.

Por já ser um resultado esperado, o teste de detecção vibracional foi realizado para confirmar a hipótese, portanto não foi realizado o teste de detecção acústica.

Duto de resíduo

Nesta região da tubulação foi detectada incrustação como pode ser visto na Figura 5.36.

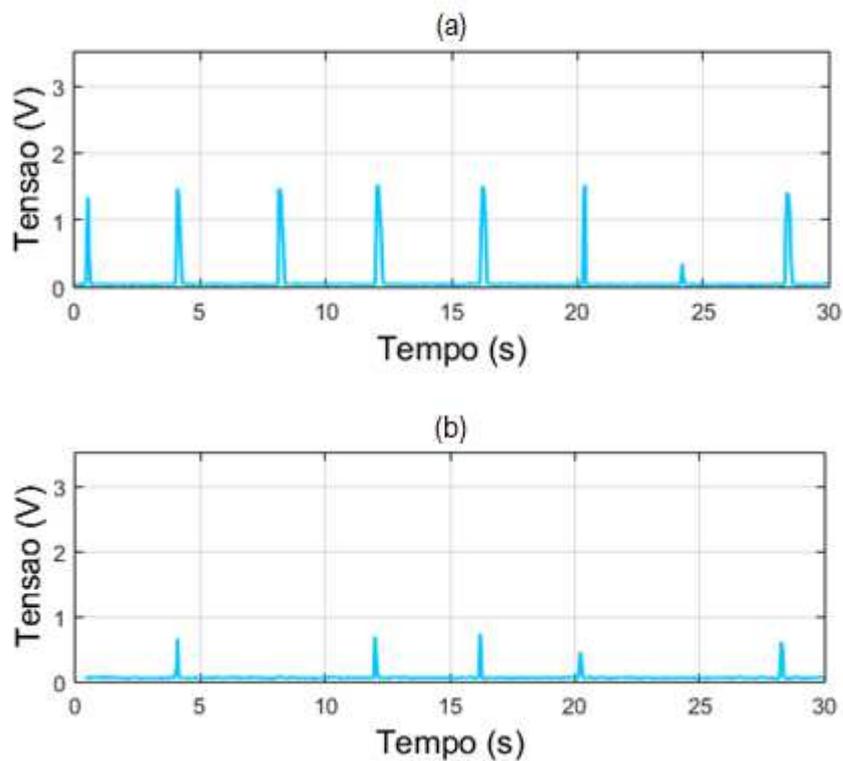
Figura 5.36: Detecção vibracional na tubulação de resíduos: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 50 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 50 cm.



Fonte: Próprio autor.

Uma vez detectada a incrustação, foi repetido o teste diminuindo a distância entre os nós e o martelo para 30 cm, apresentado na Figura 5.37.

Figura 5.37: Detecção vibracional na tubulação de resíduos: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 30 cm; (b) comportamento do nó 2 posicionado a direita do martelo, distando 30 cm.

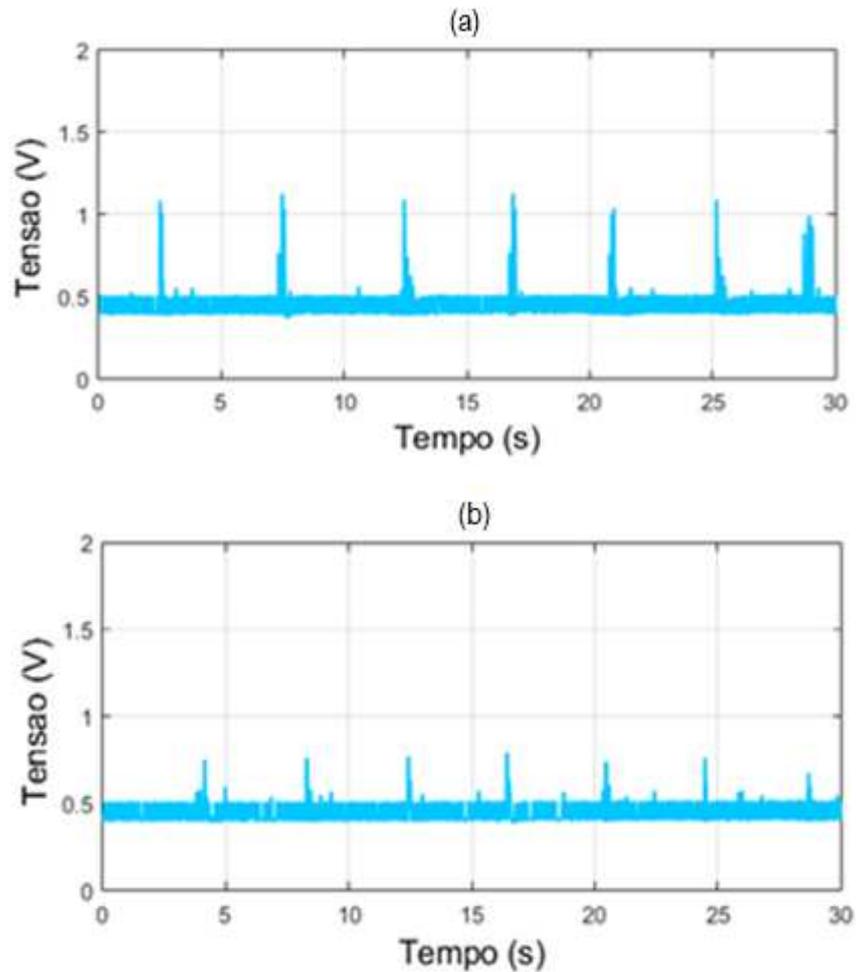


Fonte: Próprio autor.

De fato, era de se esperar que esta região da estrutura apresentasse material incrustante em seu interior já que é um duto de resíduos e era utilizado apenas para escoar os fluidos descartados pós testes experimentais. Por ser esse descarte uma mistura de água e óleo, com o passar dos anos, partes sólidas foram se depositando ao longo da tubulação, e por não haver limpeza no duto dos resíduos, diferente dos demais, foi possível detectar incrustação nesta seção da tubulação.

Para confirmar de fato a presença do material incrustante, realizou-se o teste de detecção acústica, esperando uma variação no tempo de decaimento do sinal sonoro (Figura 5.38).

Figura 5.38: Detecção acústica na tubulação de resíduos: (a) Comportamento do nó 1 posicionado a esquerda do martelo, distando 30 cm; (b) Comportamento do nó 1 posicionado a direita do martelo, distando 30 cm.



Fonte: Próprio autor.

Como o sinal do microfone apresentou um comportamento diferente, um tempo de decaimento reduzido, verificou-se a variação conjunta dos parâmetros fortemente correlatos: amplitude vibracional e tempo de decaimento, o que indica a presença de incrustação.

As conclusões gerais em relação ao trabalho realizado e as sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

Capítulo 6 – Conclusão

O objetivo principal desta tese foi desenvolver uma técnica não invasiva de detecção de incrustação por meio da correlação de sinais vibracionais mecânicos e sonoros decorrentes do impacto do martelo sem a necessidade da assinatura do tubo. O intuito é ter uma técnica capaz de detectar incrustação para uma tubulação metálica apenas ajustado a força de impacto do martelo e sem a necessidade de obter demais características da tubulação.

Para o sistema de excitação, teve-se o equacionamento da força de impacto fiel ao martelo utilizado, de modo que os valores da simulação se mostraram próximos dos valores reais (erro de 0,2%), permitindo assim ajustar adequadamente a força para a tubulação sob teste. Esse ajuste permitiu adaptar a intensidade da força do golpe para cada situação analisada, independentemente de onde se localizaram os nós-sensores ou do tipo de suporte da estrutura sob teste.

A definição do termo incrustação relativa foi revista e sua aplicação redefinida de maneira correta para que se tomasse como base da técnica de detecção aos pares no teste vibracional mecânico com o acelerômetro.

O alto grau de correlação dos sinais sonoros e mecânicos, indicou uma forte e direta correlação conjunta das grandezas tempo de decaimento e amplitude mecânica, indicando que a presença da incrustação ocorre, se e somente se, ambas variarem conjuntamente.

A validade da técnica foi comprovada ao aplicá-la em plantas reais condutoras de fluido sem realização de testes prévios ou obtenção de assinaturas das tubulações. Nos testes realizados no LIEC–UFCG, verificou-se a interferência dos suportes afetando as medições do acelerômetro, gerando falsos positivos que foram comprovados mediante os testes com microfone, nos quais verificou-se que não havia incrustação na estrutura. Em contrapartida, ao substituir a tubulação limpa por uma incrustada, detectou-se pela técnica de medição aos pares a ocorrência da incrustação pela diferença de sinal obtida nos nós sensores submetidos as mesmas condições de teste. E essa alteração foi confirmada nos testes acústicos onde o sinal sonoro adquirido pelo microfone apresentou alterações no tempo de decaimento medido, e por comprovar essa variação conjunta das grandezas fortemente correlacionadas, detectou-se a presença da incrustação.

Nos testes realizados no LAMP–UFRN foi possível determinar e localizar a incrustação, sem interromper o processo de condução do fluido. Este teste realizado numa área externa e em diversos pontos da tubulação com características distintas, permitiu

verificar as mais diversificadas disposições de uma tubulação real como uma tubulação livre de suportes para vibrar mais facilmente, com suportes que interferiam em sua vibração, junções, válvulas e sensores que se configuravam como obstáculos na propagação da onda vibracional. Foi o primeiro e único contato com a tubulação, indicando a aplicabilidade da técnica proposta para qualquer tubulação metálica condutora de fluido, mesmo sem o conhecimento de suas características, apenas ajustando a intensidade da força de impacto. Os resultados obtidos se apresentaram dentro do esperado: ausência de incrustação em setores da tubulação que eram constantemente limpos, falsos positivos em pontos de medições com obstáculos e suportes que afetavam a propagação da onda mecânica, e uma forte presença do material incrustante na tubulação de rejeitos, a qual não recebia manutenção de limpeza.

Assim, a contribuição desta tese foi o desenvolvimento de uma técnica não invasiva capaz de detectar incrustação sem a necessidade de interromper o processo produtivo, e implementá-la num sistema de detecção utilizado em testes de situações reais. O fato de não precisar da assinatura do tubo é um ponto positivo, pois permite que a técnica seja utilizada numa tubulação metálica sem a necessidade de ensaios prévios ou conhecimento das características de uma tubulação limpa. Com os resultados obtidos nos testes, foi comprovado que é possível determinar incrustação de forma não invasiva e sem a necessidade de assinatura da tubulação.

6.1 Trabalhos Futuros e Produção Científica

Algumas sugestões para continuação deste trabalho:

- Aperfeiçoar a técnica desenvolvida, tratando os parâmetros monitorados sob o domínio da frequência.
- Através da variação dos parâmetros vibracionais e sonoros da tubulação, estimar o nível da camada incrustante;
- Estender a técnica desenvolvida para outras tubulações que não metálicas, e verificar sua aplicabilidade.

Produção científica:

- Publicados:
 - Lemos Júnior, L. C., Silva, J. J., Rocha Neto, J. S. *Estimated Impact Force for an Electromagnetic Hammer*. In: Journal of Physics. Conference Series (Online), v.1044, p.012029, 2018.
 - Lemos Júnior, L. C., Silva, J. J., Rocha Neto, J. S. *Vibration analysis for fouling detection using hammer impact test and ZigBee based wireless sensor network*. In: 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2016, Santa Clara. 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2016. p. 1190.

- Submetidos:
 - Lemos Júnior, L. C., Silva, J. J., Rocha Neto, J. S. *Fouling Detection in Metal Pipes Based on Sound and Vibration Correlation*. In: Journal of Control, Automation and Electrical Systems, 2019.
 - Lemos Júnior, L. C., Silva, J. J., Rocha Neto, J. S. *Fouling Detection in Metal Pipes Based on Vibration Analysis Without Pipe Signature*. In: IEEE Latin America Transactions, 2018.

Referências

- [1] E. Cam, M. Lei, I. Kicaarslan, and C. Taplamacioglu. *Defect Detection in a Cantilever Beam from Vibration Data*. Report, Kirikkale University, Faculty of Engineering, Department of Electrical and Electronics., Kirikkale, 2002.
- [2] J. J. Silva. *Desenvolvimento de Técnicas de Detecção de Incrustação Utilizando Métodos Não-Invasivos*. PhD thesis, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil, Dezembro 2008.
- [3] N. J. Carino. *The Impact-Echo Method: An Overview*. In Proceedings of the 2001 Structures Congress and Exposition, Washington, USA, May 2001.
- [4] P. Castelline, G. M. Revel, and L. Scalise. *Measurement of vibrational modal parameters using laser pulse excitation techniques*, volume 35. Elsevier - Measurement, 2004. pp.163-175.
- [5] Y. Champoux, V. Cotoni, B. Paillard, and O. Beslin. *Moment Excitation os Structures Using Two Synchronized Impact Hammers*. Journal of Sound and Vibration, 263, 2003. pp.515-533.
- [6] L. C. Lemos Junior. *Plataforma Para a Detecção de Incrustação Utilizando o Método do Impacto do Martelo e a Tecnologia ZigBee*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Campina Grande, Paraíba, Brasil, Dezembro, 2011.
- [7] Halit Eren. *Wireless Sensors and Instruments Networks, Design, and Applications*. Taylor and Francis, 2005.
- [8] K. Sohraby, D. Minoli and T. Znati. *Wireless sensor networks: technology, protocols and applications*. John Wiley and Sons, 2007.
- [9] L. C. Lemos Junior, J. M. R. Souza Neto, J. J. Silva, and J. S. Rocha Neto. *Fouling Detection using Hammer Impact Test and Wireless Communication*. In IMTC 2011 – International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Binjiang, Hangzhou, China, May 2011.
- [10] L. C. Lemos Junior and J. S. Rocha Neto. *Sistema de Monitoramento de Temperatura Utilizando Redes de Sensores Sem Fio Com Tecnologia Bluetooth*. In XXXVII Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE 2009, Recife, Brasil, Setembro 2009. ABENGE - Associação Brasileira de Educação em Engenharia.
- [11] A. S. Krisher. *Technical Information Regarding Coupon Testing*. Technical report, ASK Associates, St. Louis, Missouri, 2003.

- [12] W. P. Lai and W. Fang. *Novel Bulk Acoustic Wave Hammer to Determinate the Dynamic Response of Microstructure Using Pulsed Broad Bandwidth Ultrasonic Transducers*. Elsevier - Sensors and Actuators, 96:43–52, 2002.
- [13] G. A. Mansoori. *Deposition and Fouling of Heavy Organic Oils Other Compounds*. In 9th International Conference on Properties and Phase Equilibrium for Product and Process Design - PPEPPD 2001, Kurashiki, Okayama, Japan, May 20-25 2001.
- [14] K. Mori, A. Spagnoli, Y. Murakami, G. Kondo, and I. Torigoe. *A New Non-Contacting Nondestructive Testing Method for Defect Detection in Concrete*. Elsevier Science, 2002.
- [15] C. B. Panchal. *Fouling Mitigation of Industrial Heat Exchange Equipment*. Technical report, Bengell House, New York, 1997.
- [16] S. Priyanto, G. A. Mansoori, and A. Suwono. *Structure and Properties of Micelles and Micelle Coacervates of Asphaltene Macromolecule*. In Proceedings of AIChE Annual Meeting, Session 90, 2001.
- [17] P. K. Roy and N. Canesan. *Transient Response of a Cantilever Beam Subject to an Impulse Load*. *Journal of Sound and Vibration*, 183:873–890, 1995.
- [18] M. H. H. Shen and C. Pierre. Free vibrations of beams with a single-edge crack. *Journal of Sound and Vibration*, 170, 1994. pp.237-259.
- [19] R. A. Sigwalt, C. O. R. Negrão, and P. C. Tonin. *Influência do Escoamento no Processo de Incrustação*. Seminário, Departamento de Mecânica, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, PR, 2002.
- [20] S. J. Ahn and W. B. Jeong. *Improvement of Impulse Response Spectrum and its Application*. *Journal of Sound and Vibration*, 288:1223–1239, 2005.
- [21] J. J. Silva, A. M. N. Lima, F. H. Neff, and J. S. Rocha Neto. *Fouling Detection based on Vibration Analysis with the Hammer Impact Test*. In IMTC 2007 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Warsaw, Poland, 2007.
- [22] J. K. Sinha, M. I. Friswell, and S. Edwards. *Simplified Models for the Location of Cracks in Beam Structures Using Measured Vibration Data*. *Journal of Sound and Vibration*, 251:13–38, 2002.
- [23] P. C. Tonin and C. O. R. Negrão. *Estudos Preliminares do Processo de Incrustação em Trocadores de Calor*. In I Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural do Paraná, Curitiba, PR, 2001. CEFET-PR e UFPR.
- [24] G. A. Mansoori. *Physicochemical Basis of Arterial Blockage/Fouling Prediction and Pre-vention*. University of Illinois at Chicago, USA. September, 2001.

- [25] P. A. Tipler, G. Mosca. *Física Para Cientistas e Engenheiros, Volume 2*. 6º ed. LTC, São Paulo, 2012.
- [26] M. A. Zaro, R. L. D. Blanco, C. A. K. Thomas. *Medição de força produzida pelo solenoide sobre o núcleo móvel em bobinas usadas nos sistemas de partida*. In: Revista de Ensino de Física, vol. 11. Dezembro, 1989, p.88-106.
- [27] Digi. XBee/XBee-Pro ZB RF Modules. Digi International Inc., Minnetonka, MN 55343, 2010.
- [28] S. M. B. B. Correa. *Probabilidade e Estatística*. 2ª ed. Belo Horizonte. PUC Minas Virtual, 2003.
- [29] D. B. F. Filho. *Desvendando os mistérios do coeficiente de correlação de Pearson (r)**. Revista Política Hoje, Vol. 18, nº 1, 2009.
- [30] S. A. Lira. *Análise de Correlação: Abordagem Teórica e de Construção dos Coeficientes com Aplicações*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, Paraná, Brasil, Fevereiro, 2004.
- [31] A. K., Sharma. *The Book of Correlations and Regression*. Discovery Publishing House. 2005.
- [32] F. O. Quintaes. *Estudo da Estimativa da Incerteza de Medição Para Determinação do BS&W e da Vazão Aplicado no Laboratório de Avaliação de Medição em Petróleo*. Dissertation, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, Rio Grande do Norte, Brasil, Março 2006.
- [33] Lemos Júnior, L. C., Silva, J. J., Rocha Neto, J. S. *Estimated Impact Force for an Ectromagnetic Hammer*. In: IMEKO 2017 - Symposium on Measurement Science Challenges in Natural and Social Sciences, 2017, Rio de Janeiro. Proceedings on IMEKO 2017 - Symposium on Measurement Science Challenges in Natural and Social Sciences, 2017.
- [34] Lemos Júnior, L. C., Silva, J. J., Rocha Neto, J. S. *Vibration analysis for fouling detection using hammer impact test and ZigBee based wireless sensor network*. In: 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2016, Santa Clara. 2016 IEEE 25th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE), 2016. p. 1190.
- [35] L. Sun, G. Feng, W. Lu. *Fouling Detection Based on Analysis of Ultrasonic Time-Domain Reflectometry Using Wavelet Transform*. International Conference on Computer Science and Information Engineering – CSIE 2011. pp 347-352.

- [36] P. Catton, S. Chan, V. dimlaye, P. Mudge. Detection of Fouling in Food Pipelines using long range ultrasonic testing. TWI, Blackpool, UK, September 2009.
- [37] Magalhães, M. N. Probabilidade e Variáveis Aleatórias. Ed. Universidade de São Paulo, 2004.
- [38] M. Soares. *Sistema de Detecção de Incrustações em Dutos de Transporte de Petróleo pela Técnica de Transmissão Gama*. PhD thesis, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro 2014.

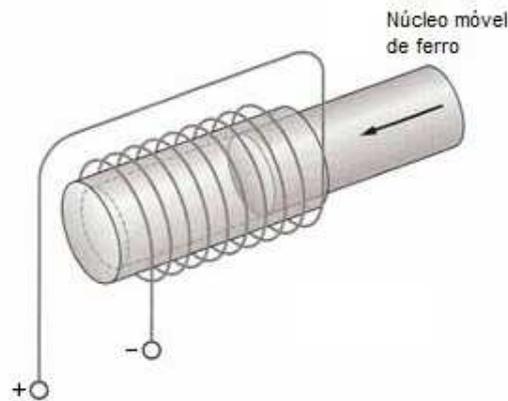
Apêndice A

Força de Impacto

Antes de construir o *hardware* do martelo eletromagnético, é preciso prever seu comportamento como sistema de excitação. Para tal, foi-se modelado o sistema excitador para verificar sua atuação na estrutura.

O princípio do martelo magnético segue outras aplicações já utilizadas no cotidiano como o solenoide de partida para automóveis [25]. Trata-se de um núcleo metálico inserido no interior de um solenoide com uma das extremidades presa a uma mola. Ao acionar-se o solenoide, este gera uma força magnética responsável pelo deslocamento do núcleo, que retorna posição de origem devido a força elástica exercida pela mola após o desligamento do campo magnético. Tem-se agora um modelo mais completo para o martelo que o anterior, pois neste se apresenta a mola responsável pelo retorno do núcleo móvel a sua posição original como pode ser visto na Figura A.1.

Figura A.1: Solenoide de partida para automóveis.



Fonte: P. A. Tipler. Física para cientistas e engenheiros, volume 2, 6ª edição, p. 228.

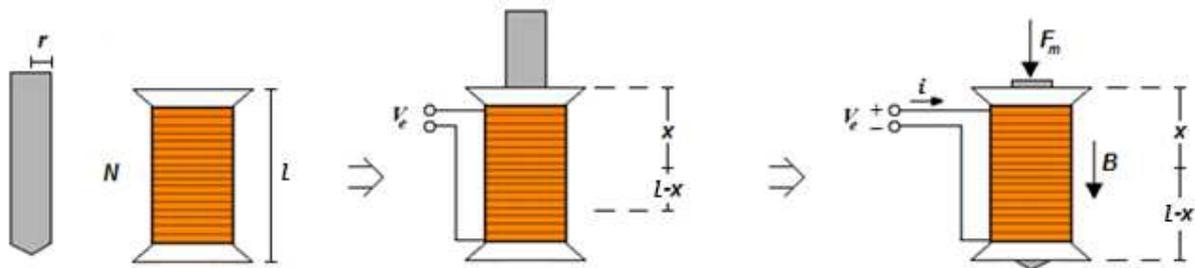
Similar à estrutura exibida na Figura A.1, o martelo magnético possui o mesmo princípio de funcionamento: um núcleo móvel cilíndrico envolto por um solenoide composto de N espiras, que ao ser energizado por i gera um campo magnético deslocando o núcleo com uma força magnética.

Força Magnética

Em geral, a literatura acadêmica trata apenas do campo magnético no interior do solenoide, porém para determinar a força de impacto do martelo na estrutura tubular, precisa-se antes descobrir a influência que o campo produz no núcleo móvel da bobina, a força magnética.

Para um solenoide de comprimento l formado de N espiras com núcleo móvel ferromagnético cilíndrico de raio da base r , o campo magnético em seu interior é dado pela ação da indução magnética B ao longo do eixo longitudinal do núcleo em função da distância variável x das extremidades ao centro da bobina como representado na Figura.A.2.

Figura.A.2: Disposição do martelo magnético.



Fonte: Próprio autor.

Essa relação é representada pela Equação (A.1):

$$B = \frac{\mu \cdot i \cdot N}{2l} \left[\frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{r^2 + (l-x)^2}} \right] \quad (\text{A.1})$$

À medida que o núcleo vai se deslocando para dentro do solenoide, a intensidade da força varia devido a atuação da indução magnética que tende a ser constante e de maior intensidade em seu centro, e menor nas extremidades. Sendo o campo magnético H inversamente proporcional à permeabilidade magnética do núcleo μ , sua relação com a indução magnética é dada por:

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (\text{A.2})$$

Substituindo a Equação (A.2) na Equação (A.1), tem-se:

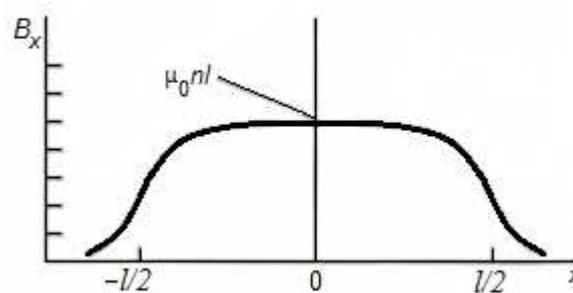
$$H = \frac{N.i}{2l} \left[\frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{r^2 + (l-x)^2}} \right] \quad (\text{A.3})$$

Em que:

- N é o número de espiras do solenoide;
- i é a entrada do sistema que controla a força de impacto resultante;
- μ é a permeabilidade magnética do núcleo;
- l é o comprimento do solenoide;
- x é a distância do centro do núcleo móvel a extremidade do solenoide.

Analisando a Equação (A.3), observa-se o comportamento do campo menor nas extremidades do solenoide que em seu centro, como pode ser observado na Figura A.3 do comportamento da indução magnética ao longo do eixo x .

Figura A.3: Campo magnético no interior de um solenoide ao longo.



Fonte: P. A. Tipler. Física para cientistas e engenheiros, volume 2, 6ª edição, p. 228.

Nas extremidades $x = 0$ ou $x = l$, enquanto no centro tem-se $x = l/2$. Para esses valores de x , a partir da Equação A.3 obtêm-se as expressões para o campo magnético nas extremidades e no centro do solenoide, representadas respectivamente pelas Equações (A.4) e (A.5):

$$H_e = \frac{1}{2} \cdot \frac{N.i}{\sqrt{r^2 + l^2}} \quad (\text{A.4})$$

$$H_c = \frac{N.i}{\sqrt{4r^2 + l^2}} \quad (\text{A.5})$$

Sendo a energia magnética dada pela Equação (A.6):

$$U_m = \frac{1}{2} \cdot \int_{vol.} \frac{B^2}{\mu} \cdot dv \quad (\text{A.6})$$

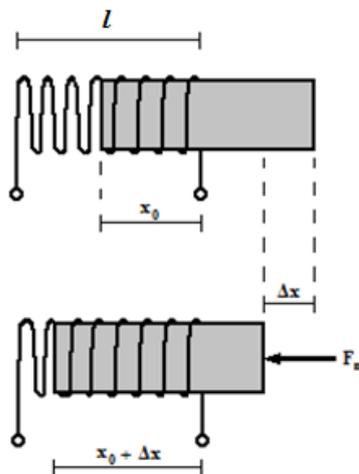
Substituindo a Equação (A.2) na Equação (A.6) tem-se:

$$U_m = \frac{\mu}{2} \cdot \int_{vol.} H^2 \cdot dv \quad (\text{A.7})$$

Segundo Zaro [26], o trabalho depende da energia magnética, logo $U_m = F \cdot x$, assim a força magnética medida na direção x é dada pela variação da energia magnética ao longo do eixo x dada pela Equação (A.8). Seu comportamento pode ser observado na Figura A.4.

$$F_x = \frac{\Delta U}{\Delta x} \quad (\text{A.8})$$

Figura A.4: Força magnética num núcleo móvel de um solenoide.



Fonte: Próprio autor.

Dessa variação é possível achar uma relação para a força magnética em função do deslocamento do núcleo a partir da Equação (A.7) de energia de U_m . Sendo x_0 a posição inicial do núcleo móvel dentro do solenoide e Δx a variação da posição deste dentro do campo da bobina, a energia magnética responsável pela força magnética será dada pela soma das duas energias representada pela Equação (A.9):

$$U_{(x_0+\Delta x)} = U_{(x_0)} + U_{(\Delta x)} \quad (\text{A.9})$$

Substituindo a Equação (A.7) na Equação (A.9), tem-se:

$$U_{(x_0+\Delta x)} = U_{(x_0)} + \frac{\mu}{2} \cdot \int_{vol.} H^2 \cdot dv \quad (\text{A.10})$$

Como o volume do cilindro pode ser representado pela área da base (nesse caso a área da secção transversal representada por A) multiplicado pela altura (representada por Δx , pois se considera o cilindro deitado), substituem-se esses valores na integral da energia:

$$U_{(x_0+\Delta x)} = U_{(x_0)} + \frac{(\mu_n - \mu_0)}{2} \cdot \int_{A \cdot \Delta x} H^2 \cdot dv \quad (\text{A.11})$$

$$U_{(x_0+\Delta x)} = U_{(x_0)} + \frac{1}{2} \cdot (\mu_n - \mu_0) \cdot \int_{A \cdot \Delta x} H^2 \cdot A \cdot \Delta x \quad (\text{A.12})$$

Substituindo a Equação A.12 na Equação A.8, tem-se a força magnética no núcleo em função do campo magnético H , das permeabilidades magnéticas do núcleo μ_n e do ar μ_0 e da área da base do cilindro A :

$$F_m = \frac{1}{2} \cdot (\mu_n - \mu_0) \cdot H^2 \cdot A \quad (\text{A.13})$$

Em que:

- μ_n é a permeabilidade magnética do material que compõe o núcleo.
- μ_0 é permeabilidade magnética do ar;
- A é a área da secção transversal do núcleo cilíndrico.

Reescrevendo a equação da força substituindo a Equação (A.3) na Equação (A.13), tem-se:

$$F_m = \frac{N^2 \cdot i^2}{8l^2} \left[\frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{r^2 + (l-x)^2}} \right]^2 \cdot (\mu_n - \mu_0) \cdot A \quad (\text{A.14})$$

Uma vez que a permeabilidade magnética do núcleo pode ser reescrita em função da permeabilidade do ar e da susceptibilidade magnética do material X_m , tem-se:

$$\mu_n = \mu_0 \cdot (1 + X_m) \Leftrightarrow \mu_n - \mu_0 = X_m \cdot \mu_0 \quad (\text{A.15})$$

Substituindo a Equação (A.15) na Equação (A.14), obtém-se a expressão geral para força magnética no núcleo móvel do solenoide dada pela Equação (A.16).

$$F_m = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot A \cdot X_m \cdot \mu_0}{8l^2} \left[\frac{x}{\sqrt{r^2 + x^2}} + \frac{l-x}{\sqrt{r^2 + (l-x)^2}} \right]^2 \quad (\text{A.16})$$

Analogamente, as equações do campo magnético terão seus valores nas extremidades e no centro do solenoide dadas pelas Equações (A.17) e (A.18):

$$F_{m_e} = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot A \cdot X_m \cdot \mu_0}{8 \cdot (r^2 + l^2)} \quad (\text{A.17})$$

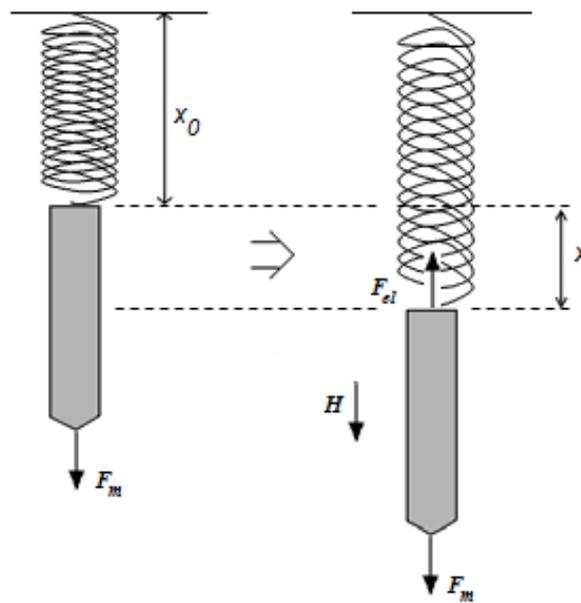
$$F_{m_c} = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot A \cdot X_m \cdot \mu_0}{2 \cdot (4r^2 + l^2)} \quad (\text{A.18})$$

O comportamento da força magnética deve ser levado em conta na obtenção da força de impacto, já que este ocorre nas extremidades da bobina, onde a força magnética é menor, porém sofre influência da componente do centro a qual possui maior intensidade.

Força elástica e força resultante

A força de impacto F_a é obtida pela resultante das forças atuantes sobre o núcleo móvel do martelo. Na Figura A.5 observa-se que a resultante é dada pela ação da força magnética, decorrente do campo magnético ao qual o núcleo está inserido, e pela força peso, decorrente da massa do corpo e atração gravitacional, subtraída da força elástica exercida pela mola contrária ao movimento.

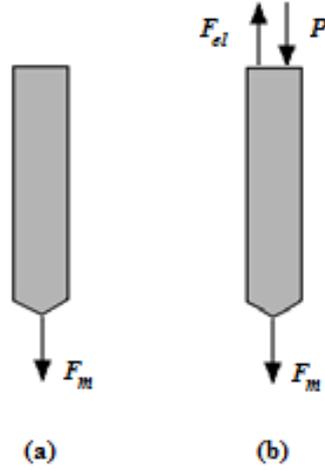
Figura A.5: Funcionamento do núcleo móvel do martelo magnético acoplado a mola de retorno.



Fonte: Próprio autor.

A partir do Diagrama de Corpo Livre (DCL) para o caso estudado, tem-se uma melhor observação do comportamento das forças. Porém, deve-se destacar que esse comportamento é distinto em dois instantes: no início do movimento do núcleo e no momento do impacto do núcleo na tubulação. Esses comportamentos podem ser vistos na Figura A.6.

Figura A.6: Diagrama de Corpo Livre para forças atuantes sobre o núcleo móvel:
 (a) no início do movimento; (b) no fim do movimento.



Fonte: Próprio autor.

A força de impacto F_a é a resultante das forças atuantes sobre o núcleo na hora do impacto, logo:

$$F_R = F_{m_e} + P - F_{el} \quad (\text{A.19})$$

$$F_a = F_{m_e} + P - F_{el} \quad (\text{A.20})$$

$$F_a = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{8 \cdot (r^2 + l^2)} + m \cdot a - \frac{k \cdot l}{2} \quad (\text{A.21})$$

Em que:

- N é o número de espiras do solenoide;
- i é a entrada do sistema que controla a força de impacto resultante;
- X_m é a susceptibilidade magnética do núcleo;
- μ_0 é a permeabilidade magnética do ar;
- A é a área da secção transversal do núcleo magnético;
- a é a aceleração do sistema e é obtida a partir do início do movimento.

No primeiro momento, observa-se que o corpo parte do repouso, o que implica na elongação mínima decorrida da influência da força peso, a qual se equilibra com a elástica. Nesse instante atua sobre o núcleo móvel apenas a força magnética. Ou seja, o corpo está em repouso, logo, $F_{el} = P$, portanto:

$$F_R = F_{m_c} + P - F_{el} \quad (\text{A.22})$$

$$F_R = F_{m_c} \quad (\text{A.23})$$

$$m \cdot \alpha = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{2 \cdot (4r^2 + l^2)} \quad (\text{A.24})$$

$$m \cdot \alpha = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{2 \cdot (4r^2 + l^2)} \quad (\text{A.25})$$

$$\alpha = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{2m \cdot (4r^2 + l^2)} \quad (\text{A.26})$$

Portanto, a força de impacto é dada por:

$$F_a = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{8 \cdot (r^2 + l^2)} + m \cdot \left[\frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{2m \cdot (4r^2 + l^2)} \right] - \frac{k \cdot l}{2} \quad (\text{A.27})$$

$$F_a = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{8 \cdot (r^2 + l^2)} + \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{2 \cdot (4r^2 + l^2)} - \frac{k \cdot l}{2} \quad (\text{A.28})$$

$$F_a = \frac{N^2 \cdot i^2 \cdot X_m \cdot \mu_0 \cdot A}{2} + \left[\frac{1}{4 \cdot (r^2 + l^2)} + \frac{1}{4r^2 + l^2} \right] - k \cdot l \quad (\text{A.29})$$