

**UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
ESCOLA DE ENGENHARIA
MESTRADO PROFISSIONAL EM MONTAGEM INDUSTRIAL**

HEBER FIGUEIREDO JUNIOR

**ANÁLISE DIMENSIONAL DO MÉTODO DE MEDIÇÃO DE DESCONTINUIDADES
INTERNAS DE DUTOS ATRAVÉS DO PIG PALITO**

**NITERÓI, RJ
2021**

HEBER FIGUEIREDO JUNIOR

**ANÁLISE DIMENSIONAL DO MÉTODO DE MEDIÇÃO DE DESCONTINUIDADES
INTERNAS DE DUTOS ATRAVÉS DO PIG PALITO**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Orientadores:

Prof. Dr. Roger Matsumoto Moreira

Profa. Dr. Fabiana Rodrigues Leta

NITERÓI, RJ

2021

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE
Gerada com informações fornecidas pelo autor

F475a Figueiredo junior, Heber
ANÁLISE DIMENSIONAL DO MÉTODO DE MEDIÇÃO DE DESCONTINUIDADES
INTERNAS DE DUTOS ATRAVÉS DO PIG PALITO / Heber Figueiredo
junior ; Roger Matsumoto Moreira, orientador ; Fabiana
Rodrigues Leta, coorientadora. Niterói, 2021.
75 f. : il.

Dissertação (mestrado profissional)-Universidade Federal
Fluminense, Niterói, 2021.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PMI.2021.mp.05506517726>

1. Análise de Incertezas. 2. PIG Palito. 3. Metrologia. 4.
Corrosão em Dutos. 5. Produção intelectual. I. Matsumoto
Moreira, Roger, orientador. II. Rodrigues Leta, Fabiana,
coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Escola de
Engenharia. IV. Título.

CDD -

HEBER FIGUEIREDO JUNIOR

**ANÁLISE DIMENSIONAL DO MÉTODO DE MEDIÇÃO DE DESCONTINUIDADES
INTERNAS DE DUTOS ATRAVÉS DO PIG PALITO**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Montagem Industrial da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Montagem Industrial. Área de Concentração: Montagem Industrial.

Aprovada em 20 de dezembro de 2021.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Ph.D. Roger Matsumoto Moreira - Orientador - Presidente
Universidade Federal Fluminense (UFF)



Profa. Dra. Fabiana Rodrigues Leta - Orientadora
Universidade Federal Fluminense (UFF)



Prof. Dr. Antonio Lopes Gama
Universidade Federal Fluminense (UFF)



Prof. Dr. Pedro Bastos Costa
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Niterói, RJ
2021

Dedico esta dissertação primeiramente a Deus que tem me dado oportunidades de crescimento pessoal e profissional e minha família por me dar o suporte para este crescimento.

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer primeiramente a Deus por me inspirar, ajudar e me direcionar na minha vida profissional e acadêmica.

A minha família por me dar apoio e sempre acreditar no meu potencial.

Ao professor Roger Matsumoto Moreira e a professora Fabiana Rodrigues Leta pela paciência e orientação nessa dissertação.

Ao mestre Claudio Camerini por me receber tão gentilmente em seu centro de pesquisa (CPTI) e dar suporte a este trabalho, disponibilizar sua equipe, equipamentos e espaço físico, e principalmente por dar livre acesso ao software RTScan que é o coração do PIG Palito.

A PUC-Rio por proporcionar a liberdade de trabalho e disponibilização de seu espaço físico.

RESUMO

O PIG Palito é um equipamento que utiliza sensor geométrico para fazer a inspeção interna de dutos de tamanhos variados, podendo, por exemplo, indicar pontos de corrosão severa. Diversos experimentos em bancadas de laboratório foram realizados com o intuito de se avaliar a capacidade de medição do PIG Palito, considerando-se um disco metálico rotatório com descontinuidades usinadas em seu corpo e um único sensor para detecção dos defeitos. Até o momento, desconhece-se experimentos em bancada em que o próprio PIG Palito e seu sistema completo de sensores passam pelo interior da tubulação. Neste sentido, o presente trabalho tem como objetivo estudar as incertezas de medição com o PIG Palito, através de experimento em laboratório, comparando os resultados encontrados pela passagem desse dispositivo, em tubulação com diâmetro nominal de 6" em PVC, com descontinuidades sintéticas feitas em impressora 3D calibradas, em laboratório acreditado pelo INMETRO. Os testes foram baseados na utilização operacional do PIG, no qual o mesmo se desloca no interior da tubulação sob diferentes condições de velocidades e com um arranjo de descontinuidades sintéticas com 5 geometrias diferentes. A metodologia empregada foi a mesma utilizada nos laboratórios de calibração de instrumentação, no qual o somatório das incertezas tipo A e B são multiplicados pelo fator de abrangência (k), que mostrou-se capaz de atingir incertezas expandidas da ordem de $\pm 3,1\%$ a $5,0\%$ utilizando um nível de confiabilidade de 95,45%. A partir da análise dos experimentos, pode-se verificar que o PIG mostrou ser capaz de realizar a função de detecção de defeitos por corrosão na ordem de milímetros.

Palavras-chave: Análise de Incertezas, PIG Palito, Metrologia, Corrosão em Dutos.

ABSTRACT

The Feeler PIG is equipment that uses a geometric sensor to perform the internal inspection of pipelines of different sizes, which can, for instance, indicate points of severe corrosion. Several experiments on laboratory were carried out with the aim of evaluating the measuring capacity of the PIG, considering a rotating metallic disk with machined discontinuities in its body and a single sensor for detecting defects. So far, experiments on a laboratory in which the Feeler PIG and its complete sensor system pass through the interior of the pipe are unknown. In this sense, the present work aims to study the measurement uncertainties of the PIG, through a laboratory experiment comparing the results found by passing this device in a pipe with a nominal diameter of 6" in PVC with synthetic discontinuities made in a 3D printer calibrated in laboratory accredited by INMETRO. The tests were based on the operational use of the PIG, in which it moves inside the pipe under different speed conditions and with an arrangement of synthetic discontinuities with 5 different geometries. The methodology used was the same used in instrumentation calibration laboratories, in which the sum of type A and B uncertainties are multiplicated by the factor (k), which proved to be capable of reaching expanded uncertainties of the order of ± 3.1 to 5.0% using a reliability level of 95.45%. From the analysis of the experiments, it can be verified that the PIG proved to be able to perform the corrosion defect detection function in millimeters.

Keywords: Uncertainty Analysis, Feeler PIG, Metrology, Pipeline Corrosion.

SUMÁRIO

FOLHA DE ROSTO, p. 1

FOLHA DE APROVAÇÃO, p.4

DEDICATÓRIA, p.5

AGRADECIMENTOS, p.6

RESUMO NA LÍNGUA VERNÁCULA, p.7

RESUMO EM LÍNGUA ESTRANGEIRA, p.8

SUMÁRIO, p.9

LISTA DE ILUSTRAÇÕES, p.11

LISTA DE TABELAS, p.12

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS, p. 13

1. INTRODUÇÃO, p. 6

1.1. Justificativa, p. 7

1.2. Relevância, p. 9

1.3. Objetivo da pesquisa, p. 9

1.4. Organização da dissertação, p. 9

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, p. 11

2.1. Tipos de corrosão, p. 11

2.2. Principais PIGs utilizados para detecção de corrosão interna de dutos, p. 13

2.2.1. PIG Palito, p. 15

2.2.1.1. Transdutor de efeito hall, p. 18

2.2.1.2. Calibração, p. 19

2.2.1.3. Limitações do sistema de medição, p. 21

2.3. Trabalhos recentes sobre o PIG Palito, p. 22

3. METODOLOGIA DE PESQUISA – MATERIAIS E MÉTODOS, p. 28

3.1.1. Método, p. 28

3.1.2. Amostra, p. 33

3.1.3. Operador, p. 34

3.1.4. Equipamento, p. 34

4. RESULTADOS, p. 39

4.1. Comparação dos resultados com as descontinuidades sintéticas, p. 39

4.2. Cálculo da incerteza, p. 42

4.2.1. Modelo matemático da calibração, p. 45

4.2.2. Desvio padrão, p. 46

4.2.3. Incerteza tipo A, p. 47

4.2.4. Incerteza tipo B, p. 48

4.2.5. Incerteza combinada, p. 48

4.2.6. Grau de liberdade efetivo e fator de abrangência, p. 48

4.2.7. Incerteza expandida, p. 50

5. CONCLUSÃO, p. 52

5.1. Proposta para trabalhos futuros, p. 53

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS, p. 54

7. ANEXOS, p. 56

7.1. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 2.5 x 5 mm, p. 56

7.2. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 4.5 x 9 mm, p. 58

7.3. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 6 x 12 mm, p. 60

7.4. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 9 x 16 mm, p. 62

7.5. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 12 x 20 mm, p. 64

7.6. Tabela de Cálculo de Incerteza – Profundidade de 4,5 mm a 0,5 m/s, p. 66

7.7. Tabela de Cálculo de Incerteza – Diâmetro de 9 mm a 0,5 m/s, p. 67

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1.1: PIG de limpeza de 28" de diâmetro, p.6
- Figura 1.2: Esquemático de um "R.O.V" inspecionando um duto submarino, p.8
- Figura 2.1: Tipos de corrosões - generalizada, galvânica, puntiforme e alveolar, p.12
- Figura 2.2: Inserção do PIG Palito na tubulação, p.13
- Figura 2.3: Tipos de PIGs: placa calibradora, geométrico, magnético e ultrassônico, p. 14
- Figura 2.4: PIG palito multidimensional, p.17
- Figura 2.5: Sensores palito perfilando uma superfície com defeito, p. 18
- Figura 2.6: Princípio do efeito Hall, p. 19
- Figura 2.7: PIG Palito em calibração na bancada, p. 21
- Figura 2.8: Simulação do sensor palito apalpando uma corrosão, p. 22
- Figura 2.9: Detalhe do alvéolo, p. 23
- Figura 3.1: Diagrama de Ishikawa - agentes metrológicos, p. 28
- Figura 3.2: Bancada de teste, p. 29
- Figura 3.3: Desenho da bancada de teste, p. 31
- Figura 3.4: Vista lateral da bancada de teste com os setores, p. 32
- Figura 3.5: Divisão por quadrante, p. 32
- Figura 3.6: Vista frontal da bancada de teste, p. 33
- Figura 3.7: Dispositivo projetado para rebocar o PIG Palito, p. 35
- Figura 3.8: Modelagem com Software Autodesk Inventor, p. 36
- Figura 3.9: Descontinuidades sintética faceando o interior do tubo de PVC, p. 36
- Figura 3.10: Descontinuidades sintéticas impressas em 3D, p. 37
- Figura 4.1: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 0,2 m/s, p. 40
- Figura 4.2: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 0,5 m/s, p. 41
- Figura 4.3: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 1,0 m/s, p. 41
- Figura 4.4: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 1,5 m/s, p. 42
- Figura 4.1: Profundidades medidas pelo PIG palito para $v = 0,2; 0,5; 1,0; 1,5\text{m/s}$, p. 44
- Figura 4.2: Diâmetros medidos pelo PIG palito para $v = 0,2; 0,5; 1,0; 1,5\text{m/s}$, p. 44

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Quadro Referencial Teórico, p.23

Tabela 2.2: Resultados dos erros experimentais, p.25

Tabela 2.3: Quadro comparativo de grandezas utilizadas nos estudos, p.26

Tabela 2.4: Quadro de porcentagem de erro de medição do sensor palito, p.27

Tabela 3.1: Parâmetros de teste, p.38

Tabela 4.1: Quadro com os valores de encontrados no teste, p.43

Tabela 4.2: Erros encontrados no teste, p.45

Tabela 4.3: Quadro com os desvios padrões encontrados no teste, p.46

Tabela 4.4: Coeficiente t-Student para vários níveis de confiabilidade, p.49

Tabela 4.5: Incertezas Finais, p.50

LISTA DE SIGLAS

CENPES	Centro de Pesquisa da Petrobras S.A;
CPTI	Centro de Pesquisa em Tecnologia de Inspeção;
PUC-RIO	Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro;
R.O.V	Remotely Operated Vehicle.
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
AMR	Anisotropic Magneto Resistive Sensor

1. INTRODUÇÃO

Com o avanço da indústria de petróleo e gás, principalmente depois da Segunda Guerra Mundial, com as altas demandas de energia, surgiu a necessidade de se desenvolverem técnicas e equipamentos, não só para evitar o crescimento de novas incrustações, mas para retirada de resíduos já existentes. Por este motivo, começou-se a desenvolver a passagem de um dispositivo chamado de PIG como parte de rotinas operacionais (GUEDES, 1994).

O PIG é um equipamento amplamente usado na indústria de construção e montagem principalmente no segmento de petróleo e gás. Este tipo de equipamento, de uma forma geral é utilizado na verificação de corrosão, trincas, amassamentos, limpeza, separação de fluidos, dentre outros em dutos (Figura 1.1).



Figura 1.1: PIG de limpeza de 28" de diâmetro.

Fonte: Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Pigging>>. Acessado em 21/08/2021.

O termo PIG, porco em português, tem origem nos Estados Unidos, mas o porquê da escolha nunca foi satisfatoriamente explicado. Existem várias teorias, entretanto, a mais aceita é pelo motivo do som emitido pela passagem do PIG no duto,

produzindo um ruído semelhante ao grunhido de um porco. Outra explicação seria a aparência do dispositivo quando emerge dos dutos coberto de petróleo cru, lembrando um porco no chiqueiro. É altamente improvável que o surgimento do nome PIG seja uma abreviação de “*Pipeline Inspection Gauge*”, uma vez que esse termo começou a ser usado somente quando as inspeções começaram a ser utilizados na indústria (CORDELL & VANZANT, 2003).

Sabendo-se que este setor é de grande importância no crescimento econômico em nível mundial, melhorar cada procedimento e equipamento na construção de empreendimentos torna-se de extrema importância, principalmente porque na atualidade o Brasil requer novos aprimoramentos tecnológicos e construtivos.

Diante da crise econômica que vem impactando diretamente a retomada do crescimento do segmento de petróleo e gás, pesquisar sobre equipamentos que são utilizados em dutos para verificações de discontinuidades, no intuito de melhorar as suas aplicações e minimizar custo e tempo, torna-se um diferencial à concorrência interna e externa. Assim sendo, há mais de uma década a Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-RIO) vem pesquisando e desenvolvendo um tipo de PIG denominado Palito, para a verificação de corrosão interna em dutos submarinos.

A intenção de pesquisar mais a fundo o PIG Palito é mostrar o seu diferencial na verificação de corrosão interna em dutos submarinos em relação a algumas limitações que existem na passagem dos PIGs convencionais, pois os dutos apresentam diâmetros variados, grandes espessuras e curvas com pequenos raios. Sendo assim, os métodos disponíveis no mercado não atendem completamente à demanda de inspeção interna destes dutos.

Neste contexto, a presente dissertação tem como objetivo avaliar as incertezas de medição dos PIGs Palito e os benefícios de sua aplicação na detecção de corrosão interna de dutos.

1.1. Justificativa

No levantamento bibliográfico com foco em PIG Palito poucos trabalhos relacionados a este assunto foram encontrados na literatura nacional. Em relação a

literatura internacional apresentam-se os resultados da pesquisa no decorrer deste capítulo.

A motivação da realização deste trabalho foi o interesse no estudo do PIG brasileiro denominado PIG Palito, que foi desenvolvido com o intuito de competir com as tecnologias estrangeiras.

O PIG Palito tem como principal objetivo detectar corrosões internas em dutos submarinos, uma vez que os mesmos possuem grande concentração de água salgada, que é uma das principais causadoras de perda interna de material. Este fenômeno é muito comum nesses tipos de dutos, principalmente em sua geratriz inferior, devido ao acúmulo de água salgada proveniente da produção de petróleo. O foco deste dispositivo não é avaliar a corrosão externa, pois segundo Salcedo (2009), a proteção externa é facilmente evitada pela proteção catódica e os danos externos são identificados através de inspeções visuais por “*R.O.V - Remotely Operated Vehicle*”, que é um veículo subaquático controlado remotamente, que permite a observação do duto no fundo do mar (Figura 1.2).

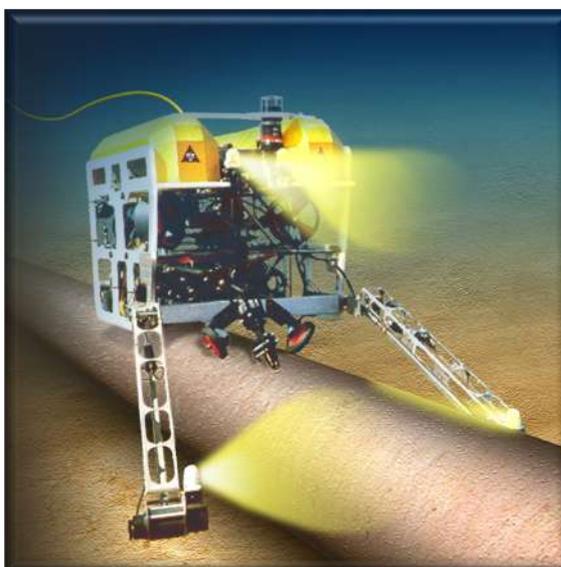


Figura 1.2: Esquemático de um “R.O.V” inspecionando um duto submarino.

Fonte: Disponível em:

<http://www1.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2013/Bruno%20e%20Julio/relat1/relatorio.htm>. Acessado em 13/07/2017.

1.2. Relevância

A relevância desta pesquisa é a contribuição para a avaliação da confiabilidade de novas ferramentas para detecção de corrosão interna de dutos submarinos, através de estudos das incertezas de medição do PIG Palito, que tem o propósito de aumentar a precisão na localização de discontinuidades e diminuir erros de leitura durante a varredura interna do duto. Importante destacar que até o momento desconhece-se a aplicação do PIG palito em uma bancada experimental visando avaliar se o conjunto de sensores consegue detectar corrosões alveolares em dutos.

1.3. Objetivo da pesquisa

Esta dissertação teve por objetivo analisar as incertezas associadas às medições de corrosões internas em tubulações utilizando-se o PIG palito. O estudo foi realizado em uma bancada composta por uma tubulação em PVC com o diâmetro nominal de 6", contendo discontinuidades sintéticas obtidas em impressora 3D. Tais defeitos visam reproduzir corrosões alveolares típicas, com as dimensões das discontinuidades sendo aferidas por laboratório acreditado pelo INMETRO para efeito comparativo.

Assim sendo, se pretende responder à seguinte pergunta nesta dissertação:

“EXISTE A GARANTIA DA CONFIABILIDADE DA MEDIÇÃO COM PIG PALITO ATRAVÉS DE UMA COMPARAÇÃO COM UM PADRÃO DE REFERÊNCIA?”

Ao final desta pesquisa se demonstra os benefícios da utilização do PIG Palito na detecção da corrosão interna de dutos submarinos com a posterior análise dos resultados.

1.4. Organização da dissertação

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, onde estão explicitadas as descrições dos conceitos e definições pertinentes ao assunto abordado nesta pesquisa.

Já o capítulo 3 trata sobre a metodologia de pesquisa, onde é abordada uma breve descrição do levantamento da revisão bibliográfica e posterior pesquisa experimental.

A análise dos resultados exposta no capítulo 4, apresenta a descrição do tratamento dos dados estatísticos do experimento.

Finalmente no capítulo 5 é escrito o fechamento do trabalho e proposta de pesquisas e estudos subsequentes ou futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados os principais tipos de corrosão encontradas em tubulações industriais e os diferentes tipos de PIGs utilizados para a detecção de corrosão interna.

2.1. Tipos de corrosão

Segundo Gentil (1995), corrosão é a deterioração dos materiais, especialmente metálicos, pela ação eletroquímica ou química do meio. Essa deterioração pode estar ou não associada a esforços mecânicos. Quando do emprego de materiais na construção de equipamentos é necessário que estes resistam à ação do meio corrosivo, além de apresentar propriedades mecânicas adequadas.

De acordo com Salcedo (2009), os principais tipos de corrosão interna encontrados em dutos são: uniforme ou generalizada, puntiforme, galvânica, alveolar e bacteriana. Esses tipos de corrosão são causados pelas características de operação e dos materiais empregadas nos dutos, sendo difíceis de prever e determinar.

Um dos tipos consiste na corrosão se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura. É chamada por alguns de generalizada, mas essa terminologia não deve ser usada só para corrosão uniforme, pois pode-se ter também outras corrosões generalizadas, o termo generalizado é aplicável à corrosão por pite ou alveolar, quando manifestadas em toda a extensão da superfície corroída (GENTIL, 1995) (Figura 2.1 – Imagem 1).

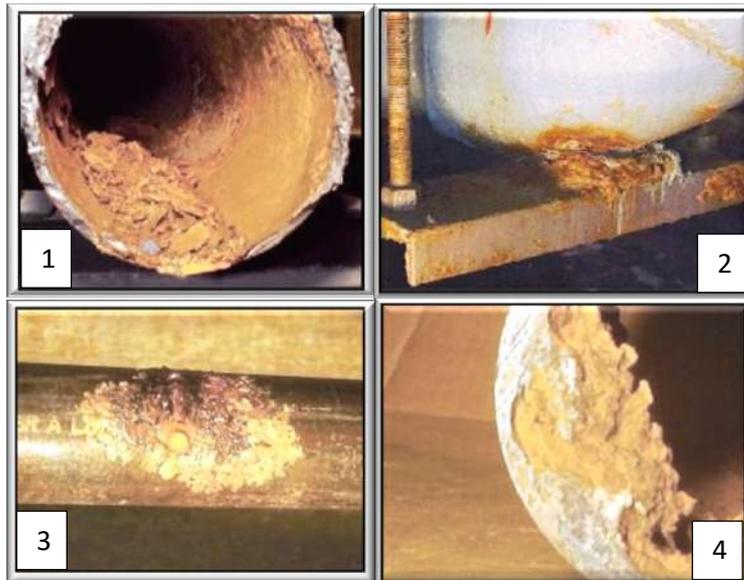


Figura 2.1: Tipos de corrosões - generalizada, galvânica, puntiforme e alveolar.

Fonte: Salcedo (2009).

O contato elétrico entre materiais diferentes resulta no processo conhecido como corrosão galvânica. A intensidade deste tipo de corrosão será proporcional à diferença entre os valores de potencial eletroquímico dos materiais (SALCEDO, 2009) (Figura 2.1 – Imagem 2).

A corrosão puntiforme ou por pite se processa em pontos ou pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que o diâmetro (GENTIL, 1995) (Figura 2.1 – Imagem 3).

A corrosão alveolar se processa na superfície metálica, produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos, apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que seu diâmetro (GENTIL, 1995) (Figura 2.1 – Imagem 4).

A corrosão bacteriana é resultante da presença de atividades de microrganismos, incluindo bactérias e fungos. O crescimento bacteriano no interior das paredes de dutos e sistemas de processamento é um problema comum em muitos campos de petróleo no mundo (SALCEDO, 2009).

2.2. Principais PIGs utilizados para detecção de corrosão interna de dutos

Para detecção de corrosão interna em dutos, os dispositivos utilizados devem ser capazes de fornecer três tipos de informações básicas: detectar a descontinuidade, informar sua localidade e mensurar a corrosão. Para esta finalidade são usados PIGs denominados instrumentados ou inteligentes.

Estes equipamentos utilizam a própria energia de bombeio do fluido interno para se deslocar no interior dos dutos. Segundo Salcedo (2009), são construídos em geral com um corpo cilíndrico, onde se localiza a eletrônica e a bateria, e o mesmo é sustentado por copos de poliuretano, possuem ainda um hodômetro para registro de distância ou posição (Figura 2.2).

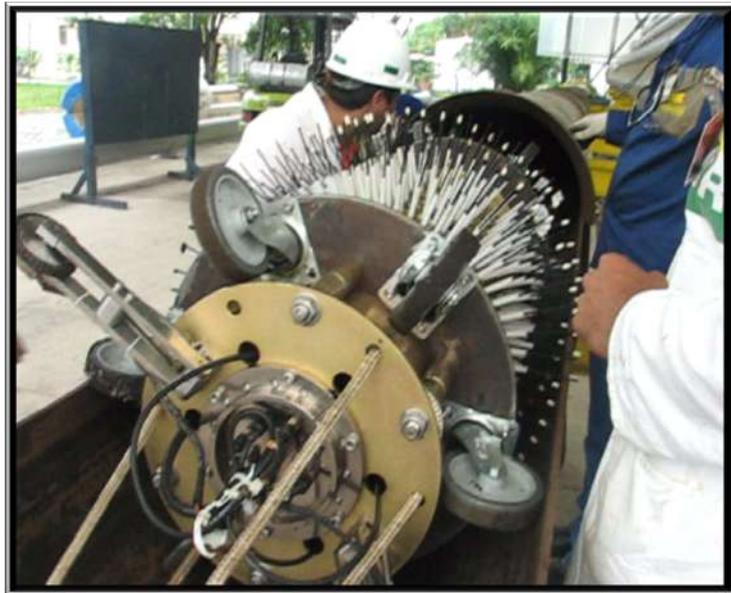


Figura 2.2: Inserção do PIG Palito na tubulação.

Fonte: Salcedo (2009).

O PIG com placa calibradora é um dos dispositivos mais importantes a ser utilizado durante o processo de construção de um duto, pois o mesmo verifica se a linha foi entregue conforme a especificação. Este método é necessário para verificar se existem diminuições de diâmetro ou ovalizações causadas pelas curvas dos dutos (CORDELL & VANZANT, 2003).

Estes PIGs utilizam uma placa de alumínio, localizada na parte posterior do PIG, para que em contato com a parede interna do duto, este não sofra danos em sua superfície interna (CORDELL & VANZANT, 2003) (Figura 2.3 – Imagem 1).

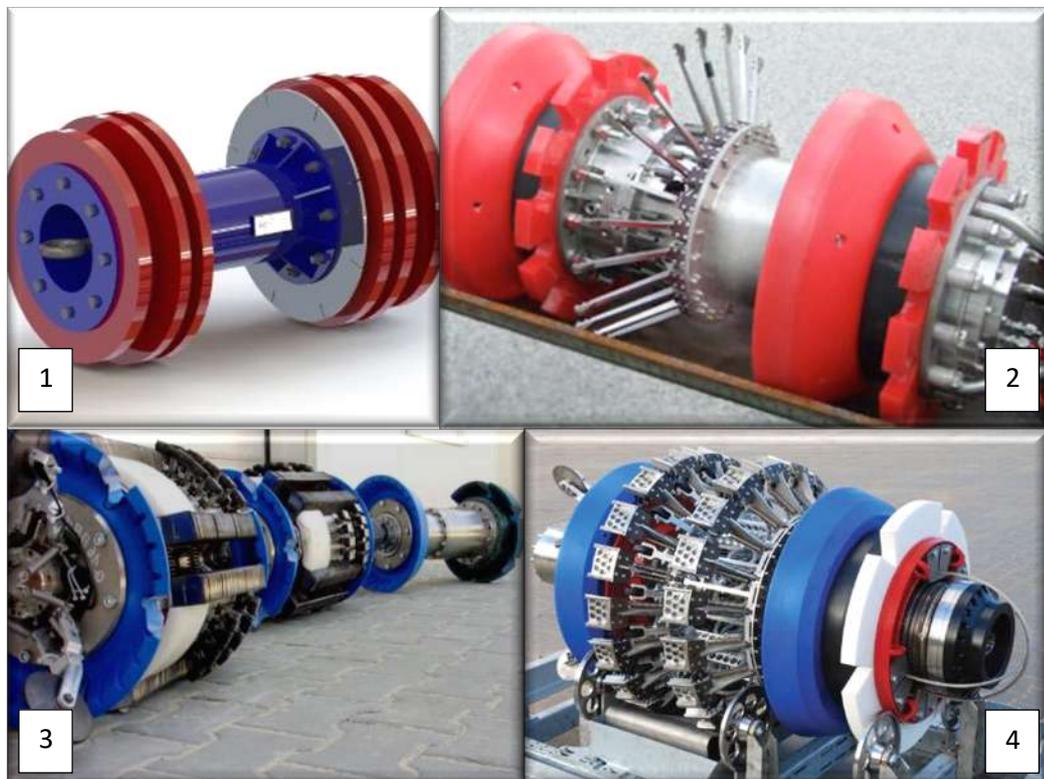


Figura 2.3: Tipos de PIGs: placa calibradora, geométrico, magnético e ultrassônico.

Fonte: Moreira (2012).

O PIG geométrico foi desenvolvido pela empresa T. D. Williamson em 1960 para resolver os problemas dos PIGs com placas calibradoras, pois, após o dispositivo detectar o dano interno no duto, existia o problema da localização da descontinuidade, gerando gasto de dinheiro e tempo (CORDELL & VANZANT, 2003).

O uso do hodômetro é usado para a medição da distância percorrida no duto e principalmente para a detecção da extensão da descontinuidade. O resultado das medições fornece a localização do defeito, e se for o caso, fornecesse também o local da redução de diâmetro da tubulação. A análise do PIG não fornece apenas a redução dimensional, mas também pode prover dados confiáveis da possível causa do defeito encontrado (CORDELL & VANZANT, 2003) (Figura 2.3 – Imagem 2).

De acordo com Cordell & Vanzant (2003), o dispositivo *magnetic flux leakage* (MFL) ou dispersão de fluxo magnético é composto de dois anéis magnéticos, separados entre si e com polaridades opostas para indução do fluxo magnético na parede do duto. Os sensores são montados entre os anéis para detecção da fuga de fluxos magnéticos que pode ocorrer devido à perda de material na parede do duto, como visto na Figura 2.3 na Imagem 3. Os sensores utilizam o efeito *Hall* para detectar a fuga do campo magnético.

A saturação magnética da parede do duto é importante para detectar qualquer perda de metal, e para isso é utilizada a fuga de fluxo magnético. Isso requer um poderoso magnetizador em contato direto com a parede do duto. Existe um fator limitante em relação ao uso do MFL em paredes de alta espessura. A espessura máxima de parede para o MFL varia com o diâmetro da linha e a velocidade, mas para a maioria dos dispositivos é de 1" (25 mm). Entretanto, existem casos em que pode-se chegar à espessura de 1 ½ " (38 mm) (CORDELL & VANZANT, 2003).

Como na Figura 2.3 na Imagem 4 os PIGs ultrassônicos são instrumentos para detecção de corrosão nas paredes interna e externa do duto. O princípio de inspeção por ultrassom é realizado através de transdutores que emitem um pulso ultrassônico que viaja em uma velocidade conhecida pelo material. O pulso ultrassônico ao entrar na parede do duto forma um eco, e o sinal de retorno é a o pulso refletido da parede externa do duto. O tempo gasto por estes ecos é chamado de tempo de trânsito e fornece uma medição direta da espessura da parede (CORDELL & VANZANT, 2003).

Diferentemente do PIG MFL, que possui uma espessura máxima de trabalho, o PIG ultrassônico possui uma espessura mínima. Essa limitação depende do instrumento e das condições de operação, mas esse valor geralmente é de 0,2" (5 mm) (CORDELL & VANZANT, 2003).

2.2.1. PIG Palito

Este instrumento foi desenvolvido no Brasil com o objetivo de detectar corrosão interna de dutos. A principal motivação para o desenvolvimento desta ferramenta foi a inspeção em dutos de produção e escoamento de petróleo offshore.

Existem dutos chamados de não-pigáveis no escoamento de produção e refino na Petrobras que impõem dificuldade e limitações aos PIGs instrumentados convencionais, como por exemplo, o ultrassônico e o magnético. Por este motivo foi desenvolvido o PIG Palito para superar as dificuldades na detecção de corrosão interna, ocasionado pela presença de água salgada transportada junto com o petróleo, uma vez que a corrosão externa é detectada por inspeção visual executado por R.O.V - *Remotely Operated Vehicle* e pela eficácia de combate a este tipo de corrosão pela proteção catódica (SALCEDO, 2009).

A estrutura mecânica do sensor palito é basicamente uma vara de contato fixo dentro de uma haste articulada, um eixo de rotação da haste que é fixada na base do sensor e o transdutor dentro deste eixo, como na Figura 2.4. Ímãs que fornecem um campo magnético constante ao conjunto composto pelo eixo e transdutor estão fixos dentro da haste articulada do sensor palito (SALCEDO, 2009).



Figura 2.4: PIG palito multidimensional.

Fonte: autor (2021).

Quando ocorre movimentação angular da haste articulada, que é resultado do apalpamento da superfície do duto pela vara, ou seja, um defeito de perda de espessura causado pela corrosão, o ângulo de incidência do fluxo magnético na face do transdutor se altera proporcionalmente ao movimento como na Figura 2.5. Assim, esta variação de incidência de fluxo magnético produzirá um sinal analógico de saída do transdutor proporcional ao movimento angular da haste (SALCEDO, 2009).

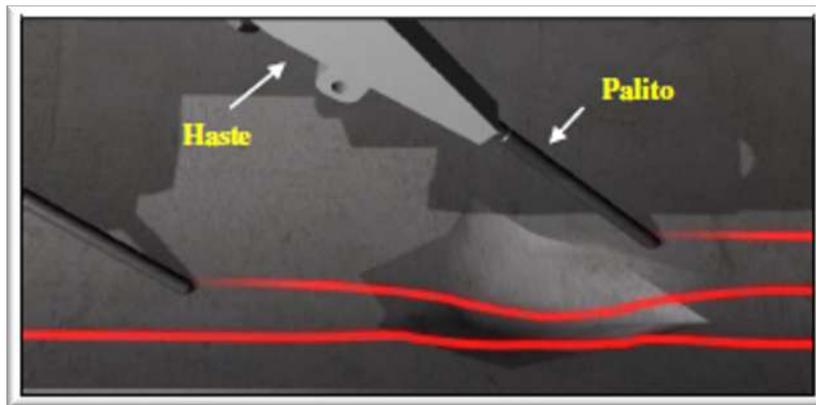


Figura 2.5: Sensores palito perfilando uma superfície com defeito.

Fonte: Salcedo (2009).

2.2.1.1. Transdutor de efeito hall

Segundo Salcedo (2009), o elemento primário de medição de um sensor palito é a medida da posição angular da haste com ímãs permanentes em torno do transdutor *Hall*. Portanto, a medição efetiva é a intensidade de fluxo magnético incidente na face do transdutor *Hall* que está dentro do eixo. As principais características para a escolha deste sensor são:

- Resistência à temperatura, caso seja encapsulado com resina;
- Baixo custo;
- Ausência de partes móveis de contato;
- Tamanho pequeno;
- Versatilidade.

O transdutor *Hall* segue o princípio do efeito *Hall*, que quando uma placa fina de um material semicondutor, 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 como na Figura 2.6. A tensão de saída do elemento *Hall* é diretamente proporcional à densidade do fluxo magnético (Medeiros, 2013).

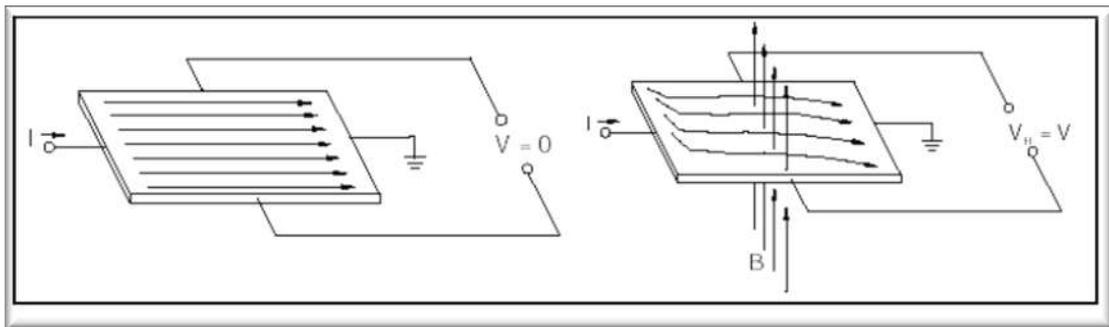


Figura 2.6: Princípio do efeito *Hall*.

Fonte: Salcedo (2009).

Para este trabalho foram utilizados sensores tipo AMR – *Anisotropic Magneto Resistive Sensor*, implementadas em placas de circuito eletrônico, em conjunto com as estruturas mecânicas do sensor palito.

2.2.1.2. Calibração

Segundo Salcedo (2009) 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 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 da calibração (SALCEDO, 2009).

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

Na primeira fase de calibração o objetivo é ajustar a sensibilidade do transdutor 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, 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 para conversão das medidas analógicas em sinais de voltagem de cada sensor palito para milímetros. A altura de cada degrau do gabarito de calibração é usinada para representar a faixa de excursão de atuação do sensor palito durante a inspeção no duto. A Figura 2.7 mostra o uma coroa do PIG Palito, sem os copos de sustentação, em fase de calibração na bancada.



Figura 2.7: PIG Palito em calibração na bancada.

Fonte: Autor (2021).

2.2.1.3. Limitações do sistema de medição

Como mostrado na Figura 2.8, existe uma limitação que é a detecção de corrosões profundas e com diâmetro reduzido, devido ao ângulo de alcance da haste no fundo da descontinuidade. O critério utilizado no projeto mecânico do sensor é determinar que no diâmetro nominal interno do duto a inspecionar, o palito deverá formar um ângulo de 45 graus com a superfície, (SALCEDO, 2009).

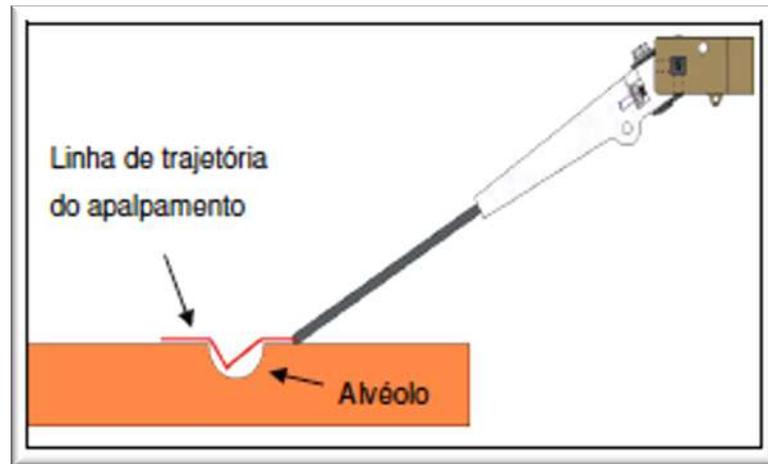


Figura 2.8: Simulação do sensor palito apalpando uma corrosão.

Fonte: Salcedo (2009).

Outro problema que ocorre nas medições executadas pelo PIG Palito é um efeito chamado de *overshoot* que é causado pelo impacto da haste do sensor na superfície do duto. Este efeito ocorre após a passagem da ferramenta em soldas circunferenciais durante a inspeção. Isso gera uma oscilação no sinal de medida do sensor e provoca falsa interpretação de medição, como, por exemplo, uma falsa corrosão (SALCEDO, 2009).

2.3. Trabalhos recentes sobre o PIG Palito

Foram reunidas um total de 44 bibliografias catalogadas para o estudo deste tema, sendo que para este trabalho foram utilizadas 15 bibliografias, conforme o quadro referencial teórico na tabela 2.1. O período de abrangência utilizado foi de 10 anos, porém foram utilizadas também bibliografias com uma abrangência maior, devido a sua importância nesse assunto.

Tabela 2.1: Quadro Referencial Teórico.

TEMAS	REFERÊNCIAS
Corrosão	GENTIL, V. (1995)
Tipos de PIG	CORDELL J.; VANZANT H. (2003) e GUEDES M. (1994).
Testes com PIG Palito	CANAVESE G.; SCALTRITO L. (2015a), CANAVESE G.; SCALTRITO L. (2015b), COSTA C. J. M. (2013), LI X.; ZHANG S.; LIU S. (2015), KIM D.K.; CHO S.H.; PARK S.S. (2003), MEDEIROS J. S. (2013), MOREIRA A. P. (2012), SABINO J. M. (2009) e SALCEDO T. (2009)
Metrologia	JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) (2008), MENDES A.; ROSÁRIO P. P. (2005) e VIM - Vocabulário Internacional de Metrologia (2012)

Fonte: Autor (2021)

Salcedo (2009) estuda o desgaste das pontas dos sensores e problemas na obtenção de dados no sensor palito devido a vibrações que interferem na detecção de micro geometria, gerando assim, erros de interpretação dos dados. O mesmo utiliza alvéolos com as seguintes dimensões (diâmetro x profundidade): 5 mm x 2,5 mm, 9 mm x 4,5 mm, 12 mm x 6 mm, 16 mm x 8 mm e 20 mm x 10 mm que foram usinados em um disco de aço carbono como na Figura 2.9. A velocidade utilizada foi de 0,5 m/s.

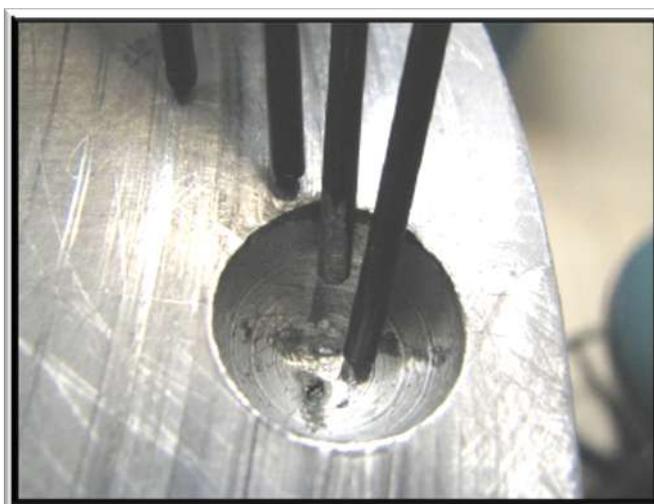


Figura 2.9: Detalhe do alvéolo.

Fonte: Salcedo (2009).

Medeiros (2013) estuda diversas condições de operação e apresenta uma bancada para ensaiar sensores perfilométricos de PIG Palito. Além disso, apresenta resultados de medições de descontinuidade de ressalto e rebaixo em superfícies plana e cilíndrica, além de um modelo matemático de segunda ordem para interpretação de dados. O mesmo utiliza alvéolos com as seguintes dimensões (diâmetro x profundidade): 5 mm x 2,5 mm, 9 mm x 4,5 mm, 12 mm x 6 mm e 16 mm x 8 mm. O ressalto cônico tem dimensão de 6 mm a 2 mm de altura e o ressalto cilíndrico tem altura de 4 mm. As velocidades utilizadas são de 0,2, 1 e 2 m/s.

Costa (2013) usa recursos de topografia para mapear a superfície circular de aço carbono com danos simulados experimentalmente com ressalto e rebaixos em 4 (quatro) velocidades distintas utilizando o sensor do PIG Palito. São utilizados sensores perfilométricos indutivos para identificar zonas cegas devido a flutuação dos saltos do sensor na superfície danificada. O mesmo utiliza alvéolos com as seguintes dimensões (diâmetro x profundidade): 5 mm x 2,5 mm, 9 mm x 4,5 mm, 12 mm x 6 mm e 16 mm x 8 mm. Os ressaltos cilíndricos em dimensões de (altura x largura): 2 mm x 6 mm, 4 mm x 12 mm e 6 mm x 13 mm. As velocidades utilizadas são de 0,02, 0,2, 1 e 2 m/s.

Li *et al.* (2015) realizam um experimento para estudar a influência da velocidade e a força elástica da mola pré-tencionada em defeitos convexos, simulando uma corrida de PIG em dutos com diferentes velocidades e forças aplicadas à mola com o intuito de estudar o fenômeno chamado de “trajetória assimétrica”, que basicamente comprova que o tempo de subida do sensor até o topo do ressalto é maior que a descida até a face interna do duto. O mesmo utiliza ressalto cilíndrico com altura de 5,5 mm. Neste artigo não são abordados alvéolos, apenas ressaltos. As velocidades utilizadas são de 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, e 8 m/s. As forças da mola utilizada são de 9, 12 e 15 N.

Kim *et al.* (2003) trabalham com o PIG de perfilagem, estudando o campo magnético através de análise de elementos finitos. Este dispositivo utiliza como princípio de medição o efeito hall e apalpadores com rodízios. As velocidades de deslocamento dentro do duto variam de 2 a 4 m/s e precisão é de $\pm 1,0$ mm. A tabela 2.2 apresenta os dados de coletas de dados sobre os erros de medição.

Tabela 2.2: Resultados dos erros experimentais.

Altura do Ressalto (mm)	Valor Medido (mm)	Erro (mm)	Valor Medido (mm)	Erro (mm)
2	2,1099	+ 0,10	2,3881	+ 0,38
3	3,1988	+ 0,19	3,1728	+ 0,17
5	4,9859	- 0,01	4,9359	- 0,06
7	6,8244	- 0,17	7,1401	+ 0,14
10	9,8342	- 0,16	10,230	+ 0,223

Fonte: Kim & Cho (2003)

Sabino (2009) faz uma análise comparativa entre o PIG palito e um medidor ultrassônico automatizado de inspeção não-destrutiva. O trabalho indicou que muitas descontinuidades não foram detectadas pelo PIG palito, principalmente as de pequenos diâmetros e defeitos próximos a ressaltos. Com isso os erros detectados nos instrumentos foram predominantemente elevados.

Canavese & Scaltrito (2015a) abordam um protótipo de PIG de perfilagem de baixo custo que utiliza extensômetro como princípio de medição. Este dispositivo funciona com temperaturas de até 180 °C e alcança uma precisão de medição de 10 µm. Segundo os autores este PIG é capaz de detectar e localizar mudanças de diâmetro interno e mudanças de rugosidade graças aos extensômetros.

Canavese & Scaltrito (2015b) realizam teste de campo e processamento de dados em Trecate (Novara, Itália) para testar o desempenho de um protótipo de PIG perfilagem de baixo custo. O teste é realizado em um duto de diâmetro de 12" com 8 km de extensão, o fluido de teste usado foi água, com 2 bar de pressão, velocidade média de 1,1 m/s e duração de 2 horas. Segundo os autores através do processamento de dados é possível detectar soldas concêntricas entre a junção de dois tubos com aproximadamente 10 m de distância entre eles. Ainda segundo os autores é possível detectar características com apenas um exame visual no *software* como: curvas horizontais e verticais, válvulas, conexão tipo T, obstruções, bombas, rachaduras, ovalizações e restrições de diâmetro.

Um dos primeiros testes realizados no PIG Palito teve o objetivo de avaliar o comportamento do sensor. Os testes foram realizados em bancada para se estudar principalmente um efeito intrínseco ao sensor chamado de *overshoot* que é causado pelo impacto da haste do sensor na superfície interna do duto, após passar por algum

ressalto. Este efeito ocorre principalmente após a passagem do instrumento em soldas circunferenciais de união de tubos durante a inspeção. Isso gera uma oscilação no sinal do sensor e provoca falsas interpretações de medição como, por exemplo, uma falsa corrosão (SALCEDO, 2009).

A instrumentação utilizada na bancada é composta por medidor de velocidade, placa de condicionamento de sinais e câmera de alta velocidade, que filma o comportamento do sensor durante o teste. A velocidade de rotação do disco foi controlada através do inversor de frequência do motor que está acoplado no eixo de giro da bancada. O disco foi submetido a velocidades entre 0,2 m/s até 2 m/s para análise do comportamento do sensor nestas velocidades. Estas velocidades foram adotadas pelo fato de a velocidade média apropriada para inspeção ser 1 m/s, por este motivo adotou-se uma faixa entorno deste valor. Os testes realizados serviram também para avaliar erros de medição do PIG palito.

Outros trabalhos acadêmicos que realizaram este tipo de teste foram Costa (2013) e Medeiros (2013). A tabela 2.3 representa uma análise comparativa entre os parâmetros de teste utilizados pelos autores citados.

Tabela 2.3: Quadro comparativo de grandezas utilizadas nos estudos.

	Salcedo (2009)	Medeiros (2013)	Costa (2013)
Alvéolo <i>Diâmetro x</i> <i>Profundidade</i> <i>(mm)</i>	Ø 5 x 2,5 Ø 9 x 4,5 Ø 12 x 6 Ø 16 x 8 Ø 20 x 10	Ø 5 x 2,5 Ø 9 x 4,5 Ø 12 x 6 Ø 16 x 8	Ø 5 x 2,5 Ø 9 x 4,5 Ø 12 x 6 Ø 16 x 8
Velocidade <i>(m/s)</i>	0,5	0,2 1,0 2,0	0,02 0,2 1,0 2,0

Fonte: adaptado de Salcedo (2009), Costa (2013) e Medeiros (2013).

A tabela 2.4 apresenta uma análise comparativa dos resultados encontrados utilizando os parâmetros da tabela 2.3. Os resultados estão informados através de

erro relativo, no qual foram comparados com os resultados encontrados durante o teste de bancada.

Pode se observar na tabela 2.4 que os erros são mais elevados quando a velocidade é aumentada, com exceção de Medeiros (2013), pois o mesmo utiliza modelos matemáticos de segunda ordem para interpretação dos dados, sendo que Salcedo (2009) e Costa (2013) utilizam medição direta.

Tabela 2.4: Quadro de porcentagem de erro de medição do sensor palito.

	Salcedo (2009)	Medeiros (2013)			Costa (2013)			
Alvéolo Profundidade (mm)	Velocidade (m/s)							
	0,5	0,2	1,0	2,0	0,02	0,2	1,0	2,0
2,5	40%				56%	64%	20%	84%
4,5	36%	15% a	7% a	2% a	33%	44%	22%	80%
6	22%	45%	10%	8%	28%	42%	32%	80%
8	17%				28%	36%	25%	71%
10	18%				-	-	-	-

Fonte: adaptado de Salcedo (2009), Costa (2013) e Medeiros (2013).

Com a proposta de dar prosseguimento aos testes realizados pelos autores anteriores, foi realizado um teste em laboratório utilizando um PIG Palito multidimensional de DN 4" x 8", passando o mesmo em uma tubulação de PVC de DN 6", com descontinuidades sintéticas com dimensões conhecidas, localizadas em sua face interna e utilizando velocidades variadas.

3. METODOLOGIA DE PESQUISA – MATERIAIS E MÉTODOS

Mendes & Rosário (2005) especificam que as medições são influenciadas por alguns agentes metrológicos como: método, amostra, condições ambientais, operadores equipamento, fontes erro e incertezas. Com o somatório de todos estes componentes se obtém o resultado do processo de medição e a qualidade deste processo depende do gerenciamento de cada processo. A Figura 3.1 ilustra o fluxo de como esse capítulo foi dividido segunda a metodologia.

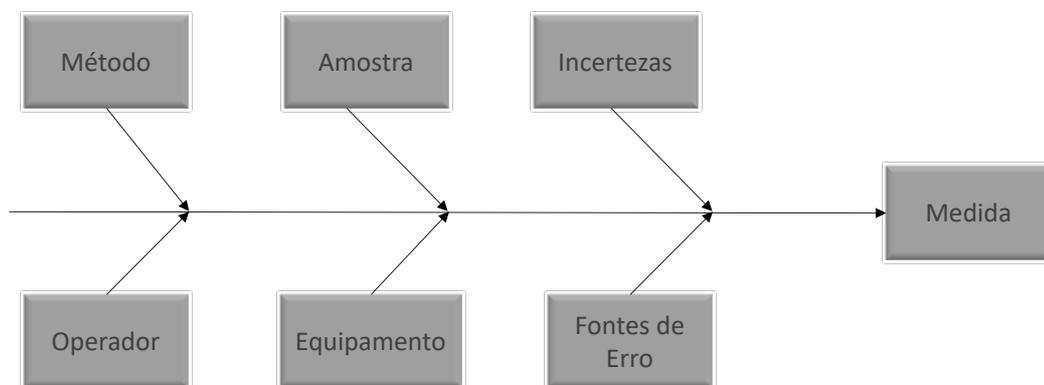


Figura 3.1: Diagrama de Ishikawa - agentes metrológicos.

Fonte: Adaptado Mendes & Rosário (2005)

3.1.1. Método

Segundo VIM (2012), o “método de medição é a sequência lógica de operações, descritas genericamente, usadas nas execuções de medidas”. Neste caso foi utilizado o método de medição direta, ou seja, onde é utilizado o instrumento para obter o resultado da medição desejada.

O método de calibração utilizado foi por comparação dimensional entre a descontinuidade sintética e a medição detectada pelo PIG Palito durante os testes como mostrado na Figura 3.2. As dimensões da descontinuidade foram aferidas por Laboratório acreditado pelo INMETRO, no qual os certificados desta calibração encontram-se no anexo deste trabalho.

O teste foi realizado com velocidades variadas de 0,2, 0,5, 1,0 e 1,5 m/s, as velocidades foram definidas baseadas em trabalhos anteriores realizados por Salcedo (2009), Costa (2013) e Medeiros (2013). Para cada velocidade foram realizadas 16 corridas para coleta de dados, a definição da quantidade de corridas levou-se em consideração a quantidade de medições que foram realizadas nas discontinuidades sintéticas no momento da calibração.

As discontinuidades foram posicionadas na face externa do tubo de PVC de DN 6" para iniciar as passagens do PIG Palito. Foram feitos 20 furos no total com diâmetro de 25 mm para acomodação das discontinuidades. A tubulação foi fixada nos suportes através de cintas de carga em bancadas com o tampo de madeira. Para garantir que as discontinuidades não fossem ejetadas com a passagem do PIG, abraçadeiras de nylon foram instaladas em seu perímetro para prevenir esse efeito (Figura 3.2).



Figura 3.2: Bancada de teste.

Fonte: Autor (2021)

Conforme a Figura 3.3, a bancada foi projetada em software 3D AutoDesk Inventor e constituída de quatro varas de tubo de DN 6" medindo 3.000 mm

comprimento cada. Além disso, 3 luvas de DN 6" com 300 mm de extensão foram utilizadas para o acoplamento dos tubos entre si, totalizando 12.000 mm de largura de bancada no total.

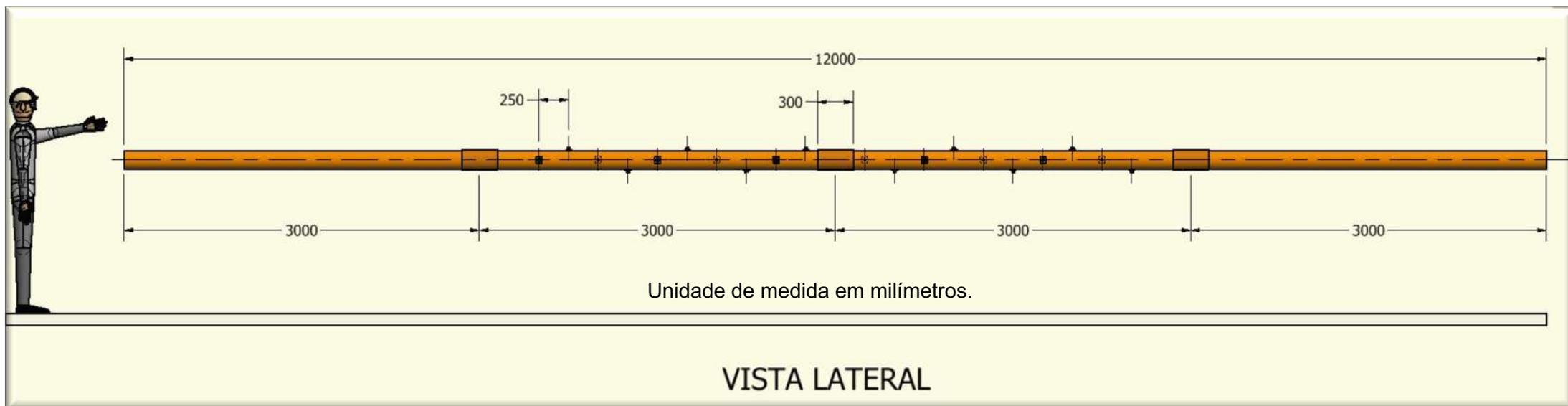


Figura 3.3: Desenho da bancada de teste.

Fonte: Autor (2021)

A bancada foi dividida em 5 setores (Figura 3.4), sendo que cada um é constituído por 4 descontinuidades de mesmas dimensões separadas entre elas com 250 mm de distância. A finalidade desta setorização foi obter o maior número de dados possíveis em uma mesma corrida, ou seja, em uma passagem do PIG Palito são recolhidas 4 informações dimensionais de cada setor, somando 20 coletas de dados.

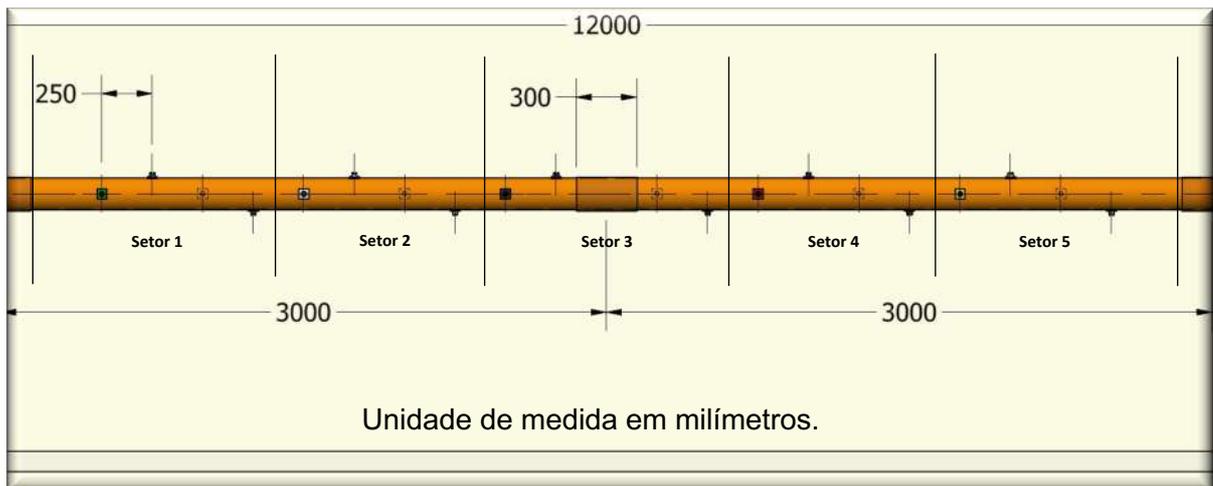


Figura 3.4: Vista lateral da bancada de teste com os setores.

Fonte: Autor (2021)

Foi adotado um posicionamento helicoidal das descontinuidades sintéticas para que para cada quadrante da tubulação fosse coberta por uma peça de cada dimensão (Figura 3.5). Essa metodologia foi adotada para testar o número máximo de sensores do PIG Palito durante a sua passagem.

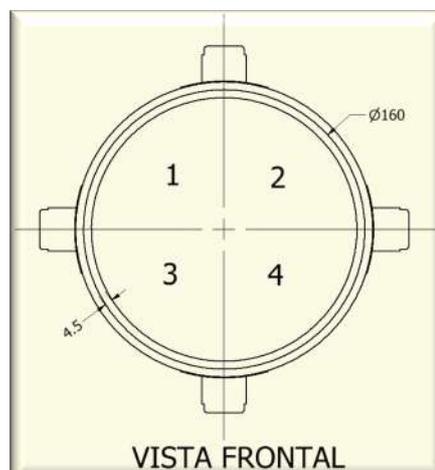


Figura 3.5: Divisão por quadrante.

Fonte: autor (2021)

É caracterizada uma corrida quando o PIG palito é posicionado na entrada da tubulação e é rebocado através de um motor de corrente alternada, no qual possui *dimmer* para controle da rotação do motor, conforme Figura 3.6. Entre o motor e o PIG é utilizada uma corda que tem a finalidade de rebocar o equipamento dentro da tubulação. Quando o PIG Palito chega ao outro extremo do tubo é caracterizado 1 corrida.

A velocidade de avanço foi calculada de maneira indireta, ou seja, através do tempo de passagem do PIG Palito no interior da tubulação. Foi usado um cronometro marcando o tempo do início a partir do acionamento do motor até a chegada do PIG no final da tubulação.



Figura 3.6: Vista frontal da bancada de teste.

Fonte: autor (2021)

3.1.2. Amostra

Segundo Mendes & Rosário (2005), amostra “é a parte de um todo, uma vez avaliada, analisada e medida que garante que os resultados encontrados podem ser atribuídos ao conjunto original”. Neste caso foi utilizada uma taxa de amostragem de 100% dos dados adquiridos.

Durante a realização do teste houve discontinuidades que não foram detectadas na passagem do PIG. Como o intuito do experimento era reproduzir um cenário real, os valores nulos foram considerados no cálculo de incerteza.

3.1.3. Operador

Este item é essencial para a aquisição de dados de medição. Os testes foram realizados por 2 técnicos do centro de pesquisa e 1 analista especializada na interpretação dos dados fornecidos pelo programa RTScan, que é o *software* desenvolvido pelo CPTI para aquisição de dados do PIG.

Todos os dados de medição coletados pelo equipamento foram cedidos pelo CPTI. Toda a manipulação dos dados foi realizada por profissionais experientes na utilização do PIG.

3.1.4. Equipamento

Segundo VIM (2012), o instrumento de medição “é todo e qualquer dispositivo utilizado sozinho ou em conjunto com outros para realizar uma medição”. Para o experimento foram utilizados na bancada de teste os seguintes materiais:

- 12 metros de tubulação de PVC com DN 6”;
- 04 bancadas fechadas para oficina com tampo de madeira;
- 04 cintas de carga;
- 20 discontinuidades sintéticas impressas em impressora 3D;
- 20 abraçadeiras de nylon;
- 01 furadeira com dupla rotação com 750 w de potência;
- 01 módulo *dimmer* rotativo 127 V eletrônico;
- 01 soquete multidimensional;
- 01 guincho manual 2500 lb;
- 01 bancada de trabalho dobrável;
- 15 metros de corda com diâmetro de 10 mm;
- 02 olhais de içamento;
- 01 PIG Palito multidimensional de DN 4” x 8”.

Para o deslocamento do equipamento dentro do tubo de PVC, foi projetado e montado um dispositivo capaz de puxar o PIG Palito em diversas velocidades. Para isso foram usadas uma furadeira elétrica acoplada a um guincho manual, um *dimmer* eletrônico para a variação da rotação da furadeira e corda (Figura 3.7).

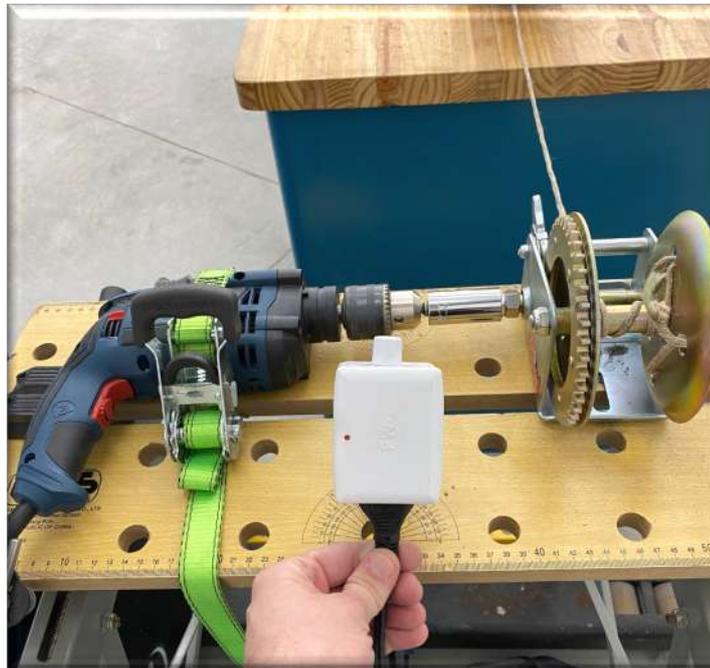


Figura 3.7: Dispositivo projetado para rebocar o PIG Palito.

Fonte: autor (2021)

A partir do momento que o *dimmer* eletrônico era acionado, o motor de corrente alternando da furadeira começava a rotacional na velocidade equivalente a corrente gerada pelo dispositivo. Utilizando um acoplamento através de um soquete multidimensional, o guincho manual tracionava a corda que estava alojada em seu carretel, realizando assim o deslocamento do PIG, pois a extremidade da corda estava acoplada na parte dianteira do equipamento.

Para a simulação dos defeitos de corrosão na tubulação, foram modeladas descontinuidades sintéticas em 3D, utilizado o software Autodesk Inventor (Figura 3.8) para que o mesmo fosse milimetricamente acoplado na face externada do tubo e projetado também para que a peça modelada facesse a parede interna da tubulação, com o propósito que o PIG só detectasse as imperfeições mapeadas (Figura 3.9).

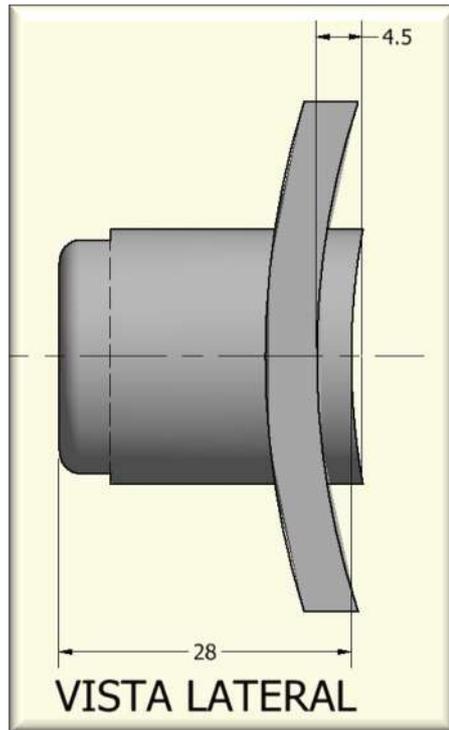


Figura 3.8: Modelagem com Software Autodesk Inventor.

Fonte: autor (2021)



Figura 3.9: Descontinuidades sintética faceando o interior do tubo de PVC.

Fonte: autor (2021)

Para a confecção das peças para simulação das discontinuidades foi utilizado o método de impressão 3D, por possuir melhor custo-benefício. A técnica de impressão foi a fabricação com filamento fundido (FFF) como na Figura 3.10. A técnica

de fabricação parte do aquecimento de filamentos de material plástico como o ácido polilático (PLA) (Figura 3.10), até chegar num estado semissólido e a posterior saída através do bico extrusor. Essa extrusão forma camadas a partir da movimentação da impressora nos eixos X, Y e Z. É importante destacar que a aplicação desse método foi pioneira no meio acadêmico sobre PIG, pois não foi encontrada em outras publicações pesquisadas sobre o assunto.

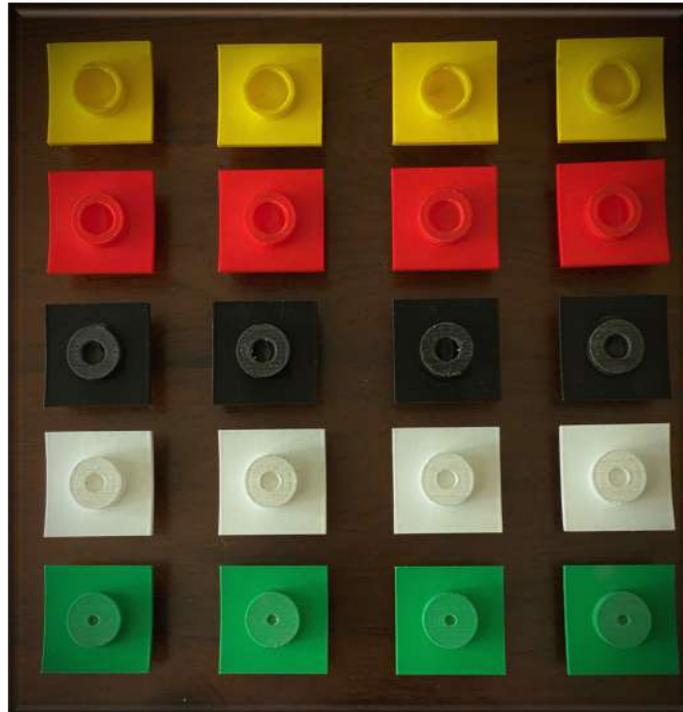


Figura 3.10: Descontinuidades sintéticas impressas em 3D.

Fonte: autor (2021)

Na Tabela 3.1 apresentam-se as dimensões das descontinuidades sintéticas utilizadas, suas cores e as velocidades adotadas.

Tabela 3.1: Parâmetros de teste.

Velocidade (m/s)	Alvéolo <i>Diâmetro x Profundidade</i> (mm)	Cores das Descontinuidades Sintéticas.
0,2	5 x 2,5	Verde
0,5	9 x 4,5	Branco
1,0	12 x 6	Preto
1,5	16 x 8	Vermelho
	20 x 12	Amarelo

Fonte: autor (2021)

As dimensões das peças foram baseadas em trabalhos realizados anteriormente por Salcedo (2009), Costa (2013) e Medeiros (2013), apenas a dimensão 20 x 12 mm foi escolhida pelo autor juntamente com o Mestre Camerini, por se tratar de uma dimensão convencional na indústria.

Para efeito de confiabilidade das dimensões das descontinuidades impressas, as peças foram enviadas para um laboratório de calibração acreditado pelo INMETRO, essa certificação é o reconhecimento formal de que o laboratório está operando com um sistema de gestão de qualidade documentado e tecnicamente competente segundo critérios estabelecidos por normas internacionais. Os certificados de calibração utilizados no teste estão em anexo a este trabalho. Assim como a utilização de peças impressas em 3D, a calibração dimensional das descontinuidades utilizadas é um diferencial nesse trabalho.

4. RESULTADOS

A finalidade deste Capítulo é comparar os resultados encontrados durante o teste, com as descontinuidades sintéticas impressas em 3D calibradas em laboratório rastreável, pela Rede Brasileira de Calibração e apresentar como foi calculada a incerteza do PIG Palito.

4.1. Comparação dos resultados com as descontinuidades sintéticas

Para a análise dos resultados das corridas realizadas pelo PIG Palito foi utilizado o software RTScan. Na Figura 4.1 apresenta-se a imagem da varredura realizada pelo equipamento na velocidade de 0,2 m/s, onde os pixels em branco representam as descontinuidades sintéticas. Na imagem a seguir o sentido da corrida é da esquerda para a direita.

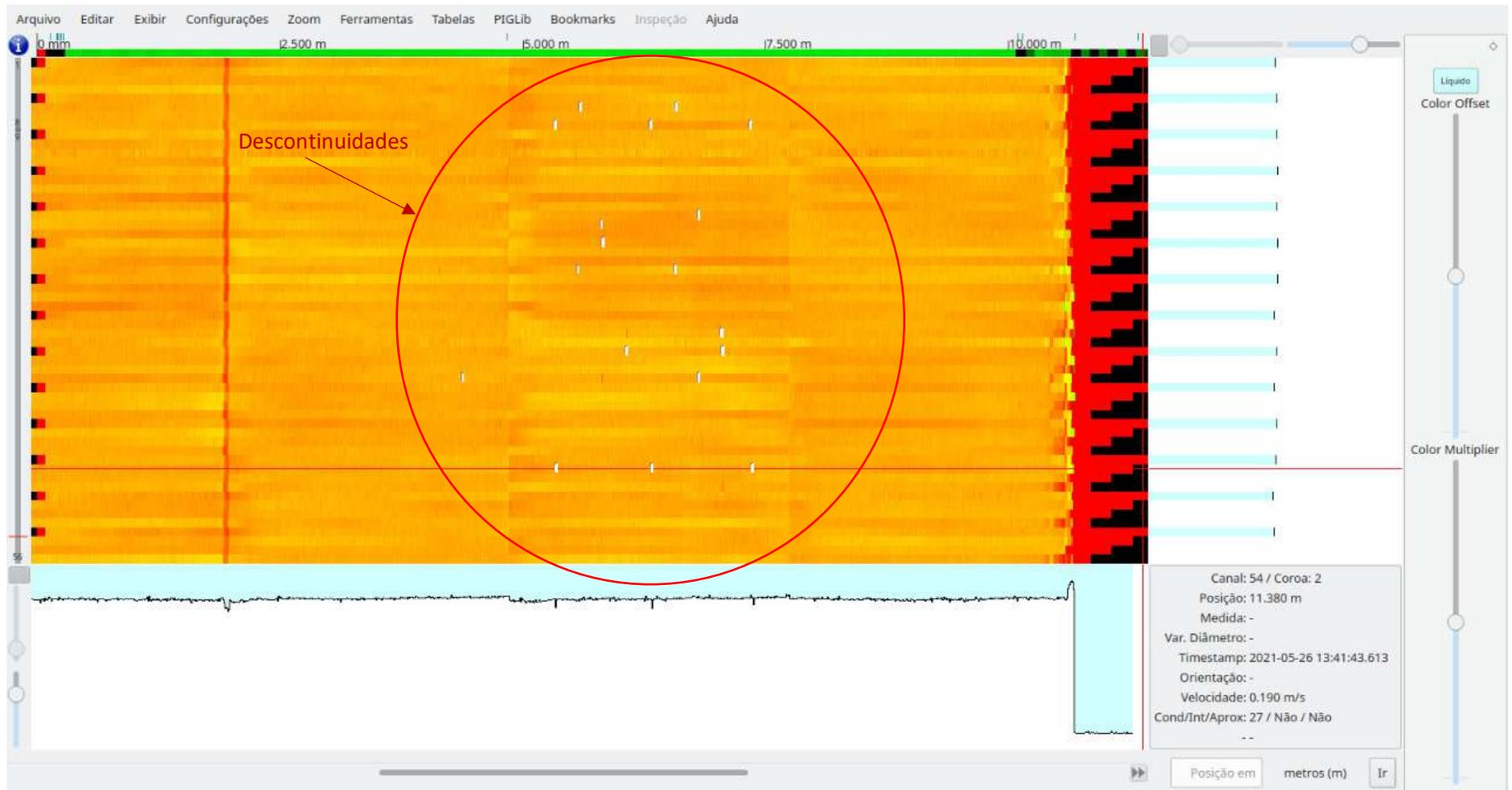


Figura 4.1: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 0,2 m/s.

Fonte: autor (2021)

Na Figura 4.2, onde a velocidade é de 0,5 m/s, se observa uma coloração amarelada, que é a região onde os sensores apalpam a parede interna do duto.

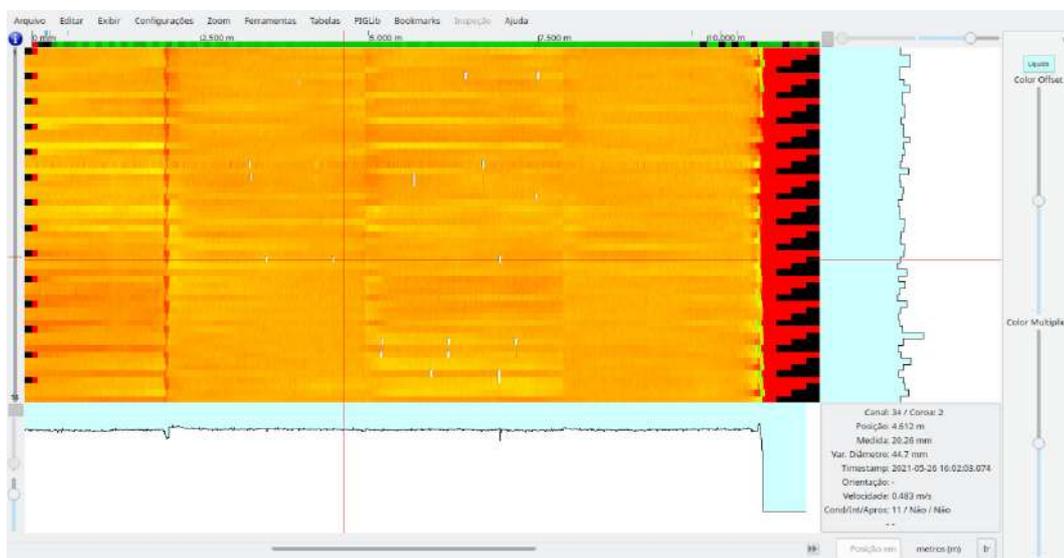


Figura 4.2: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 0,5 m/s.

Fonte: autor (2021)

Já na Figura 4.3, apresenta a área que não teve nenhuma detecção, tanto de discontinuidades quanto de parede interna da tubulação. Esta parte é representada pelas cores vermelha e preta. Esta região é localizada no final do duto.

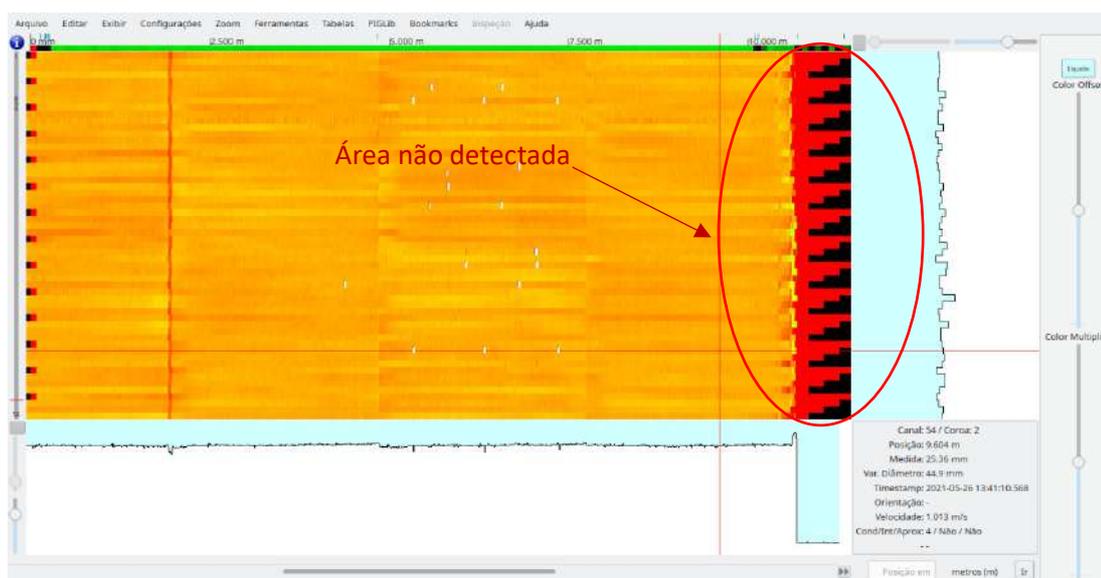


Figura 4.3: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 1,0 m/s.

Fonte: autor (2021)

Pode se observar também na Figura 4.4 que as emendas da tubulação são representadas pelas descontinuidades das linhas na cor amarela, sendo que a primeira emenda está representada por uma linha vermelha, no qual a falha é mais acentuada.

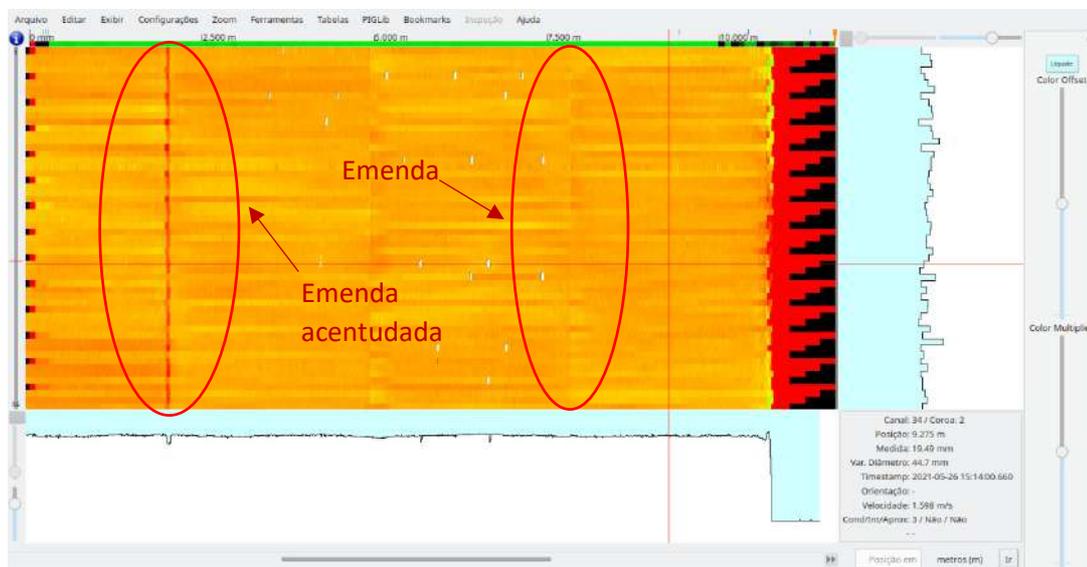


Figura 4.4: Imagem gerada pelo Software RTScan para a velocidade 1,5 m/s.

Fonte: autor (2021)

Analisando as 4 imagens geradas com suas respectivas velocidades pode se observar que o padrão de detecção das discontinuidades sintéticas são basicamente as mesmas, expressando assim a repetibilidade do PIG Palito.

4.2. Cálculo da incerteza

Durante a execução do teste foram realizadas 16 corridas por velocidade, somando 64 corridas totais. Após a finalização do experimento foram coletadas 1.280 medições, pois em uma passagem do PIG são coletados 20 dimensionais, pois são 4 discontinuidades iguais divididas em 5 seções. A planilha de cálculo utilizada para realizar os cálculos de incerteza está em anexo a este trabalho.

Decidiu-se calcular a incerteza separadamente da profundidade e do diâmetro, pois se fosse adotado o critério de volume os resultados não seriam considerados justos.

Os valores das discontinuidades demonstrados na Tabela 4.1 são os resultados médios coletados pelo equipamento durante as corridas.

Tabela 4.1: Quadro com os valores de encontrados no teste.

Velocidade (m/s)	Alvéolo <i>Profundidade x</i> <i>Diâmetro</i> (mm)	Valor Médio Padrão <i>Profundidade x</i> <i>Diâmetro</i> (mm)	Valor Médio Encontrado pelo PIG <i>Profundidade x</i> <i>Diâmetro</i> (mm)
0,2	2,5 x 5	2,55 x 4,71	1,75 x 3,69
	4,5 x 9	4,60 x 8,48	3,56 x 7,70
	6 x 12	6,08 x 11,72	4,56 x 9,47
	9 x 16	8,10 x 15,64	4,15 x 12,46
	12 x 20	12,15 x 19,74	2,4 x 5,36
0,5	2,5 x 5	2,55 x 4,71	1,58 x 4,26
	4,5 x 9	4,60 x 8,48	2,63 x 6,54
	6 x 12	6,08 x 11,72	4,14 x 10,70
	9 x 16	8,10 x 15,64	4,80 x 12,64
	12 x 20	12,15 x 19,74	2,75 x 6,50
1,0	2,5 x 5	2,55 x 4,71	0,51 x 1,64
	4,5 x 9	4,60 x 8,48	1,70 x 5,14
	6 x 12	6,08 x 11,72	3,22 x 9,66
	9 x 16	8,10 x 15,64	4,49 x 13,44
	12 x 20	12,15 x 19,74	1,22 x 3,22
1,5	2,5 x 5	2,55 x 4,71	0,75 x 3,76
	4,5 x 9	4,60 x 8,48	2,25 x 8,56
	6 x 12	6,08 x 11,72	3,56 x 11,98
	9 x 16	8,10 x 15,64	3,96 x 13,76
	12 x 20	12,15 x 19,74	1,44 x 4,84

Fonte: Autor (2021)

As Figuras 4.1 e 4.2 foram retirados da Tabela 4.1 e pode se observar que a variação entre os valores encontrados dentro da mesma faixa de medida de profundidade, diâmetro e velocidade estão entre 0,37 e 1,48 mm. Se observa também as medidas relacionadas ao diâmetro, principalmente no 16 mm, estão com variação baixa, na ordem de 0,62 mm, demonstrando que o PIG Palito possui repetibilidade em suas medições.

Como percebido também no Figura 4.1 e 4.2 na barra da profundidade 12 mm e no diâmetro 20 mm, representado na cor azul escuro. Os valores estão abaixo do esperado graficamente, pois quebram a escala crescente. Esse fenômeno se dá por causa da desaceleração do PIG no final da corrida, causando assim anulação na detecção das descontinuidades localizadas no final da tubulação.

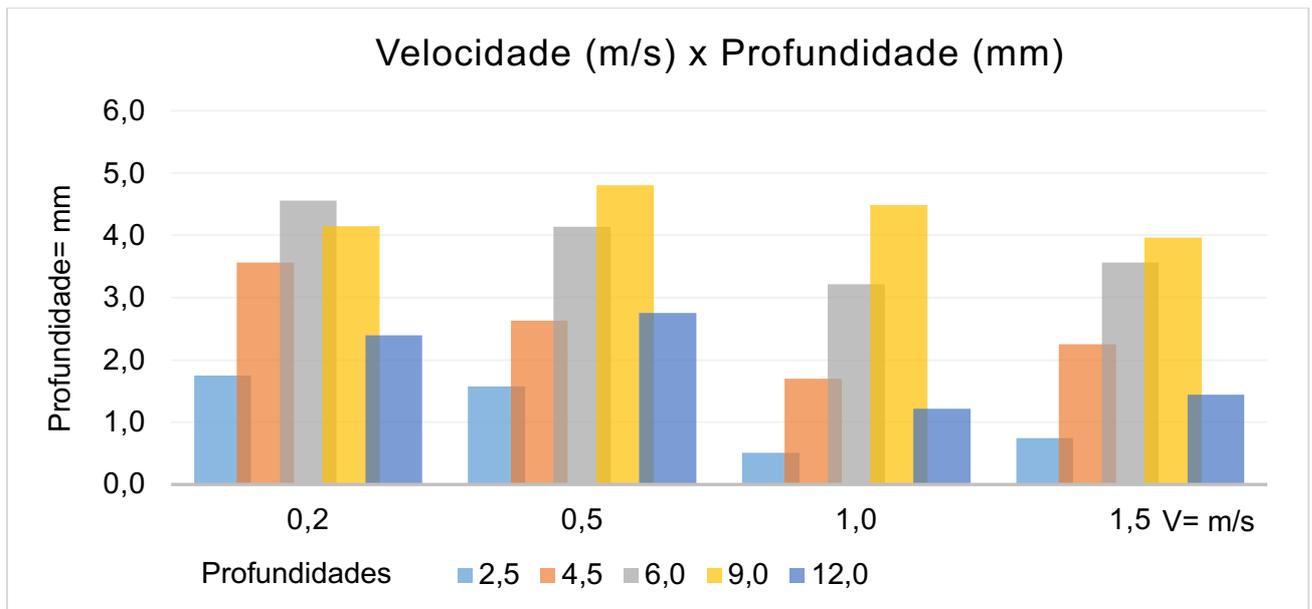


Figura 4.1: Profundidades medidas pelo PIG palito para $v = 0,2; 0,5; 1,0; 1,5\text{m/s}$.

Fonte: autor (2021)

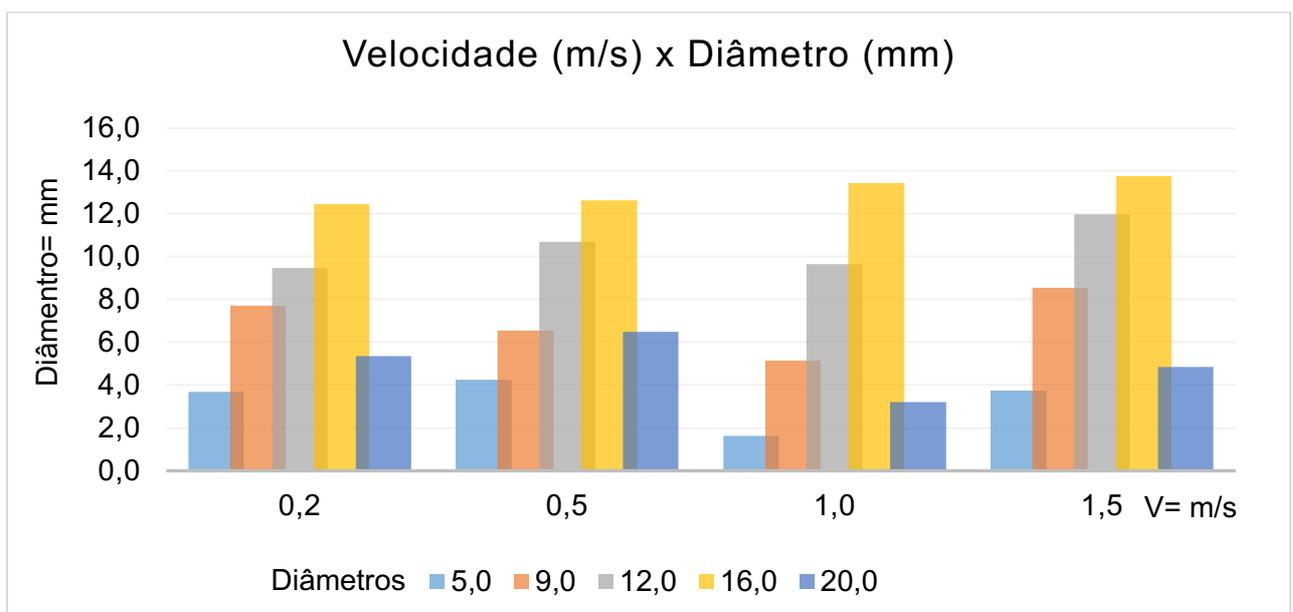


Figura 4.2: Diâmetros medidos pelo PIG palito para $v = 0,2; 0,5; 1,0; 1,5\text{m/s}$.

Fonte: autor (2021)

4.2.1. Modelo matemático da calibração

Segundo Mendes & Rosário (2005) o erro de medição (E) é caracterizado como o resultado de uma medição (X) menos o valor verdadeiro do mensurando (VV), isso caracteriza a tendência da medição.

$$E = X - VV \quad (4.1)$$

O erro utilizado para os cálculos foi o erro relativo (Er), que por definição é o erro de medição dividido pelo valor verdadeiro do mensurado do objeto da medição.

$$Er = \frac{X - VV}{VV} \cdot 100(\%) \quad (4.2)$$

Os erros relativos calculados estão expressos na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Erros encontrados no teste

Velocidade (m/s)	Alvéolo Profundidade x Diâmetro (mm)	Erro relativo médio Profundidade x Diâmetro (%)
0,2	2,5 x 5	-31,28 x -21,57
	4,5 x 9	-22,47 x -9,10
	6 x 12	-24,99 x -19,20
	9 x 16	-48,82 x -20,58
	12 x 20	-80,26 x -72,88
0,5	2,5 x 5	-38,05 x -9,59
	4,5 x 9	-42,87 x -22,86
	6 x 12	-31,89 x -8,70
	9 x 16	-40,74 x -19,37
	12 x 20	-77,38 x -67,07
1,0	2,5 x 5	-79,89 x -65,19
	4,5 x 9	-62,97 x -39,35
	6 x 12	-47,08 x -17,51
	9 x 16	-44,51 x -14,08
	12 x 20	-89,93 x -83,18
1,5	2,5 x 5	-70,44 x -20,42
	4,5 x 9	-51,16 x 1,04
	6 x 12	-41,52 x 2,24
	9 x 16	-51,16 x -12,08
	12 x 20	-88,13 x -75,47

Fonte: Autor (2021)

Na Tabela 4.2 pode-se observar que quanto mais profunda é a descontinuidade maior é o erro, isso ocorre porque quanto menor o diâmetro e mais profunda a descontinuidade será pior a sua detecção, pois a inclinação da haste não permite que a ponta do sensor alcance o fundo do orifício. Este fato é uma limitação do instrumento conforme explicado no item 2.2.1.3.

4.2.2. Desvio padrão

Os valores encontrados estão expressos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Quadro com os desvios padrões encontrados no teste.

Velocidade (m/s)	Alvéolo <i>Profundidade x Diâmetro</i> (mm)	Desvio Padrão (mm)
0,2	2,5 x 5	1,69 x 4,70
	4,5 x 9	1,70 x 6,87
	6 x 12	1,75 x 5,41
	9 x 16	2,12 x 5,43
	12 x 20	1,79 x 4,28
0,5	2,5 x 5	1,36 x 3,81
	4,5 x 9	1,67 x 4,53
	6 x 12	1,82 x 4,87
	9 x 16	2,55 x 6,44
	12 x 20	2,62 x 6,08
1,0	2,5 x 5	0,97 x 3,09
	4,5 x 9	1,47 x 4,45
	6 x 12	1,76 x 5,29
	9 x 16	2,18 x 6,41
	12 x 20	0,44 x 1,05
1,5	2,5 x 5	1,02 x 5,03
	4,5 x 9	1,21 x 4,52
	6 x 12	1,13 x 3,53
	9 x 16	2,05 x 6,86
	12 x 20	0,99 x 2,94

Fonte: Autor (2021)

Segundo a Tabela 4.3, o melhor resultado encontrado de desvio padrão foi na velocidade 1,0 m/s, onde se apresenta uma variação de entre 0,44 e 6,41 mm. Neste

caso, a velocidade supracitada foi considerada ideal para a detecção de discontinuidades.

4.2.3. Incerteza tipo A

Segundo Mendes & Rosário (2005), a incerteza tipo A é o método de avaliação da incerteza pela análise estatística de uma série de observações.

Por diversas razões, principalmente as de ordem econômica, o número de repetições de uma medição é reduzido, tipicamente variando entre três e dez.

Sendo assim, a incerteza de medição tipo A (u_a), para nível de confiança de 95,44 %, conforme o gráfico 4.3 de distribuição de probabilidade normal, é obtido por, sendo que S é o desvio padrão e n é o número de medições:

$$u_a = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

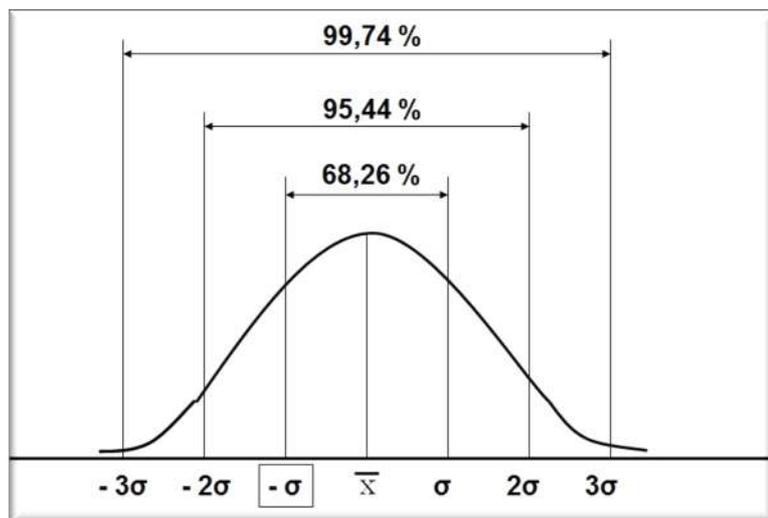


Gráfico 4.3: Gráfico de distribuição de probabilidade normal.

Fonte: <http://alexandreprofessor.blogspot.com/p/probabilidade-e-distribuicoes-de.html> - acessado em 28/04/2019.

4.2.4. Incerteza tipo B

De acordo com Mendes & Rosário (2005), a avaliação da incerteza tipo B é um método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações.

Incertezas deste tipo são determinadas a partir de informações acessórias e externas ao processo de medição.

Foram consideradas como incertezas do tipo B a resolução do padrão, resolução do PIG ($u_{\text{resolução}}$) e a incerteza do padrão (68,26%), conforme gráfico 4.1 de distribuição de probabilidade normal, onde os parâmetros do padrão foram retirados de seu certificado de calibração e a resolução do PIG foi utilizada a distribuição retangular, pois a distribuição de probabilidade é a mesma em um determinado intervalo.

$$u_{\text{resolução}} = \frac{\text{resolução}}{\sqrt{3}} \quad (4.4)$$

4.2.5. Incerteza combinada

Incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, que constituem as variâncias ou concordâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas (Mendes & Rosário, 2005).

A fórmula 4.5 expressa a incerteza combinada (U_c) através do somatório vetorial da incerteza da resolução do PIG ($rpig$) e a incerteza do padrão (cp).

$$u_c = \sqrt{u^2(rpig) + u^2(cp)} \quad (4.5)$$

4.2.6. Grau de liberdade efetivo e fator de abrangência

Quando se faz um número menor de medições, neste caso 16, aproxima-se esta distribuição a uma normal, aplicando o T-Student expresso na Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Coeficiente t-Student para vários níveis de confiabilidade.

Número de medições n	Graus de liberdade v = n - 1	Fração p em porcentagem					
		68,27	90	95	95,45	99	99,73
2	1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,80
3	2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
4	3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
5	4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,66
6	5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
7	6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
8	7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
9	8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
10	9	1,06	1,83	2,26	2,32	3,25	4,09
11	10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
12	11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
13	12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
14	13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
15	14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
16	15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
17	16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
18	17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
19	18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
20	19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
21	20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
26	25	1,02	1,71	2,06	2,11	2,79	3,33
31	30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
36	35	1,01	1,70	2,03	2,07	2,72	3,23
41	40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
46	45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
51	50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
101	100	1,00	1,66	1,98	2,02	2,63	3,08
∞	∞	1,00	1,64	1,96	2,00	2,58	3,00

Fonte: Mendes & Rosário (2005).

A melhor maneira de combinar os diversos componentes de incerteza através da tabulação das incertezas padronizadas de cada tipo, utilizando o conceito de grau de liberdade efetivo para determinar o coeficiente de abrangência que corresponda a uma confiança estatística de 95,45%. Esta determinação baseia-se na equação de Welch-Satterwaite (grau de liberdade efetivo calculado).

$$V_{ef} = \frac{u_c^4(x)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(x)}{v_i}} \quad (4.6)$$

Para determinar o fator de abrangência (k), é necessário determinar o número de graus de liberdade efetivo (V_{ef}). O número de graus de liberdade efetivo é o número de graus de liberdade associado à incerteza padrão combinada (u_c). Utilizando a Tabela 4.5 do t-Student adota-se um fator de abrangência (k) de 2,18, com 95,45% de fração.

4.2.7. Incerteza expandida

A incerteza expandida (U) é obtida multiplicando-se a incerteza padronizada combinada (U_c) pelo fator de abrangência (k). O fator (k) é identificado na Tabela T-Student, para 95,45% de probabilidade, e definido pelo valor do grau de liberdade efetivo (V_{ef}), (JCGM, 2008). Na Tabela 4.5 são explicitadas as incertezas finais encontradas.

$$U = k \cdot u_c \quad (4.7)$$

Tabela 4.5: Incertezas Finais.

Velocidade (<i>m/s</i>)	Alvéolo <i>Profundidade x Diâmetro</i> (<i>mm</i>)	Incerteza Expandida \pm (%) <i>Profundidade x Diâmetro</i>
0,2	2,5 x 5	3,30 x 4,10
	4,5 x 9	3,38 x 5,01
	6 x 12	3,29 x 4,35
	9 x 16	3,40 x 4,35
	12 x 20	3,36 x 4,14
0,5	2,5 x 5	3,26 x 3,81
	4,5 x 9	3,37 x 4,11
	6 x 12	3,28 x 4,14
	9 x 16	3,44 x 4,75
	12 x 20	3,48 x 4,62
1,0	2,5 x 5	3,22 x 3,59
	4,5 x 9	3,34 x 4,06
	6 x 12	3,26 x 4,27
	9 x 16	3,73 x 4,72
	12 x 20	3,18 x 3,33
1,5	2,5 x 5	3,22 x 4,22
	4,5 x 9	3,13 x 4,08
	6 x 12	3,20 x 3,78
	9 x 16	3,34 x 4,92
	12 x 20	3,24 x 3,83

Fonte: autor (2021).

As incertezas expandidas apresentadas na Tabela 4.5 expõem valores entre $\pm 3,1\%$ a $5,0\%$. Importante ressaltar que o experimento apresentado nessa dissertação analisou os valores medidos pelo PIG Palito simulando as condições operacionais do equipamento, diferentemente dos trabalhos anteriores, onde o teste era realizado em uma bancada giratória em condições ideais.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve o objetivo de estudar as incertezas de medição do PIG Palito, através de experimento em laboratório, comparando os resultados encontrados pela passagem do PIG em tubulação de PVC, com descontinuidade sintéticas e confrontando estes resultados com as dimensões reais das peças.

Diversos experimentos em bancadas de laboratório foram realizados com o intuito de se avaliar a capacidade de medição do PIG Palito, considerando-se um disco metálico rotatório com descontinuidades usinadas em seu corpo e um único sensor para detecção dos defeitos. Vale destacar que este trabalho utilizou o princípio operacional do equipamento e considerou uma gama de variáveis presentes durante sua utilização, resultando em saídas de informações mais próximas da realidade do que os testes anteriores.

O princípio utilizado mostrou-se capaz de atingir incertezas da ordem de $\pm 3,1$ a $5,0\%$ utilizando uma incerteza expandida obtida com um nível de confiabilidade de $95,45\%$. Entretanto, ainda existem alguns problemas encontrados no estado atual da bancada de teste que limitam o desempenho, principalmente na determinação da velocidade média do PIG durante o teste.

A partir da análise dos experimentos de validação do sistema, pode-se verificar que o mesmo se mostrou capaz de realizar a função de detecção de defeitos por corrosão na ordem de milímetros.

Com o pior caso possível, notou-se que as descontinuidades de menores diâmetro são as que tem os piores resultados, pois remete aos maiores erros encontrados durante os testes. Uma das lições aprendidas durante a execução do teste foi que para uma medição mais precisa do tempo é necessário um instrumento automático para cronometrar a passagem do PIG.

Em síntese, é possível concluir que o sistema desenvolvido tem potencial para utilização como uma bancada de calibração do PIG Palito. Com a criação de metodologia laboratorial é possível certificar a bancada para calibração com rastreabilidade do INMETRO.

Em relação ao equipamento, o mesmo viabiliza a medição com elevada resolução e velocidade, é um sistema robusto, com grandes possibilidades de aprimoramento.

5.1. Proposta para trabalhos futuros

Existem ainda diversos estudos e trabalhos a serem desenvolvidos até que se possa normatizar uma bancada de teste para cálculo de incerteza do PIG Palito.

A seguir são descritas sugestões para trabalhos futuros:

- Criação de dispositivo para medição do tempo de forma automática para a coleta de dados mais precisa;
- Influência de diferentes materiais de dutos e diferentes diâmetros nas medições;
- Criação de metodologia para a utilização da banca de teste como banca de calibração do PIG Palito
- Desenvolvimento de dispositivo para deslocamento do PIG Palito dentro do duto com precisão de velocidade;
- Dispositivo que possibilite o teste com velocidades mais elevadas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANAVESE G.; SCALTRITO L.; FERRERO S.; PIRRI C.F; COCUZZA M.; PIROLA M.; CORBELLIN S.; GHIONE G.; RAMELLA C.; VERGA F.; TASSO A.; DILULLO A.; *A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection—Part A: Design and laboratory characterization*; Journal of Petroleum Science and Engineering; Vol. 127; Pág. 311-317; 2015a.

CANAVESE G.; SCALTRITO L.; FERRERO S.; PIRRI C.F; COCUZZA M.; PIROLA M.; CORBELLIN S.; GHIONE G.; RAMELLA C.; VERGA F.; TASSO A.; DILULLO A.; *A novel smart caliper foam pig for low-cost pipeline inspection— Part B: Field test and data processing*; Journal of Petroleum Science and Engineering; Vol. 133; Pág. 771-775; 2015b.

CORDELL J.; VANZANT H.; *The Pipeline Pigging Handbook*; 3th Edition; Clarion Technical Publishers and Scientific Surveys Ltd; 2003.

COSTA C. J. M.; *Análise Topológica Experimental Por Perfilometria Cíclica Indutiva de Superfícies de Paredes Estruturais*; Dissertação – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN; 2013.

GENTIL, V.; *Corrosão*, 3º ed. - Rio de Janeiro, LTC - Editora, 1995.

GUEDES M.; *Análise de copos de PIGs para limpeza interna de tubulações pelo método dos elementos finitos*; Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ; 1994.

JCGM (Joint Committee for Guides in Metrology) 100 - Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição; INMETRO; 2008.

LI X.; ZHANG S.; LIU S.; JIAO Q.; DAI L.; *An experimental evaluation of the probe dynamics as a probe pig inspects internal convex defects in oil and gas pipelines*; Measurement; Vol. 63; Pág. 49-60; 2015-1.

KIM D.K.; CHO S.H.; PARK S.S.; YOO H.R.; RHO Y.W.; KHO Y.T.; *Development of the caliper system for a geometry PIG based on magnetic field analysis*; KSME International Journal; Vol. 17; p. 1835-1842; 2003.

MEDEIROS J. S.; *Medição e Modelagem da Resposta de PIG Perfilométrico Sob Diferentes Solicitações Dinâmicas*; Universidade Federal do Rio Grande do Norte; 2013.

MENDES A.; ROSÁRIO P. P.; *Metrologia & Incerteza de Medição*; Sociedade Brasileira de Metrologia; Editora Epse; 2005.

MOREIRA A. P.; *Gestão Tecnológica do Monitoramento da Corrosão Interna de Dutos*; *Dissertação* – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ / Escola de Química; 2012.

SABINO J. M.; *Avaliação por Pig de Perfilagem de Danos Superficiais nos Materiais das Paredes de Dutos de Petróleo*; *Dissertação* – Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN; 2009.

SALCEDO T.; *Análise do Sensor de um Pig Instrumentado do Tipo Palito*; Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ; 2009.

VIM - *Vocabulário Internacional de Metrologia*; INMETRO; 2012.

7. ANEXOS

7.1. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 2.5 x 5 mm.



Calibração
NBR ISO/IEC
17025
CAL 0071

TRIDIMENSIONAL LEKAS MEDIÇÕES

ENDEREÇO: RUA RIO APA, 564 – CORDOVIL – RIO DE JANEIRO – RJ – CEP: 21.250-570
TEL: (21)3458-9449 FAX: (21) 3458-9568
CNPJ: 32.173.395/0001-10 INSC. EST.: 83.604.387
Email: comercial@lekas.com.br
<http://www.lekas.com.br>

Relatório de Medição Nº 4066719

CLIENTE: HEBER FIGUEIREDO JUNIOR Folha 01 / 02
ENDEREÇO: RUA DR. ALFREDO BARCELOS, 437 - APT 301
OLARIA - RIO DE JANEIRO - RJ
OBJETO: DESCONTINUIDADE SINTÉTICA (EM JOGO) DATA DE EMISSÃO: 10/12/19
FABRICANTE: -- MODELO: --
IDENTIFICAÇÃO: VIDE TABELA Nº DE SÉRIE: --
ORDEM DE SERVIÇO: 124261 DATA DA MEDIÇÃO: 03/12/19

Características do Objeto

Cotas verificadas:

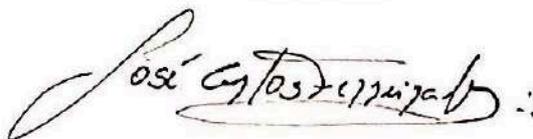
Vide folha 02/02

Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, a qual avaliou a competência do laboratório, e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à medição nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

A reprodução deste relatório só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da LEKA'S.

Signatário Autorizado:



José Carlos Ferreira de Lima
Gerente Técnico

1. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO:

É realizada as medições das cotas definidas pelo cliente, através de uma série de três replicações para cada medida, e conforme procedimento de Medição de Peças LEKA'S PA-53 REV -02.

2. RESULTADOS DA MEDIÇÃO: (valores em mm)

IDENTIFICAÇÃO	COTA	DIREÇÃO	VALOR MEDIO OBTIDO	INCERTEZA DE MEDIÇÃO (U)	FATOR DE ABRANGÊNCIA (K)	VEFF
			(mm)	(mm)		
0757-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D0	4,69	0,021	2,19	15
		D90	4,81	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	2,54	0,021	2,19	15
0758-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D0	4,70	0,017	2,04	81
		D90	4,65	0,017	2,04	81
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	2,55	0,017	2,04	79
0759-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D0	4,70	0,021	2,19	15
		D90	4,65	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	2,55	0,021	2,19	15
0760-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D0	4,69	0,021	2,19	15
		D90	4,74	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE	-	2,54	0,017	2,04	79

3. EQUIPAMENTO UTILIZADO – RASTREABILIDADE:

Descrição	Identificação	Nº Certificado	Órgão Emissor	Validade
PAQUÍMETRO (DIGITAL)	PAT-328	3038919	LEKA'S	JUL/20

4. TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA:

20 °C ± 2 °C

60 % ± 20 %

5. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (veff) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.



7.2. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 4.5 x 9 mm.

**TRIDIMENSIONAL LEKAS MEDIÇÕES**
ENDEREÇO: RUA RIO APA, 564 - CORDOVIL - RIO DE JANEIRO - RJ - CEP: 21.250-570
TEL: (21)3458-9449 FAX: (21) 3458-9568
CNPJ: 32.173.395/0001-10 INSC. EST.: 83.604.387
Email: comercial@lekas.com.br
<http://www.lekas.com.br>

Relatório de Medição N° 4066519

CLIENTE: HEBER FIGUEIREDO JUNIOR Folha 01 / 02
ENDEREÇO: RUA DR. ALFREDO BARCELOS, 437 - APT 301
OLARIA - RIO DE JANEIRO - RJ
OBJETO: DESCONTINUIDADE SINTÉTICA (EM JOGO) DATA DE EMISSÃO: 10/12/19
FABRICANTE: -- MODELO: --
IDENTIFICAÇÃO: VIDE TABELA N° DE SÉRIE: --
ORDEM DE SERVIÇO: 124260 DATA DA MEDIÇÃO: 03/12/19

Características do Objeto

Cotas verificadas:

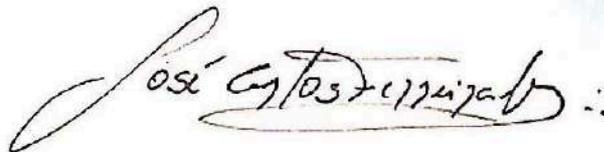
Vide folha 02/02

Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, a qual avaliou a competência do laboratório, e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à medição nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

A reprodução deste relatório só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da LEKA'S.

Signatário Autorizado:



José Carlos Ferreira de Lima
Gerente Técnico

1. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO:

É realizada as medições das cotas definidas pelo cliente, através de uma série de três replicações para cada medida, e conforme procedimento de Medição de Peças LEKA'S PA-53 REV -02.

2. RESULTADOS DA MEDIÇÃO: (valores em mm)

IDENTIFICAÇÃO	COTA	DIREÇÃO	VALOR MEDIO OBTIDO	INCERTEZA DE MEDIÇÃO (U)	FATOR DE ABRANGÊNCIA (K)	VEFF
			(mm)	(mm)		
0736-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	8,35	0,023	2,26	11
		D ₉₀	8,68	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	4,61	0,023	2,26	11
0743-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	8,26	0,029	2,52	6
		D ₉₀	8,63	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	4,58	0,021	2,19	15
0746-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	8,26	0,021	2,19	15
		D ₉₀	8,63	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	4,58	0,021	2,19	15
0747-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	8,31	0,023	2,26	11
		D ₉₀	8,68	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE	-	4,62	0,023	2,26	11

3. EQUIPAMENTO UTILIZADO – RASTREABILIDADE:

Descrição	Identificação	Nº Certificado	Órgão Emissor	Validade
PAQUÍMETRO (DIGITAL)	PAT-328	3038919	LEKA'S	JUL/20

4. TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA:

20 °C ± 2 °C

60 % ± 20 %

5. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (veff) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.



7.3. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 6 x 12 mm.



TRIDIMENSIONAL LEKAS MEDIÇÕES

ENDEREÇO: RUA RIO APA, 564 - CORDOVIL - RIO DE JANEIRO - RJ - CEP: 21.250-570

TEL: (21)3458-9449 FAX: (21) 3458-9568

CNPJ: 32.173.395/0001-10 INSC. EST.: 83.604.387

Email: comercial@lekas.com.br

http://www.lekas.com.br

Relatório de Medição N° 4067619

CLIENTE: HEBER FIGUEIREDO JUNIOR

Folha 01 / 02

ENDEREÇO: RUA DR. ALFREDO BARCELOS, 437 - APT 301

OLARIA - RIO DE JANEIRO - RJ

OBJETO: DESCONTINUIDADE SINTÉTICA (EM JOGO)

DATA DE EMISSÃO: 10/12/19

FABRICANTE: --

MODELO: --

IDENTIFICAÇÃO: VIDE TABELA

N° DE SÉRIE: --

ORDEM DE SERVIÇO: 124259

DATA DA MEDIÇÃO: 03/12/19

Características do Objeto

Cotas verificadas:

Vide folha 02/02

Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, a qual avaliou a competência do laboratório, e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à medição nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

A reprodução deste relatório só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da LEKA'S.

Signatário Autorizado:

José Carlos Ferreira de Lima
Gerente Técnico

1. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO:

É realizada as medições das cotas definidas pelo cliente, através de uma série de três replicações para cada medida, e conforme procedimento de Medição de Peças LEKA'S PA-53 REV -02.

2. RESULTADOS DA MEDIÇÃO: (valores em mm)

IDENTIFICAÇÃO	COTA	DIREÇÃO	VALOR MEDIO OBTIDO	INCERTEZA DE MEDIÇÃO (U)	FATOR DE ABRANGÊNCIA (K)	VEFF
			(mm)	(mm)		
0737-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	11,75	0,017	2,04	80
		D ₉₀	11,89	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	6,11	0,017	2,04	80
0753-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	11,75	0,017	2,04	81
		D ₉₀	11,65	0,017	2,04	81
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	6,08	0,017	2,04	79
0754-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	11,75	0,017	2,04	79
		D ₉₀	11,65	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	6,08	0,017	2,04	79
0755-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	11,74	0,017	2,04	79
		D ₉₀	11,53	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE	-	6,06	0,017	2,04	79

3. EQUIPAMENTO UTILIZADO – RASTREABILIDADE:

Descrição	Identificação	Nº Certificado	Órgão Emissor	Validade
PAQUÍMETRO (DIGITAL)	PAT-328	3038919	LEKA'S	JUL/20

4. TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA:

20 °C ± 2 °C

60 % ± 20 %

5. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (veff) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.



7.4. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 9 x 16 mm.

 **TRIDIMENSIONAL LEKAS MEDIÇÕES**
ENDEREÇO: RUA RIO APA, 564 – CORDOVIL – RIO DE JANEIRO – RJ – CEP: 21.250-570
TEL: (21)3458-9449 FAX: (21) 3458-9568
CNPJ: 32.173.395/0001-10 INSC. EST.: 83.604.387
Email: comercial@lekas.com.br
http://www.lekas.com.br

Relatório de Medição Nº 4066619

CLIENTE: HEBER FIGUEIREDO JUNIOR

Folha 01 / 02

ENDEREÇO: RUA DR. ALFREDO BARCELOS, 437 - APT 301

OLARIA - RIO DE JANEIRO - RJ

OBJETO: DESCONTINUIDADE SINTÉTICA (EM JOGO)

DATA DE EMISSÃO: 10/12/19

FABRICANTE: --

MODELO: --

IDENTIFICAÇÃO: VIDE TABELA

Nº DE SÉRIE: --

ORDEM DE SERVIÇO: 124262

DATA DA MEDIÇÃO: 03/12/19

Características do Objeto

Cotas verificadas:

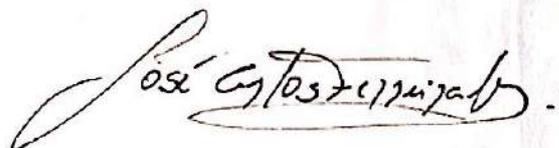
Vide folha 02/02

Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, a qual avaliou a competência do laboratório, e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à medição nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

A reprodução deste relatório só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da LEKA'S.

Signatário Autorizado:



José Carlos Ferreira de Lima
Gerente Técnico

1. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO:

É realizada as medições das cotas definidas pelo cliente, através de uma série de três replicações para cada medida, e conforme procedimento de Medição de Peças LEKA'S PA-53 REV -02.

2. RESULTADOS DA MEDIÇÃO: (valores em mm)

IDENTIFICAÇÃO	COTA	DIREÇÃO	VALOR MEDIO	INCERTEZA DE	FATOR DE	VEFF
			OBTIDO	MEDIÇÃO (U)		
			(mm)	(mm)	ABRANGÊNCIA (K)	
0749-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	15,11	0,021	2,19	15
		D ₉₀	15,69	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	8,06	0,017	2,04	80
0750-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	15,73	0,021	2,19	15
		D ₉₀	15,79	0,021	2,19	15
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	8,11	0,029	2,52	6
0751-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	15,73	0,021	2,19	15
		D ₉₀	15,79	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	8,11	0,017	2,04	79
0752-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	15,72	0,017	2,04	79
		D ₉₀	15,57	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE	-	8,11	0,017	2,04	79

3. EQUIPAMENTO UTILIZADO – RASTREABILIDADE:

Descrição	Identificação	Nº Certificado	Órgão Emissor	Validade
PAQUÍMETRO (DIGITAL)	PAT-328	3038919	LEKA'S	JUL/20

4. TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA:

20 °C ± 2 °C

60 % ± 20 %

5. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (veff) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.



7.5. Certificado de calibração da descontinuidade sintética - 12 x 20 mm.

**TRIDIMENSIONAL LEKAS MEDIÇÕES**
ENDEREÇO: RUA RIO APA, 564 – CORDOVIL – RIO DE JANEIRO – RJ – CEP. 21.250-570
TEL: (21)3458-9449 FAX: (21) 3458-9568
CNPJ: 32.173.395/0001-10 INSC. EST.: 83.604.387
Email: comercial@lekas.com.br
http://www.lekas.com.br

Relatório de Medição N° 4067219

CLIENTE: HEBER FIGUEIREDO JUNIOR Folha 01 / 02
ENDEREÇO: RUA DR. ALFREDO BARCELOS, 437 - APT 301
OLARIA - RIO DE JANEIRO - RJ
OBJETO: DESCONTINUIDADE SINTÉTICA (EM JOGO) DATA DE EMISSÃO: 10/12/19
FABRICANTE: -- MODELO: --
IDENTIFICAÇÃO: VIDE TABELA N° DE SÉRIE: --
ORDEM DE SERVIÇO: 124258 DATA DA MEDIÇÃO: 03/12/19

Características do Objeto

Cotas verificadas:

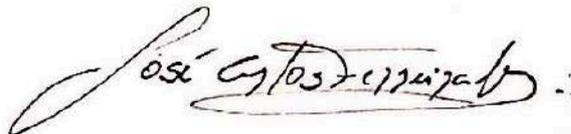
Vide folha 02/02

Este relatório atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE, a qual avaliou a competência do laboratório, e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

Os resultados deste relatório referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à medição nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

A reprodução deste relatório só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da LEKA'S.

Signatário Autorizado:



José Carlos Ferreira de Lima
Gerente Técnico

1. DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO:

É realizada as medições das cotas definidas pelo cliente, através de uma série de três replicações para cada medida, e conforme procedimento de Medição de Peças LEKA'S PA-53 REV -02.

2. RESULTADOS DA MEDIÇÃO: (valores em mm)

IDENTIFICAÇÃO	COTA	DIREÇÃO	VALOR MEDIO OBTIDO	INCERTEZA DE MEDIÇÃO (U)	FATOR DE ABRANGÊNCIA (K)	VEFF
			(mm)	(mm)		
0742-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	19,83	0,021	2,19	15
		D ₉₀	19,69	0,017	2,04	82
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	12,1495	0,006	2,66	5
0744-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	19,73	0,023	2,26	11
		D ₉₀	19,69	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	12,1609	0,006	2,66	5
0745-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	19,73	0,017	2,04	79
		D ₉₀	19,69	0,017	2,04	79
	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE	-	12,1609	0,020	4,55	2
0756-19	MEDIÇÃO DO DIÂMETRO	D ₀	19,71	0,021	2,19	15
		D ₉₀	19,82	0,029	2,52	6
	MEDIÇÃO DE PROFUNDIDADE	-	12,1351	0,006	2,66	5

3. EQUIPAMENTO UTILIZADO – RASTREABILIDADE:

Descrição	Identificação	Nº Certificado	Órgão Emissor	Validade
MEDIDOR DE ALTURA	PAT-315	1033518	LEKA'S	FEV/20
DESEMPENO DE GRANITO	PAT-320	09534/15	ISOMETRO	JUN/25
PAQUÍMETRO (DIGITAL)	PAT-328	3038919	LEKA'S	JUL/20

4. TEMPERATURA AMBIENTE E UMIDADE RELATIVA:

20 °C ± 2 °C

60 % ± 20 %

5. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO:

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (veff) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.



7.6. Tabela de Cálculo de Incerteza – Profundidade de 4,5 mm a 0,5 m/s

DISCONTINUIDADE	CORRIDA	VELOCIDADE	ID DISCONTINUIDADE	PROFUNDIDADE PADRÃO	PROFUNDIDADE PID	ERRO ABSOLUTO	ERRO RELATIVO	DEBÍO PADRÃO	INCERTEZA TIPO A	INCERTEZA TIPO B				INCERTEZA COMBINADA (U _c)	EFETIVO (V _{eff})	FATOR DE ABRANGÊNCIA (K)	INCERTEZA EXPANDIDA (95,45%)			
										RESOLUÇÃO PADRÃO	RESOLUÇÃO PG	INCERTEZA DO PADRÃO (±0,2%)	SOMATÓRIO							
4,5 x 3	0,3		0706-10	4,51	3,34	-0,66	-14,64	1,424493340	0,358122338	0,002336751	0,002666751	2,19	1,461814201	1,524006795	15,00	2,18	3,324			
				4,51	2,89	-1,53	-41,78													
				4,51	4,14	-0,48	-10,30													
				4,51	3,12	-1,60	-32,13													
				4,51	4,07	-0,94	-11,71													
				4,51	3,70	-0,91	-20,74													
				4,51	4,05	-0,57	-12,26													
				4,51	4,23	-0,38	-9,24													
				4,51	0,00	-4,61	-100,00													
				4,51	4,80	-0,01	-0,22													
				4,51	4,19	-0,48	-10,41													
				4,51	0,00	-4,61	-100,00													
				4,51	3,31	-1,30	-28,20													
				4,51	4,25	-0,36	-7,81													
				4,51	2,53	-2,06	-45,12													
				4,51	4,35	-0,26	-5,84													
						0743-10	4,56	4,10	-0,48	-10,48	1,547587005	0,366890901	0,002336751	0,002666751	2,19	1,481814201	1,531490357	15,00	2,20	3,362
			4,56	2,89	-1,60		-41,27													
			4,56	4,34	-0,25		-5,46													
			4,56	2,87	-2,02		-44,00													
			4,56	2,63	-1,95		-42,95													
			4,56	0,00	-4,58		-100,00													
			4,56	3,74	-0,83		-21,91													
			4,56	4,55	-0,03		-0,66													
			4,56	4,12	-0,47		-10,16													
			4,56	3,00	-0,69		-14,55													
			4,56	0,00	-4,58		-100,00													
			4,56	3,78	-0,62		-17,30													
			4,56	2,64	-1,34		-28,30													
			4,56	3,37	-1,22		-26,53													
			4,56	2,17	-1,42		-30,00													
							0746-10	4,58	0,00	-4,58										
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	4,07	-0,51	-11,14														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	3,40	-1,18	-26,78														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	3,01	-0,87	-14,83														
			4,58	3,53	-1,05	-22,93														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	4,15	-0,43	-9,39														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
			4,58	0,00	-4,58	-100,00														
						0747-10		4,62	-0,87	0,04	0,87	1,906938065	0,476799516	0,002336751	0,002666751	2,25	1,606248851	1,676940808	15,00	2,18
			4,62	0,00	-4,62		-100,00													
4,62	0,00	-4,62	-100,00																	
4,62	3,02	-1,61	-44,74																	
4,62	0,00	-4,62	-100,00																	
4,62	2,96	-2,04	-44,18																	
4,62	4,87	0,04	0,87																	
4,62	4,72	0,10	2,16																	
4,62	4,83	0,01	0,22																	
4,62	4,37	-0,05	-1,08																	
4,62	3,71	-0,31	-15,70																	
4,62	0,00	-4,62	-100,00																	
4,62	4,34	-0,28	-6,68																	
4,62	3,96	-1,06	-22,34																	
4,62	-1,13	-0,19	-1,19																	
4,62	3,30	-1,32	-26,37																	

7.7. Tabela de Cálculo de Incerteza – Diâmetro de 9 mm a 0,5 m/s

DISCONTINUIDADE	CORRIDA	VELOCIDADE	ID DESCONTINUIDADE	DIÂMETRO PADRÃO	DIÂMETRO PIG	ERRO ASSOLUTO	ERRO RELATIVO	DESVIO PADRÃO	INCERTEZA TIPO A	INCERTEZA TIPO B				INCERTEZA COMBINADA (k=2)	EFETIVO (n/df)	FATOR DE ABRANGÊNCIA (K)	INCERTEZA EXPANDIDA (95,45%)
										RESOLUÇÃO PADRÃO	RESOLUÇÃO PIG	INCERTEZA DO PADRÃO (IG, 27%)	SOMATORIO				
4,5 x 0	0,5		0736-19	8,52	6,36	-2,16	-25,24	3,258096401	0,8110241	0,002886751	0,002886751	2,19	1,481614261	1,852129393	15,00	2,18	5,891
				8,52	6,50	-1,92	-22,67										
				8,52	6,25	-2,27	-26,64										
				8,52	6,00	-2,52	-29,76										
				8,52	5,75	-2,77	-32,50										
				8,52	5,50	-3,02	-35,32										
				8,52	5,25	-3,27	-38,15										
				8,52	5,00	-3,52	-41,00										
				8,52	4,75	-3,77	-43,85										
				8,52	4,50	-4,02	-46,70										
				8,52	4,25	-4,27	-49,55										
				8,52	4,00	-4,52	-52,40										
				8,52	3,75	-4,77	-55,25										
				8,52	3,50	-5,02	-58,10										
				8,52	3,25	-5,27	-60,95										
				8,52	3,00	-5,52	-63,80										
			0743-19	8,44	8,01	-0,43	-5,06	3,793933607	0,548464042	0,002886751	0,002886751	2,33	1,481614261	1,709373928	15,00	2,18	5,837
				8,44	8,21	-0,23	-2,73										
				8,44	7,98	-0,46	-5,46										
				8,44	7,75	-0,69	-8,19										
				8,44	7,52	-0,92	-10,92										
				8,44	7,29	-1,15	-13,65										
				8,44	7,06	-1,38	-16,38										
				8,44	6,83	-1,61	-19,11										
				8,44	6,60	-1,84	-21,84										
				8,44	6,37	-2,07	-24,57										
				8,44	6,14	-2,30	-27,30										
				8,44	5,91	-2,53	-30,03										
				8,44	5,68	-2,76	-32,76										
				8,44	5,45	-2,99	-35,49										
				8,44	5,22	-3,22	-38,22										
				8,44	5,00	-3,44	-40,94										
			0746-18	8,44	8,00	-0,44	-5,20	5,025357972	1,457339493	0,002886751	0,002886751	2,20	1,491514261	2,076387005	15,00	2,28	4,533
				8,44	8,48	0,04	0,50										
				8,44	8,92	0,48	5,76										
				8,44	9,36	0,92	10,92										
				8,44	9,80	1,36	16,08										
				8,44	10,24	1,80	21,24										
				8,44	10,68	2,24	26,40										
				8,44	11,12	2,68	31,56										
				8,44	11,56	3,12	36,72										
				8,44	12,00	3,56	41,88										
				8,44	12,44	4,00	47,04										
				8,44	12,88	4,44	52,20										
				8,44	13,32	4,88	57,36										
				8,44	13,76	5,32	62,52										
				8,44	14,20	5,76	67,68										
				8,44	14,64	6,20	72,84										
0747-16	8,50	8,72	0,22	2,56	5,228770208	1,307192552	0,002886751	0,002886751	2,16	1,505246851	1,002621298	15,00	2,20	4,377			
	8,50	8,50	0,00	0,00													
	8,50	8,28	-0,22	-2,56													
	8,50	8,06	-0,44	-5,12													
	8,50	7,84	-0,66	-7,68													
	8,50	7,62	-0,88	-10,24													
	8,50	7,40	-1,10	-12,80													
	8,50	7,18	-1,32	-15,36													
	8,50	6,96	-1,54	-17,92													
	8,50	6,74	-1,76	-20,48													
	8,50	6,52	-1,98	-23,04													
	8,50	6,30	-2,20	-25,60													
	8,50	6,08	-2,42	-28,16													
	8,50	5,86	-2,64	-30,72													
	8,50	5,64	-2,86	-33,28													
	8,50	5,42	-3,08	-35,84													