



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**MODELAGEM ANALÍTICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM
TUBOS DE PAREDE FINA VISANDO A LOCALIZAÇÃO DE UMA FONTE
PONTUAL HARMÔNICA EM SUA SUPERFÍCIE**

MARIO FRANCISCO GUERRA BOARATTI

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores

Orientador:

Dr. Daniel Kao Sun Ting

SÃO PAULO
2006

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**MODELAGEM ANALÍTICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM
TUBOS DE PAREDE FINA VISANDO A LOCALIZAÇÃO DE UMA FONTE
PONTUAL HARMÔNICA EM SUA SUPERFÍCIE**

MARIO FRANCISCO GUERRA BOARATTI

Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Reatores

Orientador:

Dr. Daniel Kao Sun Ting

SÃO PAULO
2006

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Pedro e Thereza que me deram a vida e a base familiar necessária para chegar até aqui.

À minha esposa Nanci, companheira e amiga que tanto me incentiva. Aos meus filhos André e Aline os quais amo muito.

AGRADECIMENTOS

Um trabalho de doutoramento não é um trabalho solitário, ele envolve a participação de inúmeras pessoas, que de algum modo contribuem para a sua execução. Eu quero agradecer a todos que contribuíram e me apoiaram, em particular:

- Professor Daniel Ting, meu orientador, pela dedicação, empenho e espírito pesquisador.
- Minha esposa Nanci pelo carinho e incentivo nos momentos mais difíceis, gerando um ambiente favorável à superação das dificuldades. Por entender as ausências e privações necessárias ao desenvolvimento deste trabalho.
- Aos colegas do IPEN que colaboraram com informações técnicas, instrumentações, confecções de dispositivos e incentivos nos momentos de dificuldades.
- Aos professores do IPEN e da Escola Politécnica que dividiram seus conhecimentos durante a realização deste trabalho.
- Minha família que forneceu a base necessária para o desenvolvimento deste trabalho.
- Aos amigos que colaboraram e incentivaram ao menos com uma palavra de coragem.
- A Deus pela sua proteção e sabedoria.

*Fazer ciência só tem sentido
se for para o bem estar da
humanidade e da natureza.*

MODELAGEM ANALÍTICA DA PROPAGAÇÃO DE ONDAS DE TENSÃO EM TUBOS DE PAREDE FINA VISANDO A LOCALIZAÇÃO DE UMA FONTE PONTUAL HARMÔNICA EM SUA SUPERFÍCIE

Mario Francisco Guerra Boaratti

RESUMO

Vazamentos em tubos pressurizados geram ondas acústicas que se propagam através das paredes destes tubos, as quais podem ser captadas por acelerômetros ou por sensores de emissão acústica. O conhecimento de como estas paredes podem vibrar, ou de outro modo como as ondas acústicas se propagam neste meio, é fundamental em um processo de detecção e localização da fonte de vazamento. Neste trabalho, foi implementado um modelo analítico, através das equações de movimento da casca cilíndrica, com o objetivo de entender o comportamento da superfície do tubo em função de uma excitação pontual. Como a superfície cilíndrica é um meio fechado na direção circunferencial, ondas que iniciaram sua jornada, a partir de uma fonte pontual sobre a superfície, se encontrarão com outras que já completaram a volta na casca cilíndrica, tanto no sentido horário como no anti-horário, gerando interferências construtivas e destrutivas. Após um tempo suficiente, uma estacionariedade é atingida, criando pontos de picos e vales na superfície da casca, os quais podem ser visualizadas através de uma representação gráfica do modelo analítico criado. Os resultados teóricos foram comprovados através de medidas realizadas em uma bancada de testes composta de um tubo de aço terminado em caixa de areia, simulando a condição de tubo infinito. Para proceder à localização da fonte pontual sobre a superfície, adotou-se o processo de solução inversa, ou seja, conhecidos os sinais dos sensores dispostos na superfície do tubo, determina-se através do modelo teórico onde a fonte que gerou estes sinais pode estar.

ANALYTIC MODEL OF THE STRESS WAVES PROPAGATION IN THIN WALL TUBES, SEEKING THE LOCATION OF A HARMONIC POINT SOURCE IN ITS SURFACE

Mario Francisco Guerra Boaratti

ABSTRACT

Leaks in pressurized tubes generate acoustic waves that propagate through the walls of these tubes, which can be captured by accelerometers or by acoustic emission sensors. The knowledge of how these walls can vibrate, or in another way, how these acoustic waves propagate in this material is fundamental in the detection and localization process of the leak source. In this work an analytic model was implemented, through the motion equations of a cylindrical shell, with the objective to understand the behavior of the tube surface excited by a point source. Since the cylindrical surface has a closed pattern in the circumferential direction, waves that are beginning their trajectory will meet with another that has already completed the turn over the cylindrical shell, in the clockwise direction as well as in the counter clockwise direction, generating constructive and destructive interferences. After enough time of propagation, peaks and valleys in the shell surface are formed, which can be visualized through a graphic representation of the analytic solution created. The theoretical results were proven through measures accomplished in an experimental setup composed of a steel tube finished in sand box, simulating the condition of infinite tube. To determine the location of the point source on the surface, the process of inverse solution was adopted, that is to say, known the signals of the sensor disposed in the tube surface, it is determined through the theoretical model where the source that generated these signals can be.

SUMÁRIO

| | Página |
|--|--------|
| 1 INTRODUÇÃO | 19 |
| 1.1 Metodologia | 22 |
| 1.2 Objetivos..... | 22 |
| 2 REVISÃO DA LITERATURA | 24 |
| 3 PROPAGAÇÕES DE ONDAS DE TENSÃO EM MEIOS SÓLIDOS ELÁSTICOS | 29 |
| 3.1 Componentes de tensão e deformação em meio sólido..... | 29 |
| 3.2 Lei de Hooke para um sólido isotrópico..... | 31 |
| 3.2.1 Módulo de Young - E | 32 |
| 3.2.2 Coeficiente de Poisson - ν | 32 |
| 3.2.3 Módulo de elasticidade ao cisalhamento - μ | 32 |
| 3.3 Equações do equilíbrio e do movimento em um meio sólido..... | 33 |
| 3.4 Equação do movimento em função dos deslocamentos..... | 34 |
| 3.5 Velocidades de propagações das ondas em um corpo sólido..... | 35 |
| 3.5.1 Ondas de dilatação e ondas de distorção | 35 |
| 3.5.2 Ondas longitudinais e transversais..... | 38 |
| 3.5.2.1 Ondas longitudinais | 39 |
| 3.5.2.2 Ondas transversais..... | 39 |
| 3.6 Ondas de superfície..... | 40 |
| 4 EQUAÇÃO DE ONDA EM UMA CASCA CILÍNDRICA FINA | 45 |
| 4.1 Equação de equilíbrio para a casca cilíndrica | 45 |
| 4.2 Equação de movimento para a casca cilíndrica | 49 |
| 4.3 Considerações sobre vibrações acústicas provocadas por jatos | 51 |
| 5 SOLUÇÃO ANALÍTICA DA EQUAÇÃO DE MOVIMENTO EM CILINDRO DE CASCA FINA | 57 |
| 5.1 Solução analítica para a obtenção do modelo matemático | 57 |
| 5.2 Descrição do fenômeno de interferência de ondas | 64 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 5.3 | Implementação numérica do modelo matemático | 67 |
| 5.4 | Análise dos modos circunferenciais na implementação numérica do modelo matemático | 75 |
| 5.5 | Análise dos números de onda axiais na implementação numérica do modelo matemático | 78 |
| 5.6 | Solução não senoidal da equação do movimento | 80 |
| 6 | MEDIDAS DAS VELOCIDADES DE PROPAGAÇÃO LONGITUDINAL E TRANSVERSAL | 83 |
| 6.1 | Resultados para o tubo de 3m de comprimento e diâmetro de 6 cm..... | 84 |
| 6.2 | Resultados para o tubo de 6m de comprimento e diâmetro de 20 cm..... | 88 |
| 7 | VALIDAÇÃO DO MODELO VIA MEDIDAS EXPERIMENTAIS | 91 |
| 7.1 | Estrutura experimental..... | 91 |
| 7.2 | Experimentos e seus resultados..... | 92 |
| 7.2.1 | Mapeamento do tubo | 92 |
| 7.2.1.1 | Mapeamento sobre o ângulo zero | 92 |
| 7.2.1.2 | Mapeamento nas direções axial e circunferencial | 98 |
| 7.2.1.3 | Determinação da relação entre as amplitudes medidas nos acelerômetros e a amplitude da força F_0 da solução teórica..... | 101 |
| 7.2.1.4 | Determinação das freqüências de ressonância por meio do modelo teórico e das medidas no sistema real..... | 104 |
| 8 | ANÁLISE PARAMÉTRICA DO MODELO TEÓRICO | 107 |
| 8.1 | Influência da espessura..... | 107 |
| 8.2 | Influência do raio | 111 |
| 8.3 | Influência dos parâmetros do material..... | 114 |
| 8.4 | Influência dos parâmetros para alguns materiais reais..... | 118 |
| 9 | DETECÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA FONTE PONTUAL..... | 120 |
| 9.1 | Detecção de uma falha..... | 120 |
| 9.2 | Localização de uma falha | 121 |
| 9.3 | Metodologia de localização proposta..... | 122 |
| 9.4 | Posicionamento dos sensores | 124 |
| 9.5 | Resultados da localização | 125 |
| 9.5.1 | Caso 1 | 130 |
| 9.5.2 | Caso 2..... | 130 |
| 9.5.3 | Caso 3..... | 132 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 9.5.4 | Caso 4..... | 135 |
| 9.5.5 | Caso 5..... | 136 |
| 9.5.6 | Caso 6..... | 136 |
| 9.5.7 | Caso 7..... | 138 |
| 9.5.8 | Caso 8..... | 140 |
| 10 | CONCLUSÕES | 142 |
| | APÊNDICES | 146 |
| | APÊNDICE A | 147 |
| | APÊNDICE B | 149 |
| | APÊNDICE C | 152 |
| | APÊNDICE D | 154 |
| | APÊNDICE E | 157 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 161 |

Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

