**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**ENGENHARIA MECÂNICA**

**JÉSSICA MENEGUEL**

**LEONARDO SIRINO**

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES ACÚSTICAS EM CORPOS CILINDRÍCOS DE EXTREMIDADES ELIPSOIDAIS**

**CURITIBA**

**2018**

**JÉSSICA MENEGUEL**

**LEONARDO SIRINO**

****

**LOCALIZAÇÃO DE FONTES ACÚSTICAS EM CORPOS CILINDRÍCOS DE EXTREMIDADES ELIPSOIDAIS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Kiyoshi Araki

**CURITIBA**

**2018**

**TERMO DE APROVAÇÃO**

JÉSSICA MENEGUEL

LEONARDO SIRINO

LOCALIZAÇÃO DE FONTES ACÚSTICAS EM CORPOS CILINDRÍCOS DE EXTREMIDADES ELIPSOIDAIS

Trabalho de conclusão de curso aprovado como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná.

BANCA EXAMINADORA

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. Dr./Ms……..

Departamento e Instituição onde atua o/a professor(a)

Presidente da Banca

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. Dr./Ms……..

Departamento e Instituição onde atua o/a professor(a)

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

Prof. Dr./Ms……..

Departamento e Instituição onde atua o/a professor(a)

Curitiba

2018DEDICATÓRIA

(OPCIONAL). É a menção em que o autor presta homenagem ou dedica o trabalho a alguém. É colocada em folha distinta, logo após a folha de rosto, geralmente no fim da página no canto direito ou no final da página, justificado a direita e em negrito.

Exemplo 1:

***Ao meu sonho de um sistema diferente***

***Dedico***

Exemplo 2:

***Dedico este trabalho aos colegas de cooperativa que xxxxxxxxxxxxxxxxx.***

AGRADECIMENTOS

(Opcional) São menções que o autor faz a pessoas e/ou instituições das quais eventualmente recebeu apoio para o desenvolvimento do trabalho. Os agradecimentos aparecem em folha distinta após a dedicatória, pode ser escrito no final da página, sendo o texto justificado a direita e em negrito.

Exemplo 1:

A

***Prof. Marcio Luiz Fernandes da UNIOESTE***

***pelas orientações xxxxxxxxxxxxxxxx.***

***Joaquim da Silva***

***por xxxxxxxxxxxxxxxxxx.***

***Carmem Cristina***

***devido xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx.***

***Exemplo 2:***

***A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, xxxxxx xxxx x x xxxxxxxxxxxxxxxxx xxxxxxx xx xxxx x xxx xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx.***

EPÍGRAFE

(Opcional) Folha onde o autor apresenta uma citação, seguida da indicação de autoria, relacionada com a matéria tratada no corpo do trabalho.

É a inscrição de um trecho em prosa ou composição poética que de certa forma embasou a construção do trabalho.

Exemplo:

***“Pouco conhecimento faz que as criaturas se sintam orgulhosas”.***

***Leonardo da Vinci***

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

[Figura 1 - Processo de calandramento para confecção do corpo cilíndrico 13](#_Toc528076625)

[Figura 2 - Processo de conformação para fabricação de tampo elipsoidal 14](#_Toc528076626)

[Figura 3 - Elementos de um sensor de EA 15](#_Toc528076627)

[Figura 4 - Fluxograma do sinal de EA 16](#_Toc528076628)

[Figura 5 – Tempos de um sinal de EA 17](#_Toc528076629)

[Figura 6 – Alguma imagem relacionada aos parâmetros de um hit 17](#_Toc528076630)

[Figura 7 – Alguma imagem do programa com vários hits 17](#_Toc528076631)

[Figura 8 - Localização planar pelo método da hipérbole. T1, T2 e T3 são os tempos de chegada das ondas mecânicas nos sensores correspondentes 18](#_Toc528076632)

[Figura 9 - Localização planar com dois sensores 19](#_Toc528076633)

[Figura 10 - Identificação das coordenadas x e s 22](#_Toc528076634)

[Figura 11 - Vista superior do tampo - coordenadas x0' e y0' 23](#_Toc528076635)

[Figura 12 - Secante da elipse 24](#_Toc528076636)

[Figura 13 - Vista superior do plano de seccionamento 26](#_Toc528076637)

[Figura 14 - Elipse auxiliar 27](#_Toc528076638)

[Figura 15 - Regressão Posição x Comprimento do arco 28](#_Toc528076639)

[Figura 16 - Regressão Comprimento do arco x Posição 29](#_Toc528076640)

LISTA DE TABELAS

Nenhuma entrada de índice de ilustrações foi encontrada.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|  |  |
| --- | --- |
| EA | Emissão acústica |
| END | Ensaio não destrutivo |
|  |  |
|  |  |
|  |  |
|  |  |

SUMÁRIO

[1. INTRODUÇÃO 11](#_Toc528076716)

[2. Revisão bibliográfica 13](#_Toc528076717)

[2.1. Vasos de pressão 13](#_Toc528076718)

[2.2. Emissão acústica 14](#_Toc528076719)

[2.2.1. A origem da técnica 14](#_Toc528076720)

[2.2.1. Equipamentos 15](#_Toc528076721)

[2.2.1. processamento do sinal de EA 17](#_Toc528076722)

[2.3. Localização 17](#_Toc528076723)

[2.4. Geodésica 20](#_Toc528076724)

[3. Métodos 21](#_Toc528076725)

[3.1. Método de seccionamento 21](#_Toc528076726)

[3.1.1. Coordenadas auxiliares 21](#_Toc528076727)

[3.1.2. Plano de seccionamento e elipse auxiliar 25](#_Toc528076728)

[3.1.3. aproximações 28](#_Toc528076729)

RESUMO

A técnica de Emissão Acústica (EA) é um ensaio destrutivo de grande aplicabilidade na engenharia mecânica, podendo ser usada para testes pontuais em equipamentos ou para o monitoramento continuado de grandes estruturas. Uma das grandes vantagens dessa técnica é a possibilidade de monitorar grandes regiões do equipamento em operação com uso de poucos sensores, detectando defeitos na estrutura e apontando sua localização.

Os defeitos, que atuam como fontes acústicas durante a solicitação da estrutura, podem ser localizados a partir dos tempos de chegada do sinal nos sensores, recaindo em um problema geométrico que dependerá da forma da estrutura analisada. Quando se analisa vasos de pressão, caldeiras e tanques é comum encontrar geometrias na forma de corpos cilíndricos com extremidades elipsoidais; as técnicas atuais tratam esse tipo de geometria de maneira aproximada, promovendo distorção na geometria para se realizar a localização, gerando certa imprecisão nos resultados, principalmente para fontes sonoras nos tampos.

O presente trabalho propõe uma alternativa para a técnica de localização em corpos cilíndricos com extremidades elipsoidais de modo a minimizar distorções na geometria e fornecer consequentemente resultados mais precisos.

**Palavras-chaves**: Algoritmo genético, Emissão acústica, Localização, Vasos de pressão

# INTRODUÇÃO

Estruturas de corpo cilíndrico com tampo elipsoidal, como vasos de pressão e tanques, são comumente empregados no armazenamento de fluídos na indústria mecânica. Na fabricação estes equipamentos passam por processos de laminação, conformação e soldagem, que podem gerar defeitos e induzir tensões na estrutura. Durante operação, frequentemente são submetidos a ciclos térmicos e mecânicos, propiciando que os defeitos gerados na fabricação cresçam. A falha desses equipamentos ocorre em geral por trincas e vazamentos, e pode acarretar consequências catastróficas, pelo fato dessas estruturas frequentemente armazenarem fluídos a alta temperatura e pressão. Testes hidrostáticos são empregados para certificar uma pressão de trabalho segura. Para ser qualificada, a estrutura deve resistir a uma pressão superior a pressão de trabalho.

Através da técnica de EA é possível monitor os ensaios hidrostáticos, podendo-se identificar o crescimento de trincas na estrutura e vazamento de pequena dimensão. É possível também monitorar vasos de pressão e tanques durante operação, identificando zonas críticas em tempo real, tornando a manutenção preventiva do equipamento mais eficiente.

Algumas das maiores vantagens da EA sobre as demais técnicas de ensaios não destrutivos é sua capacidade em monitorar uma estrutura de maneira global e não intrusiva, apontando a localização de regiões na estrutura que apresentam anomalias. Portanto, custos são reduzidos pelo fato de o ensaio interferir pouco na operação do equipamento e ter curta duração, e o reparo necessário devido aos eventuais defeitos encontrados ser restringido a uma área limitada indicada nos resultados. Além disso, há economia relacionada a não necessidade de escavar de tubulações enterradas e remover revestimentos quando na aplicação da técnica, entre outros.

A localização de anomalias que são fontes de EA é feita partindo-se do pressuposto que a onda se propaga em frentes de onda esféricas, atingindo os sensores com diferentes tempos de chegada. A partir do tempo que o sinal demorou para chegar em diferentes sensores e da posição de cada um desses é possível por triangulação calcular a posição da fonte causadora do sinal.

Entretanto, devido à complexidade geométrica de elementos cilíndricos com tampos elipsoidais, como os vasos de pressão, as técnicas atuais de localização aplicadas em sistemas comerciais empregam modelagens simplificadas dessas estruturas, geralmente planificando-a. Logo, é calculada a posição da fonte a partir de um caminho percorrido pela onda aproximado, gerando resultados imprecisos principalmente na região dos tampos, que é muito deformada na planificação.

Neste trabalho a trajetória das ondas sonoras em corpos cilíndricos com tampos elipsoidais é determinada através do cálculo da distância entre dois pontos pela aplicação de um método aqui denominado de Método do Seccionamento, que será comparada à distância menor entre pontos em um elipsoide de revolução, a geodésica. A partir destas distâncias procura-se obter resultados mais acurados que os métodos tradicionais de planificação para a localização de defeitos através da técnica de EA, com resultados semelhantes à aplicação de geodésicas, mas com velocidade de processamento que permita sua aplicação em monitoramento em tempo real.

# Revisão bibliográfica

## Vasos de pressão

Vasos de pressão são reservatórios de diferentes tipos, dimensões ou finalidades, não sujeitos à chama, projetados para resistir com segurança a pressões internas diferentes da pressão atmosférica ou a pressão externa. A norma NR-13 que estabelece procedimentos para o acompanhamento da vida útil de um equipamento submetido a pressão, define no anexo III, parágrafo 1.a vasos de pressão:

“Um vaso de pressão é qualquer vaso em cuja construção ou utilização encontra-se o fator P.V > 8. Onde P é a maior pressão (manométrica) de operação medida em Kpa e V é o volume interno do vaso medido em m3” .

Os vasos de pressão são fabricados a partir de chapas laminadas, que são calandradas para confecção do corpo cilíndrico (Figura 1) e conformadas para confecção do tampo (Figura 2). Aços ao carbono são frequentemente empregados na fabricação dessas estruturas devido as suas características de boa conformabilidade, boa soldabilidade, custo do material, condição de serviço, natureza e grau dos esforços aplicados, disponibilidade e segurança.

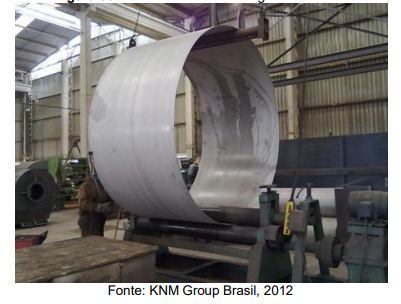


Figura 1 - Processo de calandramento para confecção do corpo cilíndrico

Fonte: KNM Group Brasil, 2012



Figura 2 - Processo de conformação para fabricação de tampo elipsoidal

Fonte: Gianturco, 2012

Teste hidrostático

## Emissão acústica

Emissão Acústica (EA) é uma técnica de ensaio não destrutivo (END) fundamentada no princípio básico de que processos de degradação dos materiais geram ondas mecânicas transientes, passíveis de detecção por sensores piezelétricos. A principal fonte de sinais quando se trata de emissão acústica é a deformação plástica, que ocorre de maneira generalizada quando há sobrecarga na estrutura, ou localizada, na ponta de uma trinca em processo de propagação, por exemplo. Também existem as chamadas pseudofontes, tais como: vazamento, cavitação, descargas parciais, fricção e entre outros; todos esses eventos geram ondas mecânicas no material que também podem ser detectadas e localizadas.

### A origem da técnica

O primeiro registro do uso da técnica de EA data do século VIII pelo alquimista árabe Jabiribn Hayyan, quando reportou que o estanho emite um “som áspero” quando trabalhado enquanto o ferro “soa muito” durante o forjamento. Esse foi o princípio do uso da técnica de EA, quando se analisava apenas as fontes audíveis, esse tipo de relato continuou com Robert Anderson testando corpos de prova de alumínio além de seu ponto de escoamento; com Erich Scheil relatando ruído audível durante a formação de martensita no aço.

O começo da era moderna da técnica de EA teve início com um dos trabalhos mais importante até hoje, o trabalho de PhD de Joseph Kaiser, intitulado Investigação da ocorrência de ruído durante o ensaio de tração (*Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch*), que registrou o primeiro relato do que hoje é conhecido como efeito Kaiser. Jopseh Kaiser observou que amostras que já haviam sido submetidas à uma determinada força, quando solicitadas mecanicamente novamente, só voltavam a emitir ruído após a máxima força aplicada no teste anterior ser ultrapassada. Nos testes de Kaiser já foram usados sensores piezelétricos para a detecção de ruído, mesmo que de forma rudimentar se comparada a tecnologia atual.

### Equipamentos

O uso moderno de EA não se limita as fontes audíveis, sensores piezelétricos são usados para captar ondes mecânicas no material, isso torna possível a detecção de ondas com frequências muito mais elevadas e amplitude menores que o ouvido humano seria capaz de detectar. O sensor de EA é geralmente constituído de um cristal piezelétrico no interior de um invólucro de proteção, onde pode estar também o amplificador integrado, denominado pré-amplificador. Na Figura 1 são apresentados os componentes de um sensor de EA.

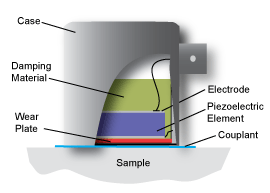


Figura 3 - Elementos de um sensor de EA

Fonte: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\_Equipment.php

Entre o sensor e a estruturada analisada há um meio acoplante, geralmente líquido e bastante viscoso, isso garante maior integridade na transmissão do sinal ao sensor.

O sinal de EA, ao passar para sensor, faz com que o cristal piezelétrico se deforme, então este produz uma diferença de potencial proporcional à esta deformação, este sinal elétrico é então amplificado e transmitido através de cabos, geralmente coaxiais.

Existem equipamentos comerciais especializados na aquisição e processamento de sinais de EA, mas todos seguem a mesma estrutura básica, conforme apresentado na Figura 4.

FIGURA DO FLUXOGRAMA DE SINAL – LIVRO UEGA



Figura 4 - Fluxograma do sinal de EA

O sinal, já amplificado pelo pré-amplificador chega ao equipamento e passa por um condicionamento, que consiste em filtros de frequência; então é amplificado novamente, é enviado ao conversor analógico-digital (*Analog Digital Converter* – ADC). Este sinal, agora digitalizado, deve ser processado para que se retire as informações pertinentes, este processamento pode ser feito por um processador convencional, um circuito dedicado ou, mais frequentemente, um chip FPGA (*Field Programmable Gate Array*).

O processamento de sinais de EA é uma tarefa de grande custo computacional, já que as frequências de amostragem geralmente são elevadas (acima de 1 MHz) para que possa se registrar de maneira fidedignas sinais de EA com frequências bastante elevadas. Usar um processador convencional para esta tarefa pode limitar o número de canais de um sistema a um valor impraticável, por esse motivo se torna interessante o uso de FPGA’s. Os FPGA’s são circuitos integrados programáveis que permitem que as operações realizadas no sinal de EA sejam diretamente implementadas em hardware, fazendo com que tenha desempenho semelhante a de circuitos dedicados, mas ainda com a flexibilidade próxima a de um processador. Outra vantagem do uso de FPGA’s que tornar o processamento distribuído, uma vez que podem ser adicionados mais chips conforme se aumente o número de canais, sendo esta uma prática comum entre as fornecedoras de equipamentos, onde cada placa de expansão de canais possui seu próprio FPGA.

### processamento do sinal de EA

Devido às altas taxas de amostragem utilizadas, é inviável a análise e registro contínuo do sinal de um sensor de EA, por esse motivo usa-se as informações dos *hits.* Os *hits* são trechos do sinal de algum sensor que em algum momento ultrapassaram algum valor pré-determinado, denominado limiar de detecção. A duração desses *hits* é definida com base em alguns parâmetros, que também são definidos previamente. A Figura 5 apresenta como esses parâmetros são observados em um sinal.



Figura 5 – Tempos de um sinal de EA

Definido um *hit*, deve se calcular algumas métricas para se caracterizar este trecho de sinal. Existe uma grande variedade de parâmetros que podem ser extraídos de um *hit,* mas os principais estão relacionados à sua intensidade, frequência, duração e energia.



Figura 6 – Alguma imagem relacionada aos parâmetros de um hit

A análise de um ensaio de EA se dá por meio destas métricas, suas correlações e sua evolução no decorrer do tempo. Portanto é muito comum o uso de gráficos durante a execução de algum ensaio para o acompanhamento em tempo real, a Figura 7 apresenta um exemplo de tela usada para o monitoramento de um ensaio.



Figura 7 – Alguma imagem do programa com vários hits

## Localização

Nos softwares comerciais de Emissão Acústica a localização de defeitos em componentes de geometria cilíndrica com tampos elipsoidais é determinada pela adaptação dos algoritmos de localização planar. A localização planar nesses sistemas de EA emprega o método da diferença no tempo de chegada, ou do inglês (Time Difference of Arrival - TDOA) que localiza a fonte por cálculo geométrico em função das diferenças entre os tempos de chegada dos sinais detectados pelos diferentes sensores arranjados na estrutura. Uma interpretação geométrica do cálculo da localização planar são as hipérboles, que são definidas como curvas na quais é constante a diferença das distâncias de cada um dos seus pontos a dois pontos fixos ou focos. Logo, para fontes localizadas sobre uma hipérbole cujos focos são dois sensores i e j o valor da diferença entre os tempos de chegada detectados em tais sensores, ti e tj, é constante. Quando é inserido mais um sensor no arranjo é possível traçar mais duas hipérboles. A intersecção das três hipérboles assim geradas ocorre sobre a fonte de emissão acústica, como é mostrado na Figura 6.



Figura 8 - Localização planar pelo método da hipérbole. T1, T2 e T3 são os tempos de chegada das ondas mecânicas nos sensores correspondentes

Tal correlação geométrica é demonstrada matematicamente na sequência.



Figura 9 - Localização planar com dois sensores

Onde:

Distância entre sensores

Distância do sensor 1 à fonte

Distância do sensor 2 à fonte

Distância do plano de sensores à fonte

Ângulo

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (.) |
|  |  | (.) |
|  |  | (.) |
|  |  | (.) |

A resolução simultânea das equações, ou seja, a intersecção entre duas hipérboles resulta na posição da fonte de EA.

A localização planar de uma fonte de EA requer a utilização de no mínimo três sensores. Caso mais de três sensores forem usados se obtém um sistema sobre determinado de equações, e métodos estatísticos, como o método dos mínimos quadrados podem ser empregados.

Para tanto é estabelecida uma função erro, calculada pela diferença entre os tempos de chegada medidos e os tempos de chegada calculados, pressupondo-se que o evento aconteceu em determinada posição (x,y).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (2.1) |
|  |  | (2.2) |
|  |  | (2.3) |
|  |  | (2.4) |

A localização da fonte é então calculada a partir da minimização da função erro, com um palpite inicial que pode ser a média geométrica da posição dos três sensores que apresentaram menor tempo de chegada. Entretanto, para calcular a distância relativa entre cada sensor emprega-se a planificação do corpo, gerando resultados insatisfatórios, principalmente para os tampos, que são as áreas mais deformadas. Para isso aplica-se nesse trabalho o conceito de geodésicas.

## Geodésica

Geodésica é a curva de menor comprimento que une dois pontos. No espaço euclidiano essa curva é um segmento de reta, mas na geometria riemanniana tal curva pode não ser uma reta.

As geodésicas são muito aplicadas em elipsoides de revolução, já que tal geometria representa adequadamente o formato da terra. Essa geometria representa adequadamente também os tampos esféricos e elipsoidais de elementos de corpo cilíndrico, abordados nesse trabalho.

Para o cálculo de distâncias nesses elementos foi usada a biblioteca para Python "*Geographiclib*". Pacotes dessa, o "*Geodesic*" e "*GeodesicLine*" são baseados na expansão de Taylor das integrais geodésicas válidas quando o achatamento f é pequeno. Já os pacotes *GeodesicExact* e *GeodesicLineExact* apresentam o cálculo exato dessas integrais. Para achatamentos pequenos o cálculo aproximado é 2-3 mais rápido e 2-3 vezes mais acurado, já que é mais fácil de controlar erros round-off com solução em séries. Para aplicações em que o achatamento absoluto é maior que 0.02 deve-se usar as classes exatas.

# Métodos

Descrever método de localização no software comercial, como entrar com as coordenadas e tudo mais

## Método de seccionamento

O uso da biblioteca *Geographiclib* se mostrou inviável devido ao tempo de execução das rotinas, isso impossibilitaria o uso desta biblioteca para o cálculo de distâncias em tempo real.

Em vista disso, nesse trabalho será proposta uma nova técnica para o cálculo de distâncias nestes elipsoides, esta técnica será referenciada no decorrer do trabalho como Seccionamento.

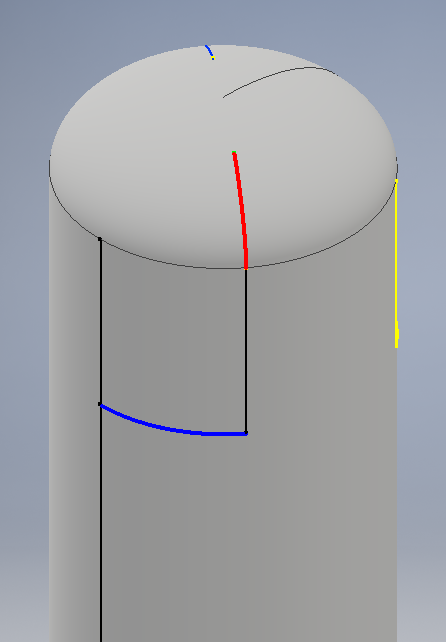
O método de seccionamento consiste em assumir que a geodésica entre dois pontos no elipsoide está contida num plano que seja paralelo ao eixo de revolução do elipsoide e que contenha os dois pontos. Esta abordagem, é descrita na sequência.

### Coordenadas auxiliares

A primeira etapa consiste em determinar algumas coordenadas auxiliares dos pontos dos quais se deseja calcular a distância. Essas coordenadas referenciam os pontos na vista superior do tampo e determinam sua altura relativa neste.

Estes pontos devem ser determinados a partir das informações conhecidas dos pontos, as quais são a distância do ponto à uma geratriz do corpo cilíndrico e a distância do ponto à interface tampo/corpo. Estas são as informações usadas para se localizar um ponto na superfície do tampo por serem as mais fáceis de se obter, numa situação de trabalho em campo, estas informações podem ser obtidas com o auxílio de uma fita métrica flexível.

No decorrer do presente trabalho essas coordenadas serão denominadas x e s, respectivamente. Na Figura 8 há uma representação dessas coordenadas em um modelo de vaso de pressão de tampo elipsoidal para um certo ponto P0.



s

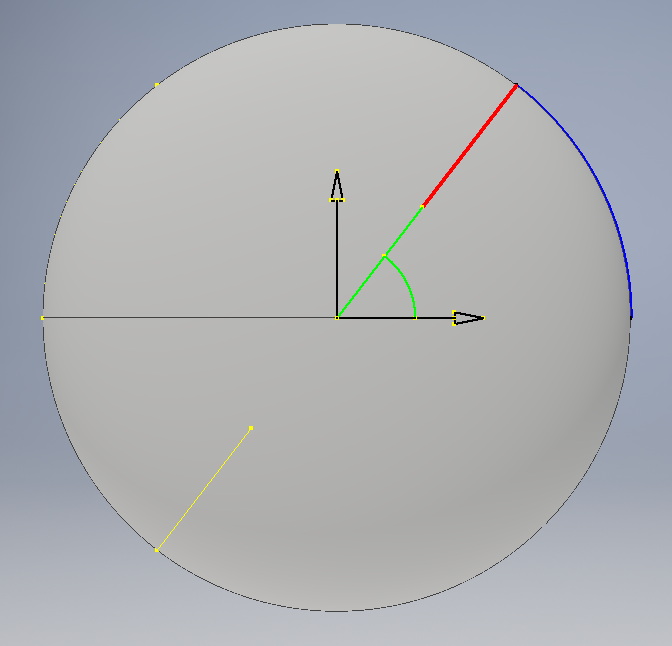
x

P0

Figura 10 - Identificação das coordenadas x e s

Quando o tampo é observado a partir de uma vista superior, o ponto P0 possuirá coordenadas diferentes, essas coordenadas serão denominadas x0’ e y0’, como pode ser observado na Figura 9.

Essas coordenadas serão posteriormente utilizadas para se determinar o plano que contém a geodésica.



**x’**

**y’**

P0: (x0’, y0’)

**λ**

**R**

Figura 11 - Vista superior do tampo - coordenadas x0' e y0'

Para a determinação de x0’ e y0’, são usadas duas informações: a distância do ponto P0 até o centro do sistema de coordenadas, denominada R, e o ângulo que este forma com o eixo x’, denominado de λ, que é a longitude do ponto no elipsoide.

A longitude λ pode ser determinada com o valor de x a partir da equação (3.1)

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.1) |

Onde D é o diâmetro externo do cilindro.

Para a determinação de R é necessário um método incremental para o cálculo do comprimento de arco de elipse. Este método consiste em aproximar o comprimento do arco de elipse a partir a soma do comprimento de secantes. Na Figura 10 é apresentada a definição de uma secante da elipse.

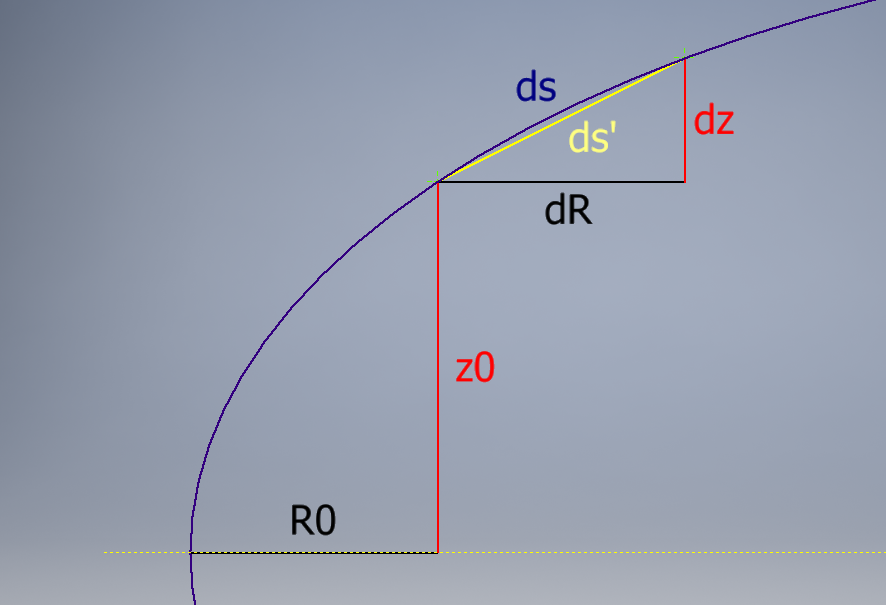


Figura 12 - Secante da elipse

Para um dR suficientemente pequeno, pode se aproximar o valor de ds como sendo igual a ds’, sendo que este é calculado a partir das equações abaixo.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.2) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.3) |

Onde:

Definir essas grandezas na seção de geodésicas, definir todas as variáveis e as letras usadas para elas

O valor de R é determinado a partir do procedimento incremental descrito no pseudocódigo abaixo:

R = -a

s’ = 0

z0 = 0

ENQUANTO s’ < s:

R = R + dR

z = a \* f \* (1 – R^2 / a^2)^(1/2)

dz = z - z0

ds = (dR^2 + dz^2)^(1/2)

s’ = s’ + ds

z0 = z

FIM ENQUANTO

RETORNE R, z

Este algoritmo retornará o valor de R e z, que serão usados para calcular as coordenadas auxiliares a partir das seguintes equações:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.4) |
|  |  | (3.5) |
|  |  | (3.6) |

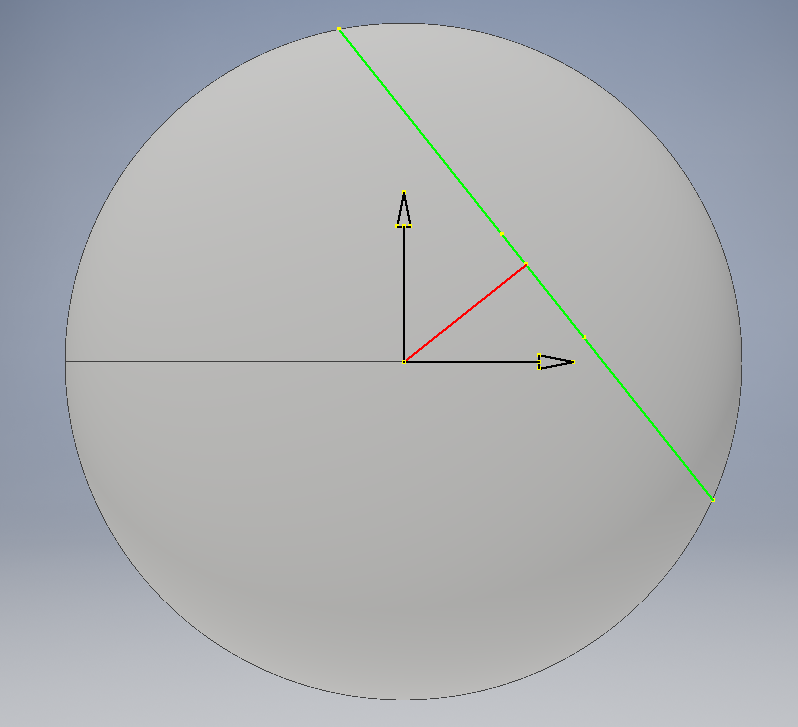
### Plano de seccionamento e elipse auxiliar

Com a informação das coordenadas auxiliares de dois pontos no elipsoide, pode se determinar a distância do plano que contém esses pontos até o eixo de revolução do elipsoide. Para isso, é observada a vista superior do elipsoide, onde o plano que contém os dois pontos é observado como uma reta e o problema se reduz a determinação da distância entre reta e ponto.

Nesse sistema de coordenadas, o eixo de revolução do elipsoide se resume à origem do sistema de coordenadas e a distância *d* pode ser determinada a partir da equação (3.6).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.6) |

A intersecção deste plano com o elipsoide resultará numa elipse menor ou igual a elipse que deu origem ao elipsoide. Por se tratar de um elipsoide da revolução, as dimensões da elipse formada na interseção com o plano dependerão apenas da distância do plano até o eixo de revolução, além disso, a razão de achatamento será a mesma para qualquer distância *d*, portanto só é preciso determinar um novo valor de raio maior (*a’*) para a elipse formada.



**x’**

**y’**

P1: (x1’, y1’)

P2: (x2’, y2’)

**d**

Figura 13 - Vista superior do plano de seccionamento

O valor de *a’* pode ser determinado fazendo o plano de intersecção normal a um dos eixos do sistema de coordenadas original e combinando a equação deste plano com a equação do elipsoide.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Plano: |  | (3.7) |

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Elipsoide: |  | (3.8) |
|  |  |  |

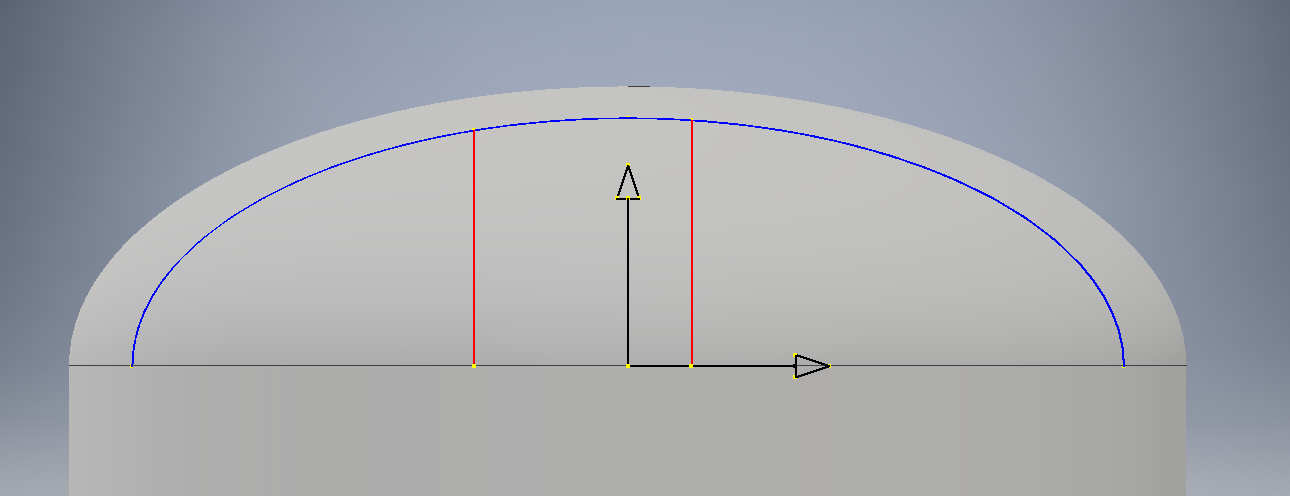
Combinando estas duas equações e realizando algumas manipulações algébricas se chega a:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.9) |

Portanto, os semi-eixos da elipse serão:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.10) |
|  |  | (3.11) |

Assim, se observa que a razão de achatamento se mantém e os dois semi-eixos são reduzidos por um mesmo fator.



P1: (R1’, z1’)

P2: (R2’, z2’)

**z’**

**R’**

Figura 14 - Elipse auxiliar

Nessa elipse os pontos P1 e P2 possuirão coordenadas R’ e z’. A coordenada R’ pode ser determinada a partir do procedimento incremental descrito anteriormente para a determinação das coordenadas auxiliares; a coordenada z’ não se altera.

Agora pode se calcular o comprimento do arco de elipse que liga os pontos P1 e P2, para isso é utilizado o procedimento descrito pelo pseudocódigo abaixo.

Ri = mínimo(R1, R2)

Rf = máximo(R1, R2)

R = Ri

z0 = a’ \* f \* (1 – R^2 / a’^2)^(1/2)

s = 0

ENQUANTO R < Rf:

R = R + dR

z = a \* f \* (1 – R^2 / a^2)^(1/2)

dz = z - z0

ds = (dR^2 + dz^2)^(1/2)

s = s + ds

z0 = z

FIM ENQUANTO

RETORNA s

O valor retornado por este procedimento será a distância entre os pontos P1 e P2 no elipsoide, que, para este método, será assumido como sendo a geodésica entre os pontos.

### aproximações

Os procedimentos incrementais descritos anteriormente podem demandar grande custo computacional e tempo de processamento elevado se o incremento escolhido for muito pequeno, entretanto, se o incremento for muito grande, isso resultará em erros elevados.

Para se contornar esta situação, foram ajustadas funções polinomiais para se representar os dados obtidos por esses procedimentos incrementais. Essas funções dependem do valor de *a* e *f.* A dependência com *a* é linear, portanto podem ser obtidas curvas normalizadas cujo resultado é posteriormente multiplicado por *a*. Para *f* não existe uma relação simples, portanto as curvas foram obtidas para um valor de 0.5, que é o valor mais comum para tampos elípticos de vasos de pressão industriais.

A regressão da posição pode ser observada na Figura 13.

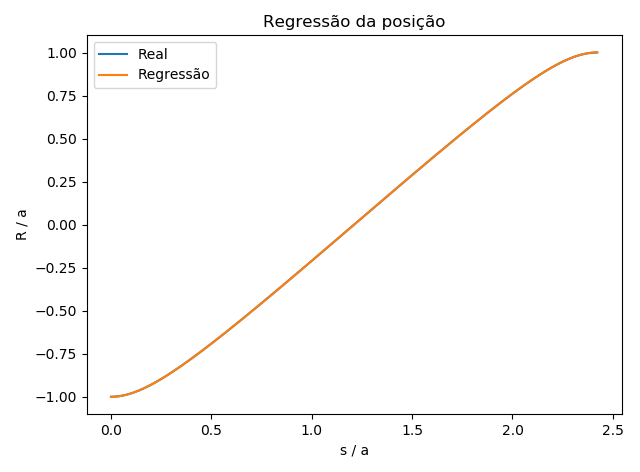


Figura 15 - Regressão Posição x Comprimento do arco

A função encontrada foi:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.13) |

A regressão do arco pode ser observada na

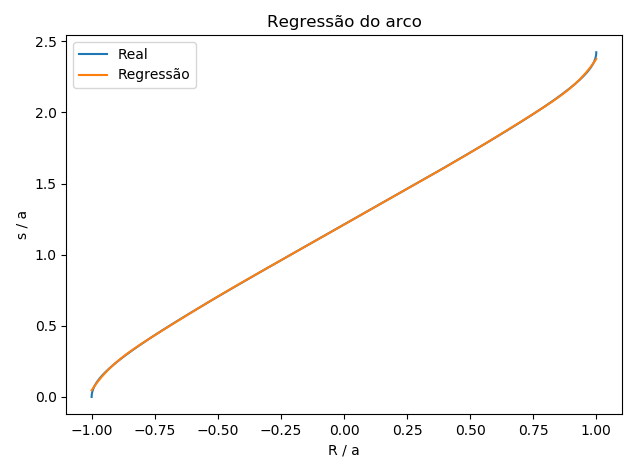


Figura 16 - Regressão Comprimento do arco x Posição

A função encontrada foi:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  | (3.13) |

Com essas funções, não há a necessidade do procedimento incremental e a determinação da distância entre os pontos é muito mais rápida, conforme será mostrado na sequência do trabalho.

REFERÊNCIAS

Carlo Giuseppe Filippin, J. B. (2017). Emissão Acústica - Conceitos e Aplicações. Curitiba: Grafo Estúdio.

Kaiser, J. (15 de Fevereiro de 1950). Untersuchung über das Auftreten von Geräuschen beim Zugversuch. *Dr.-Ing. Dissertation, Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Technischen Universität München*. München.

National Science Foundation. (2001). *Introduction to Acoustic Emission Testing*. Retirado de NDT Resource Center: https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Other%20Methods/AE/AE\_Index.php