

## *Monografia de Graduação*

# **AVALIAÇÃO MACRO E MICROGEOMÉTRICA DE DISPOSITIVOS UTILIZADOS NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO E GÁS**

**Cláudio Ferreira da Costa e Silva**

**Natal, fevereiro de 2007**

# **Monografia**

## **Avaliação Macro e Microgeométrica de Dispositivos Utilizados na Indústria do Petróleo e Gás**

**Cláudio Ferreira da Costa e Silva**

**Natal, fevereiro de 2007**

**UFRN – CT – NUPEG – Campus Universitário – CEP: 59070-970 – Natal-RN – Brasil –  
Fone-Fax: (84)3215-3773 – [www.nupeg.ufrn.br](http://www.nupeg.ufrn.br) – [nupeg@eq.ufrn.br](mailto:nupeg@eq.ufrn.br)**

**SILVA, Cláudio Ferreira da Costa – Avaliação Macro e Microgeométrica de Dispositivo Utilizado na Indústria do Petróleo e Gás, Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Química, Programa de Recursos Humanos – PRH 14 / ANP. Áreas de Concentração: Engenharia de Petróleo e Metrologia, Natal/RN, Brasil.**

**Orientador: Professor Dr. Luciano Bet**

**Co-Orientador: Professor MSc. Luiz Pedro de Araújo**

---

**RESUMO:** Na indústria do petróleo e gás a quantificação da vazão é importante em todas as fases da manipulação de fluidos, principalmente na produção, processamento e distribuição de produtos, tanto no aspecto técnico quanto no comercial. A exigência de resultados de medição confiáveis e reprodutíveis implica na busca de dispositivos e procedimentos de medição livres de erros e com um mínimo de incerteza associada a estes resultados. Devido à sua simplicidade, custo relativamente baixo, ausência de partes móveis, pouca manutenção e aplicabilidade a vários fluidos, destaca-se a placa de orifício como um dos medidores de vazão mais utilizados. Este trabalho apresenta um arcabouço teórico sobre medidores de vazão, com ênfase na medição utilizando placas de orifício, destacando as características do sistema de medição, materiais utilizados na fabricação e parâmetros de dimensionamento das mesmas. Ainda relativo a revisão bibliográfica, explicita-se os principais desvios de forma e de superfície, bem como oferece uma explanação sobre cálculo de incerteza de medição. Observam-se também as especificações para fabricação e o estabelecimento de tolerâncias macrogeométricas, relativas à planeza e circularidade bem como as especificações relativas à textura da superfície do componente (microgeometria). Relata ainda as principais fontes de incerteza atrelada ao processo de medição com placa de orifício e o método de quantificá-las. Outro ponto importante dar-se relativo ao procedimento de medição e à escolha do instrumento adequado para obtenção dos resultados durante as medições. Por fim dar-se a análise dos resultados obtidos através da observação e questionamento dos mesmos, sendo discutidos de forma explicativa os cálculos e fórmulas utilizados na obtenção dos resultados.

---

**Palavras Chaves:**

- Cálculo da Incerteza; - Medição de Vazão; - Placa de orifício.

## ABSTRACT

# Evaluation macro and microgeometric of device used in the industry of the oil and gas

---

In the industry of the oil and gas the quantification of the outflow is important in all the phases of the fluid manipulation, mainly in the production, processing and distribution of products, as much in the aspect technician how much in the advertising. The requirement of trustworthy and multipliable results of measurement implies in the search of devices and free procedures of measurement of errors and with a minimum of uncertainty associated with these results. Had its simplicity, relatively low cost, absence of mobile parts, little maintenance and applicability to some fluids, it is distinguished orifice plate as one of the used measurers of outflow more. This work presents one bibliographical revision theoretician on outflow measurers, with emphasis in the measurement using orifice plates, detaching the characteristics of the measurement system, materials used in the manufacture and parameters of sizing of the same ones. Still relative to the bibliographical revision, explicit the main shunting lines of form and surface, as well as it offers a communication on calculation of measurement uncertainty. The specifications for manufacture and the establishment of macrogeometric tolerances are also observed, relative to the planeza and circularidade as well as the relative specifications to the texture of the surface of the component (microgeometry). It still tells to the main sources of grasped uncertainty to the process of measurement with orifice plate and the method to quantify them. Another point important to give relative to the procedure of measurement and the choice of the instrument adjusted for attainment of the results during the measurements. Finally to give analysis to it of the results gotten through the comment and questioning of the same ones, being argued of demonstrative form the calculations and formulas used in the attainment of the results.

---

Words key: orifice plates; uncertainty; measurement of outflow

Dedico este trabalho a meus pais, por ouvir, incentivar, apoiar, com toda atenção e compreensão. A todos que contribuíram de qualquer forma para a conclusão do mesmo.

## AGRADECIMENTOS

- Agradeço a Deus por permitir a realização e conclusão deste trabalho.
- Agradeço ao professor Luciano Bet, pela orientação e interesse demonstrado durante o desenvolvimento deste trabalho, bem como a contribuição dada a minha formação no curso de Engenharia Mecânica. Agradeço pela convivência nos últimos anos, onde foi um período suficiente para desenvolver uma relação de respeito e amizade.
- Agradeço aos professores Luiz Pedro de Araújo e Walter Link, pela oportunidade e contribuição na realização deste trabalho.
- Agradeço ao professor José Romualdo Vidal pela amizade e pelo interesse demonstrado durante o período de realização desse trabalho.
- Agradeço aos professores Eduardo Lins, Afonso Avelino e Osvaldo Chiavore pela oportunidade de participar desse programa de recursos humanos.
- Agradeço a todos os amigos (Alexandro Barreto, Luiz Henrique, Marcelo Tanaka, Jean Barros, Raiff Ramalho e Rita Amália) do LabMetrol - Laboratório de Metrologia, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Agradeço a todos aqueles que contribuíram com a minha formação, especialmente aos meus professores de todas as épocas, que dispuseram de seu tempo e conhecimentos os quais foram fundamentais na minha formação acadêmica.
- Agradeço aos colegas de curso pela amizade e respeito dado durante todo esse tempo de convivência.
- Agradeço aos meus familiares pelo o apoio, compreensão e incentivo durante os momentos mais difíceis.
- Agradeço a ANP que através da comissão gestora PRH14 auxiliou financeiramente para a realização deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tubo de Venturi.....	4
Figura 2. Tubo de Pitot.....	6
Figura 3. Bocal de Vazão.....	7
Figura 4. Tubo de Dall.....	7
Figura 5. Rotâmetro.....	8
Figura 6. Medidor de deslocamento positivo.....	10
Figura 7. Medidor tipo Nuntante.....	11
Figura 8. Turbina.....	13
Figura 9. Medidor Eletromagnético.....	13
Figura 10. Medidor ultra-sônico.....	14
Figura 11. Medidores de Coriolis.....	15
Figura 12. Tipos de placas de orifício.....	19
Figura 13. Foto e descrição das partes de uma placa de orifício concêntrica.....	20
Figura 14. Superfície geométrica.....	29
Figura 15. Superfície real.....	30
Figura 16. Superfície efetiva.....	30
Figura 17. Perfil geométrico.....	30
Figura 18. Perfil real.....	31
Figura 19. Perfil efetivo (sem filtrar ondulações).....	31
Figura 20. Perfil de rugosidade (após filtragem da ondulação).....	31
Figura 21. Composição de superfície.....	32
Figura 22. Comprimentos de avaliação de rugosidade.....	33
Figura 23. Rugosidade e ondulação.....	34
Figura 24. Placa de orifício.....	45
Figura 25. Máquina de medir por coordenadas (MMC).....	46
Figura 26. Rugosímetro.....	46
Figura 27. Simbologia para placa de orifício.....	48
Figura 28. Desvio de planeza da placa de orifício.....	49
Figura 29. Medição do diâmetro da placa de orifício.....	50
Figura 30. Erro de circularidade (ilustração).....	50
Figura 31. Processo de medição da rugosidade superficial de placa de orifício.....	52
Figura 32. Itens medidos nas placas de orifício.....	57

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Notação e simbologia dos erros macrogeométricos.....	26
Tabela 2. Tabela de comprimento de amostragem (Cut off) .....	36
Tabela 3. Classificação dos acabamentos superficiais.....	36
Tabela 4. Tabela de Student.....	43
Tabela 5. Tolerância de circularidade para o furo da placa de orifício (dm)(2) .....	51
Tabela 6. Medições efetuadas na placa de orifício 1 .....	57
Tabela 7. Medições para determinação da planeza 1 .....	58
Tabela 8. Cálculo das incertezas de medição 1.....	58
Tabela 9. Medições de rugosidade Ra 1 .....	59
Tabela 10. Cálculo de incerteza de medição da rugosidade 1 .....	59
Tabela 11. Resumo dos resultados das medições 1 .....	59
Tabela 12. Medições efetuadas na placa de orifício 2 .....	60
Tabela 13. Medições para determinação da planeza 2.....	60
Tabela 14. Cálculo das incertezas de medição 2.....	60
Tabela 15. Medições de rugosidade Ra 2 .....	61
Tabela 16. Cálculo de incerteza de medição da rugosidade 2 .....	61
Tabela 17. Resumo dos resultados das medições 2 .....	61

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	01
1.1. OBJETIVOS.....	02
1.1.1. Objetivos Gerais.....	02
1.1.2. Objetivos Específicos .....	02
2. CAPÍTULO - MEDIDORES DE VAZÃO.....	04
2.1. MEDIÇÃO DE VAZÃO.....	04
2.2. TIPOS E APLICAÇÕES.....	04
2.3. TUBO DE VENTURI .....	04
2.4. TUBO DE PITOT .....	06
2.5. BOCAL DE VAZÃO .....	07
2.6. TUBO DE DALL.....	07
2.7. MEDIDOR DE ÁREA VARIÁVEL (ROTÂMETRO).....	08
2.8. MEDIDORES DE DESLOCAMENTO POSITIVO.....	10
2.8.1. Medidor de fluxo do tipo Nutante.....	11
2.9. TURBINA .....	12
2.10. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS DE VAZÃO .....	13
2.11. MEDIDORES ULTRA-SÔNICO (EFEITO DOPPLER) .....	14
2.12. MEDIDORES DE CORIOLIS .....	14
3. CAPÍTULO - PLACA DE ORIFÍCIO.....	16
3.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA.....	16
3.2 – TIPOS DE PLACAS DE ORIFÍCIO.....	19
3.3 – SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA PLACAS DE ORIFÍCIO.....	20
3.4 – SISTEMA DE MEDIÇÃO COM PLACA DE ORIFÍCIO .....	21
3.5 – PROCEDIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO.....	22
4. CAPÍTULO - DESVIOS DE FORMA (MACROGEOMÉTRICOS) E DE SUPERFÍCIE (MICROGEOMÉTRICOS) .....	25
4.1. DESVIOS DE FORMA OU MACROGEOMETRIA.....	25
4.1.1. Tolerância de forma (para elemento isolado) .....	26
4.2. ESTUDOS DA MICROGEOMETRIA (RUGOSIDADE) .....	28
4.2.1. Rugosidade .....	28
4.2.2. Conceitos básicos sobre superfícies .....	29
4.2.3. CRITÉRIOS PARA AVALIAR A RUGOSIDADE.....	33
4.2.4. PARÂMETROS DE RUGOSIDADE.....	34
5. CAPÍTULO - CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	37
5.1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	37
5.2. TIPOS DE INCERTEZAS .....	38
5.3. INCERTEZA PADRONIZADA.....	38
5.3.1. Avaliação do Tipo A.....	38
5.3.2. Incerteza do Tipo B.....	40
5.4. INCERTEZA COMBINADA .....	41
5.5. INCERTEZA EXPANDIDA.....	41

5.6. FATOR DE ABRANGÊNCIA.....	42
5.7. PROCEDIMENTO GERAL DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	43
6. CAPÍTULO – METODOLOGIA .....	45
6.1. PLACA DE ORIFÍCIO .....	45
6.1.1. Definição do Mensurando e suas características .....	45
6.2. DEFINIÇÃO DOS PADRÕES E SUAS CARACTERÍSTICAS .....	45
6.2.1. Máquina de medir por coordenadas .....	45
6.3. RUGOSÍMETRO.....	46
6.4. PRINCIPAIS FONTES DE ERROS E INCERTEZAS QUE SE PODE ENCONTRAR DURANTE AS MEDIÇÕES .....	47
6.5. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO.....	47
6.5.1. Espessura da placa.....	48
6.5.2. Planeza .....	49
6.5.2.1. Tolerância de planeza .....	49
6.5.3. Diâmetro do orifício.....	49
6.5.3.1. Tolerância de circularidade .....	50
6.5.4. Ângulo de chanfro.....	52
6.5.5. Espessura do orifício.....	52
6.5.6. Diâmetro maior .....	52
6.5.7. Altura do cone .....	52
6.5.8. Desvios de superfície (microgeométricos) .....	52
6.6. CÁLCULO DA INCERTEZA – MACROGEOMÉTRICOS – utilização da máquina de medir por coordenadas 53	
6.6.1. Incerteza da dispersão dos valores das medições do mensurando.....	53
6.6.2. Incerteza do padrão .....	53
6.6.3. Efeito da Resolução.....	54
6.6.4. Incerteza combinada.....	54
6.6.5. Incerteza expandida.....	54
6.6.6. Incerteza da dispersão dos valores das medições do mensurando.....	55
6.6.7. Incerteza do padrão .....	55
6.6.8. Efeito da Resolução.....	55
7. CAPÍTULO – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	57
7.1. Medições efetuadas nas placas de orifício .....	57
7.1.1. Resultados das medições dimensionais da placa de orifício 1 .....	57
7.1.2. Resultado das medições de superfície da placa de orifício 1 .....	58
7.2.1. Resultado das medições dimensionais da placa de orifício 2.....	60
7.2.2. Resultado das medições de superfície da placa de orifício 1 .....	61
8. CAPÍTULO – CONCLUSÕES.....	62
9. CAPÍTULO – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
10. ANEXO I – RELATÓRIO DE ESTÁGIO.....	66

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

Há muito tempo já é reconhecida a influência da macro e da microgeometria das superfícies técnicas no comportamento funcional de componentes mecânicos. Os desvios de forma (macrogeometria) e a presença de uma textura da superfície de trabalho (microgeometria) inadequada podem comprometer seriamente a operação de um equipamento. Este tipo de problema pode ser encontrado em vários dispositivos aplicados na produção e processamento de petróleo e gás, tais como as placas de orifício para medição de vazão, válvulas, tubulações, etc. Portanto, é adequado se despender esforços no domínio das técnicas de medição e no estudo da influência da macro e da microgeometria de superfícies técnicas.

Acompanhando as novas exigências referentes à qualidade e ao controle ambiental, destaca-se o controle dimensional de válvulas e placas de orifício, uma vez que o controle das variáveis envolvidas na produção e distribuição de gás, dentre elas a vazão, está diretamente ligado a fatores de segurança, que por sua vez controlam a ocorrência de possíveis danos ao meio ambiente.

Este trabalho pode ser justificado de várias maneiras, representado pela importância estratégica no entendimento e o domínio das técnicas de avaliação e controle de dimensões e dos parâmetros micro e macrogeométricos de componentes mecânicos. Além disso, a demanda por profissionais qualificados na área de metrologia tem crescido continuamente.

O controle dimensional de válvulas e placas de orifício, uma vez que o controle das variáveis envolvidas na produção e distribuição de gás, dentre elas a vazão, está diretamente ligado a fatores de segurança, que por sua vez controlam a ocorrência de possíveis danos ao meio ambiente.

A ênfase maior entre tipos de medidores de vazão será dada às placas de orifício, onde será feito, um estudo detalhado sobre este instrumento, partindo do resumo histórico, tipos de placas encontradas no mercado, materiais utilizados na sua fabricação, sistemas de medição, dimensionamento de placas de orifício e por fim, procurar entender a correlação existente entre os parâmetros macro e microgeométricos que influenciam o elemento primário (placa de orifício) utilizado como gerador de pressão diferencial, para quantificação da vazão.

Mostrar-se-á também, os principais erros macro e microgeométricos existentes, bem como os fatores que influenciam e causam estes erros, demonstrando ainda os tipos de equipamentos que serão utilizados para quantificá-los.

### **1.1. OBJETIVOS**

#### **1.1.1. Objetivos Gerais**

Este trabalho tem como objetivo geral o estudo e assimilação das técnicas para medição da macro e da microgeometria das superfícies técnicas e da influência destes no comportamento funcional, na operação de medição de vazão utilizando placa de orifício.

#### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Domínio das técnicas de medição dos desvios macrogeométricos: planicidade, circularidade, cilíndricidade, paralelismo, dentre outros;
- ✓ Domínio das técnicas de medição dos desvios microgeométricos: parâmetros de rugosidade, de ondulação e distribuição das marcas de usinagem;
- ✓ Determinação e análise de parâmetros micro e macrogeométricos de placas de orifício utilizadas na medição de vazão de gás, contribuindo para um aumento da confiabilidade dos resultados das medições de gás executadas com medidores deste tipo;
- ✓ Aproveitamento da contrapartida existente: instalações físicas, máquina de medir tridimensional e recursos humanos qualificados;
- ✓ Determinação e análise dos parâmetros dimensionais, microgeométricos e macrogeométricos de placas de orifício, para assegurar a exatidão da medição da vazão de gás e quantificar sua incerteza.
- ✓ Ampliação dos recursos humanos especializados na região Norte/Nordeste, relacionados com a demanda metrológica em geral e especificamente na área de petróleo e gás;
- ✓ Contribuir para o atendimento da demanda de inspeção de placas de orifício para a Região Norte/Nordeste, minimizando tempo de atendimento e custo.

## CAPÍTULO 2

### MEDIDORES DE VAZÃO

#### 2.1. MEDIÇÃO DE VAZÃO

A medição de vazão de fluidos sempre esteve presente em nossas eras. Para que possamos comprovar este fato, não precisamos ir muito longe. O hidrômetro de uma residência, o marcador de uma bomba de combustível são exemplos comuns no dia-a-dia das pessoas. Em muitos processos industriais, ela é uma necessidade imperiosa, sem a qual dificilmente poderiam ser controlados ou operados de forma segura e eficiente.

Na indústria do petróleo sabemos que os medidores de vazão estão presentes de maneira participativa e de fundamental importância, pois existe a necessidade de se quantificar toda a produção, seja de petróleo ou de gás natural, fazendo com que normas sejam criadas e melhoradas para atender a comercialização destes produtos.

Falando um pouco da história, grandes nomes marcaram suas contribuições para a medição de vazão. Provavelmente a primeira foi dada por Leonardo da Vinci que, em 1502, observou que a quantidade de água por unidade de tempo que escoava em um rio era a mesma em qualquer parte, independente da largura, profundidade, inclinação e outros. Mas o desenvolvimento de dispositivos práticos só foi possível com o surgimento da era industrial e o trabalho de pesquisadores como Bernoulli, Pitot e outros.

#### 2.2. TIPOS E APLICAÇÕES

Existe uma variedade de tipos de medidores de vazão, simples e sofisticados, para as mais diversas aplicações. O tipo a usar sempre irá depender do fluido, do seu estado físico (líquido ou gás), das características de precisão e confiabilidade desejadas e outros fatores.

#### 2.3. TUBO DE VENTURI

O tubo de venturi, ilustrado na figura 1, é um medidor de vazão gerador de pressão diferencial, que quando calibrado corretamente é um dos mais exatos. O tubo de venturi tem uma entrada cônica convergente, uma garganta cilíndrica, e um cone divergente que dar recuperação. Não possui nenhuma projeção no líquido, nenhum canto do Sharp e nenhuma mudança repentina no contorno.

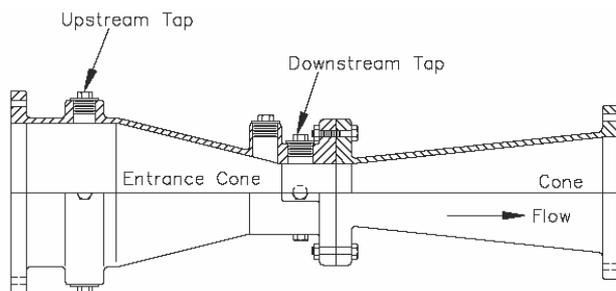


Figura 1. Tubo de Venturi

Um tubo de venturi clássico possui os seguintes componentes: cilindro de entrada, cone de entrada convergente, garganta central cilíndrica, cone de saída divergente.

A seção de entrada diminui a área de trajeto do fluido, fazendo com que a velocidade aumente e a pressão diminua. A pressão baixa é medida no centro da garganta cilíndrica desde que a pressão esteja em seu valor mais baixo, onde a pressão e a velocidade estão constantes. O cone de recuperação permite que a pressão seja recuperada, de tal modo que a perda total da pressão seja entre 10% e 25%. A alta pressão é medida ao longo do escoamento do fluido acima do cone de entrada. As principais desvantagens deste tipo de medidor de fluxo são os custos iniciais levados para a sua instalação e a dificuldade na instalação e inspeção.

Podem-se citar algumas vantagens desse medidor de vazão de modo que: Apresenta uma menor perda de carga permanente através do medidor, possui um coeficiente de descarga bem estabelecido para uma larga faixa de números de Reynolds, sua instalação requer menor comprimento de trecho reto a montante e a jusante e pelo fato de poder medir vazões muito grandes, com melhor desempenho que a placa e o bocal.

## 2.4. TUBO DE PITOT

O tubo Pitot, ilustrado na figura 2, é um medidor de vazão tipo energia extrativa, gerador de pressão diferencial, usado principalmente para a medição da velocidade de fluidos. Em seu formulário mais simples, consiste de um tubo com uma abertura para a medição da pressão de estagnação do fluido e de uma tomada comum para medir a pressão estática do processo. O tubo Pitot combinado mede simultaneamente as duas pressões; através de dois tubos concêntricos. O tubo interno mede a pressão de estagnação (abertura de impacto) e o tubo externo possui uma ou mais tomadas laterais, para a medição da pressão estática. A pressão diferencial medida é muito pequena; da ordem de alguns centímetros de coluna d'água.

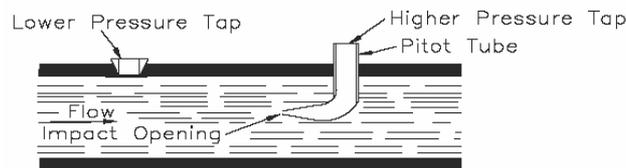


Figura 2. Tubo de Pitot

Pela medição da diferença de pressão entre a pressão estática normal da linha e a pressão de estagnação, acha-se a velocidade do fluido, e como consequência, a sua vazão. Com isso, a taxa de fluxo volumétrica pode ser obtida usando a equação abaixo.

$$Q = K \times A \times V$$

Onde:

Q = vazão volumétrica

A = área da seção transversal ao fluxo

V = velocidade do líquido fluindo

K = coeficiente do fluxo (normalmente 0,8)

Os tubos de Pitot devem ser calibrados para cada aplicação específica, porque não há nenhuma estandardização. Este tipo de instrumento pode ser usado mesmo quando o líquido não é incluído em uma tubulação ou em um duto.

## 2.5. BOCAL DE VAZÃO

O bocal, ilustrado na figura 3, possui uma entrada elíptica ou circular radial e é geralmente usado e selecionado para medição de vazão de vapor operando em grandes velocidades (30m/s). Por causa de sua rigidez, ele é dimensionalmente mais estável em maiores temperaturas e velocidades, do que a placa de orifício.

A perda de carga permanente é levemente menor que a da placa e maior que a do tubo venturi. O custo é maior que o da placa e menor que o do tubo venturi.

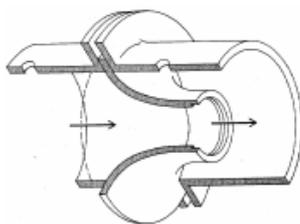


Figura 3. Bocal de Vazão

## 2.6. TUBO DE DALL

O tubo de fluxo de Dall, ilustrado na figura 4, tem uma relação mais elevada da pressão desenvolvida em relação à perda de pressão no tubo de venturi. É um instrumento mais compacto e usado geralmente em aplicações de grande fluxo.

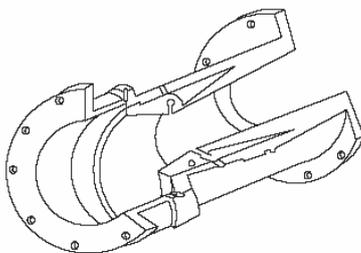


Figura 4. Tubo de Dall

O tubo consiste em uma seção de entrada curta, reta seguida por uma diminuição abrupta no diâmetro interno do tubo. Esta seção, chamada de ombro de entrada, é seguida pelo cone convergente da entrada e por um cone divergente na saída. Os dois cones são separados por um entalhe ou por uma abertura entre os dois cones. A pressão baixa é medida na garganta entalhada (área entre os dois cones). A alta pressão é medida na borda acima do ombro da entrada.

O tubo de fluxo Dall está disponível no mercado em tamanhos muito grandes. Nos tamanhos grandes, o custo é normalmente menor que o do tubo de venturi. Este tipo de tubo de fluxo tem uma perda da pressão de aproximadamente 5%. A taxa de fluxo e a gota de pressão são relacionados como mostra a equação abaixo.

$$Q = K \times \sqrt{\Delta P}$$

Onde:

$Q$  = Taxa de vazão volumétrica

$K$  = Constante derivada de parâmetros mecânicos de elementos primários

$\Delta P$  = Diferença de pressão

## 2.7. MEDIDOR DE ÁREA VARIÁVEL (ROTÂMETRO)

O Rotâmetro, ilustrado na figura 5, é um medidor de fluxo de área variável, assim nomeado, porque um flutuador girando é o elemento indicador.

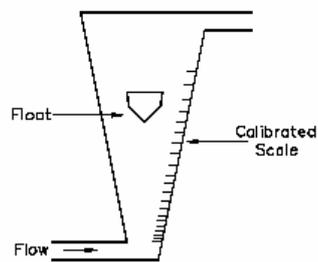


Figura 5. Rotâmetro

O rotâmetro consiste em um flutuador de metal que pode se mover na vertical e um tubo de tubo cônico vertical de material transparente (vidro ou plástico), que para evitar inclinação, em alguns casos, o flutuador tem um furo central pelo qual passa uma haste fixa. O rotâmetro é construído tais que o diâmetro aumenta com a altura.

Quando não há nenhum líquido que passa através do rotâmetro, o flutuador descansa no fundo do tubo. Porque quando o líquido entra no tubo, a densidade mais elevada do flutuador fará com que o flutuador permaneça no fundo. O espaço entre o flutuador e o tubo permite o fluxo após o flutuador.

Enquanto o fluxo aumenta no tubo, a gota de pressão aumenta. Quando a gota de pressão é suficiente, o flutuador levantar-se-á para indicar a quantidade de fluxo. Quanto mais elevada à taxa de fluxo ocorre o aumento da pressão. Enquanto que, quanto maior o aumento da gota de pressão e o ascendente, mais distante o tubo flutuador levanta-se. Notar que, no equilíbrio, a pressão vertical que atua no flutuador é constante, pois o seu peso não varia. O que muda é a área da seção do fluxo, ou seja, quanto maior a vazão, maior a área necessária para resultar na mesma pressão.

O flutuador deve permanecer em uma posição constante em uma taxa de fluxo constante. Com um flutuador liso, as flutuações parecem uniformes quando o fluxo é constante. Usando um flutuador com os entalhes inclinados cortados dentro da cabeça, o flutuador mantém uma posição constante com respeito à taxa de fluxo. Este tipo de medidor de fluxo é usado geralmente para medir baixas taxas de fluxo.

Como existe a gravação de uma escala no próprio instrumento para a indicação da vazão, a mesma pode ser lida diretamente na escala, não há necessidade de instrumentos auxiliares como em outros instrumentos.

Uma maneira de se determinar a vazão sem o uso da escala é através da fórmula a seguir:

$$Q = C \times S_2 \times \left\{ \frac{2 \times VF \times (\mu_F - \mu) \times g}{\mu \times SF \times [1 - 2 \times (S_2/S_1)]} \right\} \times \frac{1}{2}$$

Onde:

C = coeficiente que depende da forma do flutuador;

S<sub>2</sub> = área entre o tubo e o flutuador;

VF = volume do flutuador;

μ<sub>F</sub> = massa específica do flutuador;

μ = massa específica do fluido;

g = aceleração da gravidade;

SF = área máxima do flutuador no plano horizontal;

S<sub>1</sub> = área do tubo na posição do flutuador.

## 2.8. MEDIDORES DE DESLOCAMENTO POSITIVO

Os medidores de deslocamento positivo operam de forma contrária a bombas de mesmo nome. Enquanto nessas, um movimento rotativo ou oscilante produz um fluxo, que o mesmo produz movimento.

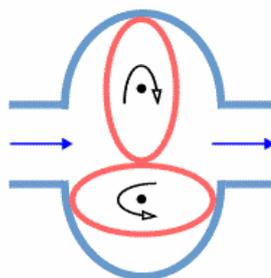


Figura 6. Medidor de deslocamento positivo.

Ilustrado na figura 6, um medidor com tipo de lóbulos elípticos que são girados pelo fluxo. Existem vários outros tipos aqui não desenhados: disco oscilante, rotor com palhetas, pistão rotativo, engrenagem, etc.

O movimento rotativo ou oscilante pode acionar um mecanismo simples de engrenagens e ponteiros ou dispositivos eletrônicos nos mais sofisticados.

Em geral, não se destinam a medir a vazão instantânea, mas sim o volume acumulado durante um determinado período. São mais adequados para fluidos viscosos como óleos (exemplo: na alimentação de caldeiras para controlar o consumo de óleo combustível).

Algumas vantagens são: adequados para fluidos viscosos, ao contrário da maioria e de baixo a médio custo de aquisição.

Algumas desvantagens: não apropriados para pequenas vazões, alta perda de carga devido à transformação do fluxo em movimento, custo de manutenção relativamente alto e não toleram partículas em suspensão e bolhas de gás afetam muito a precisão.

### 2.8.1. Medidor de fluxo do tipo nutante

O tipo mais comum de medidor de fluxo de deslocamento é o disco nutante ou medidor de placa de balanço. Um disco nutante típico é apresentado na figura 7.

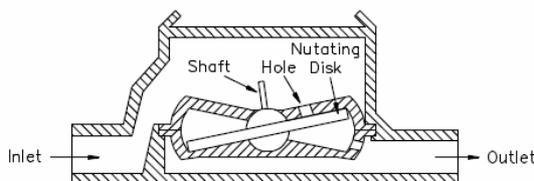


Figura 7. Medidor tipo nutante

Este tipo de medidor de fluxo é usado normalmente para serviço d'água, tal como fonte de água nascente e alimentação de evaporador. O elemento móvel é um disco circular que seja unido a uma esfera central. Um eixo é prendido à esfera e mantido em uma posição inclinada por um came ou por um rolo. O disco é montado em uma câmara que tenha paredes laterais esféricas e superfícies cônicas, superiores e inferiores.

O líquido incorpora-se a uma abertura da parede esférica em um lado da divisória e sai através do outro lado. Porque o líquido corre através da câmara, o disco balança, ou executa um movimento nutante. Desde que o volume do líquido requerido para fazer o disco terminar uma volta seja determinado, a volta total que ocorre através de um disco nutante pode ser calculada multiplicando o número de rotações do disco pelo volume determinado do líquido.

Para medir este fluxo, o movimento do eixo gera um cone com o ponto, ou o apex, para baixo. O alto do eixo opera um contador de voltas, através de uma manivela e de um jogo de engrenagens, que seja calibrado para indicar o fluxo total do sistema. Uma variedade de acessórios tais como, a contagem automática que restaura os dispositivos, pode ser adicionada ao mecanismo fundamental, que executam funções além de medir o fluxo.

## 2.9. TURBINA

A turbina é um medidor de vazão volumétrica de líquidos e gases limpos, da classe geradora de pulsos, que extrai energia da vazão medida. A turbina é largamente usada por causa de seu comprovado excelente desempenho, obtido a partir de altíssimas precisões, linearidade e repetitividade. A precisão da turbina é melhor que a de muitos outros medidores de vazão em regime turbulento e é usada como padrão para a calibração e aferição de outros medidores.

Partículas contaminantes e sujeiras em suspensão influem na precisão da medição e na sobrevivência da turbina. A seleção dos circuitos eletrônicos associados depende do ambiente, da informação desejada e do tamanho, rangeabilidade e linearidade do medidor.

Tipos de Turbinas

- *Turbinas mecânicas*
- *Turbina Tangencial*
- *Turbina de Inserção*

A Figura 8 ilustra o fluxo movimenta uma turbina cujas pás são de material magnético. Um sensor capta os pulsos, cuja frequência é proporcional à velocidade e, portanto, à vazão do fluido.

Os pulsos podem ser contados e totalizados por um circuito e o resultado dado diretamente em unidades de vazão.

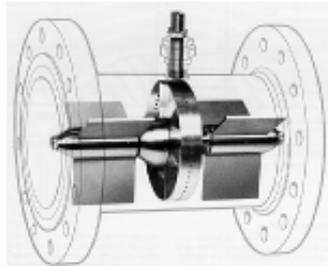


Figura 8. Turbina

Desde que não há relação quadrática como nos de pressão diferencial, a faixa de operação é mais ampla. A precisão é boa. Em geral, o tipo é apropriado para líquidos de baixa viscosidade.

Existem outras construções como, por exemplo, os hidrômetros que as companhias de água instalam nos seus consumidores: a turbina aciona um mecanismo tipo relógio e ponteiros ou dígitos indicam o valor acumulado, existindo ainda outros modelos de turbina.

## 2.10. MEDIDORES ELETROMAGNÉTICOS DE VAZÃO

Os medidores eletromagnéticos têm a vantagem da virtual ausência de perda de pressão, mas só podem ser usados com líquidos condutores de eletricidade.

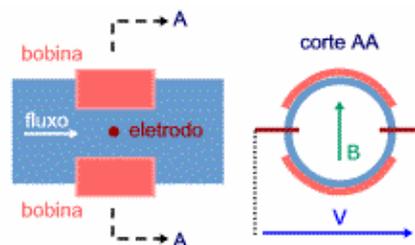


Figura 9. Medidor Eletromagnético

O princípio se baseia na Lei de Faraday, isto é, uma corrente elétrica é induzida num condutor que determina se ele se move em um campo magnético ou vice-versa.

Na Figura 9, mostra um esquema desse medidor onde um tubo de material não magnético contém duas bobinas que geram um campo magnético B no seu interior. Dois eletrodos são colocados em lados opostos do tubo e em direção perpendicular ao campo.

O sistema de medição consiste de um tubo não-magnético e não-condutor elétrico com duas bobinas eletromagnéticas posicionadas diametralmente. Quando o fluido condutor elétrico passa no interior do tubo e perpendicular às linhas de forças magnéticas, induz uma força eletromotriz, proporcional a sua velocidade. Esta tensão é detectada por dois eletrodos montados diametralmente no tubo.

As bobinas eletromagnéticas são energizadas por tensão alternada senoidal ou por um trem de pulsos, chamado de tensão contínua pulsada. Essa tensão representa a vazão volumétrica desde que o tubo esteja totalmente cheio do fluido, durante todo o tempo da medição.

## 2.11. MEDIDORES ULTRA-SÔNICO (EFEITO DOPPLER)

Os medidores que estão na categoria dos ultra-sônicos são pelo fato de usarem ondas nesta faixa de frequências.

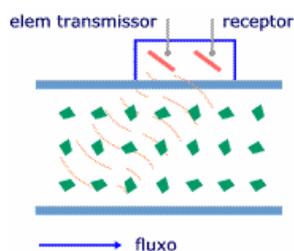


Figura 10. Medidor ultra-sônico

Só devem ser usados com fluidos que tenham partículas em suspensão.

Um elemento transmissor emite ultra-som de frequência conhecida. As partículas em suspensão no fluido refletem parte das ondas emitidas. Desde que estão em movimento, o efeito Doppler faz com que as ondas sejam captadas pelo elemento receptor em frequência diferente da transmitida e a diferença será tanto maior quanto maior a velocidade, ou seja, há relação com a vazão do fluxo.

## 2.12. MEDIDORES DE CORIOLIS

No arranjo da Figura 11, o fluido passa por um tubo em forma de U dotado de certa flexibilidade. Um dispositivo magnético na extremidade e não mostrado na figura faz o tubo vibrar com pequena amplitude na sua frequência natural e na direção indicada.

O nome é dado devido ao efeito da aceleração de Coriolis, que não será detalhado neste trabalho.

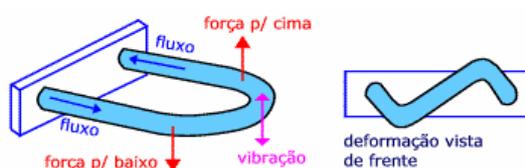


Figura 11. Medidores de Coriolis

Mas o resultado é indicado na figura. 11, onde aceleração de Coriolis provoca esforços em sentidos contrários nas laterais do U, devido à oposição dos sentidos do fluxo. E, visto de frente, o tubo é deformado e isso pode ser captado por sensores magnéticos.

A grande vantagem deste tipo é ser um medidor de fluxo de massa e não de volume, assim não há necessidade de compensações para mudanças de condições de temperatura e pressão.

Pode ser usado com uma ampla variedade de fluidos. Desde tintas, adesivos até líquidos criogênicos.

## CAPÍTULO 3

### PLACA DE ORIFÍCIO

#### 3.1. INTRODUÇÃO HISTÓRICA

A primeira aplicação da medição de vazão com placa de orifício ou outro gerador de pressão diferencial se perde na Antigüidade. Antes da era cristã, os romanos já usavam a placa de orifício para a medição de vazão de água de consumo. O desenvolvimento teórico desta aplicação é mais recente.

Em 1732, Henry Pitot inventou o tubo Pitot. Em seguida em 1738, John Bernoulli desenvolveu o teorema básico das equações hidráulicas de conservação da energia:

$$\frac{P}{\rho \times g} + \frac{v^2}{2g} + y = \text{constante}$$

Onde

P = pressão estática da tubulação

g = aceleração da gravidade no local

$\rho$  = densidade do fluido sob medição

v = velocidade do fluido

y = elevação da tubulação contendo o fluido.

A equação da continuidade fornece a outra relação entre a velocidade e a vazão do fluido em uma tubulação contendo um fluido incompressível:

$$Q = A_1 \times v_1 = A_2 \times v_2$$

Onde:

Q = vazão volumétrica instantânea do fluido

A = área da seção transversal

v = velocidade do fluido

A partir destas duas equações é que se chega à fórmula canônica:

$$Q = K \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Onde:

$\Delta P$  = pressão diferencial gerada pela placa de orifício pela vazão

$\rho$  = massa específica do fluido

K = constante

Em 1791, Giovanni Venturi desenvolveu seu trabalho básico do tubo medidor de vazão e a base teórica da atual computação dos elementos medidores do sistema.

Em 1887, Clemens Herschel, usando o trabalho de Venturi, desenvolveu o tubo comercial.

Em 1903, Thomas Wymouth usou a placa de orifício na medição de vazão de gás natural, com tomadas de pressão tipo flange e desenvolveu os coeficientes empíricos relacionados com o dimensionamento da placa.

Em 1916, Horace Judd apresentou um trabalho em um Encontro da ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), usando um sistema com placa de orifício e com tomadas de *vena contracta*. Este trabalho também se referia ao uso de placa excêntricas e segmentares para manipulação de ar sujo e líquido com ar entranhado.

Em 1970, a associação da AGA (*American Gas Association*), ASME e NBS estabeleceram um programa consistente de testes para a obtenção de dados experimentais suficientes para desenvolver uma equação para a previsão do coeficiente de descarga e de vazão. Foi esta possibilidade prática de se prever um coeficiente de vazão que levou à total comercialização e aplicação industrial do sistema de medição de vazão com placa de orifício.

Nos Estados Unidos, o report # 3 da AGA é usado como norma para a medição de gás natural com placa de orifício. As equações prescritas neste report são usadas em várias formas para calcular a vazão. Os dados experimentais relacionados com a medição de gás com placa estão relacionados no clássico livro *Principles and Practice of Flow Meter Engineering*, cuja primeira edição é de 1930 e cuja nona edição (1967) é dedicada a L. K. Spink, que foi um dos autores e um dos nove responsáveis pela elaboração do report AGA # 3.

O report AGA #3 foi sucessivamente revisto e atualizado: segunda edição em setembro de 1985 e terceira edição em outubro de 1990. Na última revisão, a equação de Stohls foi substituída pela equação de Reader-Harris/Galagher. Também nesta revisão o fator de super compressibilidade dos gases foi calculado pelo projeto NX-19.

Em 1983, R.W. Miller se propôs a fazer a atualização e revisão do livro do Spink, porém o resultado final sai tão diferente que se tornou um novo livro: *Flow Measurement Engineering Handbook*, que teve sua segunda edição em 1989 e a terceira em 1996. Este livro fornece os critérios detalhados de seleção, instalação e cálculos para os medidores de vazão mais comumente usados em transferências de custódia e aplicações de medição e controle clássicas. Diferentemente do Spink, que usava unidades inglesas, o Miller já utiliza unidades do SI. O Miller apresenta em forma de tabela as equações de computação da vazão com placa de orifício e os coeficientes experimentais de expansão e compressibilidade dos gases.

No final da década de 1960, houve a consolidação das normas americanas e européias para originar uma única norma internacional, ISO R 541 (1967) para placas e bocais e ISO R781 (1968) para tubos Venturi.

Finalmente, estas normas foram combinadas, resultando a ISO 5167 (1980), que foi atualizada em 1991, que é atualmente a norma mais recente e recomendada, por causa de sua simplicidade, precisão melhorada e aplicabilidade para uma larga faixa de números de Reynolds. A norma ISO R 541 foi à base do manual da Shell: *Shell Flow Meter Engineering Handbook* (1968), livro esgotado e possivelmente o mais copiado neste assunto.

Quando se comparam resultados obtidos através de normas diferentes (AGA # 3 e ISO 5167), as diferenças ocorreram na 4a casa decimal, ou seja, erro de 0,04%. Comparando-se resultados obtidos de programas baseados na ISO 5167, edições 1980 e 1991, as diferenças foram de 0,01%.

### 3.2 – TIPOS DE PLACAS DE ORIFÍCIO

Três tipos de placas de orifício usadas são de orifício: concêntrico, excêntrico e segmental, como mostrado na figura abaixo.

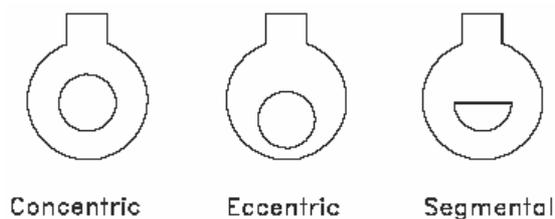


Figura 12. Tipos de placas de orifício

A placa concêntrica de orifício é a mais comum dos três tipos. Como mostrado o orifício é equidistante (concêntrico) ao diâmetro interno da tubulação. Corre através de uma placa sharp – edged do orifício é caracterizado por uma mudança na velocidade.

Enquanto o líquido passa através do orifício, o líquido converge, e a velocidade do líquido aumenta a um valor máximo. Neste momento, pressão esta em um valor mínimo. Enquanto o líquido diverge para encher a área inteira da tubulação, a velocidade diminui ate o valor original. A pressão aumenta a aproximadamente 60% a 80% do valor original da entrada. A perda da pressão é irrecuperável, conseqüentemente, a pressão da saída será sempre menor do que a pressão de entrada.

As pressões em ambos os lados do orifício são medidas, tendo por resultado uma pressão diferencial que seja proporcional à taxa de fluxo.

As placas segmentares e excêntricas de orifício são funcionalmente idênticas a de orifício concêntrico. A seção circular do orifício segmental é concêntrica com a tubulação.

A parcela segmental do orifício evita o acúmulo de resíduos na parte superior do orifício quando montada em uma tubulação horizontal. Dependendo do tipo do fluido, a seção segmental é colocada no alto ou fundo da tubulação horizontal para aumentar a exatidão da medida.

As placas excêntricas de orifício deslocam a borda do orifício ao interior da parede da tubulação. Este projeto impede o represamento do fluido e é usado também na mesma maneira que a placa segmental de orifício.

As placas de orifício têm duas desvantagens distintas, causam uma gota de pressão permanente elevada (a pressão da tomada será de 60% a 80% da pressão da entrada) e são sujeitas a corrosão, que causará, eventualmente, distorções na pressão diferencial medida.

O esquema e uma ilustração de uma placa de orifício concêntrica são detalhados no esquema abaixo:

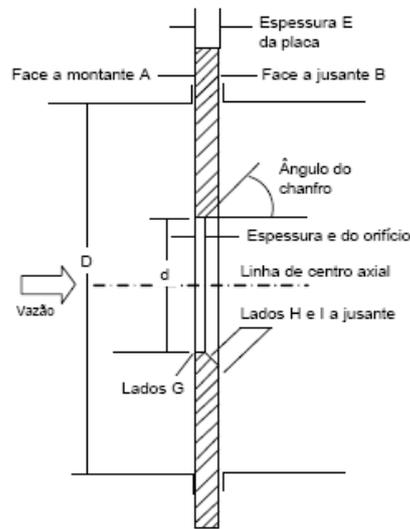
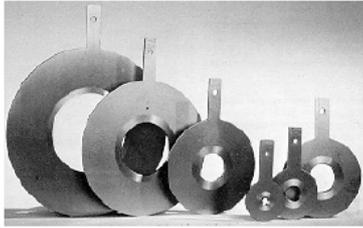


Figura 13. Foto e descrição das partes de uma placa de orifício concêntrica

### 3.3 – SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA PLACAS DE ORIFÍCIO

Como o fluido do processo entra em contato direto com a placa, a escolha do material da placa deve ser compatível com o fluido, sob o aspecto de corrosão química.

A placa de orifício pode ser construída com qualquer material que teoricamente não se deforme com a pressão e não se dilate com a temperatura e que seja de fácil manipulação mecânica. Os materiais mais comuns são: aço carbono, aço inoxidável, monel, bronze, latão.

A velocidade do fluido é também um fator importante, pois a alta velocidade do fluido pode provocar erosão na placa. A baixa velocidade pode depositar material em suspensão do fluido ou lodo na placa.

### 3.4 – SISTEMA DE MEDIÇÃO COM PLACA DE ORIFÍCIO

O sistema de medição de vazão com placa de orifício inserida em uma tubulação de seção circular, totalmente cheia de fluido é constituído de:

1. elemento primário e as tomadas de impulso correspondentes,
2. elemento secundário, que mede a pressão diferencial gerada pelo primário.

Há norma que trata exclusivamente das conexões entre os elementos primário e secundário: ISO 2186 (1973).

O que interessa no presente trabalho é o estudo do elemento primário, mais especificamente, da placa de orifício.

De um modo simplificado, a placa de orifício é feita de uma chapa fina de metal, com um furo circular em sua parte central e concêntrica com a tubulação, com cantos vivos e retos a montante e com uma espessura muito menor que o diâmetro da seção de medição.

Diz-se que a placa de orifício é um elemento primário de vazão, não porque seja de altíssima precisão, mas porque, se construída conforme a norma, ela está umbilicalmente ligada à vazão que ela mede, através de equações matemáticas teóricas e coeficientes empíricos.

Para se entender a filosofia do dimensionamento da placa deve-se começar pela equação matemática que relaciona os principais parâmetros envolvidos é o seguinte:

$$Q = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{2\Delta P \rho_1}$$

Onde

Q é a vazão mássica

C é o coeficiente de descarga

b é a relação d/D da placa de orifício

$\varepsilon_1$  é o fator de expansão do fluido cuja vazão quer se medir

d é o diâmetro interno do orifício da placa

D é o diâmetro interno da tubulação

$\Delta P$  é a pressão diferencial gerada pela placa por causa da vazão

$\rho_1$  é a densidade do fluido

O índice 1 de alguns parâmetros, se relaciona com as condições a montante (antes) da placa. Existe uma forma análoga, substituindo-se o índice 1 por 2, e com os parâmetros referidos às condições a jusante (depois) da placa.

Como a placa de orifício infere a vazão volumétrica a partir da pressão diferencial gerada, tem-se:

$$W = \frac{Q}{\rho}$$

Onde

W = vazão volumétrica

$\rho$  = densidade do fluido à temperatura e pressão em que o volume é estabelecido.

### 3.5 – PROCEDIMENTO PARA DIMENSIONAMENTO

Dimensionar a placa de orifício é determinar o seu  $\beta$  ou então, determinar o diâmetro interno do furo da placa.

Para determinar o diâmetro da placa ou o seu  $\beta$ , deve-se conhecer o coeficiente de descarga da placa e o fator de expansão do fluido que dependem do  $\beta$  da placa. Assim, o dimensionamento da placa de orifício é um processo iterativo, onde se assumem valores de partida para alguns parâmetros, calcula-se o  $\beta$  para estes valores iniciais, consultam-se em tabelas para achar novos valores dos parâmetros para o valor de  $\beta$  achado, usam-se os novos valores, obtendo-se novo valor de  $\beta$ .

Por causa dos muitos fatores envolvidos e do tédio de se fazer cálculos iterativos, atualmente, o dimensionamento da placa de orifício é feito por programas de computador, onde não é transparente este processo iterativo de cálculo. Geralmente, os programas fazem várias iterações, tipicamente umas oito ou nove passagens, e dá o resultado final quando dois cálculos consecutivos difiram de uma determinada incerteza. Os programas de computadores utilizam também coeficientes experimentais provenientes de normas ISO/ASME.

Tem-se:

$$Q = K \times \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$

Onde:

K = constante que adequa as unidades e dimensões envolvidas que dependem de:

1. coeficiente de descarga
2. localização das tomadas
3. geometria do elemento primário
4. condições de operação
5. fator de expansão do gás medido
6. número de Reynolds
7. furos adicionais opcionais de dreno e ventilação.

O coeficiente de descarga é um parâmetro pouco entendido na medição com placa de orifício. Teoricamente, ele é definido como:

$$C = \frac{\textit{vazão real}}{\textit{vazão ideal}}$$

Onde *vazão real* é a vazão que passa na tubulação quando se coloca a placa de orifício nela e *vazão ideal* é a vazão que passa na tubulação sem a placa de orifício. Ou seja, a colocação da placa de orifício na tubulação diminui a vazão que passa por ela, pois introduz uma resistência hidráulica adicional. É óbvio que, depois de colocada a placa de orifício, a vazão é a mesma em qualquer ponto da tubulação, inclusive através da placa.

O coeficiente de descarga depende do tipo do elemento primário gerador da pressão diferencial, se placa de orifício, bocal ou tubo Venturi, da geometria da placa (canto reto ou cônico) e independe do sistema de unidades, pois é adimensional. O coeficiente de descarga típico da placa de orifício é de 0,60 e este valor é geralmente usado no início dos cálculos.

## CAPÍTULO 4

### DESVIOS DE FORMA (MACROGEOMÉTRICOS) E DE SUPERFÍCIE (MICROGEOMÉTRICOS)

#### 4.1. DESVIOS DE FORMA OU MACROGEOMETRIA

Apesar do alto nível de desenvolvimento tecnológico, ainda é impossível obter superfícies perfeitamente exatas. Por isso, sempre se mantém um limite de tolerância nas medições. Mesmo assim, é comum aparecerem peças com superfícies fora dos limites de tolerância, devido a várias falhas no processo de usinagem, nos instrumentos ou nos procedimentos de medição. Nesse caso, a peça apresenta erros de forma.

Erros de forma, também denominados erros macrogeométricos são os erros verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil e instrumentos mais avançados como as máquinas de medir por coordenadas (MMC) dentre outros.

Um erro de forma corresponde à diferença entre a superfície real da peça e a forma geométrica teórica. A forma de um elemento será correta quando cada um dos seus pontos for igual ou inferior ao valor da tolerância dada.

Entre esses erros, incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retilidade, planicidade, circularidade, perpendicularismo, paralelismo dentre outros defeitos de forma.

Durante a usinagem, as principais causas dos erros macrogeométricos são:

- Imperfeições na geometria da máquina ou da peça
- Fixação errada da peça
- Distorção devida ao tratamento térmico
- Vibrações.

Tabela 1. Notação e simbologia do erros macrogeométricos.

Características afetadas pelas tolerâncias		
FORMA para elementos isolados	Retilidade	—
	Planeza	▭
	Circularidade	○
	Cilindricidade	⊖
	Forma de uma linha qualquer	⌒
	Forma de uma superfície qualquer	Ⓓ
ORIENTAÇÃO para elementos associados	Paralelismo	//
	Perpendicularidade	⊥
	Inclinação	∠
POSIÇÃO para elementos associados	Posição de um elemento	⊕
	Concentricidade	⊙
	Simetria	≡
	Batimento	↗

#### 4.1.1. Tolerância de forma (para elemento isolado)

##### *Retilidade*

É a condição pela qual cada linha deve estar limitada dentro do valor de tolerância especificada.

Se a tolerância de retilidade é aplicada nas duas direções de um mesmo plano, o campo de tolerância daquela superfície tem que estar de acordo com a tolerância especificada.

A retilidade era determinada com o auxílio de um relógio comparador, que percorria toda a extensão da peça. Esse método ainda é bastante utilizado nos processos de usinagem, porém esse desvio de forma é quantificado facilmente com o auxílio das máquinas de medir por coordenadas.

### ***Planicidade***

É a condição pela qual toda superfície deve estar limitada pela zona de tolerância  $t$ , compreendida entre dois planos paralelos, distantes de  $t$ .

Quando, no projeto do produto, não se especifica a tolerância de planeza, admite-se que ela possa variar desde que não ultrapasse a tolerância dimensional.

Geralmente, os erros de planicidade ocorrem devido aos fatores:

- Variação de dureza da peça ao longo do plano de usinagem.
- Desgaste prematuro do fio de corte.
- Deficiência de fixação da peça, provocando movimentos indesejáveis durante a usinagem.
- Má escolha dos pontos de locação e fixação da peça, ocasionando deformação.
- Folga nas guias da máquina.
- Tensões internas decorrentes da usinagem, deformando a superfície.

### ***Circularidade***

É a condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada.

Normalmente, não será necessário especificar tolerâncias de circularidade pois, se os erros de forma estiverem dentro das tolerâncias dimensionais, eles serão suficientemente pequenos para se obter a montagem e o funcionamento adequados da peça.

Entretanto, há casos em que os erros permissíveis, devido a razões funcionais, são tão pequenos que a tolerância apenas dimensional não atenderia à garantia funcional.

Geralmente o erro de circularidade é verificado na produção com um dispositivo de medição entre centros.

### ***Cilindricidade***

É a condição pela qual a zona de tolerância especificada é a distância radial entre dois cilindros coaxiais.

A circularidade é um caso particular de cilindridade, quando se considera uma seção do cilindro perpendicular à sua geratriz.

A tolerância de cilindridade engloba:

- Tolerâncias admissíveis na seção longitudinal do cilindro, que compreende conicidade, concavidade e convexidade.
- Tolerância admissível na seção transversal do cilindro, que corresponde à circularidade.

### ***Forma de uma linha qualquer***

O campo de tolerância é limitado por duas linhas envolvendo círculos cujos diâmetros sejam iguais à tolerância especificada e cujos centros estejam situados sobre o perfil geométrico correto da linha.

### ***Forma de uma superfície qualquer***

O campo de tolerância é limitado por duas superfícies envolvendo esferas de diâmetro igual à tolerância especificada e cujos centros estão situados sobre uma superfície que tem a forma geométrica correta.

## **4.2. ESTUDOS DA MICROGEOMETRIA (RUGOSIDADE)**

### **4.2.1. Rugosidade**

É o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos.

Ela influi na:

- Qualidade de deslizamento;
- Resistência ao desgaste;
- Possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- Resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- Qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- Resistência à corrosão e à fadiga;
- Vedação;
- Aparência.

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que, entre outras, são:

- Imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta;
- Vibrações no sistema peça-ferramenta;
- Desgaste das ferramentas;
- O próprio método de conformação da peça.

#### 4.2.2. Conceitos básicos sobre superfícies

Para estudar e criar sistemas de avaliação do estado da superfície é necessário definir previamente diversos termos e conceitos que possam criar uma linguagem apropriada. Com essa finalidade utilizaremos as definições da norma NBR 6405/1988.

##### *Superfície geométrica*

Superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento. Por exemplo: superfície plana, cilíndrica etc., que sejam, por definição, perfeitas. Na realidade, isso não existe; trata-se apenas de uma referência.

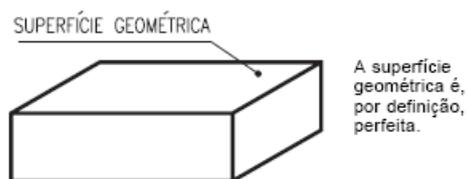


Figura 14. Superfície geométrica

##### *Superfície real*

Superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É a superfície que resulta do método empregado na sua produção. Por exemplo: torneamento, retífica, ataque químico etc. Superfície que podemos ver e tocar.

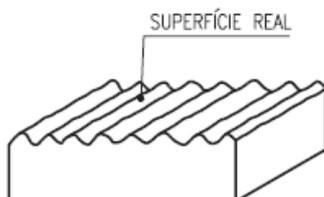


Figura 15. Superfície real

##### *Superfície efetiva*

Superfície avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de uma peça. É a superfície apresentada e analisada pelo aparelho de medição. É importante esclarecer que existem diferentes sistemas e condições de medição que apresentam diferentes superfícies efetivas.

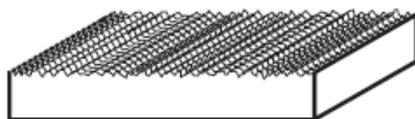


Figura 16. Superfície efetiva

##### *Perfil geométrico*

Intersecção da superfície geométrica com um plano perpendicular. Por exemplo: uma superfície plana perfeita, cortada por um plano perpendicular, originará um perfil geométrico que será uma linha reta.

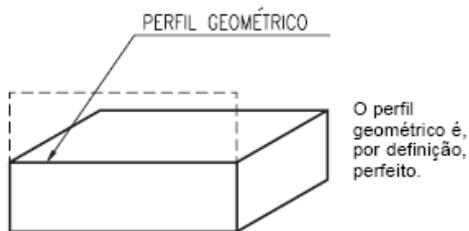


Figura 17. Perfil geométrico

### ***Perfil real***

Intersecção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso, o plano perpendicular (imaginário) cortará a superfície que resultou do método de usinagem e originará uma linha irregular.

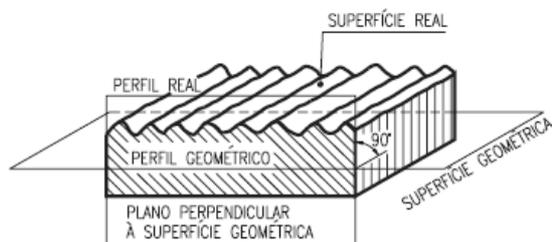


Figura 18. Perfil real

### ***Perfil efetivo***

Imagem aproximada do perfil real, obtido por um meio de avaliação ou medição. Por exemplo: o perfil apresentado por um registro gráfico, sem qualquer filtragem e com as limitações atuais da eletrônica.

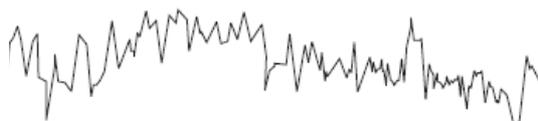


Figura 19. Perfil efetivo (sem filtrar ondulações)

### ***Perfil de rugosidade***

Obtido a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação, após filtragem. É o perfil apresentado por um registro gráfico, depois de uma filtragem para eliminar a ondulação à qual se sobrepõe geralmente à rugosidade.



Figura 20. Perfil de rugosidade (após filtragem da ondulação)

### ***Composição da superfície***

Tomando-se uma pequena porção da superfície, observam-se certos elementos que a compõem.

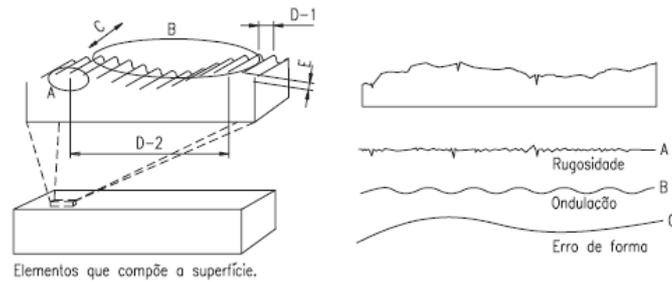


Figura 21. Composição de superfície

A figura 21 representa um perfil efetivo de uma superfície, e servirá de exemplo para salientar os elementos que compõem a textura superficial, decompondo o perfil.

A) Rugosidade ou textura primária é o conjunto das irregularidades causadas pelo processo de produção, que são as impressões deixadas pela ferramenta (fresa, pastilha, rolo laminador etc.).

B) Ondulação ou textura secundária é o conjunto das irregularidades causadas por vibrações ou deflexões do sistema de produção ou do tratamento térmico.

C) Orientação das irregularidades é a direção geral dos componentes da textura, e são classificados como:

- Orientação ou perfil periódico - quando os sulcos têm direções definidas;
- Orientação ou perfil aperiódico - quando os sulcos não têm direções definidas.

D) Passo das irregularidades é a média das distâncias entre as saliências.

- D1: passo das irregularidades da textura primária;
- D2: passo das irregularidades da textura secundária.

O passo pode ser designado pela frequência das irregularidades.

E) Altura das irregularidades ou amplitude das irregularidades.

Examinamos somente as irregularidades da textura primária.

#### 4.2.3. CRITÉRIOS PARA AVALIAR A RUGOSIDADE

##### *Comprimento de amostragem (Cut off)*

Toma-se o perfil efetivo de uma superfície num comprimento  $l_m$ , comprimento total de avaliação. Chama-se o comprimento  $l_e$  de comprimento de amostragem (NBR 6405/1988).

O comprimento de amostragem nos aparelhos eletrônicos, chamado de cut-off ( $l_e$ ), não deve ser confundido com a distância total ( $l_t$ ) percorrida pelo apalpador sobre a superfície.

É recomendado pela norma ISO que os rugosímetros devam medir 5 comprimentos de amostragem e devem indicar o valor médio.

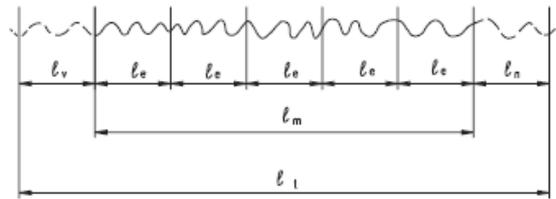


Figura 22. Comprimentos de avaliação de rugosidade

A distância percorrida pelo apalpador deverá ser igual a  $5l_e$  mais a distância para atingir a velocidade de medição  $l_v$  e para a parada do apalpador  $l_m$ .

Como o perfil apresenta rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação.

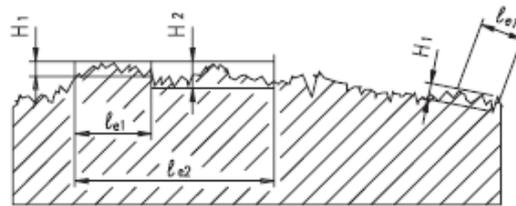


Figura 23. Rugosidade e ondulação

A rugosidade  $H_2$  é maior, pois  $l_1$  e  $l_2$  incorpora ondulação.

A rugosidade  $H_1$  é menor, pois, como o comprimento  $l_{e1}$  é menor, ele filtra a ondulação.

#### 4.2.4. PARÂMETROS DE RUGOSIDADE

A superfície de peças apresenta perfis bastante diferentes entre si. As saliências e reentrâncias (rugosidade) são irregulares. Para dar acabamento adequado às superfícies é necessário, portanto, determinar o nível em que elas devem ser usinadas, ou seja, deve-se adotar um parâmetro que possibilite avaliar a rugosidade, são eles.

##### **Rugosidade média ( $R_a$ )**

Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento ( $y_i$ ), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição ( $l_m$ ).

Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $l_m$ ).

Esse parâmetro é conhecido como

- **$R_a$**  (roughness average) que significa rugosidade média é expresso em mm (micrometro);

- **CLA** (center line average) significa centro da linha média, e é adotado pela norma inglesa. A medida é expressa em micropolegadas (min = microinch).

O parâmetro *Ra* pode ser usado nos seguintes casos:

- Quando for necessário o controle contínuo da rugosidade nas linhas de produção;
- Em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresagem etc.);
- Em superfícies de pouca responsabilidade, como no caso de acabamentos com fins apenas estéticos.

#### ***Vantagens do parâmetro Ra***

- É o parâmetro de medição mais utilizado em todo o mundo
- É aplicável à maioria dos processos de fabricação
- Devido a sua grande utilização, quase todos os equipamentos apresentam esse parâmetro (de forma analógica ou digital eletrônica).
- Os riscos superficiais inerentes ao processo não alteram muito seu valor.
- Para a maioria das superfícies, o valor da rugosidade nesse parâmetro está de acordo com a curva de Gauss, que caracteriza a distribuição de amplitude.

#### ***Desvantagens do parâmetro Ra***

- O valor de *Ra* em um comprimento de amostragem indica a média da rugosidade. Por isso, se um pico ou vale não típico aparecer na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando o defeito.
- O valor de *Ra* não define a forma das irregularidades do perfil. Dessa forma, pode-se ter um valor de *Ra* para superfícies originadas de processos diferentes de usinagem.
- Nenhuma distinção é feita entre picos e vales.
- Para alguns processos de fabricação com frequência muito alta de vales ou picos, como é o caso dos sinterizados, o parâmetro não é adequado, já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro a altos níveis.

#### ***Medição da rugosidade (Ra)***

Na medição da rugosidade, são recomendados valores para o comprimento da amostragem, conforme tabela 2:

Tabela 2. Tabela de comprimento de amostragem (Cut off)

<b>RUGOSIDADE RA (mm)</b>	<b>MÍNIMO COMPRIMENTO DE AMOSTRAGEM L (CUT OFF) (mm)</b>
De 0 até 0,1	0,25
Maior que 0,1 até 2,0	0,80
Maior que 2,0 até 10,0	2,50
Maior que 10,0	8,00

Tabela 3. Classificação dos acabamentos superficiais (grau de rugosidade e o processo de usinagem que pode ser usado em sua obtenção)

Grupos de rugosidades	▽			▽▽			▽▽▽			▽▽▽▽		
Rugosidade máxima valores em Ra(μm)	50			6,3			0,8			0,1		
Classes de rugosidade (GRADE)	N12	N11	N10	N9	N8	N7	N6	N5	N4	N3	N2	N1
Rugosidade máxima valores em Ra(μm)	50	25	12,5	6,3	3,2	1,6	0,8	0,4	0,2	0,1	0,05	0,025
Informações sobre os resultados de usinagem												
Serrar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Limar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Plainar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Tornear	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Furar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Rebaixar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Alargar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Fresar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Bruchar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Raspar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Retificar(frontal)	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Retificar(lateral)	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Aisar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Superfinish	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Lapidar	[Barra com hachuras para N12-N10]											
Polir	[Barra com hachuras para N12-N10]											

[Barra com hachuras para N12-N10]	Faixa para um desgaste superior
[Barra com hachuras para N12-N10]	Rugosidade realizável com usinagem comum
[Barra com hachuras para N12-N10]	Rugosidade realizável com cuidados e métodos especiais

## CAPÍTULO 5

### CÁLCULO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

#### 5.1. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do mensurando. O resultado de uma medição após a correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda, tão somente uma estimativa do valor do mensurando por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado no que diz respeito aos efeitos sistemáticos.

Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza em uma medição, incluindo:

- a) definição incompleta do mensurando;
- b) realização imperfeita da definição do mensurando;
- c) amostragem não representativa - a amostra medida pode não representar o mensurando;
- d) conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- e) erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- f) resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- g) valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- h) valores inexatos de constantes e de outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- i) aproximação e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- j) variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Estas fontes, não são necessariamente independentes e algumas das fontes de a) à i) podem contribuir para a fonte j). Naturalmente, um efeito sistemático não reconhecido não pode ser levado em consideração na avaliação da incerteza do resultado de medição, porém contribui para seu erro.

#### 5.2. TIPOS DE INCERTEZAS

Têm-se três tipos de incertezas: Incerteza padrão ( $u$ ), Incerteza combinada ( $u_c$ ) e Incerteza expandida ( $U$ ).

A incerteza padrão de um dado aleatório corresponde à estimativa equivalente a um desvio padrão ( $s$ )  $\rightarrow u = \pm s$ . Esta incerteza tem uma probabilidade de ocorrência  $P = 68,27\%$ .

A incerteza combinada de um processo de medição é calculada considerando-se a ação simultânea de todas as fontes de incertezas, ou seja, é a influência combinada de todas as incertezas padrão sobre o resultado da medição (RM). A incerteza combinada  $u_c$  também equivale a um desvio padrão. Esta incerteza também tem uma probabilidade de ocorrência  $P = 68,27\%$ .

A incerteza expandida é determinada a partir da incerteza combinada multiplicada pelo coeficiente t-Student apropriado. Esta incerteza reflete a faixa de dúvidas ainda presente na medição para uma probabilidade de enquadramento definida, geralmente 95,45%.

### 5.3. INCERTEZA PADRONIZADA

A incerteza padronizada ou padrão de uma fonte de erro é a faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão.

A avaliação da incerteza padronizada pode ser classificada em Tipo A e Tipo B. O propósito de classificação Tipo A e Tipo B é de indicar as duas maneiras diferentes de avaliar as componentes da incerteza e serve apenas para discussão, a classificação não se propõe a indicar que haja qualquer diferença na natureza dos componentes resultando dois tipos de avaliação. Ambos os tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e os componentes de incerteza resultantes de cada tipo são quantificados por variâncias ou desvios padrão.

#### 5.3.1. Avaliação do Tipo A

O procedimento tipo "A" para estimativa da incerteza padrão baseia-se no cálculo de parâmetros estatísticos, os quais são obtidos de várias medições. Considere a variável aleatória  $x$ . Foram efetuadas  $n$  medidas. A média pode ser estimada pela equação:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

O desvio padrão experimental  $S(x)$  é calculado pela equação:

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Para que o valor de  $S(x)$  seja confiável é necessário que seja realizado um número suficientemente grande de medições, geralmente  $n \geq 10$ .

Se utilizar o valor médio de várias indicações, obtido a partir da média de um conjunto de " $n$ " indicações de  $x$ , o desvio padrão experimental da média de  $x$  é estimado por:

$$s(\bar{x}) = \frac{S(x)}{\sqrt{n}}$$

A incerteza padrão associada à variável  $x$ , representada por  $u(x)$ , é o próprio desvio padrão da média das " $n$ " observações, ou seja,

$$u(x) = s(\bar{x})$$

O número de graus de liberdade envolvido ( $i$ ) na determinação de  $u(x)$  é o número de medições independentes efetuadas menos 1, ou seja:

$$\nu = n - 1$$

### 5.3.2. Incerteza do Tipo B

Método de avaliação da incerteza por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações.

A incerteza padronizada  $u(x_i)$  é avaliada por julgamento científico baseando-se em todas informações disponíveis sobre a possível variabilidade de  $x_i$ . O conjunto de informações pode incluir:

1. dados de medições prévias;
2. a experiência ou o conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos;
3. especificações do fabricante;
4. dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados e;
5. incertezas relacionadas a dados de referência extraídos de manuais.

Devem ser coletadas informações que permitam estimar a incerteza associada a cada fonte de erro.

Recomenda-se apresentar o valor associado aos limites de variação da fonte de incertezas em sua unidade natural e identificar o tipo de distribuição de probabilidade envolvida (normal, retangular, triangular ou outra).

Em função do tipo de distribuição será definido o divisor utilizado para converter o valor conhecido na incerteza padronizada. Para distribuições normais este valor geralmente é unitário no caso da avaliação de incerteza tipo “A”, ou coincide com o fator de abrangência utilizado na fonte de informação quando a avaliação tipo “B” é considerada.

Os divisores para algumas distribuições de probabilidade são:

- Retangular =  $\sqrt{3}$
- Triangular =  $\sqrt{6}$
- U = 2

### 5.4. INCERTEZA COMBINADA

A incerteza padronizada combinada de um resultado de medição é a incerteza padronizada quando este resultado é obtido por meio dos valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição variam com mudanças nestas grandezas.

Deve-se combinar estas incertezas individuais para se ter a influência conjunta de todas as fontes sobre o resultado final:

$$u_c = \sqrt{(u_1)^2 + (u_2)^2 + \dots + (u_n)^2}$$

## 5.5. INCERTEZA EXPANDIDA

Embora a incerteza padronizada combinada  $u_c(y)$  possa ser universalmente usada para expressar a incerteza de um resultado de medição, em algumas aplicações comerciais, industriais e regulamentadoras, e quando a saúde e a segurança estão em questão, é, muitas vezes, necessário dar uma medida de incerteza que define um intervalo em torno do resultado da medição com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando.

A medida adicional de incerteza que satisfaz o requisito de fornecer um intervalo do tipo indicado anteriormente denominada incerteza expandida e é representada por  $U$ . A incerteza expandida  $U$  é obtida multiplicando-se a incerteza padronizada combinada  $u_c$  por um fator de abrangência  $k$ :

$$U = k \cdot u_c(y)$$

O resultado de uma medição é, então, convenientemente expresso como  $Y = y \pm U$ , que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando  $Y$  é  $y$ , e que  $y - U$  a  $y + U$  é o intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a  $Y$ . Tal intervalo é também expresso como:

$$y - U \leq Y \leq y + U$$

$U$  é interpretado como definindo um intervalo em torno do resultado de medição que abrange uma extensa fração  $P$  da distribuição de probabilidade, caracterizada por aquele resultado e sua incerteza padronizada combinada, e  $P$  é a probabilidade de abrangência ou nível da confiança do intervalo.

Sempre que praticável, o nível da confiança  $P$ , associado com intervalo definido por  $U$  deve ser estimado e declarado. Deve ser reconhecido que multiplicando  $u_c(y)$  por uma constante, não acrescenta informação nova, porém se apresenta a informação previamente disponível de forma diferente. Entretanto, também deve ser reconhecido que, na maioria dos casos, o nível da confiança  $P$  (especialmente para valores de  $P$  próximos de 1) é um tanto incerto, não somente por causa do conhecimento limitado da distribuição de probabilidade caracterizada, por  $y$  e  $u_c(y)$  (especialmente nas extremidades), mas também por causa da incerteza da própria  $u_c(y)$ .

## 5.6. FATOR DE ABRANGÊNCIA

O valor do fator de abrangência  $k$  deve levar em conta, além do nível de confiança desejado, o número de graus de liberdade efetivos associados ao caso para o intervalo  $y-U$  a  $y+U$ . O valor de  $k$  geralmente está entre 2 e 3, mas pode assumir diversos outros valores.

É comum calcular o número de graus de liberdade efetivos ( $u_{ef}$ ) através da equação de Welch-Satterthwaite:

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}}$$

onde:

$u_c$  = incerteza combinada;

$u_i$  = incerteza padronizada associada à  $i$ -ésima fonte de incerteza;

$v_i$  = número de graus de liberdade associado à  $i$ -ésima fonte de incerteza;

$N$  = número total de fontes de incertezas analisadas.

Da aplicação da equação acima resulta o número de graus de liberdade efetivo. O valor de “ $k$ ” para nível de confiança de 95% pode então ser obtido da tabela 3.1:

Tabela 4. Tabela de Student.

$v_{ef}$	1	2	3	4	5	6	7	8	10	12	14	16
$k_{95}$	13,97	4,53	3,31	2,87	2,65	2,52	2,43	2,37	2,28	2,23	2,20	2,17

$v_{ef}$	18	20	25	30	35	40	45	50	60	80	100	$\infty$
$k_{95}$	2,15	2,13	2,11	2,09	2,07	2,06	2,06	2,05	2,04	2,03	2,02	2,00

Para valores fracionários de  $v_{ef}$ , interpolação linear pode ser usada se  $v_{ef} > 3$ . Alternativamente o valor de  $k_{95}$  corresponde ao valor de  $v_{ef}$  imediatamente inferior na tabela pode ser adotado.

## 5.7. PROCEDIMENTO GERAL DE AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

- Determinar o modelo matemático que relaciona a grandeza de entrada com a saída;  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$
- Identificar todas as correções a serem feitas ao resultado de medição;
- Listar componentes sistemáticos da incerteza associada a correções e tratar efeitos sistemáticos não corrigidos com parcelas de incerteza;
- Atribuir valores de incertezas e distribuição de probabilidades com base em conhecimentos experimentais práticos ou teóricos;
- Calcular a Incerteza Padronizada ( $u_i$ ) para cada componente de incerteza;
- Calcular a Incerteza Combinada ( $u_c$ ) ou  $u_c(y)$ ;
- Calcular a Incerteza Expandida ( $U$ ).

## CAPÍTULO 6

### METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho destacará o procedimento de calibração de uma placa de orifício, abordando o procedimento de medição, seus erros macro e micro-geométrico, suas tolerâncias e avaliação dos resultados através do cálculo da incerteza, bem como a definição do padrão, do mensurando e das grandezas de influência. O conhecimento das incertezas das medidas permite decidir se o resultado obtido está dentro dos limites preestabelecidos.

#### 6.1. PLACA DE ORIFÍCIO

##### 6.1.1. Definição do Mensurando e suas características

O mensurando, ao qual procuraremos identificar suas características, era um conjunto de placas de orifício, a serem obtidas, semelhantes à ilustrada na figura 24, porém as medições foram efetuadas em somente uma placa de orifício.



Figura 24. Placa de orifício

#### 6.2. DEFINIÇÃO DOS PADRÕES E SUAS CARACTERÍSTICAS

##### 6.2.1. Máquina de medir por coordenadas

O padrão utilizado nas medições, dos parâmetros macrogeométricos, da placa de orifício será uma máquina de medir por coordenadas ou tridimensional, apresentada na figura 25, cujas características serão descritas a seguir.



Figura 25. Máquina de medir por coordenadas (MMC)

## Características:

- ✓ Fabricante: Mitutoyo
- ✓ Modelo: QM – Measure 353
- ✓ Programa de medição: QM-data 3D.
- ✓ Incerteza:  $\pm (1,3 + L/500)$  mm, onde L é a indicação da máquina em "mm"
- ✓ Certificado de calibração: 3635/02 – Mitutoyo – RBC.

## 6.3. RUGOSÍMETRO

Na quantificação dos parâmetros microgeométricos, o padrão utilizado foi o medidor de perfil de rugosidade, ilustrado na figura 26, cujas características serão descritas a seguir.



Figura 26. Rugosímetro

## Características

- ✓ Fabricante: Rank Taylor Hobson
- ✓ Modelo: Stylus
- ✓ Resolução: 0,01  $\mu\text{m}$
- ✓ Incerteza: 5%
- ✓ Certificado de calibração: CR-001-04 - IEA/CTA - RBC

Existem ainda, equipamentos que auxiliaram nas medições, como suportes para fixação, instrumento para nivelamento dentre outros.

## 6.4. PRINCIPAIS FONTES DE ERROS E INCERTEZAS QUE SE PODE ENCONTRAR DURANTE AS MEDIÇÕES

Nos parâmetros que serão quantificados durante a pesquisa, dentre as principais fontes de erros e incertezas que se possam identificar, podemos citar:

- ✓ Dispersão dos valores das medições
- ✓ Incerteza da máquina de medir por coordenadas

- ✓ Erro de perpendicularismo
- ✓ Erro de paralelismo
- ✓ Erro no nivelamento da placa
- ✓ Incerteza do padrão de rugosidade
- ✓ Efeito da resolução do padrão de rugosidade
- ✓ Reprodutibilidade do padrão de rugosidade
- ✓ Efeito da temperatura

Outras possíveis fontes de erro e incerteza poderão aparecer no decorrer do processo de medição.

## 6.5. PROCEDIMENTOS DE MEDIÇÃO

Antes de iniciar as medições, a placa de orifício foi limpa e posta na sala de medições. Para se efetuar as medições faz-se necessário que o mensurando está climatizado, ou seja, a mesma temperatura ambiente do laboratório. O tempo para estabilização foi de, aproximadamente, 12 horas.

As medições dos parâmetros macrogeométricos foram efetuadas em uma máquina tridimensional de medir, modelo QM-353 e dos parâmetros microgeométricos com o rugosímetro Rank Taylor Hobson.

A especificação de uma placa de orifício concêntrica é detalhada através de sua simbologia, conforme apresentada na figura 27.

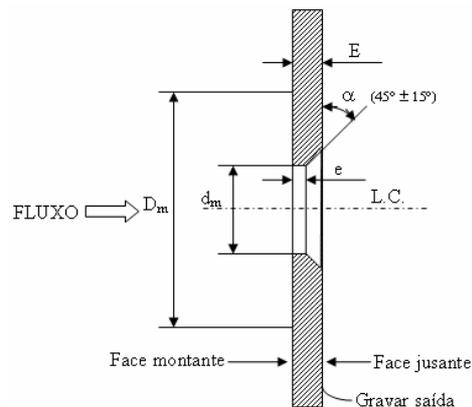


Figura 27. Simbologia para placa de orifício

Onde:

$D_m$  = diâmetro da tubulação

$d_m$  = diâmetro do orifício

$e$  = espessura do orifício

$E$  = espessura da placa

$\alpha$  = ângulo de chanfro

$L.C.$  = linha de centro.

### 6.5.1. Espessura da placa

A espessura da placa pode ser determinada através da medição direta, utilizando um micrômetro externo de 0 – 25 mm.

## 6.5.2. Planeza

A medição dos desvios de planeza se dar da seguinte maneira: com a placa de orifício nivelada sobre a mesa da máquina de medir por coordenadas (MMC), selecionar a função planeza; tocar, com o sensor apalpador da máquina, em quatro pontos da superfície da placa; e por fim, selecionar a função calcular, na MMC.

### 6.5.2.1. Tolerância de planeza

A tolerância de planeza é o desvio aceitável na forma do elemento tolerado em relação à forma plana ideal, conforme está ilustrado na Figura 28.

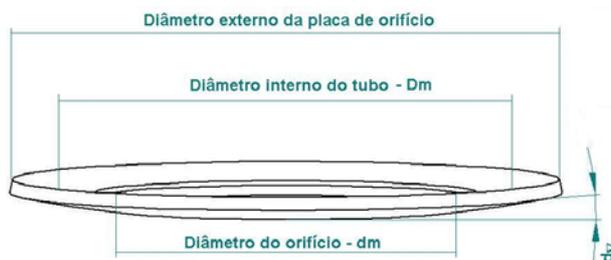


Figura 28. Desvio de planeza da placa de orifício

O desvio de planeza é representado por  $\Delta p$ . Segundo AGA3 2000 – parte 2, as superfícies da placa de orifício tanto a montante quanto a jusante admite um desvio de planeza menor ou igual a 1% do nível de fluido (isto é, 0,010 pol por polegada de coluna) na condição de não escoamento. A altura da coluna pode ser calculada por  $(D_m - d_m)/2$ . Este critério para a planeza se aplica a qualquer dois pontos da placa de orifício que estejam dentro do perímetro definido pelo diâmetro interno do tubo.

### 6.5.3. Diâmetro do orifício

O valor obtido do diâmetro do furo da placa de orifício é dado pela média de quatro ou mais medições do furo.



Figura 29. Medição do diâmetro da placa de orifício

A medição do diâmetro do furo de uma placa de orifício, ilustrada na figura 29, é efetuada da seguinte maneira: selecionar a função circularidade na MMC, com o apalpador tocar na superfície interna, em vários pontos do furo; e por fim selecionar a função calcular.

### 6.5.3.1. Tolerância de circularidade

A tolerância de circularidade corresponde ao desvio da forma geométrica circular, que pode ser aceito sem comprometer a funcionalidade da peça. O controle deste desvio de forma é recomendado principalmente em peças cônicas e cilíndricas. O erro de circularidade encontrado em uma placa de orifício é mostrado na figura 30.

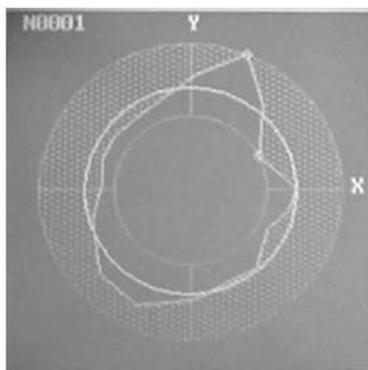


Figura 30. Erro de circularidade (ilustração)

Segundo a norma AGA3 2000 – parte 2, o diâmetro, de projeto, do furo da placa de orifício ( $d_r$ ) é definido como o diâmetro de referência, calculado à temperatura de referência ( $t_r$ ) pela seguinte equação:

$$d_r = d_m[1 + \alpha_1(t_r - t_m)]$$

Onde:

$\alpha_1$  - coeficiente de expansão linear do material da placa (ver Tabela II),

$d_r$  - diâmetro do furo da placa de orifício calculado à temperatura de referência ( $t_r$ ),

$d_m$  - diâmetro do furo da placa de orifício medido à temperatura ( $t_m$ ),

$t_m$  - temperatura da placa durante as medições,

$r$  - temperatura de referência da placa de orifício.

A seguir, apresentamos na tabela 5 alguns valores de tolerância de circularidade para o furo da placa de orifício ( $d_m$ ):

Tabela 5. Tolerância de circularidade para o furo da placa de orifício ( $d_m$ )(2).

Diâmetro do furo da placa de orifício (pol)	Tolerância ( $\pm$ pol)
$\leq 0,250$ (a)	0,0003
0,251 a 0,375 (a)	0,0004
0,376 a 0,500 (a)	0,0005
0,501 a 0,625	0,0005
0,626 a 0,725	0,0005
0,726 a 0,875	0,0005
0,876 a 1,000	0,0005
$> 1,000$	0,0005 pol/(pol de diâmetro)

(a) O uso de diâmetros menores não é proibido, porém as incertezas nas medições são maiores que as usuais.

Segundo a norma AGA3 2000 – parte 2, a altura do cilindro é a espessura do furo da placa de orifício ( $e$ ). O valor mínimo admissível para a espessura do furo da placa de orifício é obtido pelo maior valor encontrado através das expressões:  $e \geq 0,01d_r$  ou  $e > 0,005 \text{ pol.}$  O valor máximo admissível para a espessura do furo da placa de orifício é obtido pelo menor valor encontrado através destas duas expressões:  $e \leq 0,02D_r$  ou  $e \leq 0,125d_r$ , mas sempre menor que a máxima espessura admissível para a placa ( $E$ ).

#### 6.5.4. Ângulo de chanfro

A determinação do ângulo de chanfro é obtido da seguinte maneira: projeta-se um cone através do toque do apalpador em três pontos de circunferência do cone já existente em uma altura e depois se repete a mesma operação em mais três pontos em outra altura projetado desta maneira um cone. Em seguida seleciona-se na máquina a função medir ângulo que o software da MMC calcula o ângulo do cone que é igual ao ângulo de chanfro.

#### 6.5.5. Espessura do orifício

É obtida pela diferença da espessura da placa pela altura do cone, de acordo com a equação:  $h = (D - d)/(2xtg\beta)$ .

#### 6.5.6. Diâmetro maior

É obtido através de uma interseção entre um cone virtual e um plano virtual a jusante da placa. Projeta-se o cone existente na máquina e em seguida projeta-se um plano da jusante e por fim faz-se a interseção dos dois objetos obtendo assim o diâmetro maior.

#### 6.5.7. Altura do cone

Obtêm-se por relação trigonométrica do triângulo. Mede-se o raio maior e subtrai do raio menor obtendo assim um cateto do triângulo. A tangente do ângulo de chanfro será esse cateto obtido sobre a altura do cone, determinando assim a altura do cone.

#### 6.5.8. Desvios de superfície (microgeométricos)

Segundo a norma AGA3 2000 – parte 2, a rugosidade superficial das faces a montante e a jusante da placa de orifício, não deve exceder 50 mpol de  $R_a$ , medido com um valor de “cut-off” não inferior a 0,03pol. A medição da rugosidade superficial de uma placa de orifício é mostrada na Figura 31.



Figura 31. Processo de medição da rugosidade superficial de placa de orifício

A rugosidade média nas superfícies da placa de orifício foi determinada da seguinte maneira: apóia-se a placa sobre dois suportes na horizontal, e em seguida efetuam-se quatro medições naquela posição, logo após rotaciona a placa em 90° repetindo o mesmo procedimento até que se finalize uma rotação da placa a 360°.

Para todos os mensurando, efetuaram-se três séries de medições atendendo ao mesmo procedimento de medição.

## 6.6. CÁLCULO DA INCERTEZA

### MACROGEOMÉTRICOS – utilização da máquina de medir por coordenadas

#### 6.6.1. Incerteza da dispersão dos valores das medições do mensurando

A incerteza padronizada do processo de medição do mensurando é o desvio padrão da diferença média das indicações, para n ciclos de medição, dividido por  $\sqrt{n}$ .

$$U_M = \pm \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}$$

#### 6.6.2. Incerteza do padrão

A incerteza padronizada da máquina de medir por coordenadas deve ser determinada a partir do certificado de calibração, dividindo a incerteza apresentada, pela distribuição de probabilidade especificada.

$$U_P = \pm \frac{u(P)}{\text{dist. probabilidade}}$$

#### 6.6.3. Efeito da Resolução

Para uma máquina com resolução  $\delta$ , a incerteza devido à resolução é dada por:

$$\Delta_R = \pm \frac{\delta}{\text{dist. probabilidade}}$$

Observação 1: Os valores para distribuição de probabilidade são os seguintes: para distribuição retangular (adotado na medição do ângulo de chanfro e medição das alturas), o valor adotado é raiz quadrada de três ( $\sqrt{3}$ ), para distribuição triangular (adotado no cálculo dos diâmetros do furo e cone), o valor adotado é raiz quadrada de seis ( $\sqrt{6}$ ) e para distribuição de probabilidade normal (todos os valores referentes ao padrão), o valor adotado é igual dois (2).

#### 6.6.4. Incerteza combinada

A incerteza combinada é obtida através da soma quadrática de todas as incertezas ( $u_n$ ) do processo, referente ao item ao qual estão sendo efetuadas as medições.

$$U_c = \pm \sqrt{\left(\sum u_n^2\right)}$$

#### 6.6.5. Incerteza expandida

A incerteza expandida é obtida através do produto da incerteza combinada pelo coeficiente de Student (determinado através da tabela 4).

$$U_e = \pm U_c \times k$$

### MICROGEOMÉTRICOS – utilização do rugosímetro

#### 6.6.6. Incerteza da dispersão dos valores das medições do mensurando

A incerteza padronizada do processo de medição do mensurando é o maior desvio padrão da diferença média das indicações, para  $n$  ciclos de medição, dividido por  $\sqrt{n}$ .

$$U_M = \pm \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}}{\sqrt{n}}$$

#### 6.6.7. Incerteza do padrão

A incerteza padronizada rugosímetro deve ser determinada a partir do certificado de calibração, dividindo a incerteza apresentada, pela distribuição de probabilidade especificada.

$$U_P = \pm \frac{u(P)}{\text{dist. probabilidade}}$$

#### 6.6.8. Efeito da Resolução

Para um rugosímetro com resolução  $\delta$ , a incerteza devido à resolução é dada por:

$$\Delta_R = \pm \frac{\delta}{\text{dist. probabilidade}}$$

Observação 2: Os valores para distribuição de probabilidade são os seguintes: para distribuição retangular (resolução do padrão), o valor adotado é raiz quadrada de três ( $\sqrt{3}$ ), para distribuição triangular, o valor adotado é raiz quadrada de seis ( $\sqrt{6}$ ) e para distribuição de probabilidade normal (padrão e dispersão dos resultados), o valor adotado é igual dois (2).

## CAPÍTULO 7

### RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 7.1. Medições efetuadas nas placas de orifício

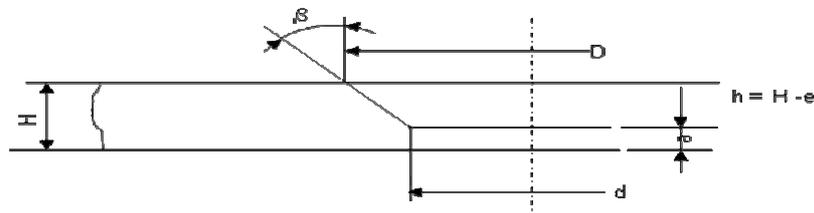


Figura 32. Itens medidos nas placas de orifício

#### 7.1.1. Resultados das medições dimensionais (macrogeométricas), placa de orifício 1.

As tabelas a seguir apresentam os resultados obtidos nas medições da placa de orifício 1.

Tabela 6. Medições efetuadas na placa de orifício 1.

ângulo (2b)			d	D	h	H	e	planeza	circularidade
89	43	53	170,1798	178,0136	3,9299	6,4494	2,5195	0,0062	0,0074
90	7	50	170,1798	178,0264	3,9363	6,4500	2,5137	0,0143	0,0068
89	40	35	170,1796	178,0024	3,9244	6,4586	2,5342	0,0308	0,0060
89	41	10	170,1790	178,0142	3,9306	6,4466	2,5160	0,0152	0,0070
89	52	0	170,1794	178,0180	3,9323	6,4564	2,5241		0,0070
					0,0000				
média (b)	44	18	170,1795	178,0149	3,2756	6,4522	2,5215	0,0166	0,0068
sv. pad.	6		0,0010	0,0120	0,0060	0,0051	0,0081	0,0103	0,0010

Onde:

$\beta$  = ângulo do cone de saída

d = diâmetro da placa de orifício

D = diâmetro da tubulação (estimativa)

h = altura do cone

H = espessura da placa

e = espessura do orifício

Tabela 7. Medições para determinação da planeza 1

	X		Y	
h1	-121,3062	-121,3122	-121,3552	-121,3326
h2	-121,3112	-121,3172	-121,3582	-121,3432
h3	-121,3162	-121,3176	-121,3356	-121,3506
h4	-121,3136	-121,2832	-121,3162	-121,3556

Onde:

h1, h2, h3 e h4 = cotas para cálculo da planeza

O erro de planeza é determina pela seguinte relação:

$$\text{Erro de planeza} = [(h1+h2) - (h3+h4)]/2$$

O erro de planeza, relativo às medições das cotas, pode ser determinado pela relação direta entre a média das medições e mais ou menos duas vezes o desvio padrão.

Os cálculos da incerteza de medição dos resultados estão simplificados na tabela a seguir, devido ao fato do detalhamento do cálculo ter sido exposto no capítulo anterior.

Tabela 8. Cálculo das incertezas de medição 1

	(β)	d	D	H	e	h	ΔP	ΔPI
	(min)	(mm)						
<b>Padrão</b>	0,14434	0,0017	0,0017	0,0017			0,0017	0,0035
<b>Mensurando</b>	2,55449	0,0004	0,0054	0,0023			0,0002	0,0042
<b>resolução</b>	0,57735	0,0001	0,0001	0,0002			0,0001	0,0001
<b>inc. comb.</b>	2,62289	0,0018	0,0056	0,0029			0,0017	0,0054
k =	2,9	2,0	2,9	2,2			2,0	2,2
<b>inc. expand.</b>	<b>7</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,0120</b>	<b>0,0062</b>	<b>0,0158</b>	<b>0,0145</b>	<b>0,0035</b>	<b>0,0060</b>

O erro de circularidade (ΔR) é obtido através da relação direta entre a média das medições e mais ou menos duas vezes o desvio padrão.

### 7.1.2. Resultado das medições de superfície (microgeométricos), placa de orifício 1.

A seguir serão apresentados nas tabelas os resultados das medições dos parâmetros microgeométricos.

Tabela 9. Medições de rugosidade Ra 1

	Rugosidade (μm)		
	I	II	III
0°	0,52	0,35	0,30
90°	0,58	0,36	0,31
180°	0,50	0,37	0,36
270°	0,48	0,31	0,38

A rugosidade média é obtida pela média das medições de rugosidade, ou seja, somam-se todas as medições de rugosidade e divide pelo número de medições. Neste caso a rugosidade média é igual a 0,40 μm.

A tabela 10 apresenta os resultados do cálculo de incerteza das medições relativas à rugosidade.

Tabela 10. Cálculo de incerteza de medição da rugosidade 1

Grandeza	Est.	Incerteza padronizada		Distribuição probabilidade	Coef. sensib.	Incerteza mm	Grau de liberdade
Padrão	6,07	0,0250	-	Normal	0,40	0,0100	infinito
Dispersão	6,06	0,0610	mm	Normal	1	0,0610	3
Res. padrão	0	0,0029	mm	Retangular	1	0,0029	infinito
k = 3,2						0,0619	3
						<b>0,20</b>	<b>mm</b>

Os resultados finais das medições dos dois parâmetros com os seus respectivos valores de incerteza são apresentados na tabela 11.

Tabela 11. Resumo dos resultados das medições 1

Dimensão	VVC	Incerteza	k
<b>Diâmetro interno do tubo</b>	<b>303,20</b>	-	-
<b>Diâmetro do orifício</b>	<b>170,180</b>	<b>0,004</b>	<b>2,0</b>
<b>Espessura da placa</b>	<b>6,452</b>	<b>0,006</b>	<b>2,2</b>
<b>Erro de circularidade</b>	<b>0,007</b>	<b>0,003</b>	<b>2,0</b>
<b>Erro de planeza</b>	<b>0,017</b>	<b>0,006</b>	<b>2,2</b>
<b>Rugosidade</b>	<b>0,40 µm</b>	<b>0,2 µm</b>	<b>3,2</b>

Todas as medições dimensionais estão em milímetros.

As incertezas apresentadas tem um nível da confiança de 95% e k =(ver tabela acima), segundo EA-02/04.

### 7.2.1. Resultado das medições dimensionais (macrogeométricas), placa de orifício 2.

As tabelas a seguir mostram os resultados obtidos nas medições da placa de orifício 2, sendo que os resultados serão apresentados somente em tabelas, pois os comentários feitos para a placa 1 são válidos também para a placa 2.

Tabela 12. Medições efetuadas na placa de orifício 2.

ângulo (2β)			d	D	h	H	e	planeza	circularidade
90	49	8	177,7914	180,8680	1,5720	6,2338	4,6618	0,4918	0,0062
89	13	42	177,7916	180,8512	1,5634	6,2366	4,6732	0,0318	0,0072
87	25	16	177,7914	180,6208	1,4457	6,2298	4,7841	0,0088	0,0058
88	9	13	177,7900	180,7830	1,5293	6,2218	4,6925	0,0193	0,0056
88	11	3	177,7898	180,7830	1,5294	6,2240	4,6946		0,0050
					0,0000				
média (b)	<b>44</b>	<b>10</b>	<b>177,7908</b>	<b>180,7812</b>	<b>1,2733</b>	<b>6,2292</b>	<b>4,7012</b>	<b>0,1379</b>	<b>0,0060</b>
desv. pad.	<b>40</b>		<b>0,0010</b>	<b>0,1381</b>	<b>0,0706</b>	<b>0,0063</b>	<b>0,0483</b>	<b>0,2361</b>	<b>0,0010</b>

Tabela 13. Medições para determinação da planeza 2

	X		Y	
h1	-121,1602	-121,1402	-121,1526	-121,1842
h2	-121,1666	-121,1276	-121,1576	-121,1782
h3	-121,1712	-121,1146	-121,1642	-121,1676
h4	-120,1720	-121,0896	-121,1636	-121,1562

Tabela 14. Cálculo das incertezas de medição 2

	( $\beta$ )	d	D	H	e	h	$\Delta R$	$\Delta PI$
	(min)	(mm)						
<b>Padrão</b>	0,14434	0,0017	0,0017	0,0017			0,0017	0,0017
<b>Mensurando</b>	17,68508	0,0004	0,0618	0,0028			0,0002	0,0345
<b>resolução</b>	0,57735	0,0001	0,0001	0,0002			0,0001	0,0001
<b>inc. comb.</b>	17,69509	0,0018	0,0618	0,0033			0,0017	0,0345
k =	2,9	2,0	2,9	2,3			2,0	2,7
<b>Inc. expand.</b>	<b>50</b>	<b>0,0036</b>	<b>0,1381</b>	<b>0,0075</b>	<b>0,0792</b>	<b>0,0789</b>	<b>0,0035</b>	<b>0,0459</b>

### 7.2.2. Resultado das medições de superfície (microgeométricos), placa de orifício 1.

Tabela 15. Medições de rugosidade Ra 2

	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )		
	I	II	III
0°	0,21	0,22	0,23
90°	0,24	0,22	0,21
180°	0,23	0,21	0,24
270°	0,24	0,20	0,28

A rugosidade média é obtida pela média das medições de rugosidade, ou seja, somam-se todas as medições de rugosidade e divide pelo número de medições. Neste caso a rugosidade média é igual a 0,23  $\mu\text{m}$ .

A tabela 16 apresenta os resultados do cálculo de incerteza das medições relativas à rugosidade.

Tabela 16. Cálculo de incerteza de medição da rugosidade 2

Grandeza	Est.	Incerteza padronizada		Distribuição probabilidade	Coef. sensib.	Incerteza mm	Grau de liberdade
Padrão	6,07	0,0250	-	Normal	0,23	0,0057	infinito
Dispersão	6,06	0,0116	mm	Normal	1	0,0116	7
Res. padrão	0	0,0029	mm	Retangular	1	0,0029	infinito
k = 2,2						0,0133	12
						<b>0,03</b>	<b>mm</b>

Os resultados finais das medições dos dois parâmetros com os seus respectivos valores de incerteza são apresentados na tabela 17.

Tabela 17. Resumo dos resultados das medições 2

<b>Dimensão</b>	<b>VVC</b>	<b>Incerteza</b>	<b>k</b>
<b>Diâmetro interno do tubo</b>	<b>317,30</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Diâmetro do orifício</b>	<b>177,791</b>	<b>0,004</b>	<b>2,0</b>
<b>Espessura da placa</b>	<b>6,229</b>	<b>0,007</b>	<b>2,3</b>
<b>Erro de circularidade</b>	<b>0,006</b>	<b>0,003</b>	<b>2,0</b>
<b>Erro de planeza</b>	<b>0,138</b>	<b>0,046</b>	<b>2,7</b>
<b>Rugosidade</b>	<b>0,23 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>0,03 <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>2,2</b>

*Dimensões em mm.*

## CAPÍTULO 8

### CONCLUSÕES

O proposto inicialmente neste trabalho foi contemplado de forma satisfatória com o término desse trabalho, intitulado Avaliação macro e microgeométrica de dispositivo utilizado na indústria do petróleo e gás, onde foi possível cumprir quase que em sua totalidade o plano de trabalho, os objetivos traçados dentre outros.

A proposta inicial era de se elaborar teste através de simulações de escoamento de fluidos por meio do sistema de medição (utilizando placas novas e submetendo-as à diferentes situações de escoamento e em seguida tendo os seus parâmetros macro e microgeométricos medidos) mas, infelizmente não foi possível. Diante desse fato elaborou-se uma proposta de utilização de placas que estavam sendo utilizadas na indústria e procurar identificar e medir os desvios de forma e superfície, obtendo os resultados apresentados anteriormente.

Diante do exposto, podemos afirmar que os equipamentos utilizados para medição foram os mais adequados dentre os existentes, pois apresentavam tanto em ranger como em resolução, a compatibilidade com os valores medidos caracterizando dessa forma um ponto positivo na elaboração do trabalho.

Outra constatação importante foi o fato de ser ter controlado as principais fontes de incerteza que poderiam influenciar nos resultados das medições, como temperatura, acuracidade do operador dos equipamentos (nesse caso o principal influenciador), controle de impurezas dentre outros fatores.

Nas medições dimensionais, obtivemos bons resultados das medições do ponto de vista que sendo a dispersão dos resultados a responsável pela determinação dos valores das incertezas, pode concluir que as medições foram efetuadas da melhor maneira possível, provando que o método escolhido está de acordo com o que se deseja quantificar. Outro fator importante observado através dos resultados com baixa dispersão das na medição dos parâmetros macrogeométricos foi os baixos valores de incerteza para todos os casos em questão, tanto na placa 1 como na placa 2.

Ao se obter os resultados das medições, pode-se constatar em breve análise com os parâmetros estabelecidos por norma, que os mesmos estavam dentro dos valores esperados para esse caso.

Observou-se que a placa 1 apresentou valores de rugosidades mais elevados que a placa 2, mostrando ainda a placa 1 uma grande dispersão dos resultados, provocando um alto coeficiente de abrangência e conseqüentemente uma elevada incerteza da medições, pois a dispersão dos resultados é o principal parâmetro de influência no cálculo da incerteza da medição já que tanto a resolução quanto a incerteza do padrão, nesse caso, são valores fixos.

Outra constatação importante pode se observar diante da elaboração das planilhas de medição que quanto maior o número de medições efetuadas, menores são os valores de incerteza para o mesmo caso.

Todos os resultados de incertezas expandidas das medições são apresentadas com um nível da confiança de 95% e fator de abrangência  $k = 2,0$ , segundo EA 04/02.

## CAPÍTULO 9

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ✓ LIRA, Francisco Adval de, 1952 – **Metrologia na Indústria. São Paulo**, Editora Érica Ltda, 2001.
- ✓ W. Link – **Metrologia Mecânica – Expressão da Incerteza dos resultados** – 1998 – IPT/MITUTOYO/INMETRO/SBM.
- ✓ W. Link – **Tópicos Avançados da Metrologia Mecânica – Confiabilidade Metrológica e suas Aplicações** – 2000 – EMIC/IPT/MITUTOYO/INMETRO/SBM.
- ✓ AGOSTINHO, Oswaldo Luiz, RODRIGUES, Antonio Carlos dos Santos, LIRANI, João. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo, Editora Edgard Blucher Ltda, 1977.
- ✓ DOEBELIN, Erneste O. **Measurement Systems: application and design**. International Student Edition.
- ✓ Mitutoyo/SENAL.SP. **Tolerância Geométrica**. Brasília, 2000.
- ✓ LOPES, Paulo Afonso. **Probabilidades e Estatística**. Rio de Janeiro, Reichmann e Afonso Editores, 1999.
- ✓ AGA. **Gás Measurement Manual – Orifice Meters Part 3.0**
- ✓ VIM – **Vocabulário Internacional de Metrologia**. 2000, INMETRO.
- ✓ NBR 13225
- ✓ ISO 5167
- ✓ ANSI/ASME B 16.36.
- ✓ TELECURSO 2000. **Metrologia**. Ed. Globo, 1995. Rio de Janeiro, RJ.
- ✓ RIBEIRO, Marco Antônio. **Medição de Vazão: Fundamentos e aplicações**, Tek. Salvador, 5ª Edição, 2003.

**10. ANEXO I**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COORDENAÇÃO DE ESTÁGIO**

Professores: Luiz Pedro de Araújo  
Francisco de Assis de Oliveira Fontes  
José Ubiragí de Lima Mendes

Relatório de Estágio – Engenharia Mecânica  
Métodos de Elevação Artificial de Hidrocarbonetos

**Realizado por:**

Cláudio Ferreira da Costa e Silva – 20023065-0

Natal, 19 de dezembro de 2006

## Identificação

São apresentados neste item todos os dados:

- Cláudio Ferreira da Costa e Silva, aluno regularmente matriculado no Curso de Engenharia Mecânica, sob o número 20023065-0, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. E-mail: [claudioferreira@yahoo.com.br](mailto:claudioferreira@yahoo.com.br).
- A Petróleo Brasileiro – PETROBRAS é dividida em várias Unidades de Negócios, sendo o estágio realizado na Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará tendo sua Sede localizada na Av. Eusébio Rocha, 1000, Cidade da Esperança - Natal -RN - CEP 59064-100, Home page: [www.petrobras.com.br](http://www.petrobras.com.br).
- Os Engenheiros de Petróleo Rutácio de Oliveira Costa e Francisco de Assis Ferreira Noronha atuaram como supervisores do Estágio. Os mesmo estando lotados na Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará, lotado no Suporte Técnico / Elevação, na cidade de Mossoró.
- O estágio iniciou dia 10/10/2006 e tem fim marcado para 10/04/2007, estando o estagiário lotado na UN-RNCE no Suporte Técnico / Elevação. Realizando atividades de inspeção e seleção de equipamentos, seleção de materiais, levantamentos de equipamentos, visitas técnicas a campos produtores de óleo, treinamento em montagem de equipamentos, acompanhamento de auditorias dentre outras atividades.

## Responsabilidade pelas Informações

Eu, Cláudio Ferreira da Costa e Silva, RG: 1.852.504, aluno regularmente matriculado no Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, sob matrícula 20023065-0, assumo a responsabilidade e veracidade nas informações prestadas no presente relatório, através deste termo de compromisso.

Sendo válido somente para as informações presentes neste relatório.

## Introdução

O presente relatório tem por objetivo familiarizar o aluno concluinte do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, com as atividades desenvolvidas no cotidiano de uma empresa, que atue nas mais variadas áreas de atuação a qual pertence às atribuições do curso em questão.

O estágio foi realizado na Unidade de Negócios de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará, no Suporte Técnico / Elevação, sob a supervisão dos engenheiros responsáveis citados ao longo deste relatório.

O objetivo específico do estágio supervisionado é proporcionar ao aluno uma maior percepção da importância das disciplinas ministradas, bem como facilitar a exposição do mesmo a assuntos que estarão presentes durante sua vida profissional desde tomada de decisões, exposições idéias e relacionamento interpessoal durante as atividades dentre outros temas importantes para a formação do profissional.

Ao longo deste relatório serão especificadas as atividades desenvolvidas durante a realização do estágio supervisionado.

## **Descrição da Empresa**

A Petróleo Brasileiro - PETROBRAS é uma Empresa de economia mista com contas a prestar para a sociedade brasileira. Atuando em diversas áreas dentre as quais podemos citar:

### ***Exploração e Produção***

Desfrutando do reconhecimento internacional, com tecnologia própria para águas ultra-profundas, está produzindo petróleo a preços competitivos em campos offshore (marítimos) a profundidades cada vez maiores, atraindo o interesse de companhias petrolíferas de todo mundo, com as quais está assinando acordos de parceria para a exploração e produção de suas reservas na enorme plataforma submarina brasileira. A abertura da área de exploração e produção para parceiros internacionais gerou, por sua vez, oportunidades E&P em outras partes do mundo, principalmente onde o know how da Petrobras possa contribuir para a realização de negócios. Um exemplo disso é a expansão da presença da Companhia no Golfo do México e na Costa Oeste da África, onde sua experiência em águas profundas adiciona valor aos empreendimentos.

### ***Gás & Energia***

O gás natural é um combustível limpo, um produto sem restrições ambientais e que reduz significativamente os índices de poluição. O combustível do futuro, como já está sendo chamado, colabora diretamente para a melhoria da qualidade de vida nas grandes metrópoles. Utilizado como matéria-prima nas indústrias siderúrgica, química, petroquímica e de fertilizantes, o gás natural fornece calor, gera eletricidade e força motriz. Na área de transportes tem a capacidade de substituir o óleo diesel, a gasolina e o álcool, participando assim, direta e indiretamente da vida de toda a população.

### ***Refino***

O refino vem acompanhando de perto as transformações que a Petrobras vivencia nos últimos anos, adequando-se ao novo modelo de mercado do setor no Brasil. O desafio de processar a crescente produção de óleo pesado brasileiro, permitindo a conversão para derivados de alto valor agregado, vem sendo vencido com investimentos e grandes avanços tecnológicos.

### ***Transporte e Armazenamento***

A empresa subsidiária da Petrobras responsável pelas atividades de transporte e armazenamento é a Petrobras Transporte S.A., a Transpetro. A empresa tem como missão atuar de forma rentável na indústria de petróleo e gás, nos mercados nacional e internacional, como fornecedora de serviços de transporte e armazenamento, respeitando o meio ambiente, considerando os interesses dos seus acionistas e contribuindo para o desenvolvimento do País.

### ***Distribuição***

Prestar sempre os melhores serviços em mais de sete mil postos espalhados por diversas cidades e rodovias do País é o objetivo da Petrobras Distribuidora. Com uma trajetória marcada por iniciativas pioneiras e resultados expressivos, a BR mantém a liderança no mercado brasileiro de distribuição de derivados de petróleo, tendo mais de dez mil grandes empresas como clientes.

## **Descrição das Atividades Desenvolvidas no Estágio**

O estágio teve início na UN-RNCE no Suporte Técnico / Engenharia de Manutenção e Inspeção, desenvolvendo um levantamento de todas as Bombas de Cavidades Progressivas, tipos de cabeçotes e matérias das polias de acionamentos das bombas existentes na UN-RNCE através de dados obtidos pelos operadores de campo de cada Ativo de Produção. Efetuou-se especificação e seleção de materiais adequados que serão utilizados na substituição dos existentes devido a seleção inadequado

do material, devido o mesmo não possuir propriedades mecânicas compatíveis para o funcionamento dentro de todas as condições de segurança para os operadores.

Posteriormente ocorreu a participação em uma auditoria técnica a uma empresa prestadora de serviços a Petrobras, onde foi observado se os serviços contratados estavam conforme o especificado em contrato firmado entre o contratante e contratada.

Algumas visitas foram realizadas para os Ativos de Produção de Mossoró e Alto de Rodrigues para reuniões técnicas, bem como o acompanhamento da instalação e montagem de equipamentos novos adquiridos que estavam em teste.

Realizou-se ainda treinamento na montagem e instalação de novas Unidades de Bombeio adquiridas junto a novos fornecedores, para que se possa aumento o universo de fornecedores de equipamentos.

Visita aos campos produtores, acompanhado de pessoa qualificadas e capacitadas, para a observação, medição e instalação de equipamentos que venham melhorar o desempenho das atividades desenvolvidas, bem como a observação durante a participação em reuniões onde decisões seriam tomadas para adequação de equipamentos que possivelmente tenham falhados ou que venham a falhar durante o funcionamento.

## **Dificuldades Encontradas**

As dificuldades encontradas foram minimizadas pelos funcionários da instituição e de contratadas que a todo momento estavam dispostos a ajudar em tudo que fosse possível, sendo todas as barreiras superadas de forma satisfatória.

## **Áreas de Identificação com o Curso**

Os conteúdos ministrados durante a graduação foram de suma importância, pois durante a realização do estágio observaram-se casos ligados a diversas disciplinas dentre a quais podemos citar: Geração de vapor – para a injeção de vapor em campos produtores de óleos pesados, aumentando a viscosidade do óleo o que facilita o seu escoamento até a superfície; Construção de Máquinas – Observou-se a grande importância ao se efetuar um ajuste em um componente mecânico para o seu correto funcionamento e facilidade de montagem; Elementos de Máquinas – seleção e especificação de polias (quantidade de gornes, tipo, dimensões nominais dentre outras), observação do tipo de engrenagem utilizado em redutores de unidades de bombeio mecânico, lubrificação dentre outros; Seleção e Especificação de Materiais – esteve presente na maioria das atividades desenvolvidas e outras disciplinas que foram englobadas e que não foram citadas.

## **Conclusão**

Os planos traçados durante a fase inicial do estágio foi contemplado de maneira satisfatória, sendo os objetivos programados alcançados com êxito.

A realização de estágio supervisionado é de suma importância na formação do estudante, pois possibilita a vivência na empresa no desenvolvimento de soluções, bem como na observação na tomada de decisões que possibilitam o andamento dos processos existentes na instituição.

Pode-se enfatizar a disponibilidade dos funcionários na contribuição para que as atividades fossem realizadas conforme programadas.

## Referências Bibliográficas

- 1- COSTA, R. O., "Apostila de Bombeio Mecânico", PETROBRAS, 2004.
- 2- THOMAS, J. E., "Fundamentos de Engenharia do Petróleo", Ed. Interciência, 2ª Edição, 2004.

---

Cláudio Ferreira da Costa e Silva  
Estagiário de Engenharia Mecânica – UFRN

---

Francisco de Assis Ferreira Noronha  
Supervisor UN-RNCE/ST/ELV

---

Rutácio de Oliveira Costa  
Supervisor UN-RNCE/ST/ELV

---

Francisco de Assis de Oliveira Fontes  
Coordenador de Estágio da UFRN