

### 3 Pig Palito – Fundamentos e Conceitos Básicos

As pesquisas e inspeções com pigs instrumentados em todo mundo são realizadas há algumas décadas. Diversas tecnologias foram desenvolvidas e consolidadas para detecção e dimensionamento de defeitos. Os operadores do duto têm acesso a diversas ferramentas e tecnologias no mercado de acordo com as suas necessidades. No entanto a escolha da ferramenta adequada torna-se algumas vezes difícil devido à falta de informação prévia dos tipos de defeitos a serem encontrados no duto. O operador muitas vezes desconhece ou não sabe determinar qual o tipo de defeito característico que pode ser encontrado. Por outro lado, para cada classe de defeitos há um tipo de pig instrumentado mais indicado, não existindo uma técnica que cubra com a mesma confiabilidade toda a gama de defeitos que podem ser encontrados no duto.

Focalizando na parte de dimensionamento e detecção de perda de espessura provocada pela corrosão interna, pode-se considerar que o Pig Ultrassônico e Magnético são as principais e as mais utilizadas ferramentas pelos operadores de duto em inspeções de campo. Independente da técnica utilizada, a escolha do pig instrumentado em geral considera os seguintes fatores:

- Tipo de defeito esperado
- Orientação do defeito (longitudinal ou circunferencial)
- Tipo de fluido (homogêneo ou multifásico)
- Diâmetro interno do duto
- Multi-diâmetro ao longo do duto
- Velocidade de escoamento do fluido
- Espessura da parede do duto
- Raio de curvatura das curvas do duto
- Restrições geométricas no duto (válvulas, equipamentos e etc.)
- Tamanho do equipamento (devido aos lançadores e recebedores)
- Custo final da inspeção

Todavia, os operadores de duto atualmente combinam sempre que possível as duas técnicas de inspeção, a magnética e ultrassônica, para inspeções de campo [16]. Isto minimiza as desvantagens de cada tecnologia e melhora os resultados da inspeção. Algumas empresas de pig instrumentado já oferecem ferramentas que combinam as duas técnicas em um único equipamento.

### 3.1

#### Motivação

O presente trabalho teve como objetivo a análise e o estudo da tecnologia de medição utilizada por um equipamento de inspeção de dutos, o Pig Palito, na detecção e dimensionamento corrosão interna em dutos.

O estudo e conhecimento de eficientes mecanismos de controle para segurança de operação da malha dutoviária brasileira, e em especial, de dutos de produção e escoamento de petróleo dos campos de produção *offshore* foi a primeira motivação para esta dissertação, assim como a participação no desenvolvimento desta ferramenta de inspeção de corrosão interna em dutos. Atualmente no sistema de escoamento de produção e refino da Petrobras existem dutos tidos como “não-pigáveis” [3], que representam dificuldades e/ou limitações aos pigs instrumentados convencionais, e motivaram o desenvolvimento do Pig Palito e o estudo de sua tecnologia de medição. Aliada ao fato da detecção e quantificação de corrosão interna ser uma das principais preocupações na integridade de dutos *offshore* devido à produção elevada de água salgada junto ao petróleo, facilidades de inspeção visual externa por *R.O.V.(Remotely Operated Vehciles)* e a eficácia no combate da corrosão externa pela proteção catódica.

A simplicidade técnica de medição e o baixo custo de produção em relação aos demais é uma das vantagens que torna essa nova tecnologia uma alternativa em inspeções de detecção e dimensionamento de corrosão interna em dutos.

## 3.2

### Princípio de funcionamento

Sabendo das dificuldades encontradas em inspeções com pigs instrumentados [3, 16], estudos e pesquisas conduziram para o desenvolvimento de um novo método para detecção e dimensionamento geométrico de perda de espessura causado pela corrosão interna. A técnica consiste na medição direta da superfície por contato dos sensores palito ou apalpadores instrumentados, que são precisamente distribuídos ao longo do corpo da ferramenta [4].

A estrutura mecânica do sensor palito basicamente é um palito de contato fixo dentro de uma haste articulada, um eixo de rotação da haste que está fixa a base do sensor, e o transdutor de efeito *Hall* dentro deste eixo. Ímãs que fornecem um campo magnético constante ao conjunto eixo e transdutor estão fixos dentro da haste articulada do sensor palito. Conforme ilustrado na Figura 11.

Quando ocorre um movimento angular da haste articulada resultante do apalpamento da superfície do duto pelo palito, ou seja, um defeito de perda de espessura causado pela corrosão, o ângulo de incidência do fluxo magnético na face do transdutor muda proporcionalmente a este movimento. Assim, esta variação de incidência de fluxo magnético produzirá um sinal analógico de saída do transdutor de efeito *Hall* proporcional ao movimento angular da haste. A Figura 10 abaixo ilustra o sensor palito apalpando uma superfície com defeito e a Figura 11 ilustra sua estrutura mecânica.

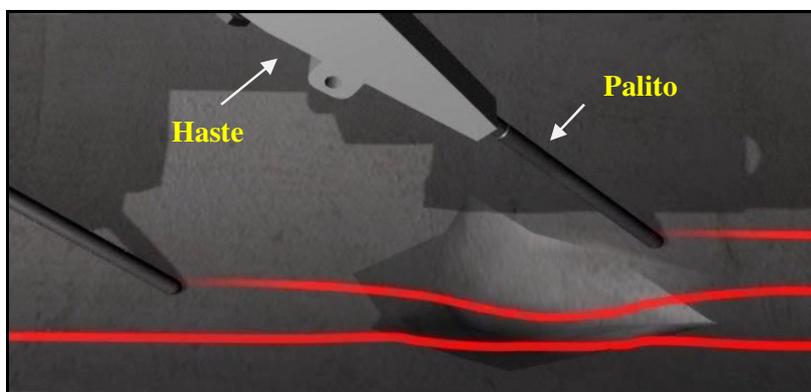


Figura 10 - Sensores palito perfilando uma superfície com defeito

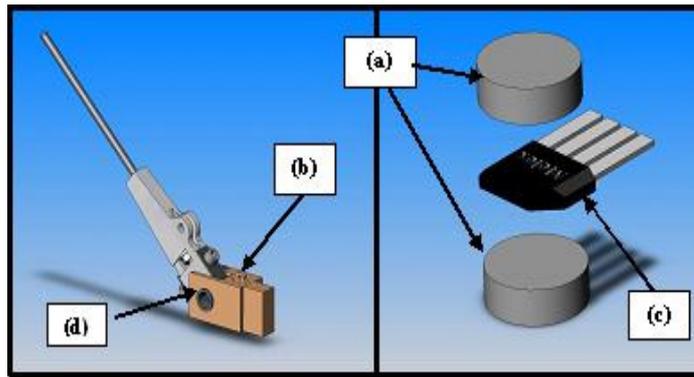


Figura 11 - Sensor palito. Imãs da haste (a), base (b), sensor *Hall* (c), eixo (d)

Para atender uma resolução circunferencial (radial) milimétrica, o Pig Palito é dotado de "coroas instrumentadas" de sensores palito ao longo do seu corpo. Essas coroas instrumentadas são angularmente defasadas umas das outras para distribuição uniforme de sensores ao longo do perímetro da superfície interna do duto. A equação abaixo demonstra o cálculo da resolução circunferencial do Pig Palito, onde "Din" é o diâmetro interno do duto.

$$\text{Resolução Circunferencial} = (\pi \times \text{Din}) / (\text{Numero de sensores palito})$$

Equação 1 – Cálculo da resolução circunferencial nominal do Pig Palito

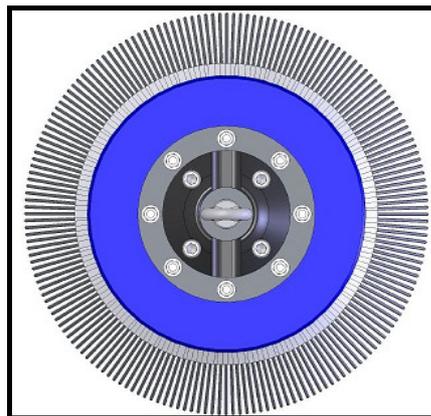


Figura 12 - Visão frontal da ferramenta com distribuição de sensores palito.

A Figura 12 acima ilustra a disposição radial de todos os sensores palito no corpo do pig, isto somente é viável com o uso das coroas instrumentadas de sensores palito.

A fim de atingir resoluções circunferências milimétricas, a instrumentação de sensores palito no equipamento demanda um sistema de multiplexação de sinais e controle eficiente, pois em geral a quantidade de sensores é elevada. Outro fator importante é a taxa de aquisição de dados de todos os sensores palito, que em geral é de dois milésimos de segundo e estabelece uma resolução longitudinal de dois milímetros numa velocidade de um metro por segundo.

O primeiro protótipo do Pig Palito foi usado para inspecionar dutos de forno em refinaria e tinha uma quantidade pequena de sensores palito. Em seguida uma inspeção realizada na Bacia de Campos com o Pig Palito de 16 polegadas foi comparada a um Pig Ultrassônico convencional [5], e mostrou a possibilidade de desenvolvimento de Pigs Palito de diferentes diâmetros.

### 3.3

#### Calibração

Todo equipamento de precisão precisa ser aferido para medição correta de uma grandeza física, e o Pig Palito é um equipamento deste tipo usado para detecção de corrosão interna em dutos. A calibração do pig é simplesmente um processo mecânico e manual operado por técnicos, que passam um gabarito de calibração individualmente em cada sensor palito. Este processo visa aferir todos os sensores de micro-geometria, os sensores palito, para posteriormente poder utilizar o equipamento na inspeção do duto. Isto porque os ímãs da estrutura interna do sensor palito podem apresentar intensidade de campo magnético variado em relação aos outros, que aliado a ao processo de montagem, ajuste mecânico e inevitáveis diferenças dimensionais de fabricação na usinagem de peças mecânicas podem introduzir imprecisões na medição de micro-geometria da superfície do duto.

Os componentes utilizados na calibração são gabarito de calibração e trilho guia de deslizamento do gabarito. O primeiro componente, o gabarito de calibração, é uma peça mecânica utilizada como referência dimensional da faixa de excursão do sensor, que possuem degraus usinados com alturas definidas a

partir do raio do centro do pig. A segunda peça, o trilho guia, é montada também em função do raio do corpo do pig e está fixo ao suporte do vaso e/ou corpo instrumentado para centralizar e realizar o escorregamento do gabarito de calibração.

A calibração do Pig Palito possui duas fases distintas, a primeira consiste na pré-programação individual de todos os transdutores de efeito *Hall* de cada sensor palito e acontece na pré-montagem do pig instrumentado. A segunda fase da calibração é iniciada após montagem de todos os sensores no equipamento.

Na primeira fase de calibração o objetivo é ajustar a sensibilidade do transdutor de efeito *Hall* dentro do conjunto sensor palito para atender as características de projeto do duto, como diâmetro interno e espessura de parede, configurando a excursão de medida do sensor. Adota-se uma faixa de operação, detalhada no tópico 3.3.2, para 20% de ganho de espessura de material (soldas) até 100% de perda de espessura de material do duto (duto furado) para medição da corrosão interna.

Na segunda fase de calibração os sensores palito são submetidos à passagem de um gabarito de calibração, assim os valores em milímetros de cada degrau são confrontados com as medidas digitalizadas de cada sensor pela eletrônica embarcada. Isto é feito através da aplicação de um algoritmo de mínimos quadrados, detalhado no tópico 3.3.3, para conversão das medidas analógicas em sinais de voltagem de cada sensor palito para milímetros. As alturas de cada degrau do gabarito de calibração são usinadas para representar a faixa de excursão de atuação do sensor palito durante a inspeção no duto. A Figura 13 mostra o Pig Palito de 24 polegadas, sem os copos de sustentação, em fase de calibração na bancada.

Como procedimento de calibração visa eliminar incertezas de medida "estática", flexões e desajustes de posição de peças provocados pela dinâmica do movimento do equipamento durante a inspeção do duto não são eliminados.

Ao final do processo de calibração o equipamento é testado no campo de testes (Figura 14). É simulada uma inspeção com Pig Palito, que é puxado através de cabos por um motor com sistema de controle de velocidade, que guia a ferramenta por dentro de um tubo com as mesmas características do duto a inspecionar.

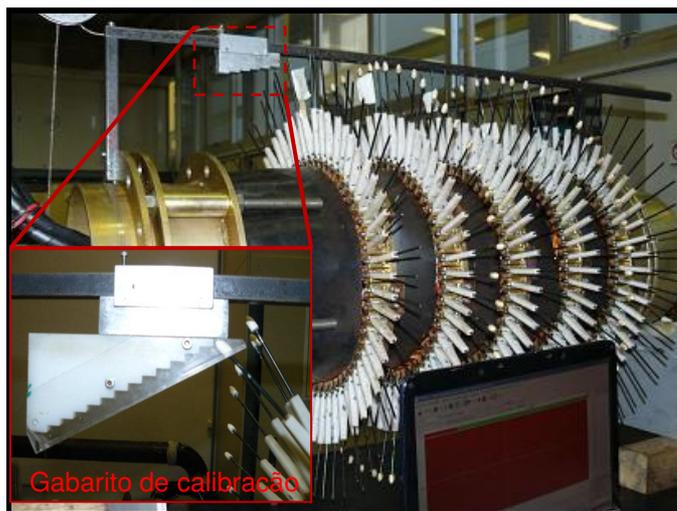


Figura 13 - Pig Palito em calibração na bancada



Figura 14 - Teste de calibração no CTDUT

Nos testes de campo além da avaliação da medição dos sensores pode-se também avaliar qualitativamente o funcionamento geral do equipamento. Como exemplo, a Figura 15 registrou as marcas deixadas pelos sensores palito durante os testes, que demonstra a capacidade de resolução circunferencial da ferramenta. Notam-se os riscos deixados pelos palitos na superfície interna do duto.



Figura 15 - Visão da parede interna do duto após passagem do Pig Palito

### 3.3.1

#### Transdutor de efeito *Hall*

O elemento primário de medição do sensor palito é a medida de posição angular através do apalramento do palito numa superfície, que causa o giro da haste com ímãs em torno do eixo de rotação do sensor palito. Portanto, a medição efetiva é a intensidade de fluxo magnético incidente na face do transdutor *Hall* que está dentro deste eixo. Esta posição angular poderia ser medida através de um potenciômetro de eixo ou elemento de resistividade variável de eixo, como em geral é feita em outras aplicações na indústria. Os fatores que determinaram a escolha do tipo de transdutor basicamente foram às características de operação e ambiente que o pig instrumentado deveria suportar. Podem-se destacar algumas destas características abaixo.

- Resistência a temperatura\*
- Alta confiabilidade
- Baixo Custo
- Ausência de partes móveis de contato
- Tamanho pequeno
- Versatilidade

\*Considerando o uso de resina tipo *epóxi* para isolamento com fluido do duto.

O transdutor *Hall* segue o princípio do efeito *Hall*, que quando uma placa fina de um material semiconductor, conduzindo corrente (**I**), é colocada e um campo magnético (**B**) perpendicular a sua superfície, uma diferença de potencial é gerada perpendicularmente a corrente e ao campo magnético. O campo magnético e a densidade de fluxo magnético são relacionados através de uma constante no ar, e a tensão de saída do elemento *Hall* é diretamente proporcional à densidade do fluxo (Eq.2) [17, 18].

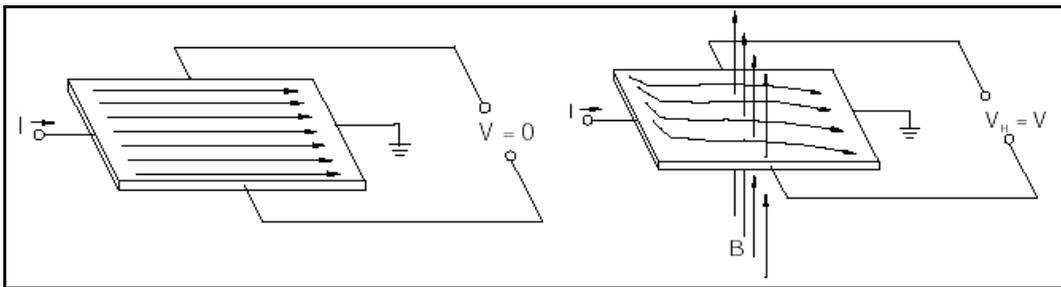


Figura 16 - Princípio do efeito Hall

$$V \propto I \times B$$

Equação 2 – Tensão de saída do elemento *Hall*

O sensor *Hall* fica solidário e dentro do eixo de rotação, que é imerso num campo magnético uniforme produzido pelos ímãs fixados na haste do sensor palito. O ângulo incidente do campo magnético na face do transdutor *Hall* muda em função de um eventual defeito detectado pelo palito. A equação abaixo mostra que a intensidade de fluxo magnético incidente no transdutor é função do cosseno do ângulo incidente do campo magnético e área da face do mesmo. Onde “ $\Phi$ ” é a intensidade de fluxo magnético, “**B**” o vetor de indução magnética e “**A**” a área atravessada pelo campo magnético.

$$\Phi = B \times A \cos \theta$$

Equação 3 – Intensidade de fluxo magnético

Para aprimorar e garantir exatidão no dimensionamento de defeitos pelo sensor palito, alguns testes e estudos mostraram as seguintes condições de projeto para aumento de desempenho do transdutor de efeito *Hall* [18, 19].

1. Campo magnético uniforme incidente na face do transdutor *Hall*
2. Uso de um concentrador de fluxo magnético
3. Imãs potentes e compactos para formação do campo magnético interno.
4. Uso de materiais diamagnéticos no conjunto das partes mecânicas do sensor palito.

A primeira condição diz que o vetor de indução magnética  $\mathbf{B}$  tem o mesmo módulo, a mesma direção e o mesmo sentido em todos os pontos do meio. Isto acontece devido ao sensor *Hall* ficar posicionado entre um par de imãs paralelos entre si numa distância milimétrica fixa, e uso do concentrador de fluxo magnético no fechamento do circuito magnético. Isto garante que a intensidade de fluxo magnético medida pelo sensor *Hall* dependerá apenas do ângulo formado entre o vetor indução magnético e área da face do sensor.

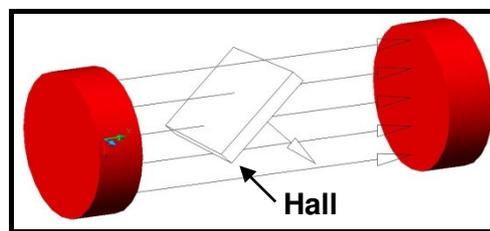


Figura 17 - Ilustração das linhas de fluxo magnético atravessando o sensor de efeito *Hall*

Na segunda condição a inserção de um concentrador de fluxo magnético, ou simplesmente uma chapa de material ferromagnético, concentra a densidade de fluxo magnético em seu corpo e evita a dispersão do mesmo para seu entorno. A relutância magnética a densidade fluxo magnético de um material ferromagnético é muito menor que relutância magnética do ar, assim é evitada dispersão de fluxo para fora do circuito magnético em questão e conserva-se o campo magnético produzido pelos imãs. Esta chapa também faz fechamento do circuito magnético conectando as faces opostas de cada imã.

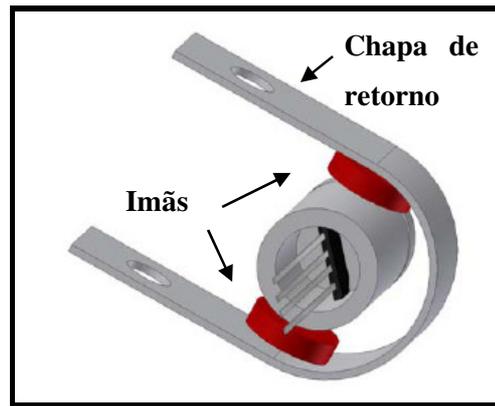


Figura 18 - Ilustração do sensor *Hall* dentro do eixo de rotação do sensor, ímãs e chapa ferromagnética

A terceira condição foi imposta pelo projeto mecânico compacto do sensor palito, pois exigia o uso de ímãs potentes e compactos para geração do campo magnético em espaço reduzido. Atualmente existem quatro classes principais de ímãs permanentes comerciais, o cerâmico, alnico, neodímio ferro boro e samário cobalto. Os ímãs de neodímio ferro boro (terras raras) possuem alta densidade de energia magnética em volume pequeno, baixo custo em relação aos demais, suporta temperaturas elevadas e possui alta resistência a desmagnetização. Esta última condição evita a interferência magnética das peças mecânicas da estrutura do sensor palito, pois influenciaria no circuito magnético de medição do transdutor.

### 3.3.2

#### Faixa de Operação do Sensor Palito

Conforme citado anteriormente, o sensor palito é pré-programado individualmente para atender as características de projeto do duto. Isto é atender a faixa operacional de medição de projeto, de 20% de ganho a 100% de perda de espessura no duto (corrosão total). Está pré-programação consiste em ajustar os parâmetros da função de transferência do transdutor de efeito *Hall* para obter melhor resposta ou sinal de saída com relação à intensidade do fluxo magnético.

A intensidade de fluxo magnético incidente no transdutor é função do cosseno do ângulo incidente do campo magnético e área da face do mesmo

(Equação 3), portanto a curva característica de resposta do transdutor é uma função conhecida. Os parâmetros de ajuste do transdutor são sensibilidade, inclinação da face ou plano de ação do fluxo magnético dentro do eixo de rotação do palito (*offset*) e a faixa de excursão angular. Estes parâmetros determinam a intensidade e excursão do sinal de saída do sensor.

A inclinação do *Hall* dentro do eixo de rotação do palito é de 45° em relação à base, assim a face do transdutor fica colinear com o campo magnético dos ímãs quando o sensor palito está medindo o diâmetro interno nominal do duto.

A fim de garantir que o transdutor opere na região onde seu sinal de saída é linearmente proporcional ao fluxo magnético incidente produzido pelo par de ímãs, a faixa de excursão angular do sensor palito fica em torno de 30°. Na metade desta faixa de excursão angular a face do transdutor fica colinear com o campo magnético dos ímãs. Conforme explicado no tópico passado.

O transdutor *Hall* “MLX90215” da fabricante *Melexis* utilizado no sensor palito possibilita este ajuste de sensibilidade. Dentre as suas principais características pode-se destacar as seguintes [20]:

- Semicondutor de efeito *Hall* programável
- Sensibilidade ao fluxo magnético ajustável (de 5 a 140 mV/mT)\*
- Compensação de perda de sensibilidade por temperatura
- Consumo total típico de 25 mW\*
- Tamanho pequeno (~ 12 mm<sup>2</sup>)

\*1 Gauss = 10<sup>-4</sup> Tesla = 10mT; 10<sup>-3</sup> Volts = 1 mV; 10<sup>-3</sup> Watts [W] = 1 mW

Sua grande versatilidade reside na capacidade de programação digital de ganho de sensibilidade à intensidade de fluxo magnético, que permite usar o transdutor em diferentes faixas de excursão, uma característica importante na inspeção de dutos multi-diâmetro e dutos de espessuras variadas. Assim, o transdutor é programado de acordo com duto a inspecionar. A Figura 19 mostra o comportamento do sinal de saída do transdutor em função da densidade de fluxo magnético [20].

Com o ajuste da sensibilidade (ganho) do transdutor em conjunto com o planejamento da faixa de excursão angular do sensor palito é possível obter um sinal de saída linearmente proporcional a densidade de fluxo magnético na face do sensor *Hall*. A Figura 20 exemplifica este planejamento da faixa de excursão do

sensor, com o sinal de saída normalizado do sensor *Hall* (em rosa) e a região de trabalho usada deste sinal do sensor palito (em verde). A curva em rosa é  $y_2 = \cos(x)$  [ $0^\circ < x < 180^\circ$ ] e a reta verde é  $y_1 = \cos(x-90)$  [ $-15^\circ < x < 15^\circ$ ].

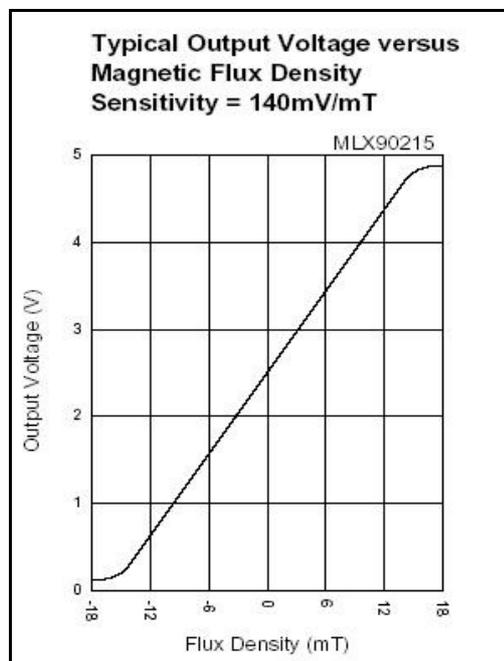


Figura 19 - Curvas do sinal de saída vs. densidade de fluxo magnético do transdutor *Hall*

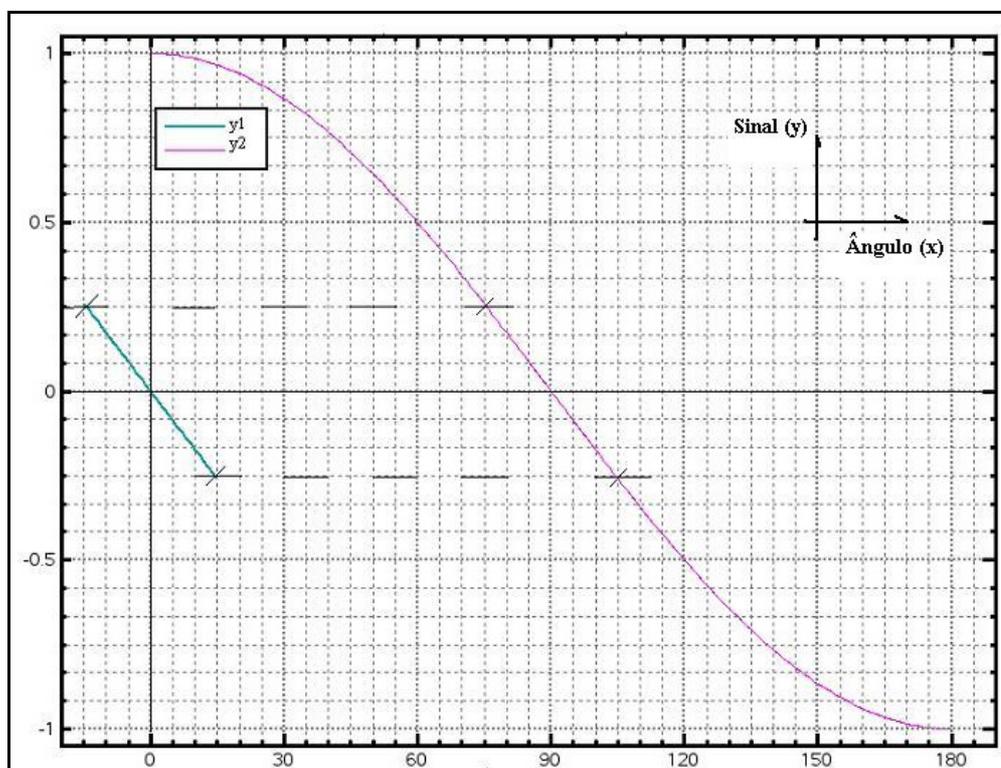


Figura 20 - Ilustração do sinal característico do sensor *Hall*

Tanto no planejamento dos parâmetros eletrônicos de pré-programação do transdutor, é feito um estudo mecânico angular da excursão do sensor palito. Com objetivo de atingir uma faixa de operação entre 20% de ganho de espessura (cordões de solda) até 100% de perda de espessura do duto (duto furado) para medição da corrosão interna. Este estudo, ilustrado na Figura 21, considera características do duto como:

- Espessura ao longo do duto
- Transição de trechos com diâmetros internos diferentes no duto
- Raio de curvatura de curvas ao longo do duto
- Flanges, derivações e equipamentos ao longo do duto

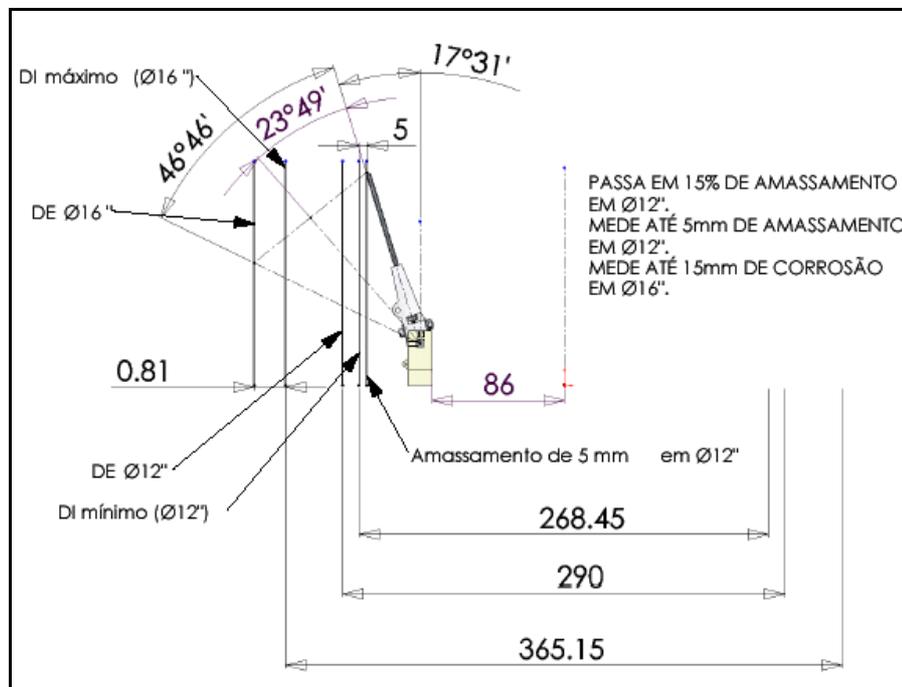


Figura 21 - Ilustração do estudo da faixa operacional do sensor palito

A partir deste estudo grava-se um sensor *Hall* e um protótipo de sensor palito é montado para testes na bancada com disco giratório (Figura 24).

Ao final deste processo é inferida a razão sinal-ruído do sensor, o ângulo de excursão do palito *versus* o sinal de saída do sensor, que determinará o tamanho do palito a ser utilizado.



Figura 22 - Foto dos sensores palito no disco giratório

### 3.3.3

#### Polinômio de Calibração

O polinômio de calibração é simplesmente a aplicação do método de mínimos quadrados aos dados adquiridos durante o processo de calibração [21].

Na calibração com o gabarito de calibração, em cada degrau amostrado pelo *software* é marcado um ponto, chamado de dado de calibração  $x_i$ , ao qual posteriormente é atribuído um valor de altura  $y_i$  em milímetros. A partir da tabela de pontos  $(x_i, y_i)$  obtêm-se com aplicação do método uma expressão analítica ou função polinomial de transferência dos valores adquiridos, em unidades digitalizadas, para valores de medição em milímetros.

Conforme equacionado abaixo, o ajuste polinomial quadrático usa a função resultante  $(P(x_i))$ , que é a soma dos quadrados das diferenças das distâncias de  $y_i$ .

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2$$

Equação 4 - Polinômio quadrático e seus coeficientes

$$q = \sum_{i=0}^2 (y_i - P(x_i))^2$$

Equação 5 - Somatório dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados adquiridos

O interesse é minimizar a distância de cada ponto  $(x_i, y_i)$  da tabela a cada ponto  $(x_i, a_0 + a_1x + a_2x^2)$  da reta. Os candidatos a ponto de mínimo do somatório acima são aqueles para os quais são nulas as derivadas parciais de  $q$  em relação a cada um de seus parâmetros ou coeficientes  $a_0, a_1, e a_2$ , isto é:

$$\frac{\partial q}{\partial a_i} = 0$$

Equação 6 – Derivada parcial da soma dos quadrados da diferença das distâncias

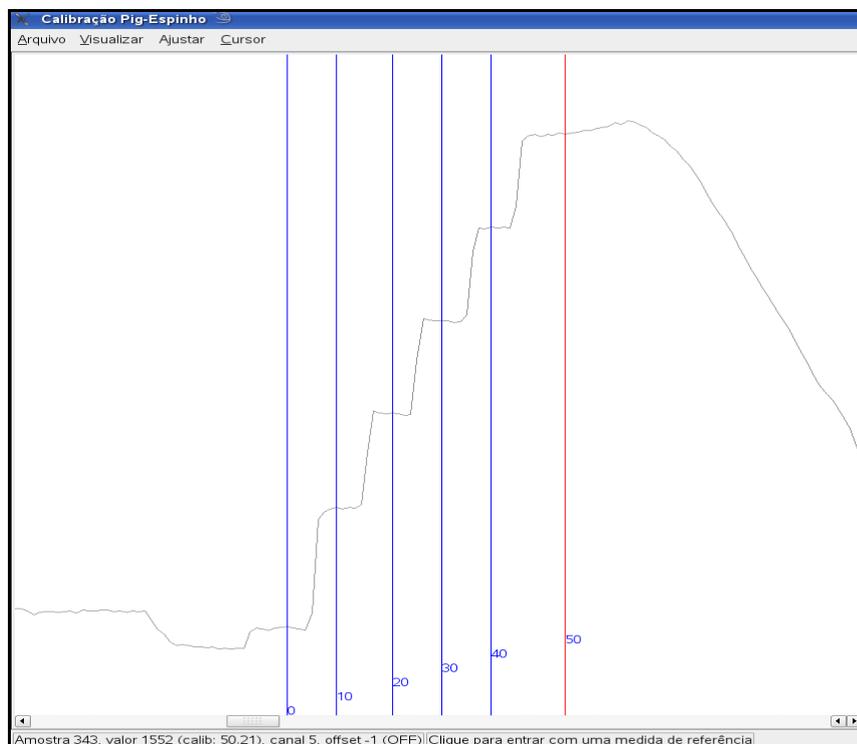


Figura 23 - Imagem do sinal amostrado com cotas de calibração

### 3.4

#### Materiais

Este capítulo tem objetivo de mostrar as características mecânicas de materiais e montagem do perfilador de micro geometria (sensor palito).

O material mais utilizado na estrutura e peças mecânicas do Pig Palito é o aço carbono tradicional, por uma questão de custo e facilidade. No entanto, o projeto mecânico de algumas partes específicas do Pig Palito requer materiais com qualidade diferenciada. O palito que realiza a medição por contato da superfície interna do duto necessita de uma maior resistência mecânica devido à solicitação de forças resultantes do atrito entre o palito e duto. O palito não pode apresentar desgaste ou perda de massa pela ação dessas forças, pois o resultado seria uma medida falsa visto que o desgaste implicaria numa variação no ângulo do sistema mecânico de medição do sensor. Outra preocupação diz respeito à necessidade de evitar a ocorrência de deformações plásticas no palito devido ao choque e força de atrito durante as inspeções, que também comprometeriam a medida do sensor palito. Assim, o material do palito deve possuir boas características de dureza e resistência mecânica ao escoamento quando submetido a tensões de flexão.

Com base nessas considerações foram realizados ensaios de desgaste em uma bancada com disco giratório de aço 1020. O disco usado nos testes possuía corrosões alveolares, cordões de soldas fabricados e lixas. Embora o disco de aço tivesse características similares à superfície do duto não é possível afirmar que este ensaio represente um desgaste igual obtido pelo atrito do palito na superfície do duto, mas é válido para comparação de eficiência dos materiais na sua aplicação. Foram realizados testes de desgaste em palitos fabricados de aço prata com tratamento térmico por nitretação. A figura abaixo mostra a foto do palito desgastado (pontagudo) no disco após teste de desgaste.

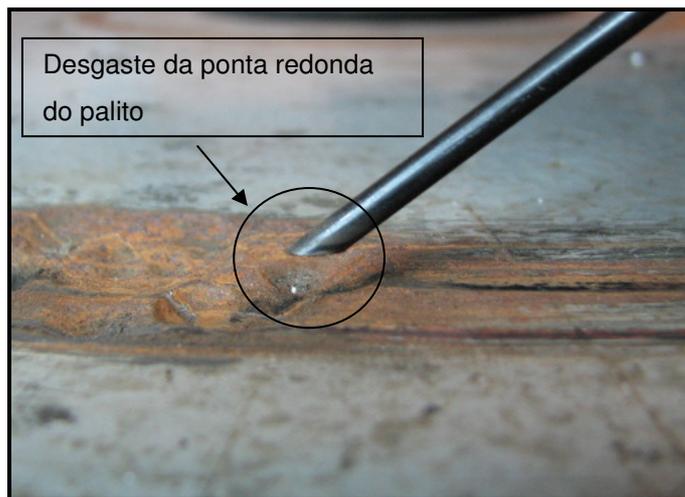


Figura 24 - Fotos do teste de desgaste com palitos de aço prata

A Tabela 1 apresenta um resumo dos resultados dos ensaios de desgaste obtido na bancada de testes com o disco giratório.

| Tabela de desgaste do palito de aço prata |                        |
|---|------------------------|
| Distância percorrida [km]                 | Perda de material [mm] |
| 54  | 6                      |
| 72  | 10                     |
| 90  | 12                     |

Tabela 1 – Tabela de desgaste do palito

Complementando estes ensaios de desgaste, foi realizada uma inspeção de um duto de produção de petróleo em Aracaju operado pela Petrobras. Nesta inspeção de 16 km de extensão foi observado um desgaste notável nos palitos do sensor. O pig foi retirado do lançador com muitos resíduos e detritos abrasivos carreados do duto. Desta forma, surgiu a idéia de pesquisar materiais alternativos para reduzir o desgaste por atrito imposto pela inspeção. Esses estudos realizados pelo CPTI da PUC-Rio convergiram para o uso de cerâmica sinterizada de alumina e zircônia. A cerâmica é composta por materiais inorgânicos e não metálicos que são formados pela ação do calor (processo de sinterização de alta temperatura), que posteriormente são arrefecidos. As cerâmicas industriais podem ser classificadas em três categorias de materiais distintos [22]:

- Óxidos: alumina, zircônia;
- Não-óxidos: boretos, nitretos, silicetos e carbonetos;
- Compósitos: partículas reforçadas com combinações de óxidos e não óxidos.

A Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ou óxido de alumínio é um isolante elétrico, mas possui condutividade térmica elevada ( $35 \text{ W / m.K}$ ), alto ponto de fusão de  $2054 \text{ }^\circ\text{C}$  e densidade de  $3.97 \text{ g / cm}^3$ . Sua dureza,  $1440 \text{ kg / mm}^2$ , é adequada para uso como um abrasivo e como um componente de ferramentas de corte.

O dióxido de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ ) ou zircônia é um isolante elétrico para temperaturas menores que  $600^\circ\text{C}$  e possui condutividade térmica ( $2 \text{ w / mK}$ ) muito menor que a Alumina. Seu ponto de fusão é de  $2715 \text{ }^\circ\text{C}$ , densidade de  $5.89 \text{ g/cm}^3$  e dureza de  $1300 \text{ Kg / mm}^2$ .

Contudo, devido ao alto custo destes materiais foi adotada uma configuração mista no projeto do palito, inserindo-se apenas uma ponteira de cerâmica em um palito de aço (Figura 25).

Novamente foram realizados ensaios de desgaste na bancada do disco giratório, sob as mesmas condições do teste anterior, que comprovaram alta resistência da cerâmica ao atrito e eficiência desta configuração mista com aço. Após  $90 \text{ km}$  percorridos no disco de desgaste o palito com a ponteira de cerâmica não apresentou nenhum desgaste.

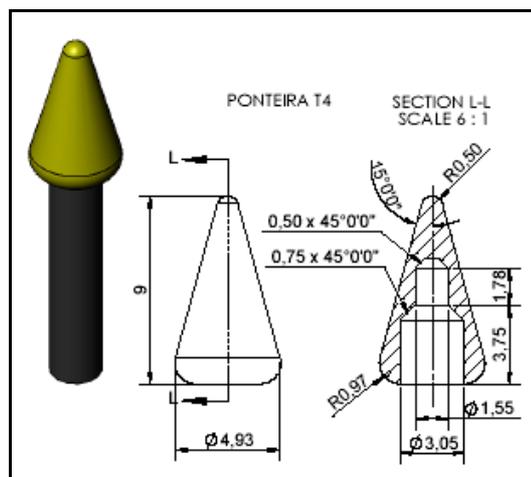


Figura 25 - Configuração mista do palito com ponteira de cerâmica