



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

LEVANTAMENTO EM CAMPO DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE TUBOS METÁLICOS

FRANCISCO CARLOS SCHRODER

Campinas

2011

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO

FRANCISCO CARLOS SCHRODER

LEVANTAMENTO EM CAMPO DA RUGOSIDADE
EQUIVALENTE DE TUBOS METÁLICOS

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na área de Concentração de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Orientador: Prof.: Dr. Paulo Vatavuk

Campinas

2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

Sch751	Schroder, Francisco Carlos Levantamento em campo da rugosidade equivalente de tubos metálicos / Francisco Carlos Schroder. -- Campinas, SP: [s.n.], 2011. Orientador: Paulo Vatavuk. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. 1. Rugosidade. 2. Fator de atrito. 5. Roughness. I. Vatavuk, Paulo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.
--------	--

Título em Inglês: Field survey of the equivalent roughness of mettalic pipes

Palavras-chave em Inglês: Friction factor

Área de concentração: Recursos Hídricos, Eneгéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: Jose Gilberto Dalfre Filho, Rodrigo de Melo Porto

Data da defesa: 24-11-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,
ARQUITETURA E URBANISMO
LEVANTAMENTO EM CAMPO DA RUGOSIDADE
EQUIVALENTE DE TUBOS METÁLICOS

Francisco Carlos Schroder

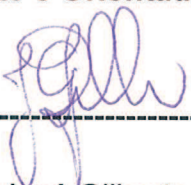
Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída

por:



Prof. Dr. Paulo Vataavuk

Presidente e Orientador/UNICAMP



Prof. Dr. José Gilberto Dalfré Filho

UNICAMP



Prof. Dr. Rodrigo de Melo Porto

USP SÃO CARLOS

Campinas, 24 de Novembro de 2011

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação à memória de meu pai que sempre incentivou a busca pelo conhecimento e aos meus filhos Clarissa, Henrique e Ricardo como exemplo para suas vidas.

AGRADECIMENTO

Ao meu orientador Paulo Vatauvuk

Aos professores do PPGRH Edevar Luvizotto Junior, José Gilberto Dalfré Filho

A professora Yvone de Faria Lemos de Lucca

Aos colegas Luiz Ricardo Patekoski , Oscar Kirchoff Junior e Pedro Henrique Ventura

As empresas ArcelorMittal e Saint-Gobain

E todos os que de alguma maneira contribuíram para a realização deste trabalho

RESUMO

SCHRODER, Francisco Carlos. **Levantamento em campo da rugosidade equivalente de tubos metálicos**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Unicamp, 2011. 204 p. Dissertação de mestrado.

O objetivo deste trabalho é pesquisar e esclarecer as divergências dos valores de rugosidade equivalente de tubos comerciais de diferentes materiais, notadamente os de aço e ferro, que são mais comuns em aplicações industriais e de saneamento, no transporte de líquidos.

Como estes valores muitas vezes não são coincidentes, apesar de originarem de materiais e processos similares, geram dúvidas quando de sua escolha para formulação do fator de atrito, que é utilizado para o cálculo de perdas de carga distribuídas em sistemas de bombeamento.

O trabalho propõe recomendações para melhorar a estimativa da rugosidade em tubos metálicos rugosos, baseado em casos reais de dimensionamento de perdas por atrito em projetos de bombeamento de água.

Palavras Chave:

Rugosidade equivalente de tubos. Rugosidade relativa de tubos. Rugosidade absoluta de tubos. Fator de atrito. Perdas de carga.

ABSTRACT

SCHRODER, Francisco Carlos. **Field survey of the equivalent roughness of metallic pipes**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo – Unicamp, 2011. 204 p. Dissertação de mestrado.

The objective of this study is to investigate and to clarify the differences in the values of equivalent roughness of commercial pipes of different materials especially the steel and iron pipes that are more common in industrial and sanitation applications for transport of liquids.

Since these values do not coincide despite similar of materials and processes innacuracy in the formulation of the friction factor can occur, they create doubts when comes the choice for the formulation of the friction factor, which is used to calculate pressure drops distributed in pumping systems.

This work proposes recommendations for improving the estimate of roughness in metallic tubes based on real cases rough sizing of friction loss in water pumping projects.

Key Words:

Equivalent roughness pipe. Relative roughness pipe. Absolute roughness pipe. Friction Factor. Losses of head.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Rugosidade interna de um tubo	6
3.1	Gráfico $\log Re \times \log (100 k)$	18
3.2	Subcamada viscosa e rugosidade	22
3.3	Dimensões e medições de elementos de forma de Schlichting	23
3.4	Comparação do fator de atrito de C-W	26
3.5	Curva transformada de C-W para k_s de Nikuradse	27
3.6	Superfícies rugosas do experimento de C-W	27
3.7	Desvios da lei de rugosidade de Nikuradse para tubos forjados e galvanizados.	28
3.8	Ábaco de k_s/D de Moody para fluxo completamente turbulento	29
3.9	Ábaco de Moody	31
3.10	Cobertura de perfil por sonda	33
3.11	Varredura de superfície por perfilômetro ótico	34
3.12	Rugosidade média	35
3.13	Rugosidade máxima	36
3.14	Superfícies com semelhantes R_y	37
3.15	Rugosidade total	37
3.16	Rugosidade de profundidade	38
3.17	Amostra tridimensional de superfície rugosa	41
3.18	Desvios de f para maiores k_s	41
3.19	Comparação de k_s para tubos revestidos, aço comercial e tubo de Moody	45

3.20	Comparação de k_s e C-W no método tridimensional	47
3.21	Transformação do coeficiente de H-W em K_s	48
3.22	Comparação do f de Moody e Langelandsvik	50
3.23	Bancada de teste de Brackbill	51
3.24	Amostra da altura da rugosidade	51
3.25	Comparação do fator de atrito de Fanning e experimento	52
3.26	Desvios do fator de atrito de C-W e Allen	56
4.1	Curva característica de bomba centrífuga do fabricante	61
4.2	Curva característica adimensional	62
4.3	Instalação de um medidor de vazão a juzante da bomba	64
4.4	Instalação do medidor ultra-sônico	65
4.5	Medição por tempo de trânsito	65
4.6	Instalação caso 01	71
4.7	Curva característica adimensional caso 01	72
4.8	Instalação caso 02	74
4.9	Curva característica adimensional caso 02	75
4.10	Instalação caso 03	77
4.11	Curva característica adimensional caso 03	78
4.12	Instalação caso 04	80
4.13	Curva característica adimensional caso 04	81
4.14	Instalação caso 05	83
4.15	Curva característica adimensional caso 05	84
4.16	Instalação caso 06	86
4.17	Curva característica adimensional caso 06	87
4.18	Instalação caso 07	89
4.19	Curva característica adimensional caso 07	90
4.20	Instalação caso 08	95
4.21	Curva característica adimensional caso 08	96
4.22	Instalação caso 09	95
4.23	Curva característica adimensional caso 09	96
4.24	Instalação caso 10	98

4.25	Curva característica adimensional caso 10	99
4.26	Instalação caso 11	101
4.27	Curva característica adimensional caso 11	102
4.28	Instalação caso 12	104
4.29	Curva característica adimensional caso 12	105
4.30	Instalação caso 13	107
4.31	Curva característica adimensional caso 13	108
4.32	Instalação caso 14	110
4.33	Curva característica adimensional caso 14	111
4.34	Instalação caso 15	113
4.35	Curva característica adimensional caso 15	114
4.36	Instalação caso 16	116
4.37	Curva característica adimensional caso 16	117
4.38	Instalação caso 17	119
4.39	Curva característica adimensional caso 17	120
4.40	Instalação caso 18	122
4.41	Curva característica adimensional caso 18	123
4.42	Instalação caso 19	125
4.43	Curva característica adimensional caso 19	126
4.44	Instalação caso 20	128
4.45	Curva característica adimensional caso 20	129
5.1	Estudo de caso tubo aço comercial	132
5.2	Média dos valores do tubo aço comercial	133
5.3	Estudo de caso tubo inox	134
5.4	Média dos valores do tubo aço inox	135
5.5	Estudo de caso tubo ferro fundido dúctil	136
5.6	Média dos valores do tubo ferro fundido dúctil	137
5.7	Média das Ref. e Valores apropriados (Tubos aço coml. e inox)	139
5.8	Média das Referências e Valores apropriados (Tubos fofo)	140

LISTA DE TABELAS

2.1	Valores da rugosidade equivalente de tubos	8
3.1	Pesquisadores de hidrodinâmica do século XVIII ao XX	14
3.2	Valores do coeficiente de rugosidade de Manning	16
3.3	Dimensões, cálculos e medições dos elementos de forma de Schlichting.	25
3.4	Conversão coordenadas do fator de atrito de C-W e Moody	30
3.5	Classe NBR 8404/84 para R_a	36
3.6	Principais entidades normalizadoras de tubos	39
3.7	Faixa de aplicação de Re para o coeficiente de H-W	47
4.1	Comprimento equivalente de acessórios e conexões	67
4.2	Memorial de perdas de carga	68
4.3	Memorial de perdas de carga - caso 01	71
4.4	Memorial de perdas de carga - caso 02	74
4.5	Memorial de perdas de carga - caso 03	77
4.6	Memorial de perdas de carga - caso 04	80
4.7	Memorial de perdas de carga - caso 05	83
4.8	Memorial de perdas de carga - caso 06	86
4.9	Memorial de perdas de carga - caso 07	89
4.10	Memorial de perdas de carga - caso 08	92
4.11	Memorial de perdas de carga - caso 09	95
4.12	Memorial de perdas de carga - caso 10	98
4.13	Memorial de perdas de carga - caso 11	101

4.14	Memorial de perdas de carga - caso 12	104
4.15	Memorial de perdas de carga - caso 13	107
4.16	Memorial de perdas de carga - caso 14	110
4.17	Memorial de perdas de carga - caso 15	113
4.18	Memorial de perdas de carga - caso 16	116
4.19	Memorial de perdas de carga - caso 17	119
4.20	Memorial de perdas de carga - caso 18	122
4.21	Memorial de perdas de carga - caso 19	125
4.22	Memorial de perdas de carga - caso 20	128
5.1	Menores e maiores valores tubo aço comercial	134
5.2	Menores e maiores valores tubo inox	136
5.3	Menores e maiores valores tubo ferro fundido dúctil	138

LISTA DE FOTOS

2.1	Microfotografia da rugosidade interna de um tubo metálico	7
3.1	Grãos de areia ampliados 20 X	18
3.2	Rugosímetro mecânico	32
3.3	Rugosímetro Stylus	33
3.4	Perfilômetro ótico	34
3.5	Imagem da rugosidade do tubo	55
4.1	Instalação típica da bomba centrífuga	59
4.2	Transdutor de pressão com indicação local	63
4.3	Transdutor de pressão e vazão com indicação local	63
4.4	Medidor de vazão eletromagnético	64

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Constante de equação
b	Constante de equação
C	Perímetro
c	Constante de equação
C_{HW}	Coeficiente de Hazen-Williams
D	Diâmetro
d	Constante de equação
f	Fator de atrito
g	Constante gravitacional
h_f	Perda de carga distribuída
h_{fl}	Perda de carga localizada
h_g	Altura geométrica
H_t	Altura manométrica total
H_s	Altura manométrica de sucção
J	Perda de carga unitária
k	Rugosidade equivalente do tubo
ks	Rugosidade relativa do tubo
L	Comprimento

L_{eq}	Comprimento equivalente
L_{eqt}	Comprimento equivalente total
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
P	Pressão
P_a	Pressão atmosférica
P_f	Pressão no flange de recalque
P_s	Pressão no flange de sucção
pH	Potencial de hidrogênio
Q	Vazão
R	Raio do rotor
r	Raio do tubo
R_a	Rugosidade média
Re	Número de Reynolds
R_h	Raio hidráulico
R_t	Rugosidade total
R_y	Rugosidade máxima
R_z	Rugosidade da profundidade média
S	Área
S_f	Área frontal total rugosa
S_{fa}	Área frontal do elemento rugoso
S_s	Área da superfície molhada do elemento rugoso
T_a	Temperatura da água
u	Velocidade
$\bar{u}$	Velocidade média
u^*	Velocidade de atrito
u_f	Velocidade no flange de recalque

u_s	Velocidade no flange de sucção
x	Coordenada de posição espacial
α	Razão entre a largura e altura do canal
Δh_{fl}	Intervalo de precisão das perdas localizadas
ΔP	Intervalo de precisão da pressão
ΔQ	Intervalo de precisão da vazão
ε	Rugosidade absoluta do tubo
δ	Espessura da subcamada viscosa
ϕ	Propriedade genérica
γ	Peso específico
η	Rendimento da bomba centrífuga
φ	Coeficiente de vazão
μ	Viscosidade dinâmica
ρ	Massa específica
τ	Tensão de cisalhamento
ν	Viscosidade cinemática
ω	Rotação
ψ	Coeficiente de pressão

LISTA ABREVIATURAS

C-W	Colebrook-White
D-W	Darcy-Weisbach
IP	Intervalo de precisão de k
FoFo	Ferro fundido
Kw	Kilowatt
H-W	Hazen-Williams
NBR	Norma brasileira
NPSH	Net positive suction head
PVC	Poli cloreto de vinila
SDCD	Sistema digital de controle distribuído

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	XIII
LISTA DE TABELAS.....	XIX
LISTA DE FOTOS	XXIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XXV
LISTA ABREVIATURAS	XXXI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO.....	1
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	2
2. MOTIVAÇÃO	5
2.1 VALORES PARA DIMENSIONAMENTO	5
2.2 PUBLICAÇÕES	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
3.1 FORMULAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTOS PRIMORDIAIS.....	13
3.1.1 FORMULAÇÃO TEÓRICA	13
3.1.2 EXPERIMENTOS PRIMORDIAIS.....	17
3.2 MÉTODOS DE MEDIÇÕES DA GEOMETRIA	32
3.2.1 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO.....	32
3.2.2 TERMOS TÉCNICOS	35
3.2.3 NORMAS	38
3.2.4 ARTIGOS SOBRE GEOMETRIA DE SUPERFÍCIES.....	40
3.3 PESQUISAS RECENTES.....	43
4. ESTUDO DE CASOS	57
4.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS.....	57
4.1.1 FLUIDO.....	57
4.1.2 CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES.....	58
4.1.3 CARACTERÍSTICAS DA BOMBA CENTRÍFUGA E ACIONADOR	60
4.1.4 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA	62
4.1.5 INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	66
4.1.6 CÁLCULO MANOMÉTRICO	66

4.1.7	MEMORIAL DE PERDAS DE CARGA.....	68
4.1.8	INTERVALO DE PRECISÃO DOS VALORES k.....	69
4.2	CASO 1.....	70
4.3	CASO 2.....	73
4.4	CASO 3.....	76
4.5	CASO 4.....	79
4.6	CASO 5.....	82
4.7	CASO 6.....	85
4.8	CASO 7.....	88
4.9	CASO 8.....	91
4.10	CASO 9.....	94
4.11	CASO 10.....	97
4.12	CASO 11.....	100
4.13	CASO 12.....	103
4.14	CASO 13.....	106
4.15	CASO 14.....	109
4.16	CASO 15.....	112
4.17	CASO 16.....	115
4.18	CASO 17.....	118
4.19	CASO 18.....	121
4.20	CASO 19.....	124
4.21	CASO 20.....	127
5.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	131
5.1	TUBO DE AÇO COMERCIAL	131
5.2	TUBO DE AÇO INOX	134
5.3	TUBO DE FERRO FUNDIDO DÚCTIL	136
5.4	VALORES MAIS APROPRIADOS E REFERÊNCIAS	139
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	141
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145
	ANEXO 1 – VALORES DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE TUBOS. FONTE: LIVROS	151
	ANEXO 2 – VALORES DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE TUBOS. FONTE: INTERNET	159

1. INTRODUÇÃO

Escoamentos de fluidos e especificamente de água em condutos forçados correspondem a uma área de pesquisa de grande relevância na engenharia, visto, a sua aplicação nos diversos segmentos da engenharia moderna, como: agrícola, drenagem, energia, industrial, mineração, abastecimento e esgoto sanitário entre outros.

Sua compreensão torna-se de vital importância para a caracterização e domínio dos fenômenos envolvidos e respectivos dimensionamentos de partes de um sistema contendo bombas, conexões, tubos e válvulas. Dentre estas especificações, as relacionadas a perdas de carga distribuídas ao longo do conduto, geradas pelas resistências oferecidas pelas superfícies dos tubos estão entre as prioridades do projeto.

1.1 OBJETIVO

Apesar de existirem investigações nesta área do conhecimento desde o final do século XVIII, permanecem ainda diversas lacunas nas formulações e experimentos que podem causar imprecisão nas resoluções de problemas de engenharia que envolvem a seleção de equipamentos baseados em cálculos do fator de atrito e de perdas de carga.

Este trabalho é dirigido à compreensão e possíveis esclarecimentos das causas das divergências dos valores de rugosidades equivalentes de tubos, das limitações

impostas pelos ensaios e modelos matemáticos, bem como algumas recomendações que possam melhorar a estimativa do fator de atrito e da própria perda de carga gerada, até o surgimento de novas pesquisas.

São feitas comparações entre os primeiros experimentos e os recentes trabalhos com o objetivo de demonstrar o desenvolvimento do tema até a atualidade e os avanços da metrologia que possibilitaram uma visão mais realista das superfícies envolvidas quando confrontadas com métodos artificiais.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para o desenvolvimento dessa dissertação, o tema foi dividido em seis capítulos, cujos conteúdos são resumidos a seguir:

Capítulo 1 - INTRODUÇÃO

Objetivos e organização do trabalho

Capítulo 2 - MOTIVAÇÃO

São analisadas as dificuldades encontradas para a seleção de valores da rugosidade equivalente na literatura técnica, onde para o mesmo material de tubo são disponibilizados diferentes valores.

Estas referências são essenciais para o cálculo manométrico de sistemas e causam diferenças nos resultados dependendo das fontes consultadas.

É realizada também uma breve revisão de trabalhos de outros pesquisadores que discutem a necessidade de mais estudos metrológicos, experimentais e teóricos de superfícies rugosas encontradas em tubos comerciais.

Capítulo 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

São revisadas as formulações e experimentos do escoamento viscoso interno e incompressível num tubo.

Apresentados diversos métodos e tecnologias que procuram melhor caracterizar a topografia de uma superfície rugosa de um tubo.

Resumidos os termos específicos para leitura das rugosidades, normas gerais, e, reportados alguns artigos especializados.

Analizadas as pesquisas atuais voltadas as superfícies rugosas, desde as formulações aos experimentos mais avançados.

Capítulo 4 - ESTUDOS DE CASO

São analisados situações de dimensionamento envolvendo tubos e bombas com escolhas de rugosidade que geraram não conformidades na instalação. Os casos foram selecionados de forma tais, que a variabilidade de parâmetros fossem suficientes para as generalizações necessárias, mas considerando a possível intervenção marginal de outros fatores.

Capítulo 5 - ANÁLISE DOS RESULTADOS

Analizados as situações de dimensionamento dos casos e o impacto técnico resultante das escolhas de valores da rugosidade dependendo da fonte consultada.

Capítulo 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

São oferecidas algumas sugestões para escolha dos valores da rugosidade que possam servir para a redução dos efeitos de um dimensionamento incorreto, bem como, algumas observações específicas que podem gerar melhores aproximações nos casos reais.

2. MOTIVAÇÃO

2.1 VALORES PARA DIMENSIONAMENTO

A opção do estudo da rugosidade de tubos teve origem nas aplicações de bombas centrífugas, em sistemas multivariados de bombeamento com prevalência do segmento industrial e de saneamento, que representam os maiores usuários destes equipamentos (bombas e tubos), dentre outros insumos utilizados para a operação do negócio.

Apesar de a bomba constituir um produto final do dimensionamento, é diretamente dependente dos cálculos de perdas de cargas distribuídas. Estas, por sua vez são obtidas a partir da formulação do fator de atrito que, para os escoamentos de casos comuns que ocorrem em regime turbulento, e em condutos fechados, requerem o conhecimento das superfícies dos tubos.

Entende-se por rugosidade (ilustrado na figura 2.1) as asperezas, protuberâncias e irregularidades existentes no interior dos tubos, decorrentes dos processos de fabricação a que estão submetidos, ou de revestimentos posteriores com finalidades anti abrasivas ou corrosivas e também pelo processo natural de incrustação devido ao ataque químico do líquido bombeado em função do tempo.

Esta rugosidade é comumente nomeada como rugosidade absoluta e identificada pelo símbolo ε .

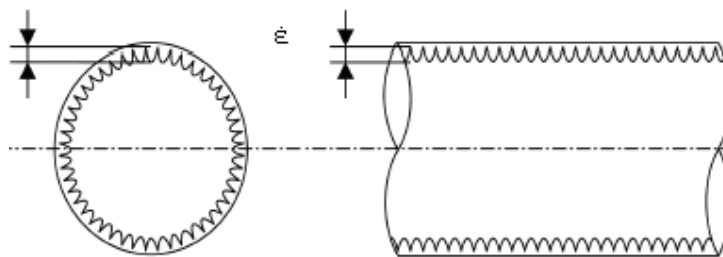


Figura 2. 1 Rugosidade Interna de um tubo.

Neste trabalho, as rugosidades serão consideradas somente em tubos novos ou semi novos sem a inclusão de asperezas adicionais, exceto quando tratar-se do revestimento original do fabricante do tubo e sem incrustações decorrentes de processos naturais.

Os tubos são disponibilizados em materiais de acordo com o uso a que se destinam, como: o PVC – para irrigação ou projetos residenciais; plásticos de engenharia ou ligas metálicas especiais – para transporte de líquidos ácidos-alcalinos, ou com elevada participação de abrasivos. Na condução de água em projetos industriais e na distribuição por concessionárias é comum o emprego de materiais metálicos que oferecem maior resistência mecânica e cuja faixa operacional permite razoáveis variações das características físico/químicas da água, como pressão, sólidos em suspensão, temperatura, pH entre outros.

Estes tubos novos ou semi novos apresentam rugosidades internas como as da foto 2.1, obtida por microfotografia e ampliada para melhor visualização.



Foto 2.1 Micro fotografia da rugosidade interna de um tubo metálico

Quanto aos valores das rugosidades das superfícies internas que caracterizam o acabamento do tubo, são frequentes as dúvidas para tomada de decisões.

O orçamentista ou projetista normalmente toma como base sua própria experiência ou opta por determinada fonte de consulta de sua confiança.

As asperezas normalmente são expressas pelo termo rugosidade equivalente, cujo significado fica melhor compreendido após exposição da experiência de Nikuradse no capítulo 3. Basicamente refere-se à comparação da rugosidade obtida artificialmente com grãos de areia do experimento que proporciona a mesma perda de carga das asperezas reais do tubo. Esta rugosidade equivalente é representada pelo símbolo k em todo trabalho, apesar de alguns autores utilizarem outros símbolos até mesmo ε provocando dúvidas do significado.

Outro termo de citação frequente é o que representa a rugosidade relativa, que é a razão entre o tamanho da projeção e o diâmetro do tubo. Neste trabalho utilizar-se-á o símbolo k_s , apesar de que na bibliografia é comum encontrar também:

$$\frac{k}{D}, \frac{\varepsilon}{D}, \frac{\varepsilon}{D}$$

São disponibilizados em livros, revistas especializadas, *sites*, tabelas com diferenças significativas dos valores da rugosidade dos tubos sem uma devida explicação, como os demonstrados na tabela 2.1, onde para um tubo comercial de aço inox, a magnitude da rugosidade varia o suficiente para modificar o fator de atrito e respectiva perda de carga de um sistema de bombeamento.

Tabela 2. 1 – Valores da rugosidade equivalente de tubos

AÇO INOX	
Rugosidade equivalente(mm)	Referência(anexo)
0,002	1G
0,015	2C
0,045	2G

As referências listadas no anexo compreendem principalmente publicações dos últimos cinquenta anos, muitas das quais são recentes e podem ser acessadas pela rede de internet.

2.2 PUBLICAÇÕES

Outra justificativa para elaboração deste trabalho é advindo de vários registros em periódicos e literatura técnica onde é comum questionamentos acerca das referências existentes sobre a rugosidade equivalente, tal como divergências sobre técnicas de obtenção e distanciamento dos resultados dos experimentos primordiais em relação a tubos reais disponíveis no mercado, e aplicados em diversas situações práticas. O resumo de algumas destas publicações é descrito a seguir:

BRADLEY (1951) comenta em sua monografia sobre dois métodos de obtenção da rugosidade relativa em tubos de grandes dimensões. O primeiro, parte da fabricação de moldes de gesso ou plástico para simular as protuberâncias que são aderidas ao tubo para realização dos ensaios de perdas de carga. Apesar da medição e fotografia micrométrica dos contornos da superfície moldada, o autor afirma que o

método exato para determinação da rugosidade na superfície do tubo não é claro. O segundo método analisado consiste em passar ar comprimido de volume calibrado sobre superfícies granulares e a partir do controle do tempo de passagem, deduzir o tamanho das protuberâncias. Sobre esta tecnologia o autor comenta que embora algum sucesso tenha sido obtido em pequenos tubos comerciais é necessário uma tecnologia de medição direta para tubos em geral e que os métodos por ele descritos são limitados a determinadas condições controladas.

LENCASTRE (1972) comenta em livro de grande prestígio entre profissionais de hidráulica que nos casos práticos a rugosidade equivalente não é uniforme como ensaiada no experimento de Nikuradse(1933) e tem de ser medida por um valor médio que do ponto de vista de perda de carga corresponde a uma rugosidade uniforme o que contradiz a realidade. A citação a seguir demonstra a dificuldade na estimativa da rugosidade:

“Há tentativas de procurar um método que determine diretamente estes valores. Dentro dos conhecimentos atuais é, porém, pela observação de tubos e condutos existentes que se fixa a rugosidade uniforme equivalente correspondente a determinado tipo de material e de acabamento.”

LAMONT (1981) elabora uma síntese das experiências realizadas na década de 50, para obtenção dos valores do fator de atrito e respectivas fórmulas exponenciais utilizadas. Menciona sobre as limitações dos resultados quando compara os ensaios (cerca de 350 em 1955) realizados fora da faixa de diâmetro dos tubos ou velocidades dos experimentos originais. Assim, enquanto as curvas de rugosidades relativas podem dar resultados razoavelmente precisos na faixa de diâmetro e velocidades cobertas pelos experimentos em que foram executadas, essas limitações tendem a subestimar o atrito quando as velocidades ou diâmetros estão abaixo ou acima dos limites. Como estes limites raramente são declarados, o uso de fórmulas e gráficos podem não ter a exatidão necessário quando de sua aplicação específica.

LESTER (1998) cita que na experiência de Nikuradse(1933) os resultados dos fatores de atrito entre a região de tubos lisos e rugosos aumentam antes de

estabilizarem na região completamente turbulenta rugosa, de forma divergente com os resultados de ensaios de tubos comerciais, comportamento este atribuído a maiores rugosidades dos grãos de areia quando comparados com as superfícies dos tubos, contudo esta particularidade não foi devidamente explorada em análise de outros pesquisadores incluindo Colebrook-White (1937), que também aceitaram como corretos os fatores de atrito para tubos rugosos em regime turbulento expressos posteriormente no ábaco de Moody(1944), apesar de não existirem dados suficientes para verificação, que foi uma falha comum da maioria dos experimentos realizados entre os anos de 1890 a 1940, que disponibilizaram poucas medições nos regimes de transição e turbulentos para tubos lisos e rugosos. Apesar disto a comunidade científica acatou os poucos dados e passou a usá-los mesmo quando estes ensaios não estavam de acordo com os casos práticos de tubos comerciais.

ANDRADE e CARVALHO (2000) em um trabalho de análise da equação de Swamee-Jain (1976) para determinação da perda de carga utilizando a fórmula de Darcy-Weisbach e comparação dos valores do fator de atrito obtido pelos autores e de fórmulas clássicas de outros pesquisadores como Blasius, C-W, Moody, Nikuradse, Von Karman e Prandtl, observam que apesar dos desvios existirem, a maior dificuldade relacionada a exatidão dos cálculos são devidos a difícil determinação prática da rugosidade equivalente, que deveria ser disponibilizada pelo fabricante do tubo, embora raramente encontrem-se informações técnicas a este respeito para a maioria dos tubos comerciais. Além disso, os valores da rugosidade equivalente encontrados na bibliografia técnica apresentam grande variabilidade, com uma ampla faixa de valores para um mesmo material.

SCHULTZ (2002), em artigo que relaciona o fator de atrito de superfícies rugosas e lixadas artificialmente observa que apesar de atraente o uso do termo rugosidade relativa baseado nas experiências de Nikuradse(1933), é problemática visto que não está fisicamente relacionada com o perfil de rugosidade de superfícies genéricas de interesse prático para a engenharia. Citando Grigson (1992) este alega que análises estatísticas de superfície não podem predizer a função rugosidade e que esta só é determinada com testes da superfície de interesse. Sua alegação é baseada em experimentos com cascos de navios que não se comportaram como previsto por

Nikuradse (1933) ou C-W (1937) apresentando vários pontos de inflexão na determinação da rugosidade.

YOO e SINGH (2005) citam que nos experimentos com tubos comerciais realizados por C-W (1937) com materiais de ferro forjado, galvanizado e revestido com asfalto, os pesquisadores apresentaram figuras que mostram a altura da rugosidade dos tubos versus seus diâmetros com relações aleatórias, ou seja, sem dependência. Suspeita-se que esta é a razão de terem escolhido um valor médio de altura de rugosidade para cada tipo de tubo. Tal procedimento incorre em muita variação no cálculo do fator de atrito. Contudo, não foi revelado o motivo da escolha da média e tampouco observado os limites de confiabilidade que este procedimento acarreta quando da obtenção da estimativa das perdas de carga.

Em geral os artigos evidenciam que antes da utilização das fórmulas e gráficos para determinação de perdas de carga, deve o engenheiro, orçamentista, projetista ou técnico deve estimar a rugosidade do tubo baseado na sua própria experiência ou na de outros que eventualmente atuam na área. Estas recomendações, entretanto não cobrem o universo de profissionais com menos familiaridade no assunto e que não sendo especialistas, precisam dispor de dados confiáveis para execução de projetos de diferentes características quanto ao material, superfícies e resistências oferecidas pelos tubos de recalque de água.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FORMULAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTOS PRIMORDIAIS

3.1.1 FORMULAÇÃO TEÓRICA

Um grande número de modelos matemáticos e experimentos foram desenvolvidos e realizados entre 1770 e 1930 por pesquisadores interessados na compreensão da resistência dos fluidos em condutos forçados com superfícies lisas e rugosas.

Estes trabalhos desenvolvidos por diversos cientistas, entre eles, os relacionados abaixo na tabela 3.1, em ordem cronológica, estabeleceram através de ensaios, formulações normalmente limitadas às condições dos testes específicos.

Tabela 3.1 – Pesquisadores de hidrodinâmica do século XVIII ao XX

ANO DIVULGAÇÃO	PESQUISADOR
1770	Antoine Chézy
1800	Gaspar C.F.M.R.Prony
1839	Gotthilf H.L.Hagen
1840	Jean L.M.Poiseuille
1845	Julies Weisbach
1857	Henry Darcy
1880	J.T. Fanning
1883	Osborne Reynolds
1889	Robert Manning
1890	Joseph V. Boussinesq
1892	Alfred A. Flamant
1897	Henri E. Bazin
1904	Ludwig Prandtl
1905	Allen Hazen
1905	Garden Williams
1911	Paul R.H. Blasius
1930	T.Von Kármán

Somente a partir de 1930 foi expandida a faixa de aplicações a partir de resultados que agregam uma forte base teórica e um experimento controlado com maior variabilidade de parâmetros.

Dentre os pesquisadores citados na tabela 3.1, destaca pela relação com o tema, os trabalhos de Julies Weisbach (1845) e Henry Darcy (1857), que utilizaram evidentemente todo o corpo experimental e teórico de parte dos seus antecessores.

DARCY-WEISBACH (1857) deduziram a partir da tensão de cisalhamento e dimensões fundamentais, a interpretação mecânica da perda de carga.

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{w^2}{2g} \quad (3.1)$$

Apesar da demonstração de D-W, esta fórmula não teve grande aceitação em sua época devido a insuficientes valores do fator de atrito, o que impediu sua generalização, que só ocorreu cerca de setenta anos depois com os experimentos de Nikuradse(1933).

Outros exemplos de formulações da perda de carga, entre tantas apresentadas ao longo do tempo, são as equações de Manning(1889), Flamant(1892) e H-W (1913), resumidas a seguir:

► MANNING (1889)

$$V = \frac{1}{n} R h^{2/3} S^{1/2} \quad (3.2)$$

O coeficiente de rugosidade (n) de Manning é um parâmetro que depende da rugosidade do tubo, cujos valores empregados podem ser obtidos na tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Valores do coeficiente de rugosidade de Manning

MATERIAIS DE CONDUTAS	CONDIÇÕES DOS CONDUTAS	VALORES DE n			
		ÓPTIMOS	BONS	RAZOÁVEIS	MAUS
Ferro fundido	Muito liso		0,011	0,012	
	Limpo, revestido	0,010	0,011	0,012	0,015
	Sujo, c/tuberculos			0,015	0,035
Ferro galvanizado		0,013	0,014	0,015	0,017
Fibrocimento		0,011	0,013	0,015	0,017
Grês vidrado		0,011	0,013	0,015	0,017
Latão ou vidro	Liso	0,009	0,010	0,011	0,013
Plástico		0,010	0,011	0,012	0,014

Fonte: Souza, E. R.(2009)

► FLAMANT (1892)

$$hf = 4f \sqrt{\frac{w^3}{D^5}} \quad (3.3)$$

O coeficiente de Flamant f depende do material do tubo, como por exemplo:

FoFo novo f = 0,0185 para 0,01 < D < 1,0 0 m

► HAZEN-WILLIAMS (1913)

$$hf = 10,648 \frac{Q^{1,85}}{C_{HW}^{1,85}} \frac{L}{D^{4,87}} \quad (3.4)$$

O coeficiente de H-W depende do material e do estado dos tubos, como por exemplo:

Aço rebitado novo	C_{HW}	110
Aço rebitado usado com 10 anos	C_{HW}	90
$0,05 < D < 3,00 \text{ m}$		

Outras fórmulas são encontradas na literatura técnica, contudo, com restrições de aplicação, entre elas, o fato de não reconhecerem a influência da rugosidade do tubo e acabaram sendo relegadas a formulações históricas.

3.1.2 EXPERIMENTOS PRIMORDIAIS

A partir do início do século XX pesquisas teóricas contribuíram para um grande número de hipóteses que junto com um aparato empírico, geraram avanços no estudo da resistência do fluido em tubos, os quais, os principais são comentados a seguir:

NIKURADSE (1933) investigou o efeito da rugosidade em uma grande faixa do número de Reynolds para determinar as leis de resistência respectivas. Para simular a rugosidade equivalente utilizou grãos de areia espalhados que foram colados e secados num tubo de aproximadamente 10 (dez) centímetros de comprimento. Para a fabricação das rugosidades usou de grãos de tamanhos uniforme com granulometria controlada.

A projeção dos grãos acima da superfície foi medida e mantida constante durante os testes. Na foto 3.1 ampliada em 20 (vinte) vezes a partir de uma microfotografia pode ser visualizado os grãos da experiência. Foram medidos os gradientes de pressão com piezômetros, a distribuição de velocidades com pitot, vazões e as perdas de carga indicadas.

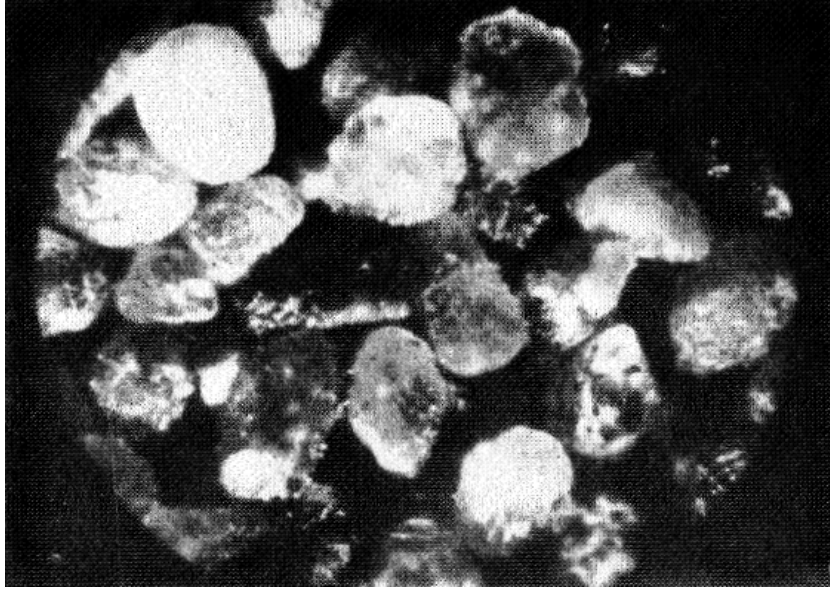


Foto 3.1 – Grãos de areia ampliados 20x
Fonte: Nikuradse (1933)

Utilizando tubos com diferentes diâmetros foi possível variar a rugosidade artificial relativa. Esta experiência provou a validade do conceito de rugosidade relativa e que é correta a expressão $f = \phi(Re, k_s)$. Com rigoroso ensaio Nikuradse elaborou o gráfico da figura 3.1.

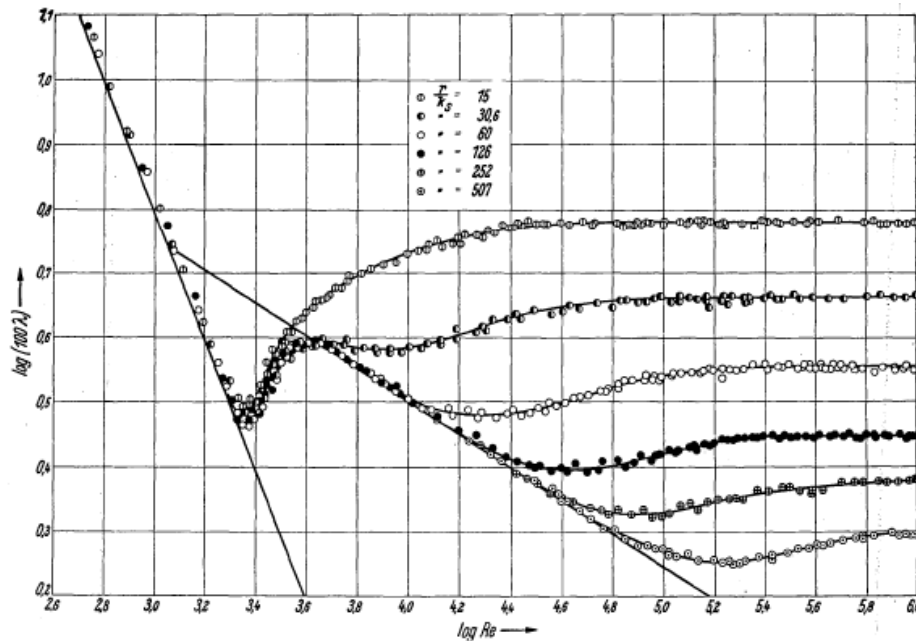


Figura 3.1 – Gráfico $\log Re \times \log(100f)$
Fonte: Nikuradse, 1933.

- ▶ Os valores de Re foram assinalados no eixo horizontal em escala logarítmica.
- ▶ Os fatores de atrito foram assinalados no eixo vertical á esquerda em escala logarítmica.
- ▶ Os valores da rugosidade artificial relativa (ks) foram assinalados no eixo vertical á direita.
- ▶ Para uma determinada vazão e velocidade da água usada no experimento, obteve Re, a perda de carga e calculou o fator de atrito, assinalando com um círculo a correspondente rugosidade relativa.
- ▶ Para o mesmo tubo repetiu o ensaio variando a velocidade da água e consequentemente do par (Re, f) cada um fornecendo um círculo no diagrama para mesma rugosidade. Ligando os pontos adjacentes, Nikuradse traçou a curva de ks.
- ▶ Para o regime laminar em tubos lisos e rugosos o fator de atrito foi definido por uma função linear a partir da equação 3.5, expressa pela lei de Poiseuille correspondente à reta á esquerda do diagrama.

$$f' = \frac{64}{Re} \quad (3.5)$$

- ▶ Para o regime turbulento em tubos lisos, o fator de atrito é expresso também por uma função linear e corresponde ao segmento de reta da metade do diagrama para á direita.
- ▶ Para o regime turbulento em tubos rugosos existem seis curvas correspondentes a cada uma das rugosidades relativa (ks)
- ▶ Para o regime de transição com Re entre 2.000 e 4.000 não foi definido o fator de atrito.

Resumidamente o desenvolvimento da fórmula do fator de atrito foi baseado nas formulações, medições e cálculos a seguir:

Da equação do fator de atrito de 3.1, reescreve-se:

$$f = \frac{8P}{\pi x} \frac{4r}{pD^2} \quad (3.6)$$

Da relação entre a tensão de cisalhamento e o fator de atrito obtém-se:

$$\frac{\tau}{\rho} = f \frac{D^2}{8} \quad (3.7)$$

Pela definição da velocidade de atrito em função da tensão de cisalhamento, temos:

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \quad (3.8)$$

E:

$$\sqrt{f} = 2,83 \frac{u_*}{V} \quad (3.9)$$

Com dados do experimento obteve:

$$Re \sqrt{f} = 5,66 \frac{u_* r}{\nu} \quad (3.10)$$

E aplicando o logaritmo em ambos os termos e considerando os efeitos da rugosidade obtidos na experiência:

$$\log (Re \sqrt{f}) - \log \frac{r}{k} = \log \left(5,66 \frac{u_* k}{\nu} \right) \quad (3.11)$$

O fator de atrito para o regime completamente turbulento rugoso independe de Re e depende somente da rugosidade relativa. Esta dependência pode ser expressa pela equação 3.12 conforme experimentos do próprio Nikuradse(1933) como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} - 2 \log \frac{r}{k} = 1,74 \quad (3.12)$$

Igualando o primeiro termo da equação 3.12 com o segundo da equação 3.11 e com arranjo, obtém-se para a região turbulenta rugosa, uma expressão baseada em dados experimentais, do fator de atrito:

$$f = \frac{1}{\left(1,74 + 2 \log \frac{r}{k}\right)^2} \quad (3.13)$$

Como os escoamentos de interesse prático ocorrem no regime turbulento, é conveniente classificá-lo de acordo com a rugosidade do tubo, para tanto é necessário reconhecer que neste regime encontram-se características laminares junto à parede do tubo, denominada subcamada viscosa, com espessura δ que dependendo da rugosidade do tubo, divide o regime em 03 (três) regiões denominadas:

- Turbulento hidraulicamente liso: quando a subcamada é maior que as rugosidades.
- Turbulento de transição: quando a subcamada é geralmente maior que as rugosidades, mas com picos que ultrapassam a subcamada, com geração de vórtices.
- Turbulento hidraulicamente rugoso: quando as rugosidades ultrapassam a subcamada.

A figura 3.2 ilustra a subcamada e a rugosidade mencionada.

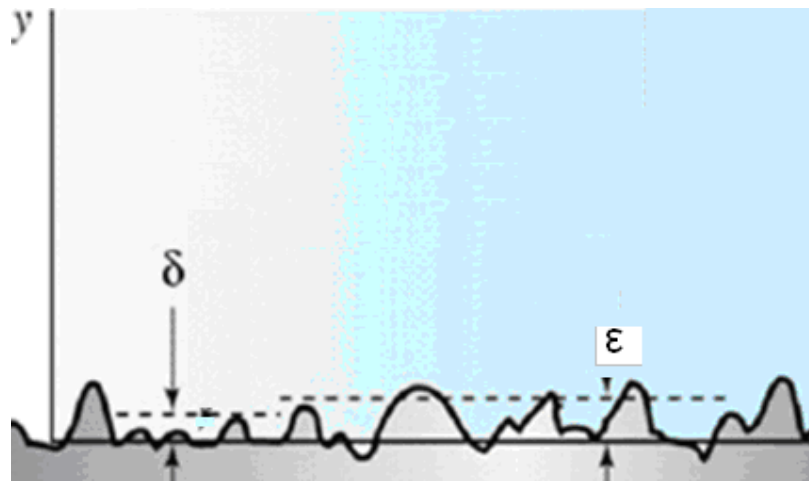


Figura 3.2 – Subcamada viscosa e rugosidade

SCHLICHTING (1937) analisou os efeitos da rugosidade em escoamentos em canais formados por placas metálicas retangulares lisas e ásperas com propósito de obter valores da chamada rugosidade equivalente dos grãos de areia da experiência de Nikuradse (1933), com o uso de elementos geométricos soldados. A resistência oferecida pelos elementos geométricos conhecidos é correspondente à rugosidade equivalente dos grãos de areia.

Schlichting acrescentou o conceito de densidade da rugosidade isto é, o número de elementos individuais por unidade de área. Como elementos de forma foram utilizados esferas, segmentos esféricos, ângulos metálicos de espessuras controladas e cones conforme ilustrados na figura 3.3:

No	item	dimensions	D [cm]	d [cm]	k [cm]	k_s [cm]	photographs
1	spheres		4	0.41	0.41	0.093	
2			2	0.41	0.41	0.344	
3			1	0.41	0.41	1.26	
4			0.6	0.41	0.41	1.56	
5			densest arrgt.	0.41	0.41	0.257	
6			1	0.21	0.21	0.172	
7			0.5	0.21	0.21	0.759	
8	spherical segments		4	0.8	0.26	0.031	
9			3	0.8	0.26	0.049	
10			2	0.8	0.26	0.149	
11			densest arrgt.	0.8	0.26	0.365	
12	cones		4	0.8	0.375	0.059	
13			3	0.8	0.375	0.164	
14			2	0.8	0.375	0.374	
15	"short" angles		4	0.8	0.30	0.291	
16			3	0.8	0.30	0.618	
17			2	0.8	0.30	1.47	

D Distância entre os centros dos elementos
 d Diâmetro dos elementos
 k Altura dos elementos (rugosidade)
 k_s Rugosidade relativa

Figura 3.3 – Dimensões e medições de elementos de forma de Schlichting
 Fonte: Schlichting (1937)

Em outro ensaio citado por Schlichting, Hopf (1923) utilizando fios de arame e chapas metálicas sobrepostas e em perfil num canal retangular de diferentes alturas, obteve uma relação para a rugosidade relativa, tomada como a razão entre o raio hidráulico e a aspereza absoluta.

Como exemplo para o fio de arame os seguintes valores foram registrados:

► Medições de Hopf(1923)

k 0,115 mm
a 0,96(constante de Hopf obtida experimentalmente)
Ks 0,028 mm

► Expressão do fator de atrito utilizado:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = a + 2 \log \frac{Rh}{k} \quad (3.14)$$

Schlichting, com medições sistemáticas do perfil velocidade e pressão, e utilizando das leis de resistência que correlacionam a velocidade de atrito com a rugosidade equivalente e o raio hidráulico, bem como o número de Reynolds do escoamento, caracterizou para cada tipo de elemento de rugosidade investigada, o valor equivalente do tamanho do grão de areia da experiência de Nikuradse (1933) em termos de geometrias conhecidas como esferas, cones e segmentos esféricos.

O registro das dimensões dos canais, das geometrias, medições e cálculos executados são ilustrados na tabela 3.3:

Tabela 3.3 – Dimensões, cálculos e medições dos elementos de forma de Schlichting

Plate No.	$\frac{v}{u} R$	λ	k_s cm	$\frac{k_s}{k} = \alpha$
Sphere roughness: $k=0.41$ cm				
XII	0.0689	12.2	0.093	0.227
III	.0881	8.92	.344	.838
I	.120	5.68	1.26	3.07
II	.131	5.15	1.56	3.81
V	.0854	9.65	.257	.626
Sphere roughness: $k=0.21$ cm				
VI	0.0779	8.98	0.172	0.819
IV	.106	5.27	.759	3.61
Spherical segment roughness: $k=0.26$ cm				
XIII	0.0590	13.8	0.031	0.118
XIV	.0631	12.7	.049	.186
XV	.0763	9.89	.149	.571
XIX	.0909	7.64	.365	1.40
Cone roughness: $k=0.375$ cm				
XXIII	0.0652	13.1	0.059	0.159
XXIV	.0754	10.6	.164	.437
XXV	.0894	8.49	.374	.996
Short angle roughness: $k=0.30$ cm				
XVI	0.0856	8.56	0.291	0.965
XVIII	.101	6.67	.618	2.05
XVII	.124	4.53	1.47	4.86
Long angle roughness: $k=0.323$ cm, 0.310 cm, 0.303 cm				
XX	0.137	4.17	1.81	5.61
XXI	.167	2.28	3.70	11.9
XXII	.179	2.53	3.56	11.75
Sand roughness: $k=0.135$ cm				
IX	0.0820	7.22	0.222	1.64

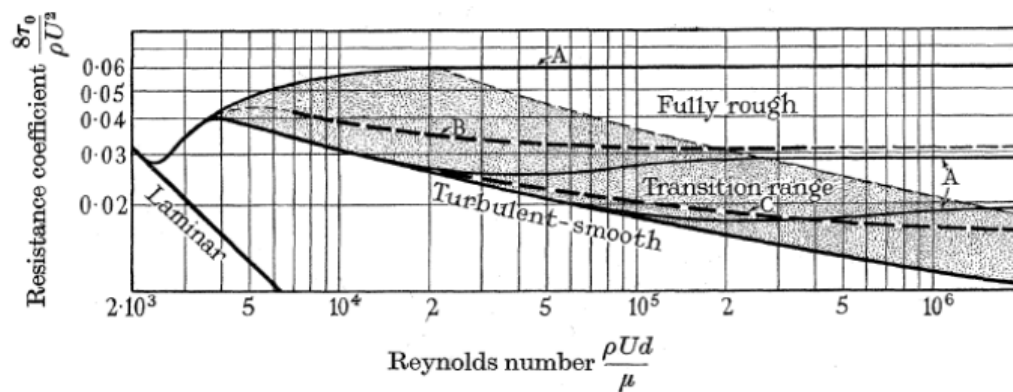
Fonte: Schlichting, 1937

Como medida de rugosidade equivalente dos elementos geométricos foi conveniente utilizar o parâmetro altura máxima. Para estender os resultados obtidos nos canais para tubos comerciais de outras dimensões, é necessário indicar o tipo da rugosidade similar aos elementos e comparar com o tamanho do grão de areia de Nikuradse (1933), visto que apresentam conforme a investigação, a mesma resistência ao atrito.

Apesar da possibilidade de reduzir a rugosidade dos grãos em termos de formas de domínio, nenhum outro significado físico pode ser acrescentado visto que as dimensões reais das asperezas de um tubo comercial, por exemplo, não foram

reprodutíveis ou medidas regularmente, tendo o experimento de Schlichting(1937) o caráter de padronização para uso futuro quando outras técnicas poderão ser capazes de mostrar o perfil real das rugosidades.

COLEBROOK e WHITE (1937) compararam os resultados do fator de atrito da experiência de Nikuradse(1933) em superfície com rugosidade artificial obtida com grãos de areia e outro trabalho de Heywood (1924) com tubo galvanizado e de Freeman(1923) com ferro forjado, demonstrando que possíveis diferenças nas dimensões e forma das protuberâncias alteram a lei de resistência desenvolvida por Nikuradse (1933), a partir da suposição que um único grão pode contribuir de maneira relevante quando as velocidades do escoamento são altas o suficiente para gerar vórtices. Esta comparação está expressa no gráfico da figura 3.4:



- A – Curva de rugosidade de grãos de areia (Nikuradse)
- B – Curva de rugosidade de tubo de aço galvanizado D = 50 mm (Heywood)
- C – Curva de rugosidade de tubo de ferro forjado D = 125 mm (Freeman)

Figura 3.4 – Comparação do fator de atrito de C-W
Fonte: Colebrook e White, 1937.

As diferentes curvas do fator de atrito contra Re elaboradas por Nikuradse (1933) foram então agrupadas por C-W em uma única curva com coordenada e abcissa resultando na figura 3.5.

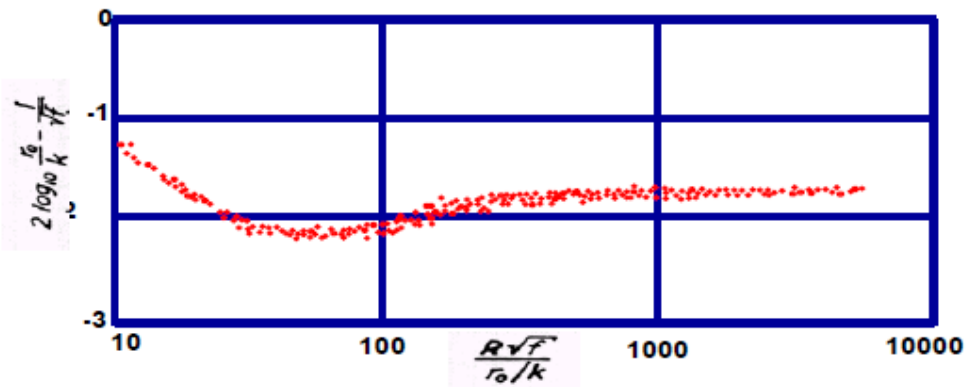


Figura 3.5 – Curva transformada de C-W para Ks de Nikuradse.

C-W testaram então tubos comerciais com 53,5 mm de diâmetro e 6 m de comprimento, com injeção de ar comprimido para determinação das perdas de carga e 6 (seis) diferentes tipos combinados de rugosidades artificiais de 0,35 mm a 3,5 mm conforme mostrado na figura 3.6.

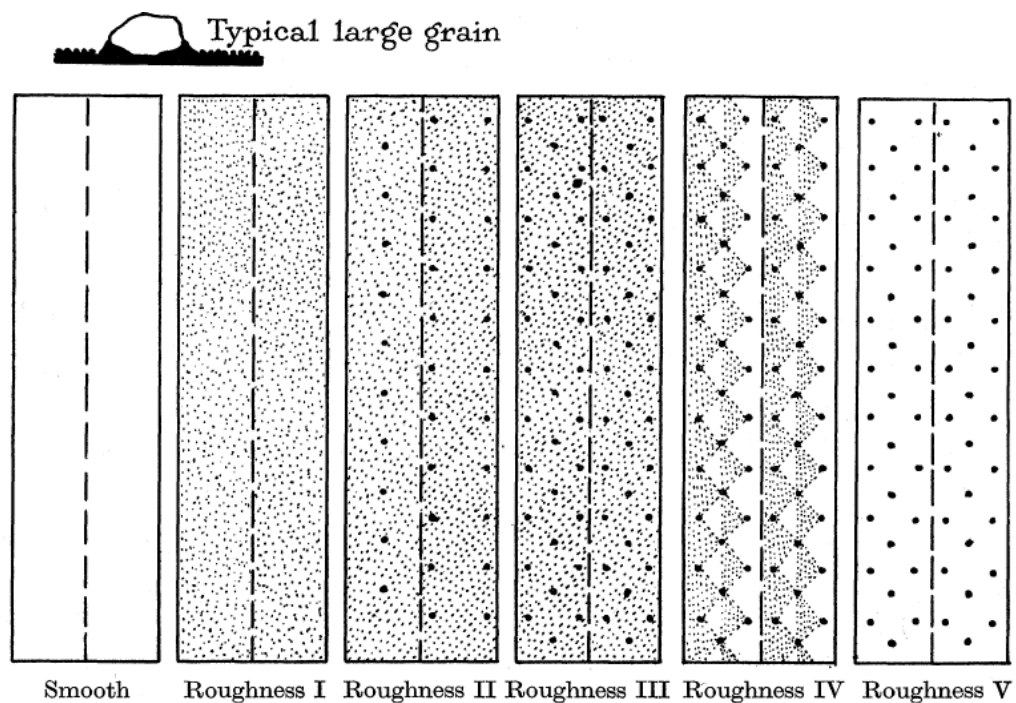


Figura 3.6 – Superfícies rugosas do experimento de C-W
Fonte: Colebrook e White, 1937.

Estes experimentos demonstram que a rugosidade não é uniforme como os grãos de areia de Nikuradse (1933) e que na região de transição para turbulenta em tubos rugosos as diferenças são significativas, conforme figura 3.7.

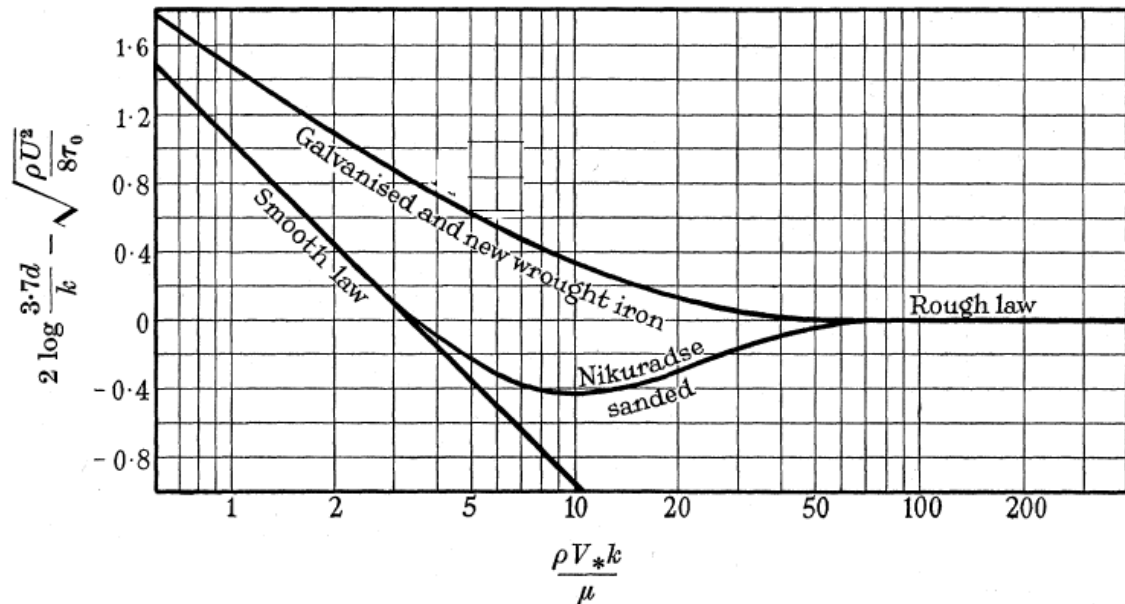


Figura 3.7 – Desvios da lei de rugosidade de Nikuradse para tubos forjados e galvanizados.
Fonte: Colebrook e White, 1937.

As equações de C-W para o fator de atrito deduzido de suas experiências são:

► Tubos lisos:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{2,512}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.15)$$

► Transição:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,715D} + \frac{2,512}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3.16)$$

► Turbulento rugoso:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{k}{3,715D} \right) \quad (3.17)$$

A rugosidade equivalente dos materiais de tubos comerciais ensaiados representam o diâmetro (ou projeção média) dos grãos de areia de Nikuradse(1933) que quando colados de modo uniforme num tubo com o mesmo diâmetro interno do comercial considerado, resultam no mesmo fator de atrito.

MOODY (1944) menciona que os resultados de Nikuradse na região de transição e de turbulência obtidos por rugosidade artificial apresentam divergências quando comparados aos experimentos realizados por Pigott (1934) com superfícies reais e menciona que a queda da curva (rugosidade relativa x número de Reynolds) não é observada em superfícies comerciais em nenhum lugar do gráfico de Pigott(1934).

Destaca a ausência de uma técnica para medir as asperezas diretamente de um tubo comercial e que até que esta barreira seja superada é preciso reconhecer a imprecisão na determinação do fator de atrito, bem como sugere que as linhas do gráfico do fator de atrito obtido através da rugosidade relativa e do diâmetro do tubo (figura 3.8) poderiam ser melhores representadas por bandas largas, admitindo, entretanto, que tal procedimento causaria sobreposição o que de fato poderia não tornar prático a escolha do valor.

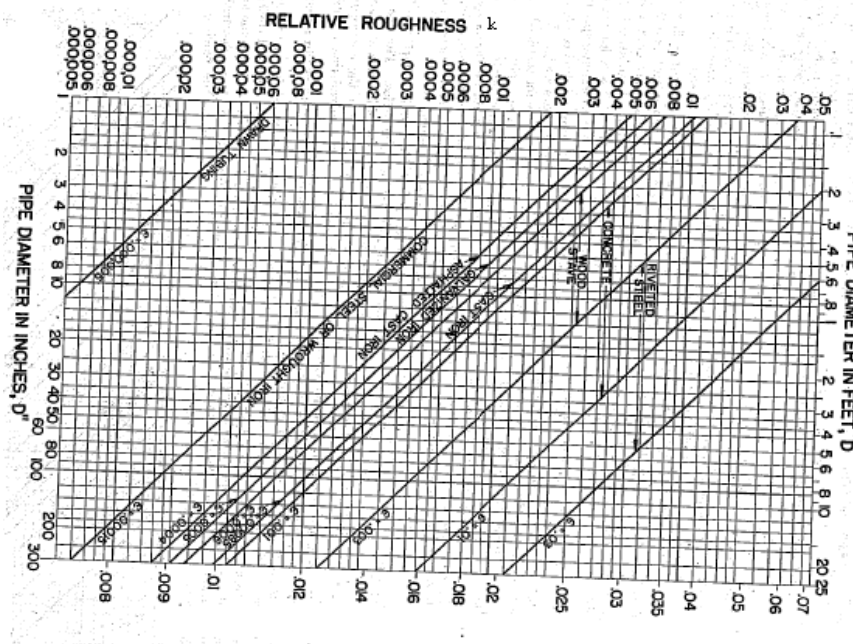


Figura 3.8 – Ábaco de $K_s \times D$ de Moody para fluxo completamente turbulento
Fonte: Moody, 1944

Também cita as investigações de C-W (1937), cujos registros com várias superfícies de tubos comerciais mostraram resultados divergentes dos obtidos por Nikuradse (1933) apesar da curva de tendência apresentar a mesma forma.

Moody confirmou que apesar de os tubos comerciais ensaiados por C-W (1937) não apresentarem uma rugosidade uniforme como aquela dos tubos de vidro com grãos de areia, os resultados de Nikuradse (1933) podem ser utilizados como indicadores quantitativos da rugosidade equivalente (k) dos tubos comerciais.

Os valores da rugosidade equivalente dos materiais dos tubos comerciais representam o diâmetro dos grãos de areia de Nikuradse.

Moody transformou as coordenadas e abscissas do gráfico de C-W conforme tabela 3.4 simplificando a visualização para obter o fator de atrito.

Tabela 3.4 – Conversão coordenadas do fator de atrito de C-W e Moody

CONVERSÃO DE COORDENADAS		
	C-W	MOODY
Abcissa	$\frac{Re \sqrt{f}}{\frac{r}{k}}$	Re
Coordenada	$2 \log \frac{r}{k} - \frac{1}{\sqrt{f}}$	f

Seu novo gráfico (figura 3.9) mereceu bons comentários dos profissionais que atuavam na área de dimensionamento de perdas de carga pela facilidade de leitura, apesar dos limites de aplicação conterem uma margem de erro de $\pm 20\%$.

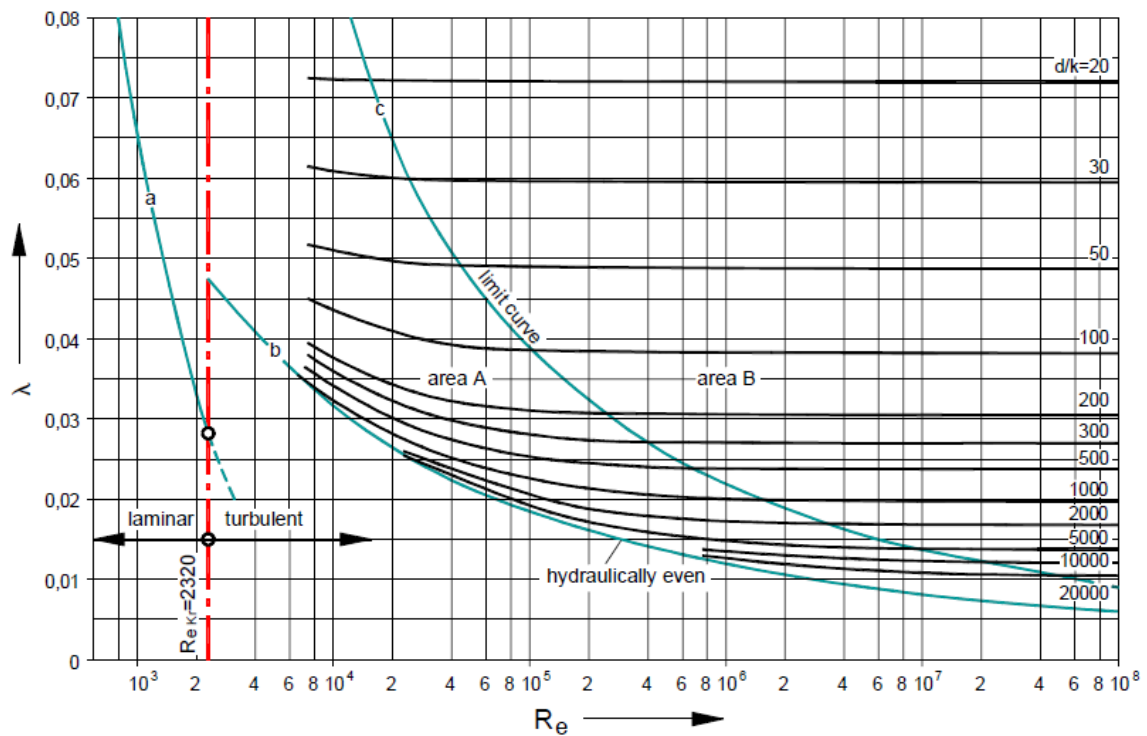


Figura 3.9 – Ábaco de Moody
Fonte: Moody, 1944

- Para baixos valores de Re o escoamento é sempre laminar e f independe da rugosidade relativa conforme fórmula 3.5 (escoamento de Poiseuille).
- Para tubos lisos f depende apenas de Re .
- Para tubos rugosos na zona de transição f depende simultaneamente de Re e da rugosidade relativa.
- Para tubos rugosos na zona de turbulência plena f depende somente da rugosidade relativa.
- Para Re entre 2.000 e 4.000 o escoamento pode ser laminar ou turbulento e f não é determinado (pode-se prolongar a curva da zona de transição, contudo o valor obtido não é seguro).

3.2 MÉTODOS DE MEDIÇÕES DA GEOMETRIA

O estudo da rugosidade requer ferramentas que caracterizem as superfícies em detalhes, contudo a avaliação das dimensões das protuberâncias em tubos ainda são difíceis, visto a necessidade de cobertura de grandes áreas representativas, e das técnicas de quantificação que ainda hoje não são plenamente satisfatórias.

3.2.1 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO

A seguir, uma descrição sumarizada dos instrumentos de medição:

► Rugosímetros ou perfilômetros mecânicos utilizam agulha para mapeamento da superfície enquanto são deslocadas ao longo de uma linha. Apesar de que muitos parâmetros atuais de rugosidade sejam obtidas por tal técnica, é conveniente lembrar que a medição de altura está restrita pela linha de cobertura cuja extensão é assumida como representação média do que ocorre nas demais partes da superfície.

Exemplo deste instrumento está ilustrado na foto 3.2.



Foto 3.2 – Rugosímetro Mecânico
Fonte: Mitutoyo(2009).

► Rugosímetros ou perfilômetros de sonda detectam variações de altura através de uma sonda incorporada a um transdutor que converte o deslocamento vertical em sinal elétrico que é então processado. Equipamentos deste tipo como o “Stylus” modelo popular para medições, têm resolução da ordem de 0,00004 mm, conforme foto 3.3:

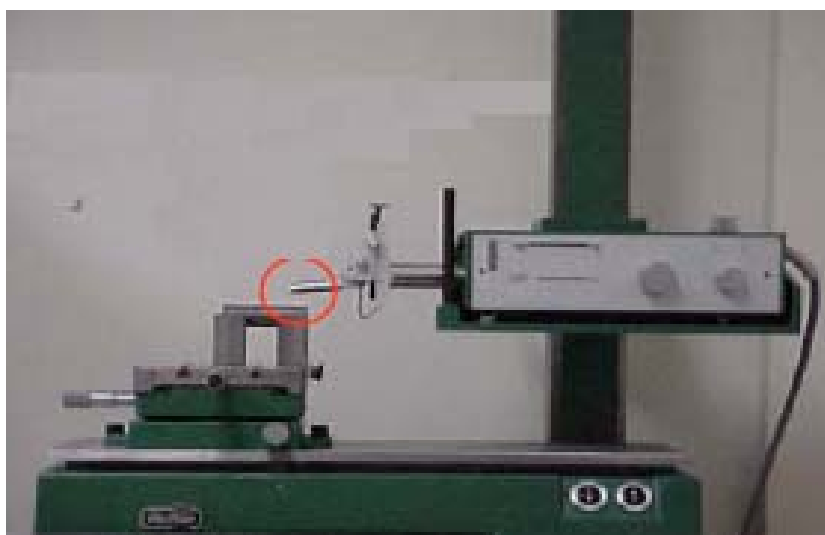


Foto 3.3 – Rugosímetro “Stylus”
Fonte: J.Jeswiet, 2007

Apesar da boa precisão alguns erros podem ser introduzidos pela cobertura do perfil da sonda principalmente em superfícies com muitas curvaturas e vales conforme exemplificado na figura 3.10:

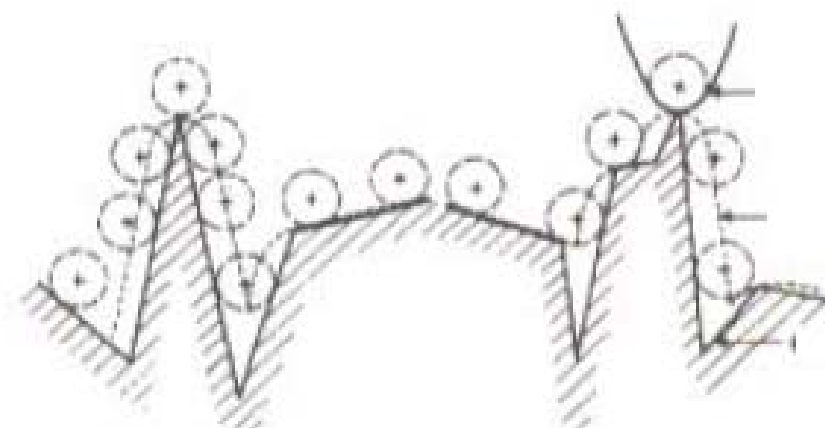


Figura 3.10 – Cobertura de perfil por sonda

► Rugosímetros ou perfilômetros óticos como os da foto 3.4 usam uma sonda também bidimensional para medição que fornece uma imagem completa da superfície além de dispor de uma série de análises estatísticas do perfil. Contudo ao medir a rugosidade apresenta uma dificuldade inerente ao processo de varredura porque apenas uma parte da luz é refletida de volta para o sistema a tratar.



Foto 3.4 – Perfilômetro Ótico
Fonte: WTKD, 2010

Na figura 3.11, a superfície lisa (à esquerda) vai refletir toda a luz incidente no mesmo ângulo em que atinge a superfície. Uma superfície áspera (à direita) irá refletir parte da luz desta maneira, mas também uma quantidade significativa de dispersão de luz em outros ângulos.

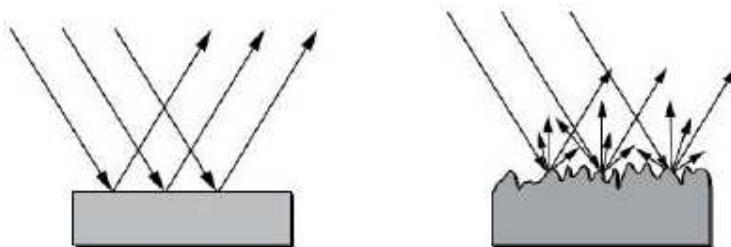


Figura 3.11 – Varredura de Superfície por perfilômetro ótico

► Rugosímetro a laser ou com luz polarizada utilizam variações de fase que resultam em diferenças de tensões que são então medidas.

Apesar de possuírem maior resolução que os de sonda como o Stylus, testes comparativos mostraram que existem diferenças de medições entre ambas as técnicas sugerindo que cada um deve ser normalizado para a superfície que será investigada.

Outros equipamentos como microscopia de varredura por tunelamento ou de força atômica por tratar-se de técnicas de aplicação específicas não se estendem a medições de superfícies rugosas envolvidas em tubos de escoamento de fluidos, pelo menos não atualmente.

3.2.2 TERMOS TÉCNICOS

Em função do aumento da demanda em medições de superfícies tornou-se necessário a criação de termos técnicos específicos para padronização e interpretação da rugosidade. Os principais estão descritos resumidamente a seguir:

► Ra – Rugosidade média definida como média aritmética dos valores absolutos das medições verticais dos perfis em relação à linha média. Ver figura 3.12 onde:

$$Ra = \frac{y_1 + y_2 + y_n}{n} \quad (3.18)$$

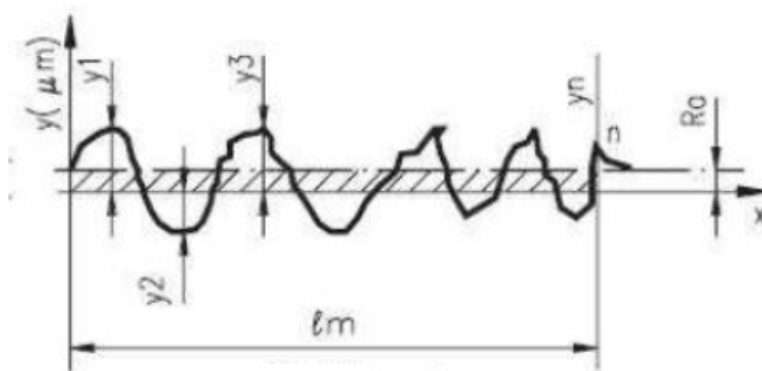


Figura 3.12 – Rugosidade média
Fonte: Rebrac (2009)

Apesar da média de ser o parâmetro mais utilizado para medição de rugosidade, por considerar na amostragem a média, pode omitir vários valores de pico ou de vale sem alteração no resultado final.

A norma ABNT, NBR 8404/84 classifica as superfícies de acordo com o valor máximo de Ra conforme tabela 3.5:

Tabela 3.5 – Classe NBR 8404/84 para Ra

CLASSE DE RUGOSIDADE	RUGOSIDADE RA (valor em $\mu\text{m.}$)
N12	50
N11	25
N10	12,5
N9	6,3
N8	3,2
N7	1,6
N6	0,8
N5	0,4
N4	0,2
N3	0,1
N2	0,05
N1	0,025

Fonte: Rebrac (2009)

► Ry – Rugosidade máxima definida como o maior valor das rugosidades parciais que se encontram no percurso da medição, como exemplificado na figura 3.13 com o valor Z_3 .

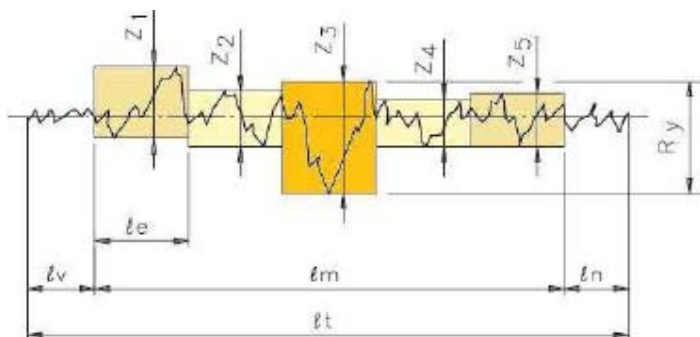


Figura 3.13 – Rugosidade máxima

Fonte: Rebrac, 2009

Fornece informação complementar a R_a , contudo não acrescenta informação a respeito da superfície, inclusive diversas formas podem ser avaliadas com o mesmo valor de R_y , como exemplificado na figura 3.14:

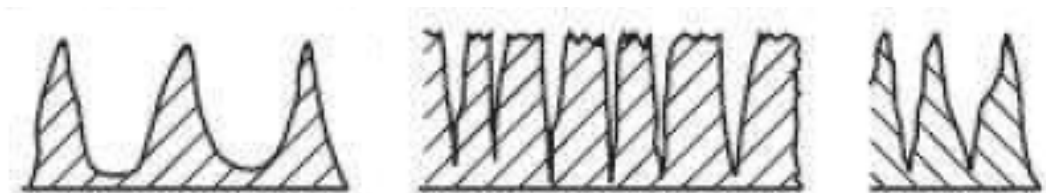


Figura 3.14 – Superfícies com Semelhantes R_y
Fonte: Rebrac, 2009

► R_t – Rugosidade total corresponde à medição entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento da superfície avaliada. Na figura 3.15, observa-se ambos os retângulos hachurados que configuram a R_t .

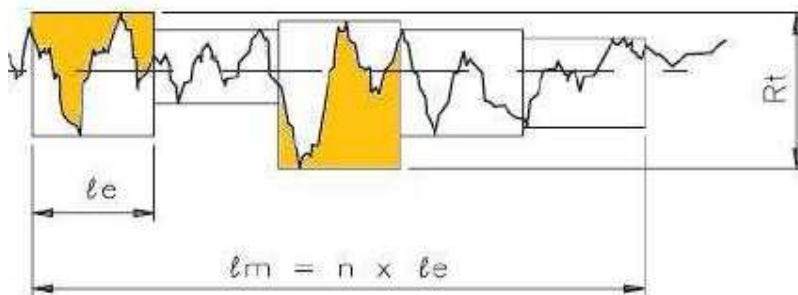


Figura 3.15 – Rugosidade Total
Fonte: Rebrac, 2009

► R_z – Rugosidade de profundidade média é a média aritmética das medições na vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo dentro de uma amostragem de comprimento. Ver figura 3.16

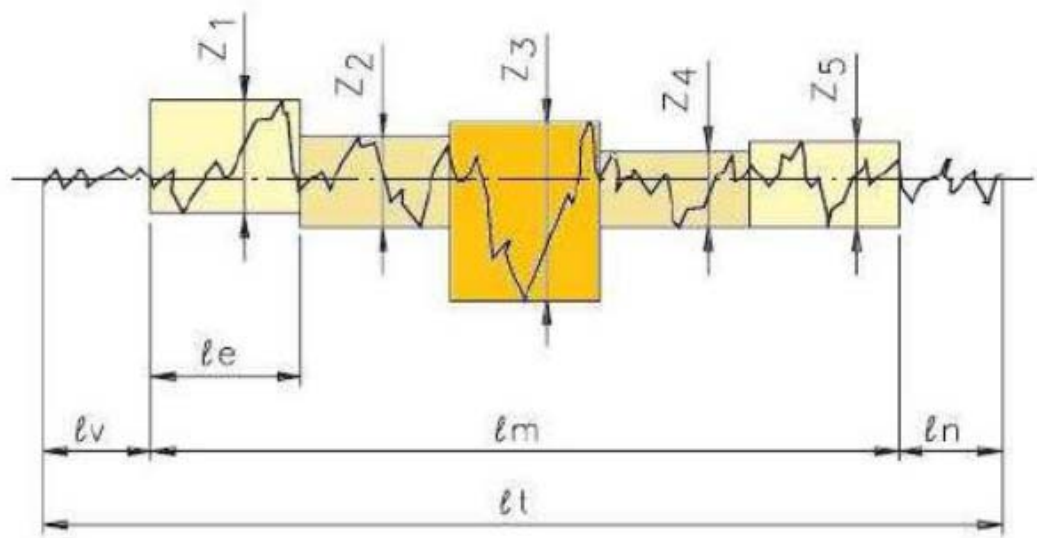


Figura 3.16 – Rugosidade de Profundidade
Fonte: Rebrac, 2009

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5}{5} \quad (3.19)$$

A R_z define melhor a superfície para tratamento estatístico posterior.

Contudo todos os parâmetros requerem filtro para tratamento dos dados coletados e tal procedimento pode ocultar um detalhe de informação, que eventualmente pode ter impacto na caracterização real da superfície.

3.2.3 NORMAS

Existem muitos códigos e normas, de diversos países, regulamentando o projeto, a fabricação, a montagem e utilização de tubos para as mais diversas aplicações. Estas normas detalham materiais, condições de operação, padronizações dimensionais entre outros aspectos. As principais associações referentes ao tema estão elencados na tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Principais entidades normalizadoras de tubos

TABELA DE ASSOCIAÇÕES DE NORMAS TÉCNICAS	
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANSI	American National Standard Institute
API	American Petroleum Institute
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
AWWA	American Water Works Association
ISO	International Organization for Standardization
DIN	Deutsches Institut für Normung
MSS	Manufacturers Standardization Society

Estas associações padronizam entre outros itens roscas, flanges, pressões admissíveis, espessuras de parede, tensões admissíveis de montagem, materiais, e outros parâmetros, contudo em função da precariedade tecnológica em medições de superfícies rugosas pouco prescreve sobre dimensões aceitáveis no processo em função dos materiais, limitando-se ao diâmetro interno nominal em função da espessura da parede e umas poucas recomendações de conteúdo vago sobre o acabamento, a qual deve atender os requisitos de aplicação.

Normas como a ISO 4287, DIN 4762 e 4768 descrevem a interpretação dos parâmetros de caracterização mencionados nos termos técnicos, principalmente para superfícies planas não contendo informações específicas para tubos.

3.2.4 ARTIGOS SOBRE GEOMETRIA DE SUPERFÍCIES

Nos últimos anos tem crescido o número de artigos técnicos voltados a geometria de superfícies rugosas, com objetivo de elucidar várias lacunas, utilizando métodos mais avançados disponíveis. Segue então um resumo de alguns destes artigos relacionados ao tema deste trabalho como justificativa também das dificuldades ainda existentes na compreensão das formas e impactos das asperezas na fluido-mecânica.

THOMAS (1998) menciona a falta de compatibilidade dos softwares de medições de superfície e que diversos processos de medida ainda estão confinados a laboratório, longe dos usuários comerciais. Outro problema refere-se aos pacotes para operadores de campo cujos códigos fontes raramente são disponibilizados e torna-se difícil estabelecer exatamente como um determinado parâmetro é definido.

AMARAL(2002) descreve técnicas recentes de medição de superfícies rugosas apresentando algumas características, vantagens e desvantagens dos métodos. Além de conceituar a rugosidade em termos de escala de medição é necessário observar o caráter estatístico uma vez que esta considera os fatores como tamanho e distribuição da amostra.

BURMESTER (2004) descreve o perfilamento a laser que é uma tecnologia recente desenvolvida para a obtenção de um modelo digital de superfície de maneira direta, aliado a técnicas de discretização, que substitui o uso de fotografias tradicionais. Sua aplicação, entretanto, ainda é restrita a cobertura de grandes superfícies, como em topografia terrestre.

TAYLOR, CARRANO e KANDLIKAR (2006), expõem uma retrospectiva histórica dos efeitos da rugosidade em sistemas de micro transportes de fluidos. Cita que a rugosidade média (R_a) apesar de generalizada em aplicações de engenharia, tem se mostrado insuficiente para caracterizar a natureza funcional da superfície.

Técnicas recentes de medição baseadas em instrumentos óticos estão incorporando outros fatores do perfil de forma tridimensional que permitem uma melhor caracterização da rugosidade, como ilustrado na figura 3.17.

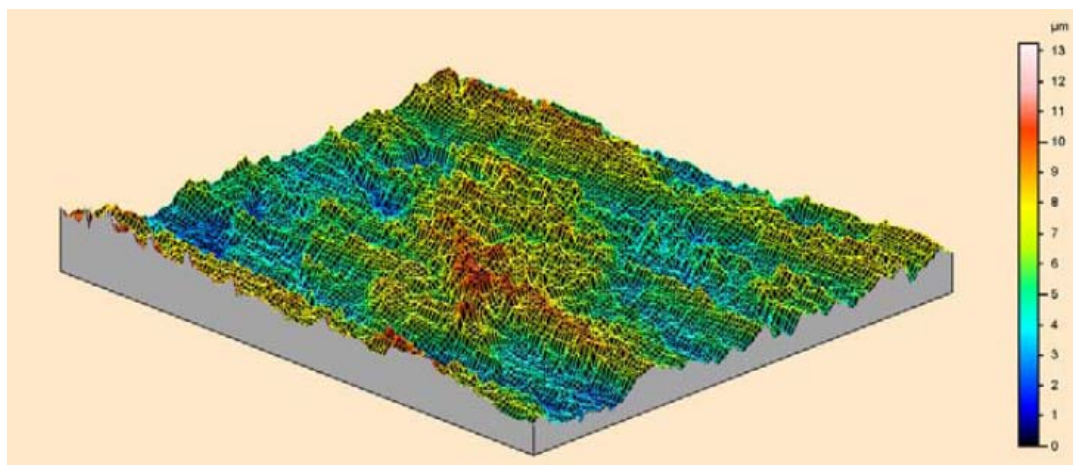


Figura 3.17 – Amostra tridimensional de superfície rugosa
 Fonte: Taylor, 2006

O experimento dos autores em um canal retangular com água e elementos geométricos de rugosidade com dentes de serra, k_s de 0,0735 mm, medidos com perfilometria ótica para cálculo do fator de atrito e comparação com o ábaco de Moody(1944), mostraram que para aumentos da rugosidade em relação ao diâmetro do tubo a margem de erro supera os 5% conforme figura 3.18.

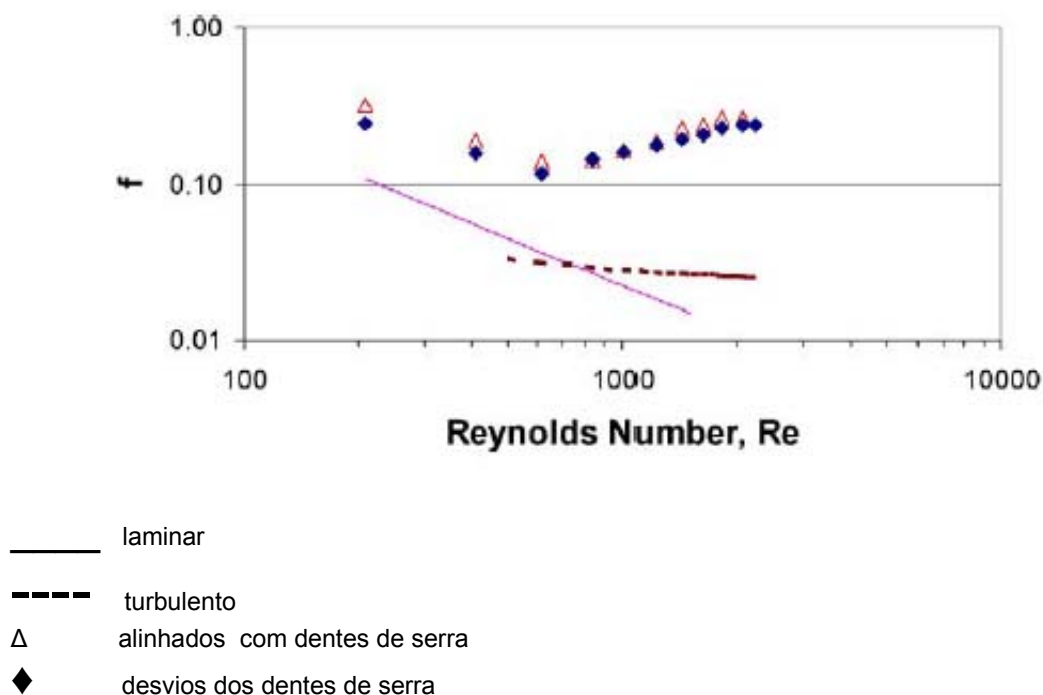


Figura 3.18 – Desvios de f para maiores K_s

O catálogo do fabricante de tubos de aço inox ARCELORMITTAL(2010), contempla diversas tolerâncias de fabricação pertinentes à espessura da parede, comprimento, ovalização e flecha do tubo entre outras características controladas, contudo não evidencia seja através de ensaios ou cumprimento de normas, quaisquer indicação da verificação da rugosidade equivalente dos tubos fabricados.

Um ensaio específico foi feito no fabricante durante visita realizada em 2010, em um tubo de aço inox solicitado por cliente. O teste na planta do fabricante com rugosímetro digital (aparelho da Mitutoyo modelo Surf test 211), relatou os seguintes valores da amostra:

► Tubo de aço inox 316 norma ASTM 270-02, diâmetro 25,4 mm, com acabamento por cabeçote de lixa e mandrilhamento na região da solda somente:

► Rugosidade inspecionada nas pontas em um lote de 110 tubos, pontas escolhidas de forma aleatória: $k = 0,016$ mm.

O catálogo do fabricante de tubos de ferro fundido revestido, SAINT GOBAIN (2010), para aplicação em adução de água faz observações pertinentes à rugosidade de tubos novos revestidos internamente com argamassa de cimento, onde citam que uma série de testes foram realizados e encontrado um valor médio de $k = 0,03$ mm, porém como a rugosidade da superfície equivalente não depende somente da uniformidade da parede interna, mas também das irregularidades do perfil geral do tubo, foi adotado o valor padrão de $k = 0,1$ mm, considerado razoável para ser usado no cálculo de perdas de carga por atrito na adução de água.

3.3 PESQUISAS RECENTES

Nos últimos 15 anos um número significativo de pesquisas acerca da rugosidade superficial de tubos tem sido publicado em várias partes do mundo, muitos destes trabalhos, apesar de fundamentação analítica e experimentos, ainda não são conclusivos, tendo os próprios autores, sugestão de novas pesquisas para complemento e esclarecimentos sobre as divergências encontradas entre ensaios de laboratório e casos práticos. A revisão a seguir explora algumas destas pesquisas sem, contudo finalizar o assunto.

RODRIGUES(1998) cita que de acordo com Irwin(1984) o conhecimento da rugosidade equivalente das paredes internas de um tubo é de fundamental importância no dimensionamento de um sistema apesar de não mencionar métodos seguros disponíveis tecnicamente para fazê-los. Registra-se que muitos engenheiros e projetistas não sentem segurança em usar gráficos que fornecem a rugosidade relativa devido à falta de conhecimentos a respeito da variação dos valores dos tubos ensaiados. A autora cita Sisson e Pitts (1988) que comentam que embora as experiências de Nikuradse(1933) sejam precisas, elas não estão diretamente relacionadas com o escoamento em tubos comerciais, podendo ser aplicada apenas para tubos geometricamente semelhante aos ensaiados. A autora resume as formulações explícitas para determinação do fator de atrito para o regime de transição entre o tubo liso e rugoso, desenvolvidas a partir da equação implícita de f , de C-W (1937).

Como exemplo destas fórmulas são evidenciados as equações abaixo:

► MOODY(1944)

$$f = 0,055 \left(1 + \left(20.000 \left(\frac{k}{D} \right) + \frac{10^6}{Re} \right)^{1/4} \right) \quad (3.20)$$

Erro médio relativo em relação a C-W 4,3%

Intervalo: $4 \times 10^3 \leq Re \leq 10^5$

► SWAMEE e JAIN(1976)

$$f = \frac{0,25}{\left[\log \left(\frac{k}{3,7D} \right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]^2} \quad (3.21)$$

Erro médio relativo em relação a C-W 1,0%

Intervalo: $5 \times 10^3 \leq Re \leq 10^8$

► SHACHAM(1980)

$$f = \left(-2 \log \left(\frac{k}{3,7D} - \frac{5,02}{Re} \log \left(\frac{k}{3,7D} + \frac{14,5}{Re} \right) \right) \right)^{-2} \quad (3.22)$$

Erro médio relativo em relação a C-W 1,0%

Todas as equações explícitas em f procuram gerar o menor desvio relativo dos resultados em relação a C-W(1937), contudo ignoram os erros significativos que estão embutidos no valor da rugosidade presente, normalmente superior aos desvios médios.

FARSHAD,RIEKE e GARBER(2001), usaram um perfilador de superfície para medir diretamente a rugosidade absoluta de um tubo de aço carbono revestido com composto fenólico para aplicação em transporte de petróleo.

Para a realização da experiência utilizaram várias amostras de tubos com 4,0 m de comprimento de diferentes diâmetros e dois aparelhos semelhantes no método de varredura da superfície, de distintos modelos. Além da varredura da superfície os aparelhos contavam com modelos matemáticos para análise estatística disponibilizando médias aritméticas, quadráticas, valores de pico e de máxima distância vertical das protuberâncias.

A partir dos dados coletados e tratados pelo perfilador, comparou as medições realizadas por ambos os aparelhos e os valores extraídos do ábaco de Moody para tubo de aço comercial conforme figura 3.19:

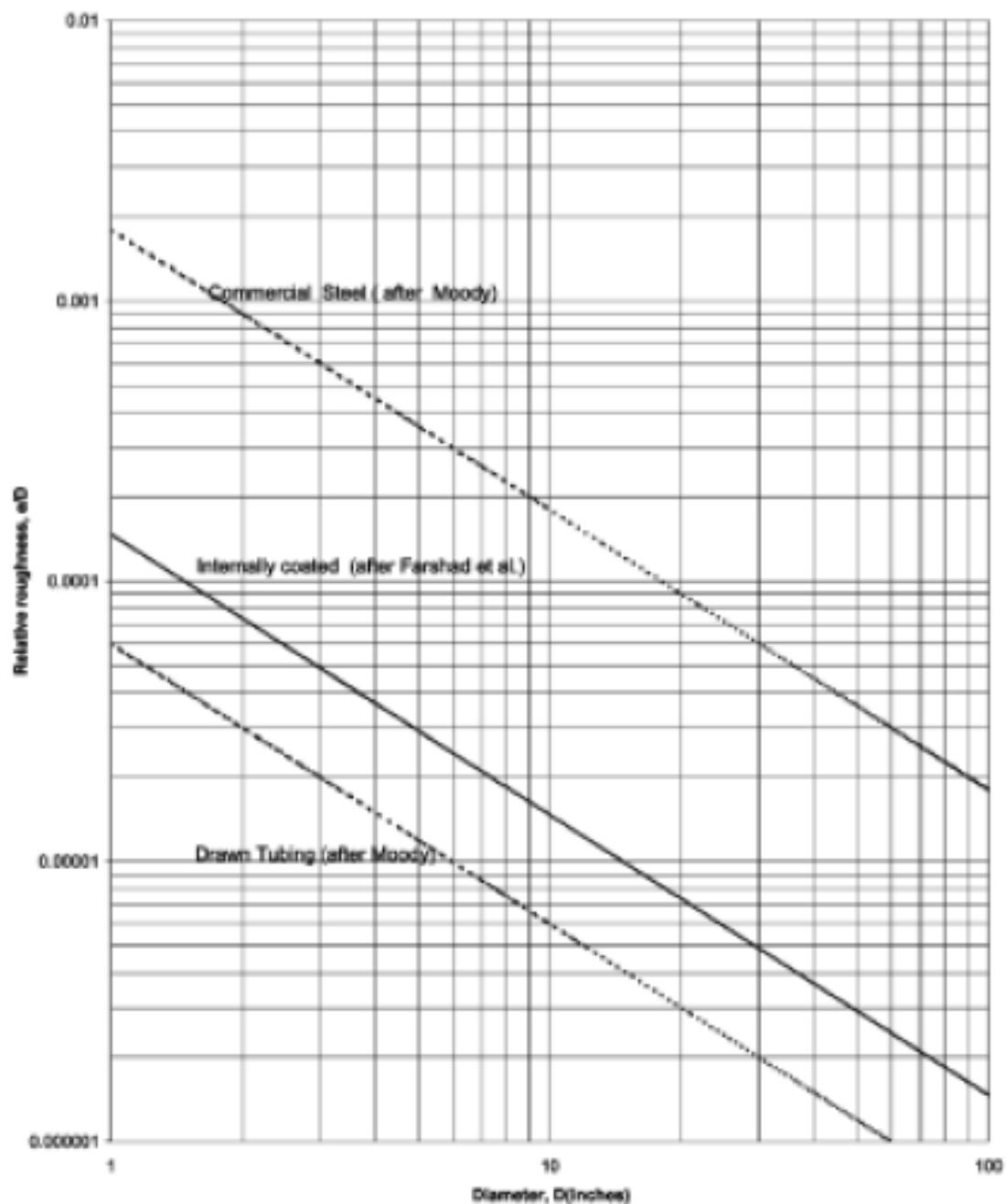


Figura 3.19 – Comparação de K_s para tubos de aço e tubo de Moody
Fonte: Farshad (2001)

Os desvios de k_s em relação à Moody (1944) foram de aproximadamente 10 (dez) vezes em magnitude.

RIJ, BELNAP e LIGRANI(2002), usaram perfilador de superfície tridimensional para validar o equivalente de grãos de areia da experiência de Nikuradse(1933) com elementos geométricos pré definidos como esferas, cones e pirâmides. A técnica determinou o equivalente da magnitude dos grãos em termos de elementos geométricos conforme trabalho de Schlichting (1937), contudo utilizando um método de varredura tridimensional.

O experimento foi realizado em um canal bidimensional com as rugosidades dispostas de forma alternada com regiões lisas que serviram de base comparativa. O experimento utilizou fluxos de ar alimentados por ventiladores, transdutores de pressão e fluxo, que processaram a aquisição das medições.

A formulação do coeficiente de atrito foi desenvolvida a partir do parâmetro de Sigal e Danberg (1998) conforme abaixo:

$$f = \left(\frac{S}{S_f} \right) \left(\frac{S f_a}{S_s} \right) \quad (3.23)$$

$$f = \left(-2,46 \ln \left(\frac{K}{\frac{n}{9,7}} \right) + \frac{0,887}{Re D \sqrt{\frac{l}{2}}} \right)^{-2} \quad (3.24)$$

Os autores compararam os dados experimentais com a determinação numérica obtida a partir da equação de C-W(1937) para tubos rugosos na zona de transição, e obtiveram valores próximos, provando a relação existente entre a rugosidade dos grãos de areia e respectivos elementos geométricos equivalentes conforme figura 3.20.

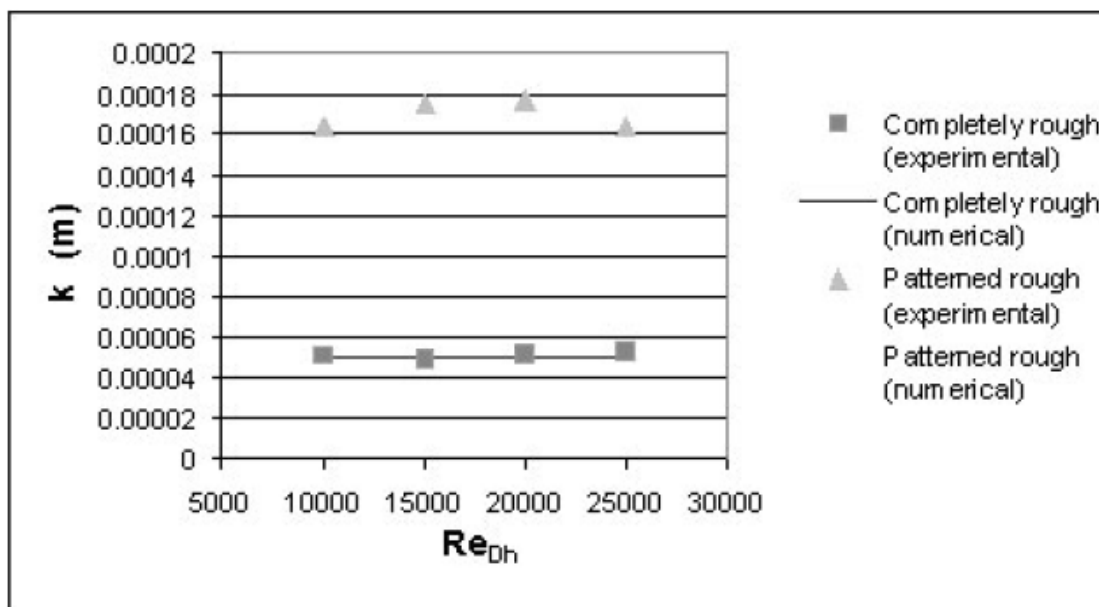


Figura 3.20 – Comparação de Ks e C-W no método tridimensional
Fonte: Rij, 2002

TRAVIS e MAYS (2007) elaboraram um trabalho teórico que estabelece a relação entre os valores do coeficiente C_{HW} da fórmula de H-W (1913) e o fator de atrito de C-W(1937).

Os limites de aplicação de H-W(1913) são controversos com referências de experimentos apresentando diferenças significativas para Re com o diâmetro do tubo entre $0,05 < D < 1,85$ m conforme tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Faixa de aplicação de Re para o coeficiente de H-W(1913)

H-W(1913)	Cristensen (2000)	Locher (2000)
$8 \times 10^3 < Re < 2 \times 10^6$	$10^5 < Re < 10^8$	$10^4 < Re < 10^7$

Fonte: Travis (2007)

O banco de dados do coeficiente C_{HW} é maior quando da aplicação da fórmula de C-W(1937), requerendo uma conversão para o fator de atrito dependente da

rugosidade relativa e de Re. Os trabalhos dos autores derivam das soluções implícitas das fórmulas de C-W(1937) e do conhecimento do diâmetro do tubo investigado.

Fazendo o coeficiente de atrito de H-W(1913) igual ao fator de atrito de C-W(1937) e estendendo esta similaridade para Re e o diâmetro do tubo e desenvolvendo por iteração as equações e as respectivas substituições, os autores geraram um gráfico (figura 3.21) que permite estimar a ks do ábaco de Moody(1944) a partir de um coeficiente de H-W(1913) hipotético.

$$k_s = D(3,820 - 0,021 C D^{0,01})^{2,173} \epsilon^{-0,04127 C D^{0,01}} \quad (3.25)$$

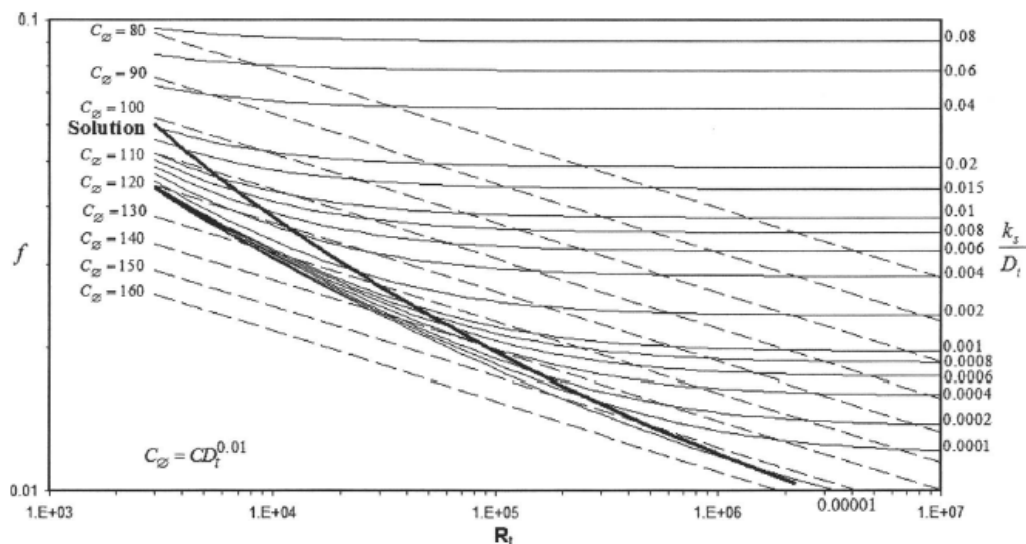


Figura 3.21 – Transformação do coeficiente de H-W(1913) em Ks
Fonte: Travis (2007)

A verificação da solução requereu a consulta a diversas tabelas, sites de internet e artigos publicados dos coeficientes C_{HW} e k dos tubos, sendo, entretanto, limitados pela exatidão destas fontes principalmente pela grande faixa de variação da rugosidade equivalente dos tubos.

LANGELANDSVIK, KUNKEL e SMITS (2008), realizaram experimentos com tubo de aço comercial com propósito de reexaminar os aspectos do ábaco de Moody(1944), principalmente para o regime de escoamento turbulento com tubos rugosos, do tipo mais comum em aplicações de engenharia.

Resumidamente o aparato de ensaio constituiu de:

- ▶ 08 (oito) seções de tubos de cinco polegadas com 20 m de comprimento cada
- ▶ 21 (vinte e um) transdutores de pressão diferencial
- ▶ Ar comprimido como fluido de teste
- ▶ Sonda pitot para medição do perfil de velocidade a 200 D a montante da admissão do fluido
- ▶ Perfilômetro ótico de superfície

Foram realizados testes com Re variando de $150 \cdot 10^3$ a $20 \cdot 10^4$ e utilizado a fórmula de C-W(1937) para correlação do fator de atrito teórico e experimental.

Os erros médios relativos da ordem de $\pm 5\%$ no fator de atrito foram creditados às incertezas na determinação do gradiente de pressão com base no perfil de velocidade afetado pelas próprias rugosidades.

Inspeções das imagens coletadas por perfilometria ótica mostraram que a rugosidade é irregular nas formas e na distribuição, com regiões ora suaves e outras mais abruptas com maiores elementos de protuberâncias. Os resultados plotados na figura 3.22 demonstram uma transição muito menos suave que a apresentada pelo diagrama de Moody (1944).

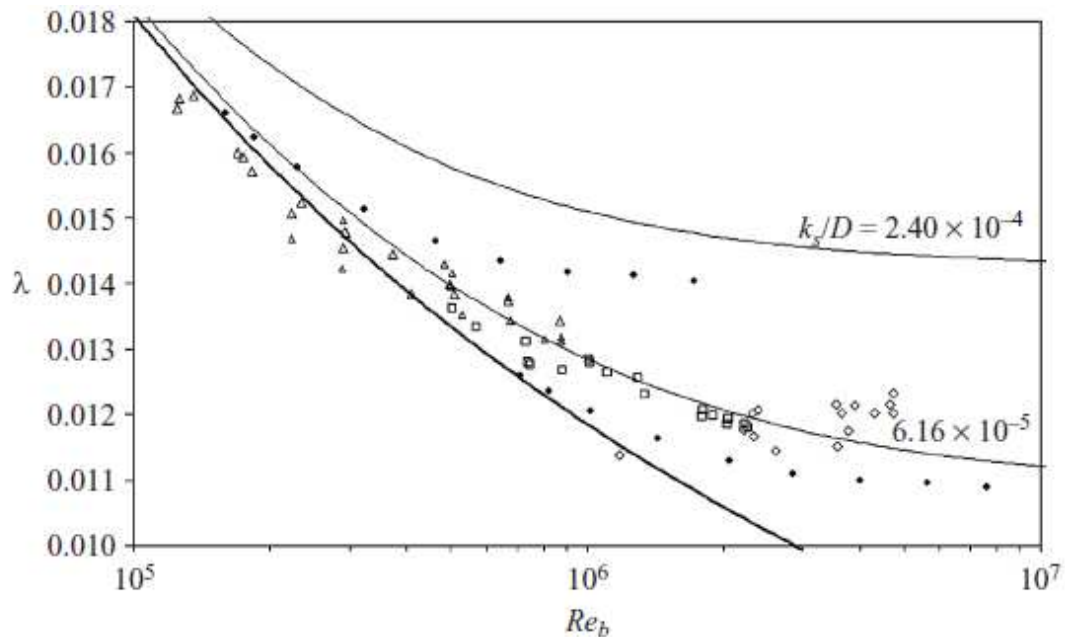
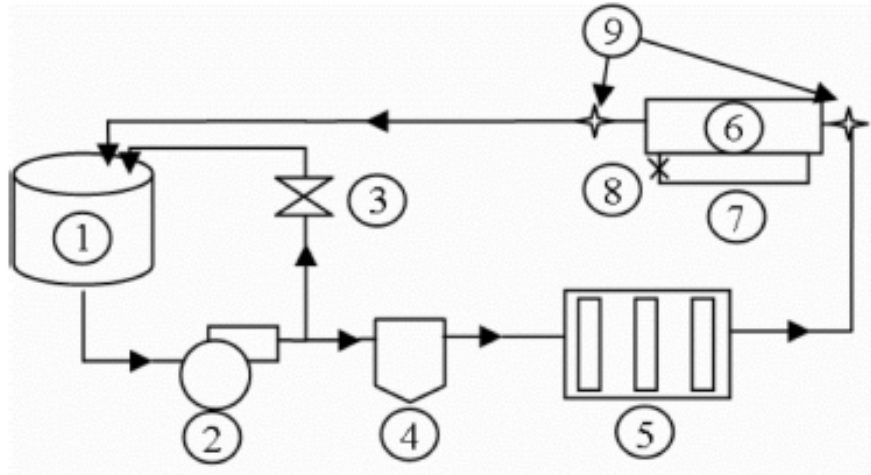


Figura 3.22 – Comparação de f de Moody e Langlandsvik
 Fonte: Langlandsvik, 2008

Além do comportamento diferente verifica-se também a tendência de que com o aumento de Re a rugosidade influencia de modo mais efetivo a passagem de transição para escoamento turbulento.

BRACKBILL e KANDLIKAR (2010) realizaram experimento em um canal retangular com largura fixa e altura regulável com rugosidade criada por dentes de serra espaçados, com o objetivo de estudar o fenômeno de transição para escoamento turbulento com um menor número de Reynolds. O ensaio na bancada é ilustrada na figura 3.23.



- 1) Reservatório
- 2) Bomba
- 3) Válvula de Pressão
- 4) Filtro
- 5) Medidor de Vazão
- 6) Seção de teste
- 7) Registro de Pressão
- 8) Sensor de Pressão
- 9) Sensor de Temperatura

Figura 3.23 – Bancada de teste de Brackbill
Fonte: Brackbill, 2010

A experiência foi executada com água, rotâmetros para fluxo, sensor de pressão e perfilador de superfície ótica com tratamento de dados acoplado. A altura das rugosidades é de cerca de 0,107 mm conforme uma amostra do perfil na figura 3.24:

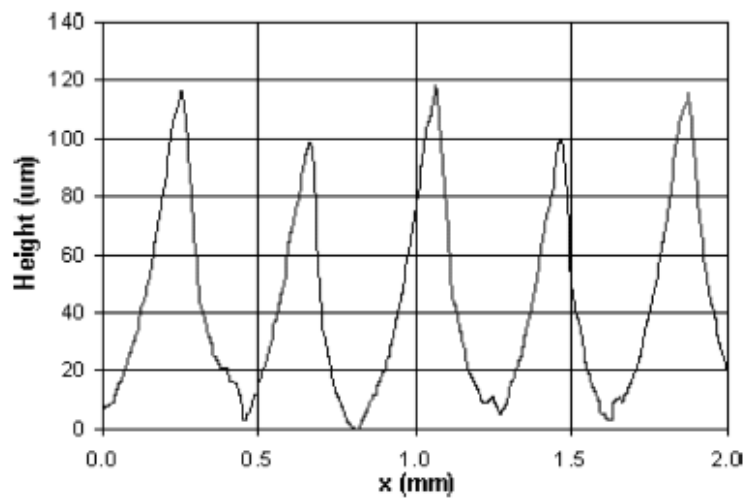


Figura 3.24 – Amostra da altura da rugosidade
Fonte: Brackbill, 2010

Com variações do fluxo obtiveram os respectivos valores de pressão para a rugosidade definida e aplicada à fórmula de Fanning (1880) para determinação do fator de atrito, e comparado com os valores para o regime turbulento conforme segue:

Fórmula de Fanning (1880):

$$hf = f \left(\frac{L}{Rh} \right) \left(\frac{w^2}{2g} \right) \quad (3.26)$$

Fator de atrito do experimento:

$$f = \frac{24}{Re} (1 - 1,3553\alpha + 1,9467\alpha^2 - 1,7012\alpha^3 + 0,9564\alpha^4 - 2,537\alpha^5) \quad (3.27)$$

► a = largura canal retangular

$$\alpha = \frac{b}{a}$$

► b = altura canal retangular

Entre os vários gráficos disponibilizados pelo experimento, o da figura 3.25 demonstra os desalinhamentos entre os valores calculados pelas fórmulas acima e os obtidos em ensaios, em média 10 (dez) vezes superiores aos teóricos.

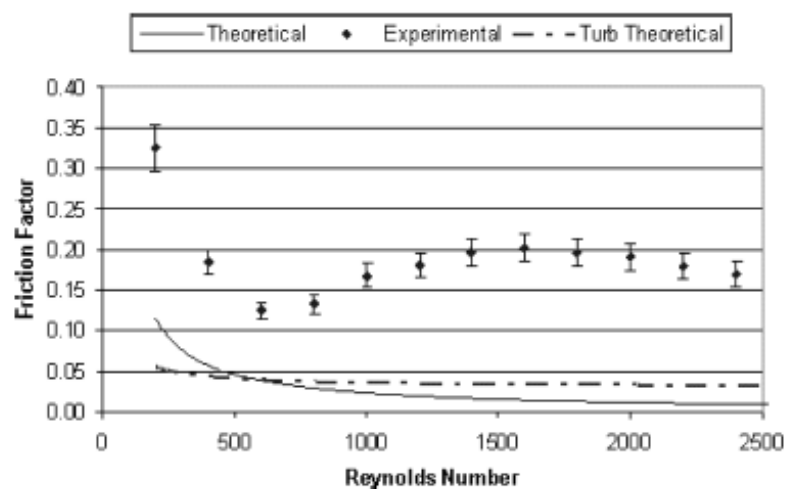


Figura 3.25 – Comparação do fato de atrito de Fanning e Experimento
Fonte: Brackbill, 2010

Os resultados mostram que em valores de Re mais baixos do que os aceitos normalmente pela literatura podem ocorrer escoamentos turbulentos influenciados pelo aumento da rugosidade. A transição para turbulência pode ser considerada até mesmo para $Re=800$ nos dados coletados. Apesar de o autor reconhecer que mais dados experimentais são necessários para a obtenção de conclusões extensivas, fica o registro de que o número de Reynolds diminui com o aumento da rugosidade e se afasta da previsão teórica.

FLACK e SCHULTZ (2010) revisaram trabalhos acerca de escalas de rugosidade em regime turbulento com superfícies rugosas. A proposta verificou os efeitos tridimensionais das superfícies irregulares na determinação do fator de atrito. Como ponto de partida levantam a questão de qual é a melhor escala de comprimento que tipifica uma superfície hidráulica visto que somente a altura da rugosidade não caracteriza os efeitos de resistência no escoamento.

Pesquisas recentes com simulação direta numérica têm sido insuficientes para resolver questões de dimensionamento de rugosidade tridimensional, limitando-se a alguns tipos de protuberâncias normalmente idealizadas a partir de formas geométricas artificiais.

Resultados de trabalhos atuais como os de Allen et al (2010) e Langelandsvik(2008) mostraram que os valores extraídos do ábaco de Moody(1944), a partir das correlações de C-W(1937), subestimam os valores de f no regime de transição para tubos rugosos e que tais dados não podem ser utilizados para uma ampla gama de interesse prático. Não fica claro também como a altura da rugosidade do diagrama pode ser extensiva a uma rugosidade real de um tubo.

Para muitas outras superfícies encontradas na prática, são desconhecidos os valores equivalentes de grãos de areia.

No trabalho, os autores utilizam de várias pesquisas com informações estatísticas e de uma ampla gama de rugosidade tridimensional, já disponibilizadas por outros pesquisadores como Flack et al (2007) que demonstraram que embora a altura da rugosidade possa variar, estas apresentam funções similares, significando que a altura por si só é insuficiente para dimensionar o atrito resultante da superfície.

Os autores citando Clauser (1954), afirmam que alguns tipos de rugosidade produzem funções com inclinação ora monotônica ora com inflexão, demonstrando a dificuldade de encontrar uma escala que reproduza as irregularidades incluindo parâmetros como forma, densidade e passo.

Complexas correlações tem sido sugeridas para determinação da rugosidade equivalente no cálculo do fator de atrito, entre elas a proposta de Van Rij et al (2002) que utilizou elementos geométricos similares aos de Schlichting(1937) contudo com medições da superfície com ferramentas atuais como perfilador ótico e métodos numéricos de análise. Todos estes trabalhos procuraram parametrizar a geometria das rugosidades, contudo a utilização de elementos de forma artificiais bem como o uso de filtros ou outras técnicas de análise de resolução espacial podem ainda ignorar informações importantes sobre a superfície rugosa natural, gerando um alto grau de variação quando comparados aos sistemas reais.

De fato ainda é difícil cobrir todas as variáveis das superfícies rugosas encontradas, apesar do termo rugosidade equivalente simplificar notadamente os diferentes tipos, este não correlaciona à verdadeira grandeza física, requerendo outros trabalhos experimentais e teóricos para melhor compreensão.

ALLEN, SHOCKLING e SMITS(2010), realizaram experimento no Superpipe da Universidade de Princeton em tubos lisos e rugosos com altos números de Reynolds com objetivo de comparar as curvas da função rugosidade de Nikuradse(1933) e posteriormente o ábaco de Moody (1944) obtido a partir da equação de C-W(1937). Estes experimentos foram executados com ar comprimido conforme resumido abaixo:

$P = 20 \text{ Mpa}$

$D = 129 \text{ mm}$

$Re = 35.10^6$

$k_s = 0,0000194$

Citando o trabalho de Zagarola e Smits (1998), sobre os efeitos da superfície rugosa no escoamento, ressalta que embora seja intuitivo que um fluxo sobre uma superfície com protuberâncias experimentam uma força de resistência maior que em

uma superfície lisa, não é completamente claro quando e como a superfície rugosa começa a afetar o perfil de velocidade média e consequente aumento da energia de turbulência.

Sobre outro artigo de Bradshaw(2000) questiona a partir de que Re a rugosidade torna-se relevante , onde os efeitos viscosos não são mais suficientes para amortecer a perturbação gerada pelas protuberâncias.

Para tubos rugosos os autores salientam as dificuldades em fazer afirmações conclusivas a respeito das características da superfície com valores muito baixos de k_s independente do método de medição, inclusive imagens óticas.

A imagem geométrica da rugosidade do tubo utilizado no laboratório de Princeton com protuberâncias equivalentes a 17 vezes quando comparadas ao tubo liso é visualizada na foto 3.5.

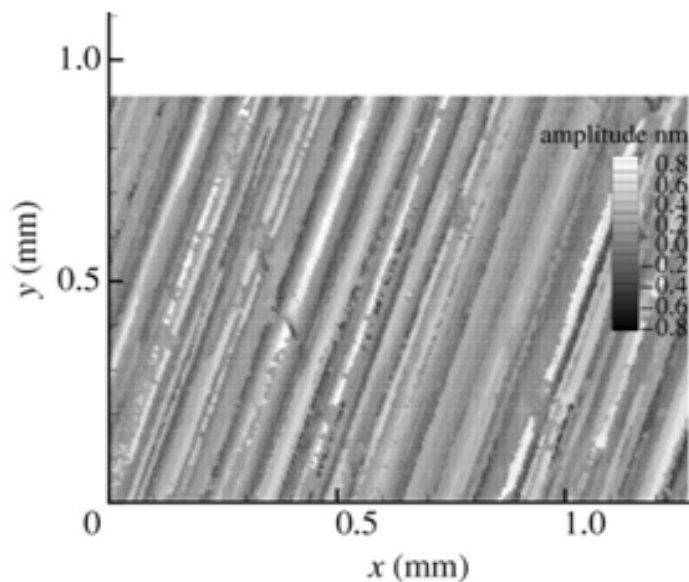


Foto 3.5 – Imagem da rugosidade do tubo
Fonte: Allen, 2010

Os resultados após testes com os gradientes de pressão obtidos, mostram divergências na previsão de C-W (1937) conforme figura 3.26.

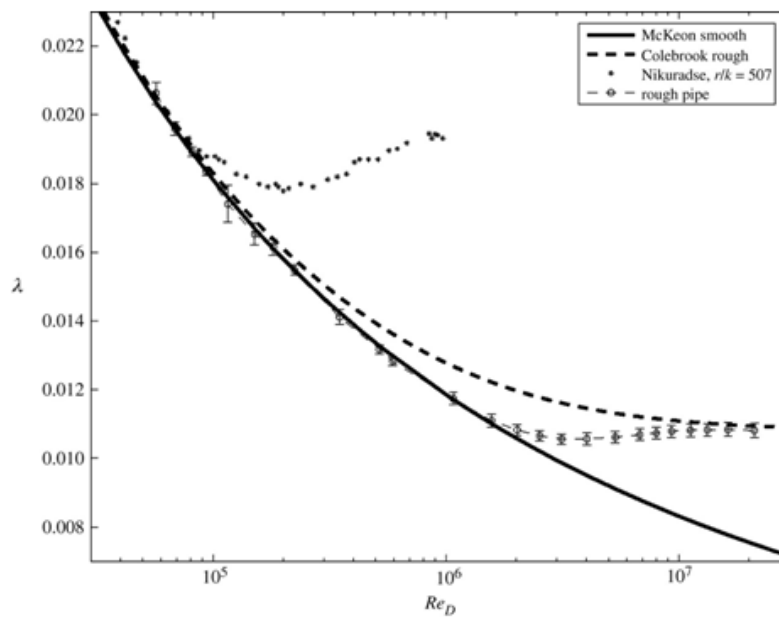


Figura 3.26 – Desvios do fator de atrito de C-W e Allen

Fonte: Allen, 2010

É importante salientar que os autores reconhecem que o valor exato de k do tubo ensaiado é desconhecido embora a estimativa da geometria esteja razoavelmente definida.

Outra técnicas de medições envolvendo turbulência com perfis de velocidade obtidos a partir de anemometria de fio quente também confirmaram para tubos rugosos na zona de transição e maiores Re , desvio em relação a C-W(1937) como citado nos trabalhos de Kunkel e Smits(2006).

4. ESTUDO DE CASOS

Os sistemas são aplicações industriais ou de empresas de saneamento, que foram investigados para determinação das causas de não conformidades operacionais e resultaram em um diagnóstico, apontando diferenças nos valores dos cálculos manométricos projetados e medidos em campo. Descontados outras causas que são mencionadas a seguir, concluiu-se que as divergências foram originadas pela escolha dos valores da rugosidade do tubo, visto que as fontes de consulta apresentam amplas faixas de valores e muitas delas são contraditórias.

4.1 CARACTERÍSTICAS DOS SISTEMAS

Para dedicação à causa principal no estudo individualizado, segue uma caracterização geral dos sistemas com observações sobre os contornos destes e, eventuais parâmetros únicos são descritos no respectivo caso.

4.1.1 FLUIDO

Água limpa ou servida isenta de sólidos ou químicos em suspensão com as seguintes características em todos os casos. A temperatura da água apresentou variação inferior a 2° C, sendo, portanto, adotado o peso específico e viscosidade cinemática abaixo:

T_a 20°C
 γ 998,2 Kg m⁻³
 ν 1,01.10⁻⁶ m² s⁻¹

4.1.2 CARACTERÍSTICAS DAS INSTALAÇÕES

Os tubos utilizados nos experimentos foram agrupados em 03 (três) classes de materiais que foram escolhidas devido a grande disponibilidade de dados destes materiais.

► Tubos de aço comercial

De uso geral na indústria também designados em projetos, como:

Aço carbono novo, aço carbono preto soldado;

Aço comercial, aço comercial novo, aço comercial soldado;

Aço galvanizado, aço galvanizado com costura.

Adotado neste trabalho a designação de aço comercial.

São tubos com costura, disponibilizados com diâmetros de 2 até 10 polegadas padronizados pela norma americana ANSI B.36.10 ou ABNT NBR 5580 e fabricados conforme norma ASTM A 53. Fabricados por ArcelorMittal ou TenarisConfab.

A norma NBR 5580 especifica os tubos de aço carbono com costura sem tratamento com a designação de aço carbono preto e com revestimento de zinco depositado como aço galvanizado.

► Tubos de aço inoxidável austeníticos

Tipos ANSI 304, 310 ou 316, utilizados em projetos industriais, disponibilizados com diâmetros de 1 a 12 polegadas padronizados pela norma americana ANSI B 36.19 e fabricados conforme norma ASTM 312. Fabricados por Acesita ou ArcelorMittal.

► Tubos de ferro fundido dúctil

Centrifugado, com revestimento interno de argamassa de cimento utilizados em condução de água, disponibilizados com diâmetros de 100 a 300 mm, especificado conforme norma NBR 6916, 7675 e ISO 2531. Fabricado por Saint-Gobain canalização.

Material, comprimento, diâmetro conforme memorial e desenho isométrico.

Instalação típica do sistema pode ser visualizada na foto 4.1.



Foto 4.1 – Instalação típica da bomba centrífuga

Os croquis apresentados em cada caso são somente ilustrativos para preservar detalhes da instalação do contratante dos serviços do diagnóstico.

4.1.3 CARACTERÍSTICAS DA BOMBA CENTRÍFUGA E ACIONADOR

► Bomba centrífuga e motor elétrico (acionador) novos.

A potência consumida pela bomba é calculada conforme abaixo:

$$P_c = \frac{Q \cdot H_t}{3,67 \cdot \eta} \quad (4.1)$$

Onde:

P_c (Kw)

Q (m³/h)

H_t (mca)

η (%)

Informações conforme folha de dados e curva característica do fabricante

► Bombas ensaiadas conforme norma ISO 2548 classe C. Protocolo de teste das bombas dos casos 1 a 20 apresentaram desvios inferiores a 2% nos valores nominais dos parâmetros Q e Ht.

Um parâmetro relevante para avaliação e demonstração dos casos baseia-se no comportamento da curva característica da bomba.

Para preservação das informações originais do contratante do diagnóstico, contudo mantendo a coerência da análise, serão utilizadas as curvas adimensionais em função dos coeficientes de pressão e vazão determinados por:

$$\psi = \frac{H_t}{(\omega R)^2} \quad (4.2)$$

$$\varphi = \frac{Q}{\omega R^3} \quad (4.3)$$

Para ilustrar o procedimento ver a curva original do fabricante na figura 4.1 e respectiva curva adimensional com os coeficientes na figura 4.2 a seguir:

curva característica fabricante			Bocal de descarga DN150	Frequência 60 Hz
Densidade 1 kg/dm ³	Viscosidade 1,01 mm ² /s	Normas de referência ISO 2548C	Velocidade nominal 1780 rpm	Data 20.04.2011
Vazão 505 m ³ /h	Altura 50,9 m	Potência nominal 85,4 kW	Rend. hidráulico 81,6 %	NPSH 3,7 m

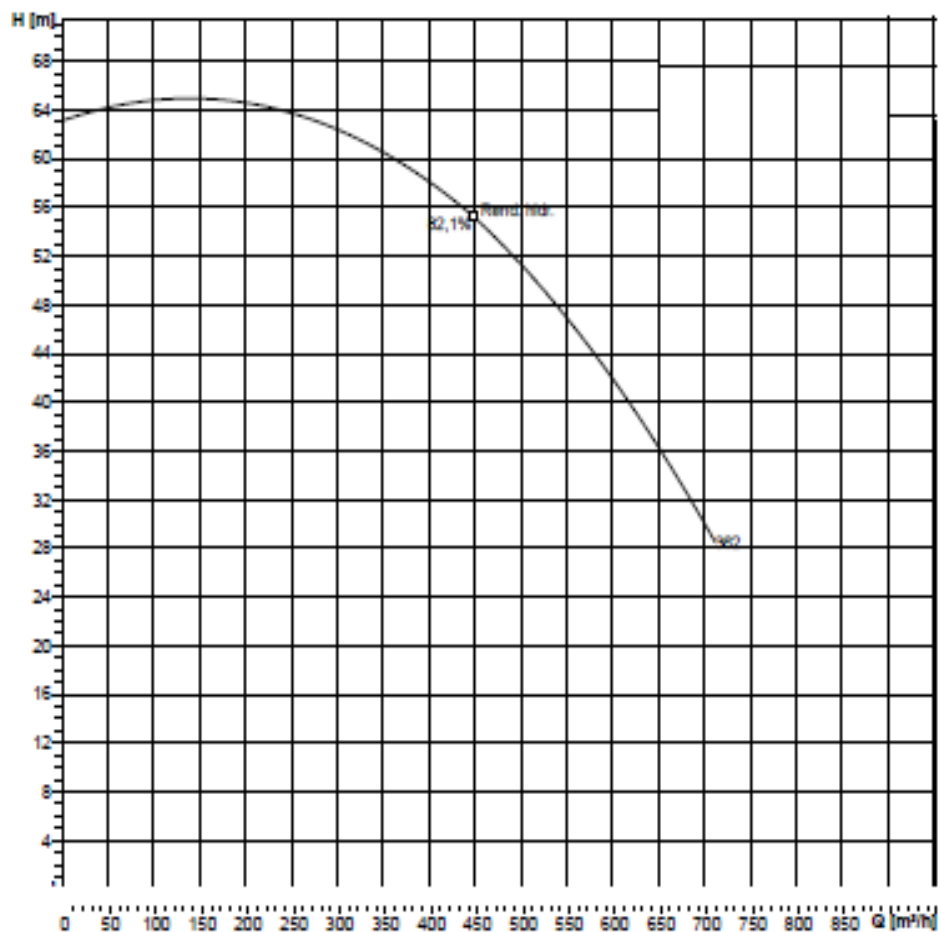


Figura. 4.1 – Curva característica de bomba centrífuga do fabricante

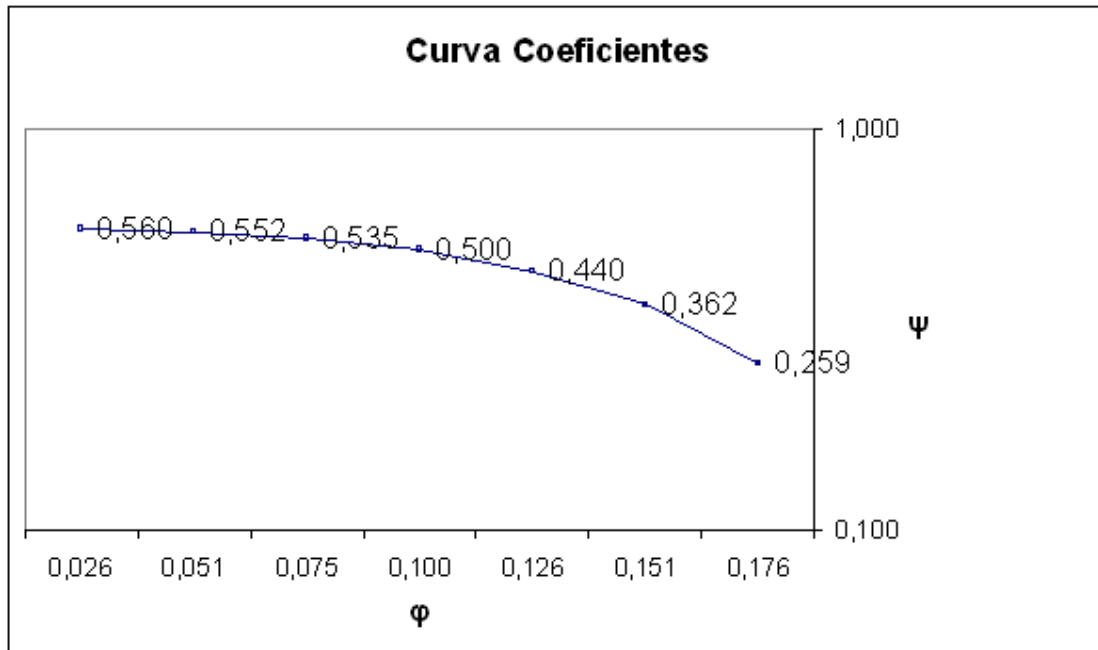


Figura. 4.2 – Curva característica adimensional

4.1.4 INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

► Transdutor de pressão

Convertem a pressão do sistema em um sinal elétrico de saída padronizado que pode disponibilizar localmente a informação (ver fotos 4.2 e 4.3) ou enviar aos controladores lógicos do SDCCD que interpretam a medição realizada. Os transdutores podem ser de sensor capacitivo, piezoresistivo, e o sinal de saída normalmente de 4-20 mA. São fabricados por marcas como Smar, Honeywell, Hytronic, Warme, Wika ou outros.

Apesar da precisão dos transdutores dependerem do fabricante, de regra, situam-se entre 0,1 e 1,0% do fundo de escala do instrumento, que para os casos estudados estão informados especificamente.



Foto 4.2 Transdutor de pressão com indicação local



Foto 4.3 Transdutor de pressão e vazão com indicação local

► Medidor de vazão eletromagnético

O transmissor de vazão é instalado entre os flanges do tubo de recalque (ver figura 4.3) e composto basicamente de um cilindro revestido de material isolante, bobinas para geração do campo eletromagnético e eletrodos fixados na bobina. O funcionamento baseia-se na lei de indução de Faraday, onde a tensão induzida no meio é diretamente proporcional à velocidade média do fluxo e a força eletromotriz é função da vazão volumétrica do sistema. Podem fornecer a medição local ou remota, com sinal de saída de 4-20 mA, e são fabricados por marcas como Conaut, Dwyler, Emerson, Incontrol, Techmeter ou outros como ilustrado na foto. 4.4.

Para a faixa de velocidade do fluxo entre 0-20 m/s, a precisão, apesar de depender do modelo e tamanho, de regra situam-se entre 0,25 e 1,0% do fundo de escala de medição, que para os casos estudados estão especificados.

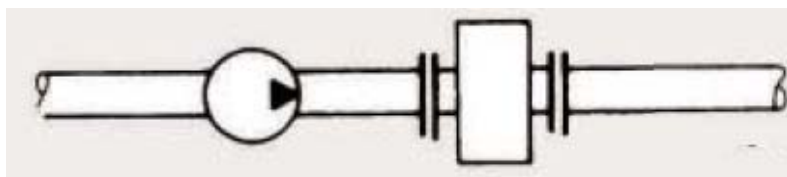


Figura 4.3 Instalação de um medidor de vazão à juzante da bomba



Foto 4.4 Medidor de vazão eletromagnético

► Medidor de vazão ultra-sônico

A medição da vazão ocorre através da instalação de sensores na parede externa do tubo, sem contato direto com o fluido, conforme figura 4.4. O medidor utiliza o efeito da diferença do tempo de propagação de pulsos para a determinação do fluxo. Este princípio mede o efeito da velocidade do líquido através de sinais acústicos bidirecionais obtidos pela montagem conforme ilustrado na figura 4.5.

O transdutor a montante do fluxo emite um sinal para um transdutor instalado a jusante do fluxo que por sua vez emite um sinal contrário. A diferença entre esses tempos de trânsito é proporcional à velocidade. O sinal de saída é de 4-20 mA, e são fabricados por marcas como Conaut, GE, Siemens ou outros.

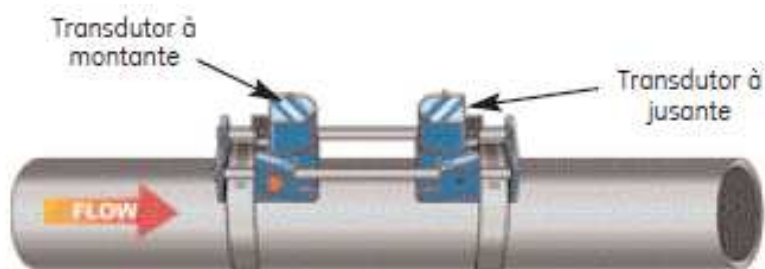


Figura 4.4 – Instalação do medidor ultra-sônico

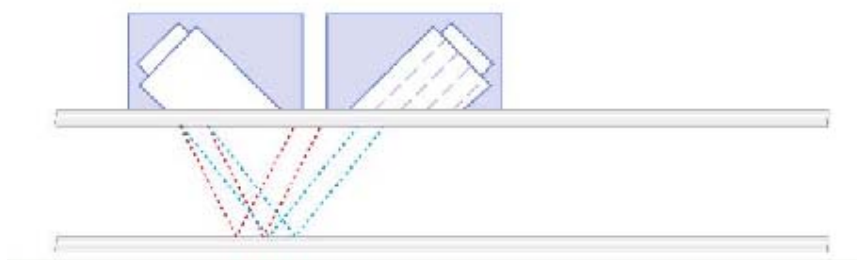


Figura 4.5 – Medição por tempo de trânsito

A precisão geralmente varia com o tamanho do medidor conforme especificado no estudo de caso.

4.1.5 INSTALAÇÃO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Outros fenômenos que poderiam afetar as perdas de carga foram investigados primeiramente e concluiu-se que estes não estavam correlacionadas aos efeitos reclamados, entre eles:

- Ar na linha de sucção
- Arranjo hidrodinâmico da sucção ou de recalque
- Desgaste dos componentes dos equipamentos
- Dimensionamento dos equipamentos
- Escorvamento
- NPSH disponível
- Operação de válvulas
- Sentido de rotação do acionador
- Transientes hidráulicos
- Vazamentos
- Velocidade do acionador

4.1.6 CÁLCULO MANOMÉTRICO

A altura manométrica total pode ser calculada no projeto ou medida na instalação conforme metodologia abaixo:

► Projeto

A carga fornecida pela bomba será igual à soma do desnível geométrico com as perdas de carga totais do sistema.

$$H_t = h_g + h_f \quad (4.4)$$

► Operação

$$H_t = \left(\frac{P_f}{\gamma} + \frac{u_f^2}{2g} \right) - \left(\frac{P_s}{\gamma} + \frac{u_s^2}{2g} \right) \quad (4.5)$$

Quando não foi possível a instalação do vacuômetro na linha, a altura manométrica de sucção foi calculada e considerada no cálculo manométrico.

Para as perdas localizadas foi adotado o método do comprimento equivalente que consiste em fixar o valor do comprimento reto do tubo que reproduziria nas mesmas condições de fluxo a mesma perda de carga que o acessório em questão. Alguns dos valores de conexões estão na tabela 4.1:

Tabela 4.1 – Comprimento equivalente de acessórios e conexões

PERDAS DE CARGAS LOCALIZADAS (EM METROS) - TABELA DE Leq					
D mm	VÁLVULA Borboleta	VÁLVULA Retenção	CURVA 45°	CURVA 90°	TÊ Saída lateral
25	1,3	0,8	0,1	0,1	0,3
50	2,4	1,9	0,2	0,2	0,7
100	4,6	4,8	0,4	0,6	1,7
150	7,1	8,3	0,7	1,1	2,9
200	8,2	12,1	1,1	1,6	4,2
250	10,7	16,4	1,4	2,1	5,7
300	19,5	20,9	1,8	2,7	7,3

4.1.7 MEMORIAL DE PERDAS DE CARGA

Para todo caso estudado foi elaborado uma planilha conforme tabela 4.2, em Excel, e notas explicativas abaixo de aplicação geral. No caso específico é transcrito somente as últimas linhas com duas simulações dos valores da rugosidade equivalente, e resumo dos cálculos, devido contrato de confidencialidade assinado entre o prestador de serviços (responsável pelo estudo) e a contratante (cliente industrial ou de saneamento).

Tabela 4.2: Memorial de Perdas de carga

COLUMNA 1	COLUMNA 2	COLUMNA 3	COLUMNA 4	COLUMNA 5	COLUMNA 6	COLUMNA 7	COLUMNA 8	COLUMNA 9	COLUMNA 10	COLUMNA 11	COLUMNA 12	COLUMNA 13	COLUMNA 14	COLUMNA 15	COLUMNA 16
DESC.	COMPLEMENTO	QT	D	D	Leq	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
		un	m	mm		m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TUBO		1	0,300	300	1000,0	1000,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	15,8
CURVA	90	10	0,300	300	0,6	6,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	0,1
CURVA	45	5	0,300	300	0,4	2,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	0,0
TÊ 90	SL	5	0,300	300	4,5	22,5	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	0,4
VÁLVULA	BORBOLETA	2	0,300	300	4,6	9,2	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	0,1
VÁLVULA	RETENÇÃO	2	0,300	300	4,8	9,6	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	0,1
OUTROS	REDUÇÃO	5	0,300	300	1,0	5,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	0,1
	TOTAL		0,300	300		1054,3	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,0150	0,000050	0,0105	16,4
TUBO		1	0,300	300	1000,0	1000,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	22,6
CURVA	90	10	0,300	300	0,6	6,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	0,1
CURVA	45	5	0,300	300	0,4	2,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	0,0
TÊ 90	SL	5	0,300	300	4,5	22,5	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	0,5
VÁLVULA	BORBOLETA	2	0,300	300	4,6	9,2	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	0,2
VÁLVULA	RETENÇÃO	2	0,300	300	4,8	9,6	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	0,2
OUTROS	REDUÇÃO	5	0,300	300	1,0	5,0	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	0,1
	TOTAL		0,300	300		1054,3	0,0707	750	0,2083	2,9	875884	0,1000	0,000333	0,0153	23,8

Coluna 1 – Descrição dos componentes da linha.

Coluna 2 – Descrição complementar do tipo do acessório ou conexão.

Coluna 3 – Quantidade total de acessórios ou conexões na linha.

Coluna 4 – Diâmetro do tubo, acessórios e conexões. Caso o sistema apresente variações no diâmetro ao longo do trecho, é adotado o diâmetro equivalente, ou seja, aquele capaz de conduzir a mesma vazão sob a mesma perda de carga.

Coluna 5 – Diâmetro em mm

Coluna 6 – Comprimento equivalente unitário dos acessórios e conexões.

Coluna 7 – Comprimento equivalente total dos acessórios e conexões.

Coluna 8 – Área interna do tubo, acessórios e conexões.

Coluna 9 – Vazão de água no sistema.

Coluna 10 – Vazão de água no sistema em metros cúbicos por segundo.

Coluna 11 – Velocidade da água no sistema.

Coluna 12 – Número de Reynolds.

Coluna 13 – Rugosidade equivalente do tubo e dos comprimentos equivalentes.

Coluna 14 – Rugosidade relativa do tubo e dos comprimentos equivalentes.

Coluna 15 – Fator de atrito calculado pela fórmula de Swamee-Jain(1976).

Coluna 16 – Perda de carga total dos comprimentos equivalentes.

As três primeiras colunas serão omitidas nos estudos individualizados. Como a descrição dos acessórios e conexões não estão registrados no resumo do memorial é fornecida a relação comprimento real do tubo pelo equivalente total (L/L_{eqt}) para indicar a participação das perdas localizadas no sistema analisado.

No exemplo da tabela 4.2, h_{fl} é igual a 5,1%. Para todos os casos estudados os comentários referem-se exclusivamente aos valores das perdas de carga total visto que a altura geométrica apesar de variável para cada situação não impacta na análise.

4.1.8 INTERVALO DE PRECISÃO DOS VALORES k

Além das medições de campo de vazão e pressão constantes dos memoriais, com respectivas precisões dos instrumentos, o intervalo para o valor de k considera também uma possível variação de 20% nos comprimentos equivalentes das perdas de carga localizadas. Estas variações são tomadas em seus limites superiores e o cálculo executado conforme abaixo:

$$IP = [(\Delta h_{fl})^2 + (\Delta Q)^2 + (\Delta P)^2]^{1/2} \quad (4.6)$$

IP	Intervalo de precisão de k
Δh_{fl}	Intervalo de precisão das perdas de carga localizadas
ΔQ	Intervalo de precisão da vazão
ΔP	Intervalo de precisão da pressão

4.2 CASO 1

PROJETO	
Ht (mca)	30,2
Q (m³/h)	400,0
h _{fl} (%)	9,2 (73 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,0200
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	39,8
Q (m³/h)	385,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	60
Precisão (%)	1,0
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	200
Faixa (m³/h)	50 - 1250
Precisão (%)	0,5
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,1100 mm IP 13,5%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 55 para 90 kw (X Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0200	Ht = 30,2 mca Q = 400 m³/h Pc = 51,1 kw
Para k = 0,1100	Ht = 41,0 mca Q = 400 m³/h Pc = 69,8 kw

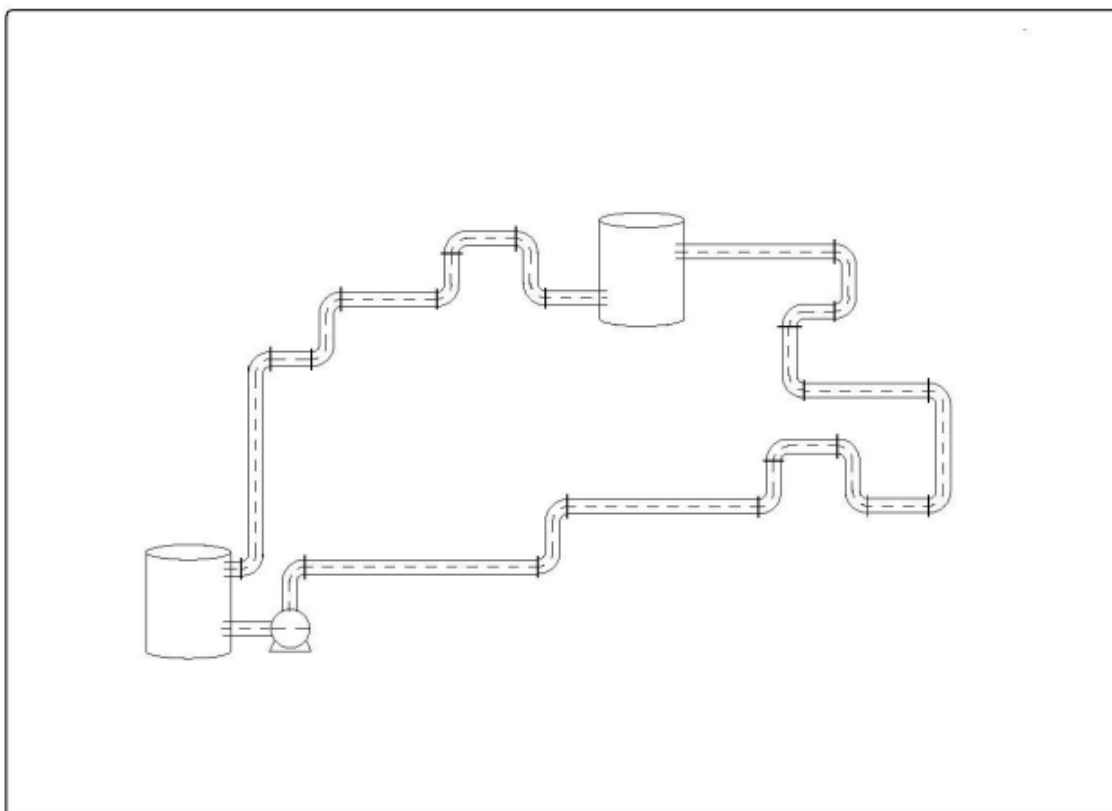


Figura 4.6 – Instalação – Caso 1

Tabela 4.3 – Memorial de perdas de carga – Caso 1

CASO 1	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
aço comercial	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,200	200	790,0	0,03140	400	0,1111	3,5	700707	0,0200	0,00010	0,0120	30,2
TOTAL	0,200	200	790,0	0,03140	385	0,1069	3,4	674431	0,1100	0,00055	0,0171	39,8

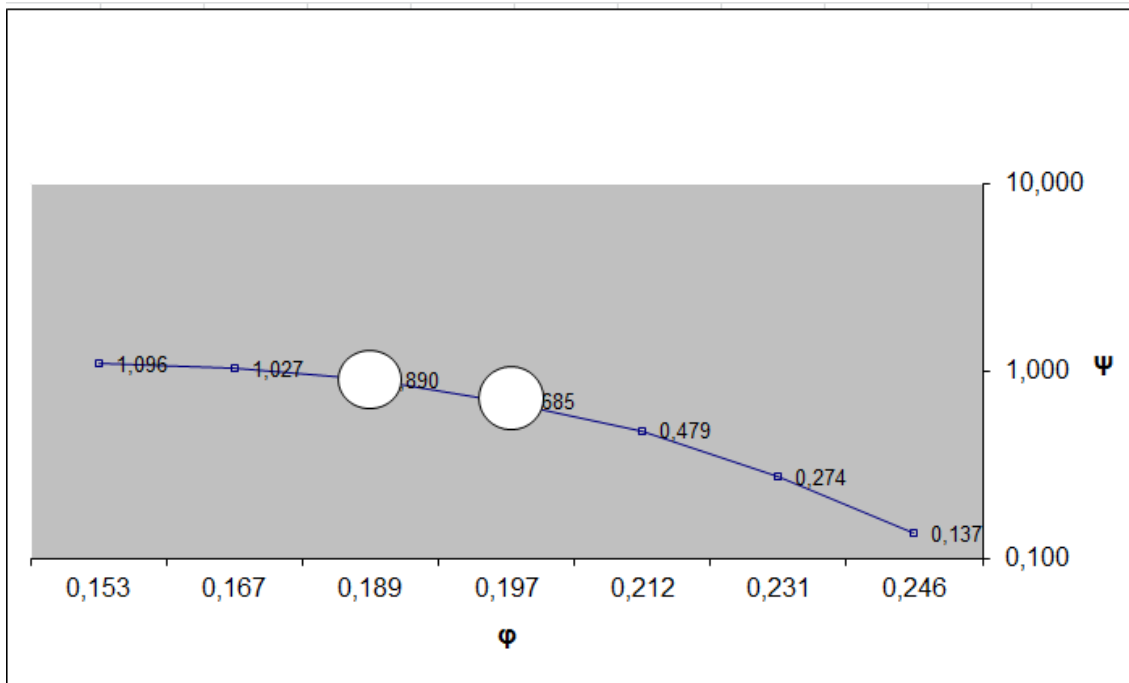


Figura 4.7 – Curva característica adimensional – Caso 1

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.3 CASO 2

PROJETO	
Ht (mca)	109,7
Q (m³/h)	315,0
h _{fl} (%)	9,8 (66 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,1500
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	97,7
Q (m³/h)	320,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	250
Precisão (%)	0,25
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	150
Faixa (m³/h)	50 - 1250
Precisão (%)	0,5
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor abaixo da calculada e vazão da bomba acima da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0800 mm IP 12,1%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do diâmetro do rotor da bomba centrífuga e serviços (desmontagem, tornearia, balanceamento, montagem)	
Insatisfação do usuário em ter investido em um motor superdimensionado para a aplicação de 150 para 132 kw(II Polos) e proteção respectiva.	
Para k = 0,1500	Ht = 109,7 mca Q = 315,0 m³/h Pc = 136,5 kw
Para k = 0,0800	Ht = 96,0 mca Q = 315,0 m³/h Pc = 119,4 kw

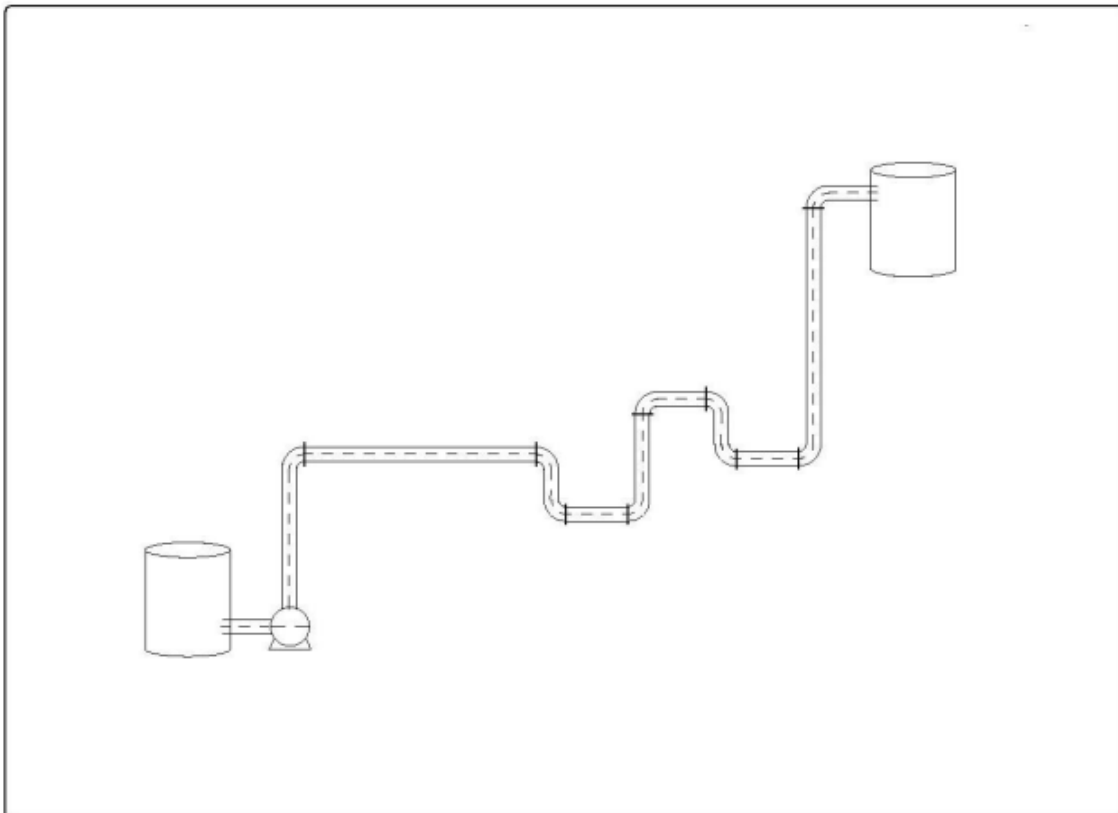


Figura 4.8 – Instalação – Caso 2

Tabela 4.4 – Memorial de perdas de carga – Caso 2

CASO 2	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
aço comercial	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,150	150	670,0	0,017663	315	0,0875	5,0	735742	0,1500	0,00100	0,0196	109,7
TOTAL	0,150	150	670,0	0,017663	320	0,0889	5,0	747421	0,0800	0,00053	0,0169	97,7

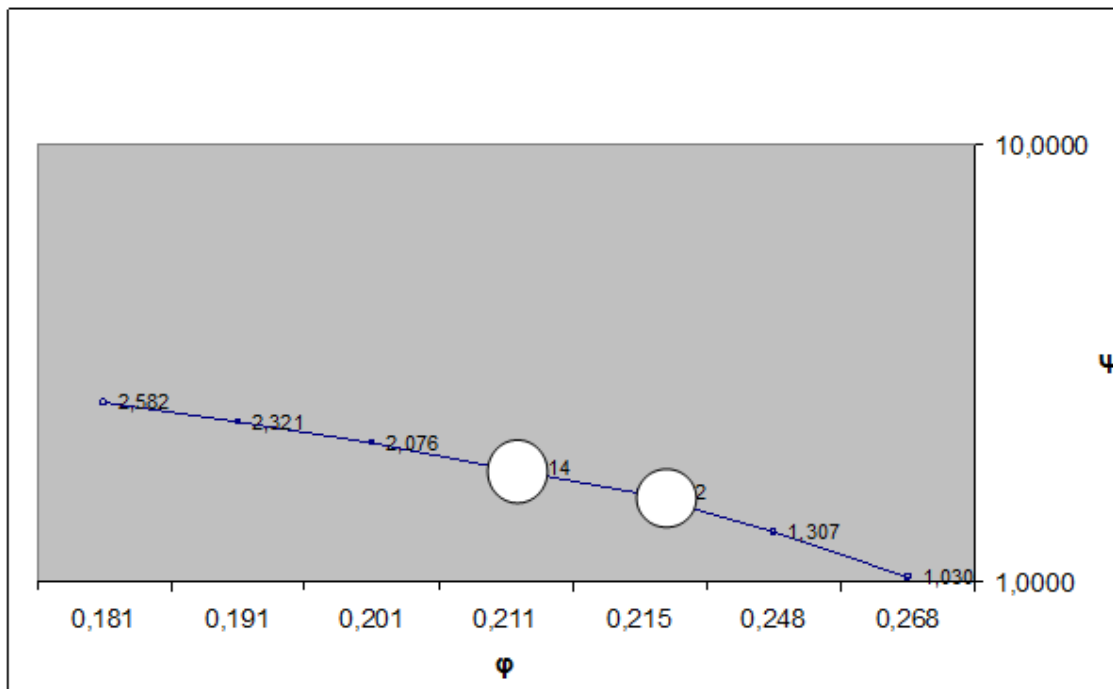


Figura 4.9 – Curva característica adimensional – Caso 2

O círculo á esquerda da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da direita o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do rotor da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela abaixo da atual.

4.4 CASO 3

PROJETO	
Ht (mca)	55,0
Q (m³/h)	210,0
h _{fl} (%)	6,8 (6 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,1500
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	46,2
Q (m³/h)	215,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	100
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	100
Faixa (m³/h)	10 - 300
Precisão (%)	0,5
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor abaixo da calculada e vazão da bomba acima da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0600 mm IP 1,6%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do diâmetro do rotor da bomba centrífuga e serviços (desmontagem, tornearia, balanceamento, montagem) Insatisfação do usuário em ter investido em um motor superdimensionado para a aplicação de 55 para 45 kw(II Polos) e proteção respectiva.	
Para k = 0,1500	Ht = 55,0 mca Q = 210,0 m³/h Pc = 43,7 kw
Para k = 0,0600	Ht = 45,1 mca Q = 210,0 m³/h Pc = 35,8 kw

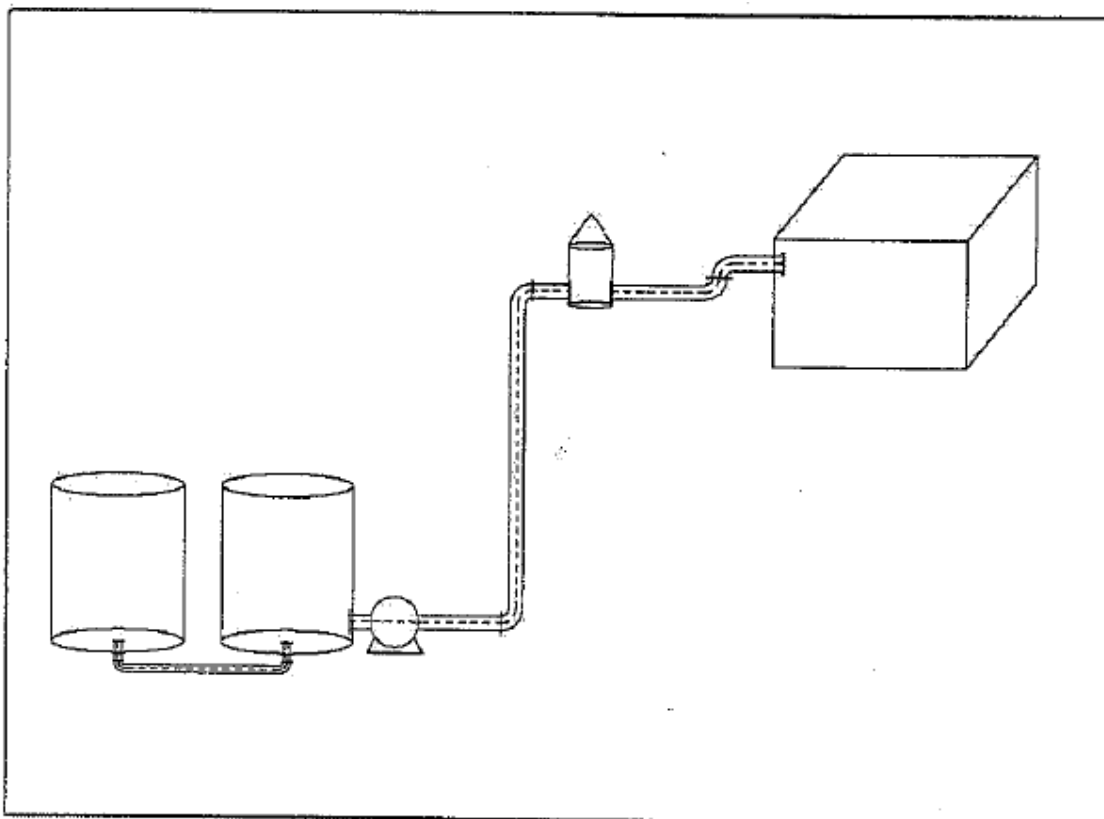


Figura 4.10 – Instalação – Caso 3

Tabela 4.5 – Memorial de perdas de carga – Caso 3

CASO 3	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo aço comercial	D m	D mm	Leqt m	S m ²	Q m ³ /h	Q m ³ /s	u m/s	Re	k mm	ks	f	hf m
TOTAL	0,100	100	90,0	0,00785	210	0,0583	7,4	735742	0,1500	0,00150	0,0217	55,0
TOTAL	0,100	100	90,0	0,00785	215	0,0597	7,6	753260	0,0600	0,00060	0,0174	46,2

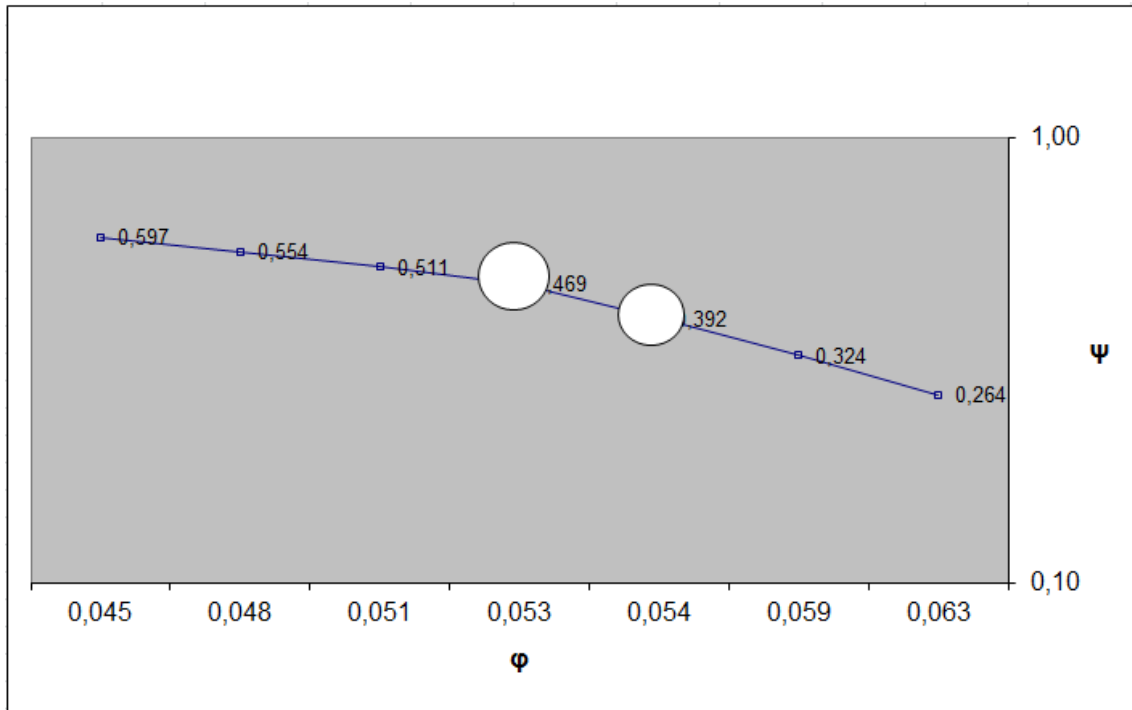


Figura 4.11 – Curva característica adimensional – Caso 3

O círculo á esquerda da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da direita o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do rotor da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela abaixo da atual.

4.5 CASO 4

PROJETO	
Ht (mca)	103,9
Q (m³/h)	340,0
h _{fl} (%)	8,9 (49 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,1500
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	92,2
Q (m³/h)	350,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	250
Precisão (%)	0,25
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	150
Faixa (m³/h)	25 - 650
Precisão (%)	0,5
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor abaixo da calculada e vazão da bomba acima da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0700 mm IP 9,1%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do diâmetro do rotor da bomba centrífuga e serviços (desmontagem, tornearia, balanceamento, montagem)	
Insatisfação do usuário em ter investido em um motor superdimensionado para a aplicação de 132 para 110 kw(VI Polos) e proteção respectiva.	
Para k = 0,1500	Ht = 103,9 mca Q = 340,0 m³/h Pc = 116,0 kw
Para k = 0,0700	Ht = 89,6 mca Q = 340,0 m³/h Pc = 100,0 kw

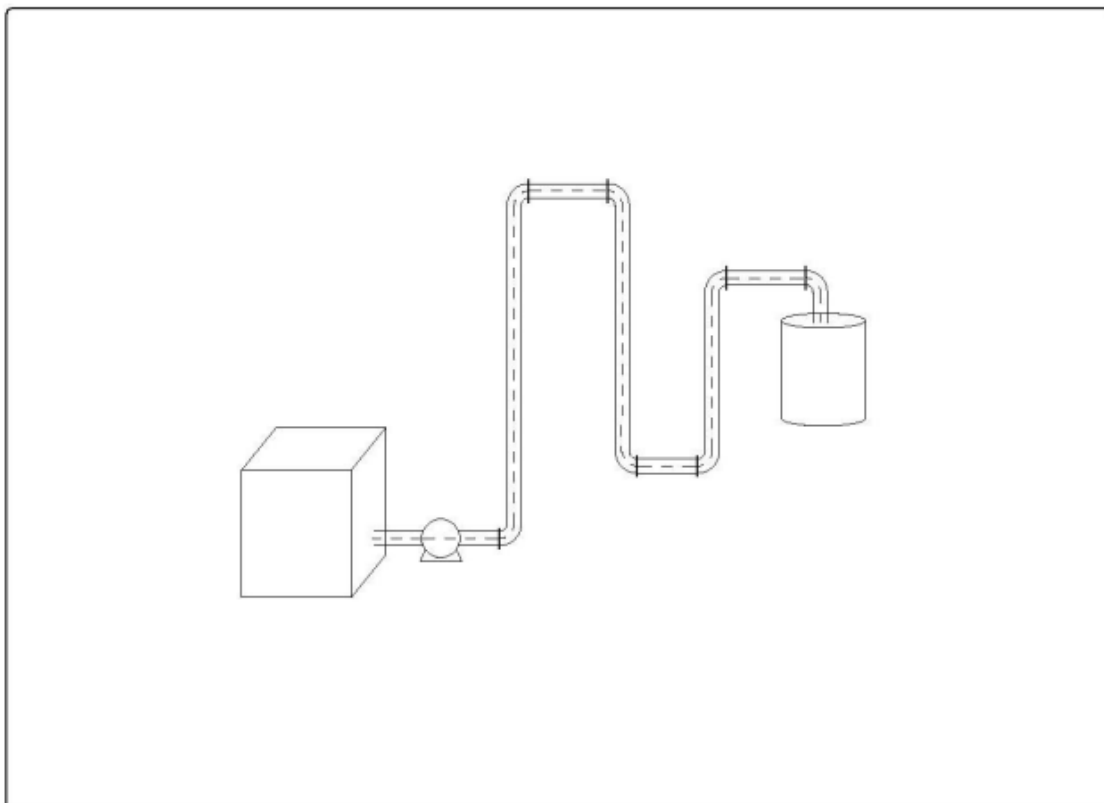


Figura 4.12 – Instalação – Caso 4

Tabela 4.6 – Memorial de perdas de carga – Caso 4

CASO 4	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
aço comercial	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,150	150	545,0	0,0176625	340	0,0944	5,3	794135	0,1500	0,00100	0,0196	103,9
TOTAL	0,150	150	545,0	0,0176625	350	0,0972	5,5	817492	0,0700	0,00047	0,0164	92,2

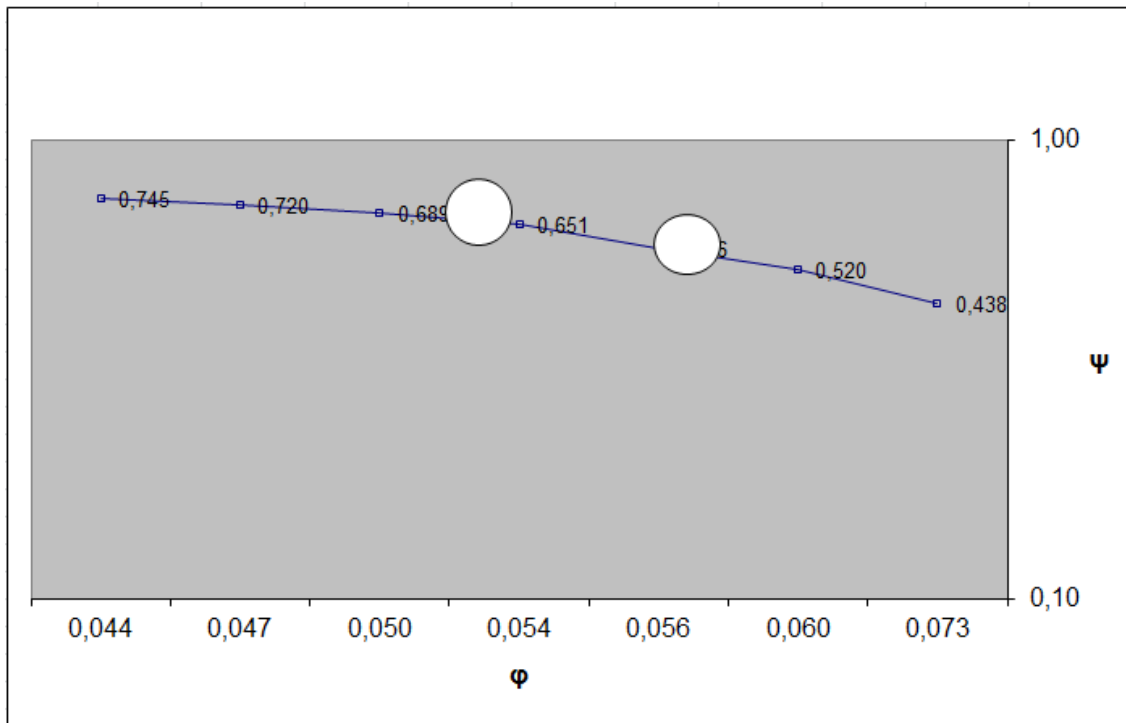


Figura 4.13 – Curva característica adimensional – Caso 4

O círculo á esquerda da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da direita o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do rotor da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela abaixo da atual.

4.6 CASO 5

PROJETO	
Ht (mca)	22,5
Q (m³/h)	855,0
h _{fl} (%)	11,7 (48 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,0200
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	32,0
Q (m³/h)	850,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	40
Precisão (%)	1,0
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	250
Faixa (m³/h)	50 - 1750
Precisão (%)	0,25
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,1200 mm IP 8,9%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 90 para 132 kw(IV Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0200	Ht = 22,5 mca Q = 855,0 m³/h Pc = 78,2 kw
Para k = 0,1200	Ht = 32,2 mca Q = 855,0 m³/h Pc = 112,0 kw

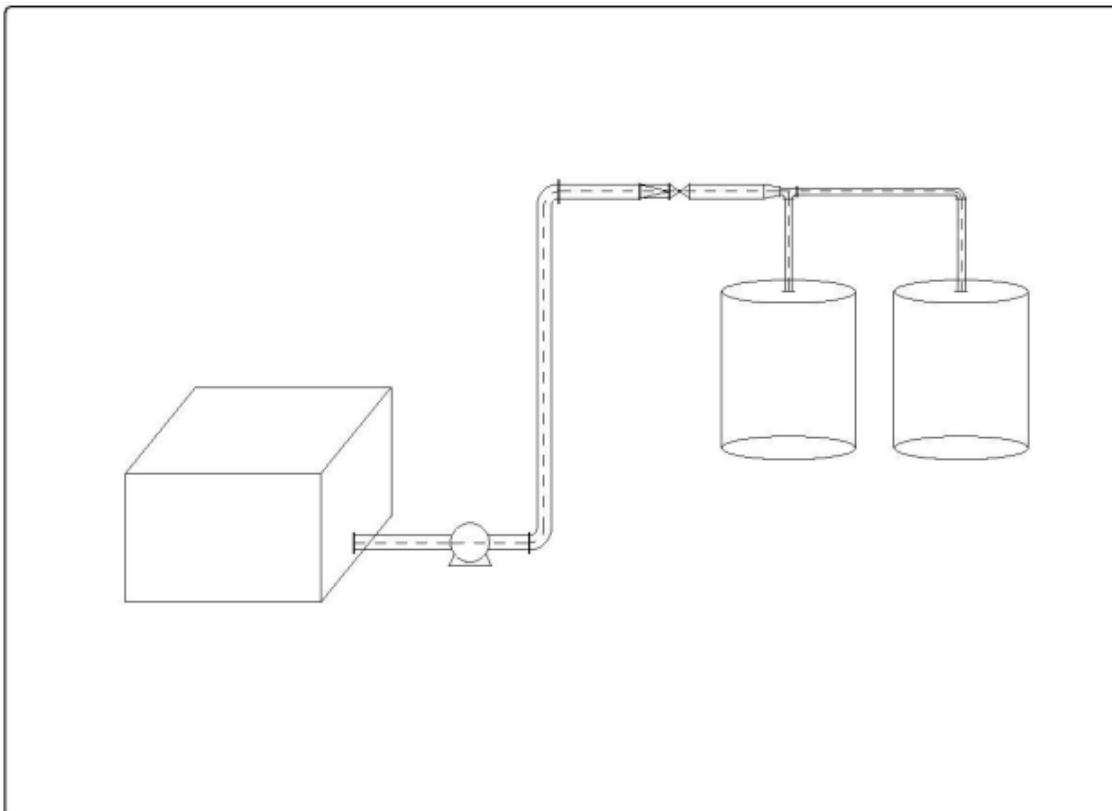


Figura 4.14 – Instalação – Caso 5

Tabela 4.7 – Memorial de perdas de carga – Caso 5

CASO 5	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo aço comercial	D m	D mm	Leqt m	S m ²	Q m ³ /h	Q m ³ /s	u m/s	Re	k mm	ks	f	hf m
TOTAL	0,250	250	410,0	0,04906	855	0,2375	4,8	1198209	0,0200	0,00008	0,0115	22,5
TOTAL	0,250	250	410,0	0,04906	850	0,2361	4,8	1191202	0,1200	0,00048	0,0165	32,0

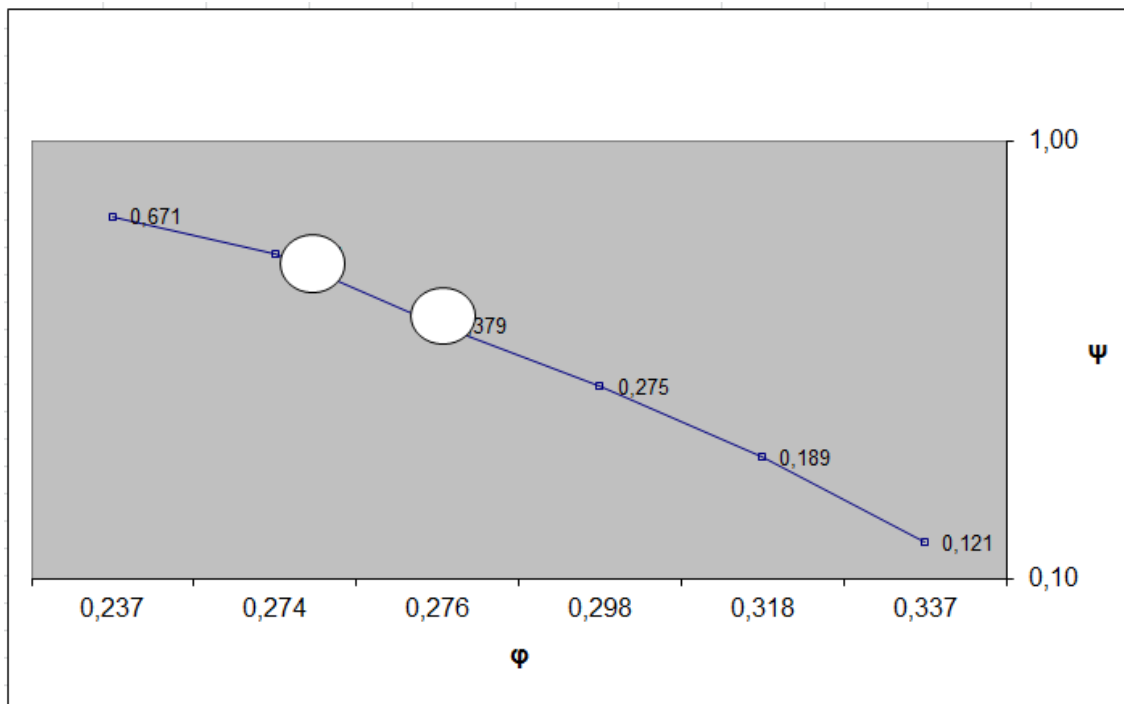


Figura 4.15 – Curva característica adimensional – Caso 5

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.7 CASO 6

PROJETO	
Ht (mca)	42,7
Q (m³/h)	46,0
h _{fl} (%)	6,7 (35 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,0200
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	52,8
Q (m³/h)	42,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	60
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	75
Faixa (m³/h)	5 - 150
Precisão (%)	0,5
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,1100 mm IP 6,5%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 9,2 para 15 kw(VI Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0200	Ht = 42,7 mca Q = 46,0 m³/h Pc = 7,9 kw
Para k = 0,1100	Ht = 57,8 mca Q = 46,0 m³/h Pc = 10,7 kw

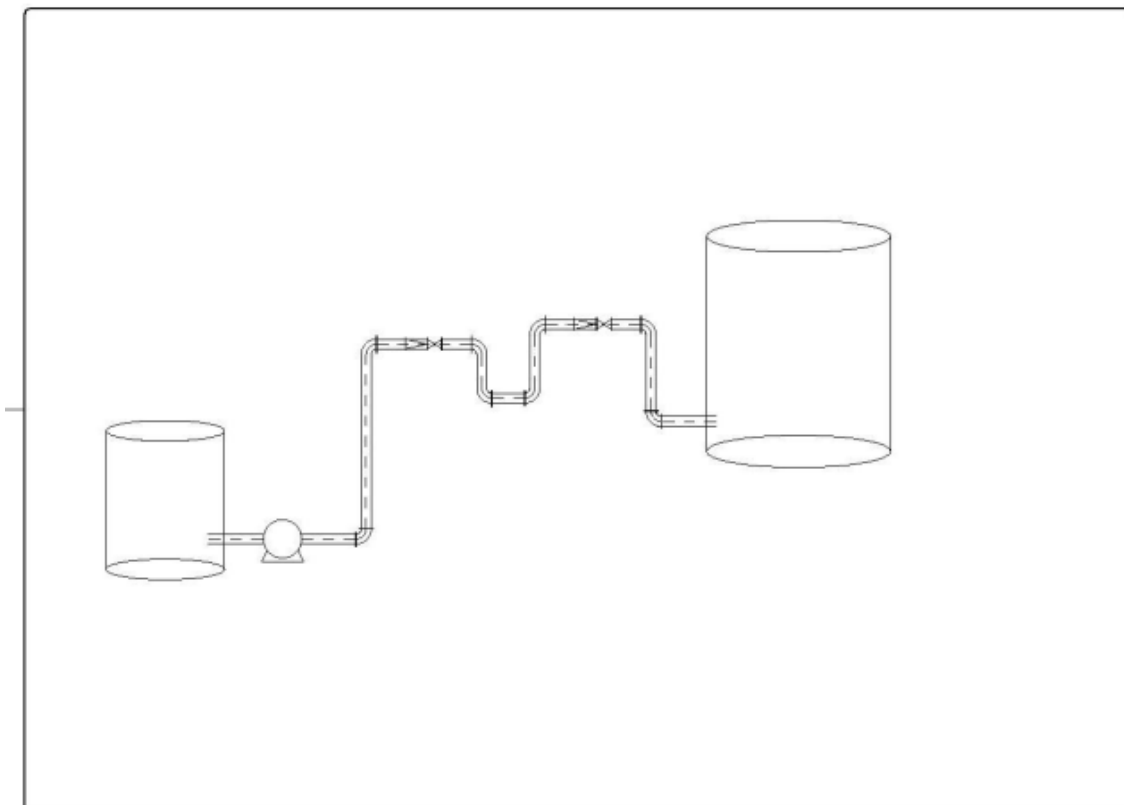


Figura 4.16 – Instalação – Caso 6

Tabela 4.8 – Memorial de perdas de carga – Caso 6

CASO 6	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
aço comercial	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,075	75	515,0	0,00442	46	0,0128	2,9	214883	0,0200	0,00027	0,0146	42,7
TOTAL	0,075	75	515,0	0,00442	42	0,0117	2,6	196198	0,1100	0,00147	0,0216	52,8

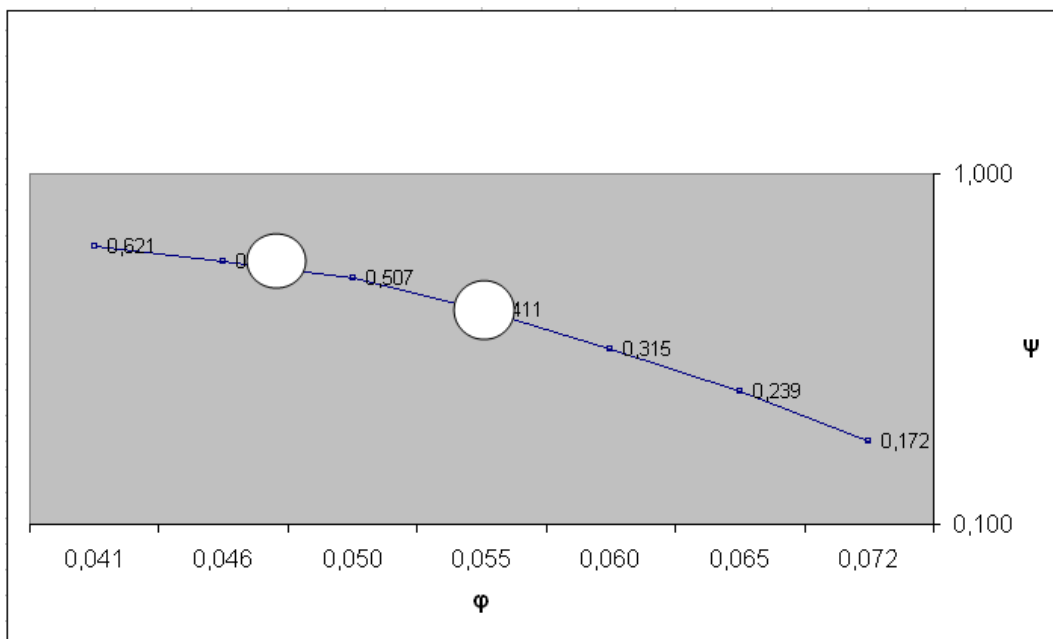


Figura 4.17 – Curva característica adimensional – Caso 6

O círculo à direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.8 CASO 7

PROJETO	
Ht (mca)	57,7
Q (m³/h)	31,0
h _{fl} (%)	4,6 (9 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,0200
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	74,4
Q (m³/h)	29,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	100
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	50
Faixa (m³/h)	2,5 - 75
Precisão (%)	1,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,1000 mm IP 1,7%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 7,5 para 9,2 kw(IV Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0200	Ht = 57,7 mca Q = 31,0 m³/h Pc = 5,7 kw
Para k = 0,1000	Ht = 79,5 mca Q = 31,0 m³/h Pc = 7,9 kw

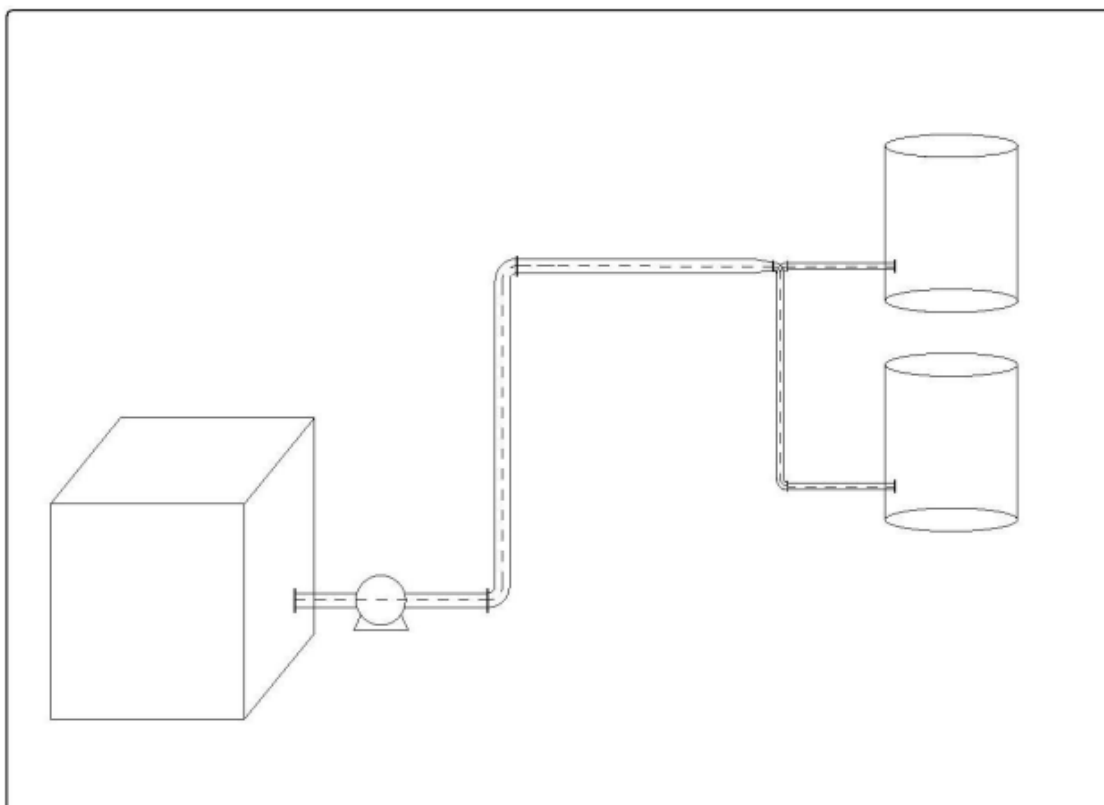


Figura 4.18 – Instalação – Caso 7

Tabela 4.9 – Memorial de perdas de carga – Caso 7

CASO 7	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
aço comercial	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,050	50	185,0	0,0019625	31	0,0086	4,4	217219	0,0200	0,00040	0,0159	57,7
TOTAL	0,050	50	185,0	0,0019625	29	0,0081	4,1	203205	0,1000	0,00200	0,0234	74,4

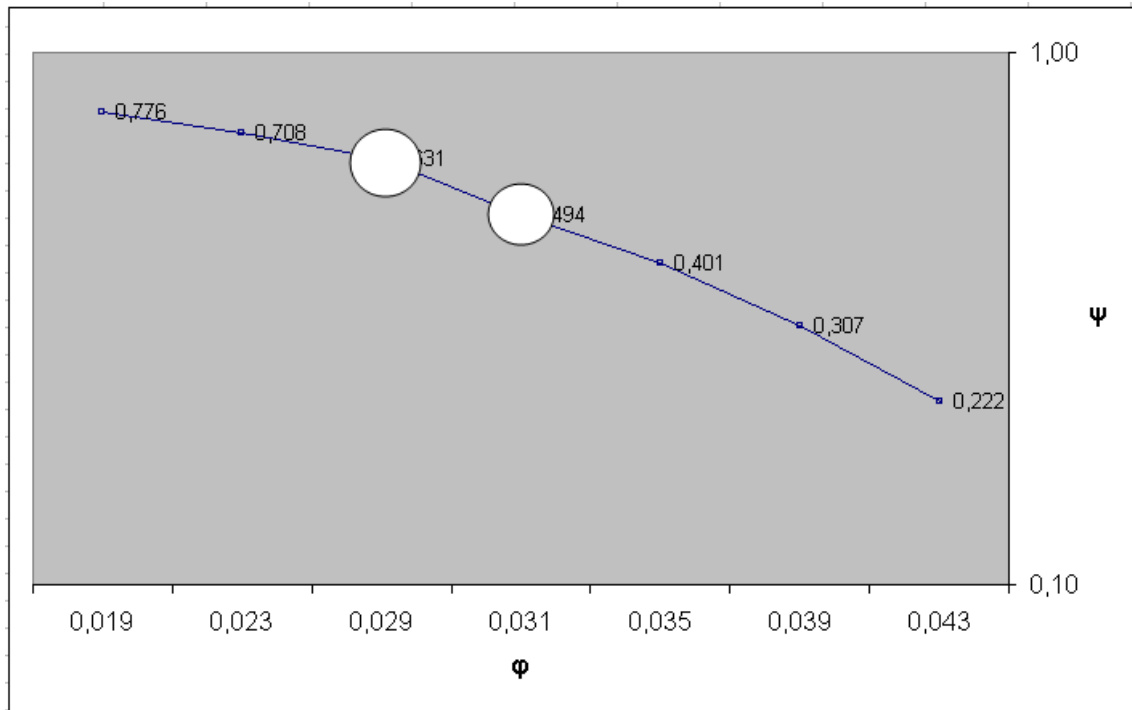


Figura 4.19 – Curva característica adimensional – Caso 7

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.9 CASO 8

PROJETO	
Ht (mca)	34,7
Q (m³/h)	235,0
h _{fl} (%)	9,8 (58 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Comercial
k SELECIONADO (mm)	0,0200
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	45,3
Q (m³/h)	224,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	60
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro	150
Faixa (m³/h)	25 - 650
Precisão (%)	0,5
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,1300 mm IP 10,6%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 30 para 45 kw(VIII Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0200	Ht = 34,7 mca Q = 235,0 m³/h Pc = 27,8 kw
Para k = 0,1300	Ht = 49,5 mca Q = 235,0 m³/h Pc = 39,6 kw

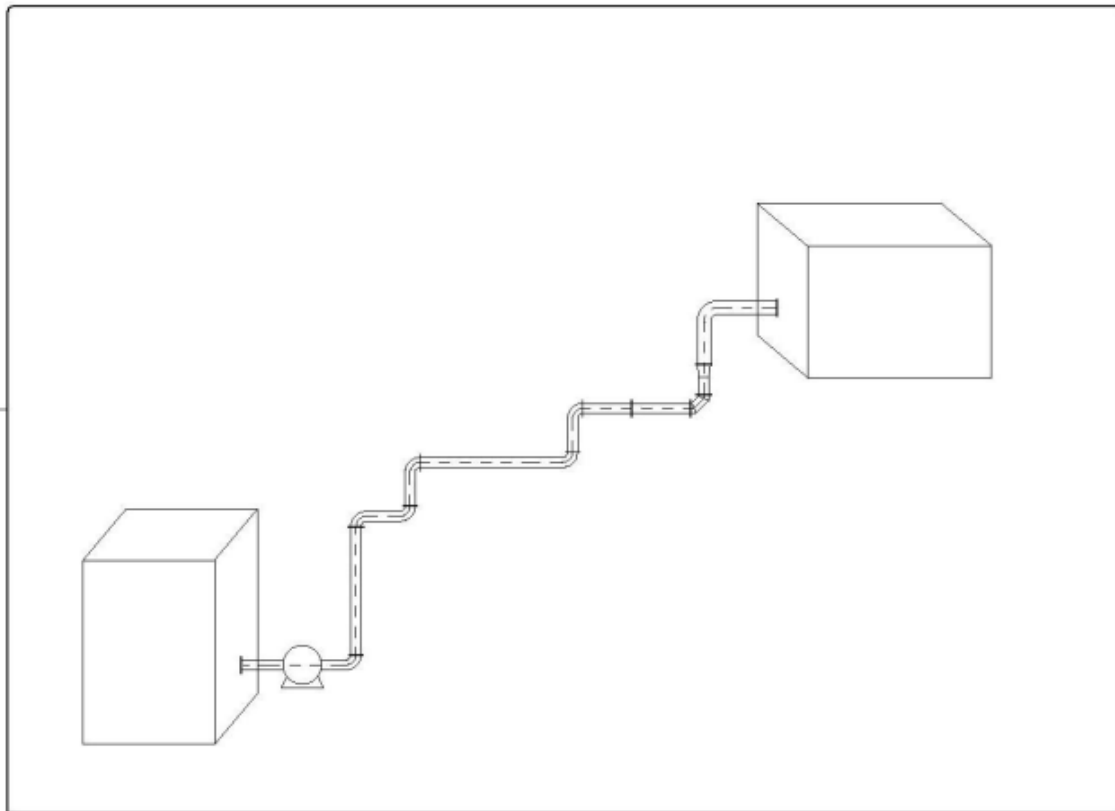


Figura 4.20 – Instalação – Caso 8

Tabela 4.10 – Memorial de perdas de carga – Caso 8

CASO 8	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
aço comercial	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,150	150	590,0	0,0176625	235	0,0653	3,7	548887	0,0200	0,00013	0,0127	34,7
TOTAL	0,150	150	590,0	0,0176625	224	0,0622	3,5	523195	0,1100	0,00073	0,0182	45,3

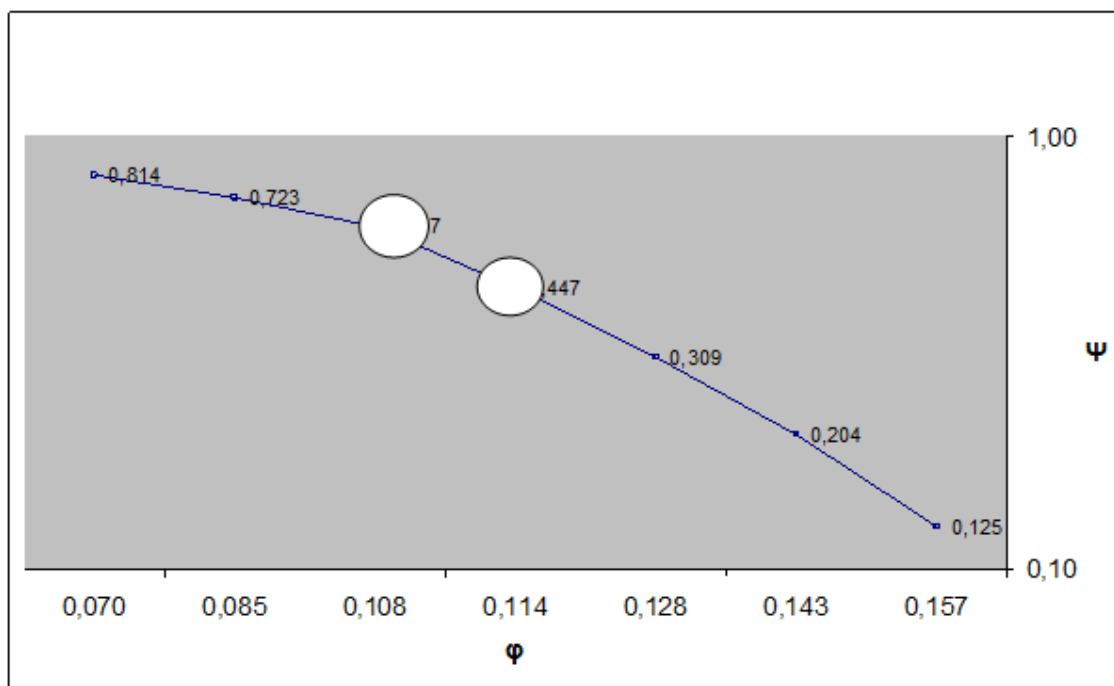


Figura 4.21 – Curva característica adimensional – Caso 8

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.10 CASO 9

PROJETO	
Ht (mca)	23,7
Q (m³/h)	1.000,0
h _{fl} (%)	9,4 (86 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Inox
k SELECIONADO (mm)	0,0100
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	31,2
Q (m³/h)	988,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	40
Precisão (%)	1,0
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	300
Faixa (m³/h)	75 - 2500
Precisão (%)	0,25
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0500 mm IP 16,0%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 90 para 132 kw(VI Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0100	Ht = 23,7mca Q = 1.000,0 m³/h Pc = 79,7 kw
Para k = 0,0500	Ht = 32,0 mca Q = 1.000,0 m³/h Pc = 107,6 kw

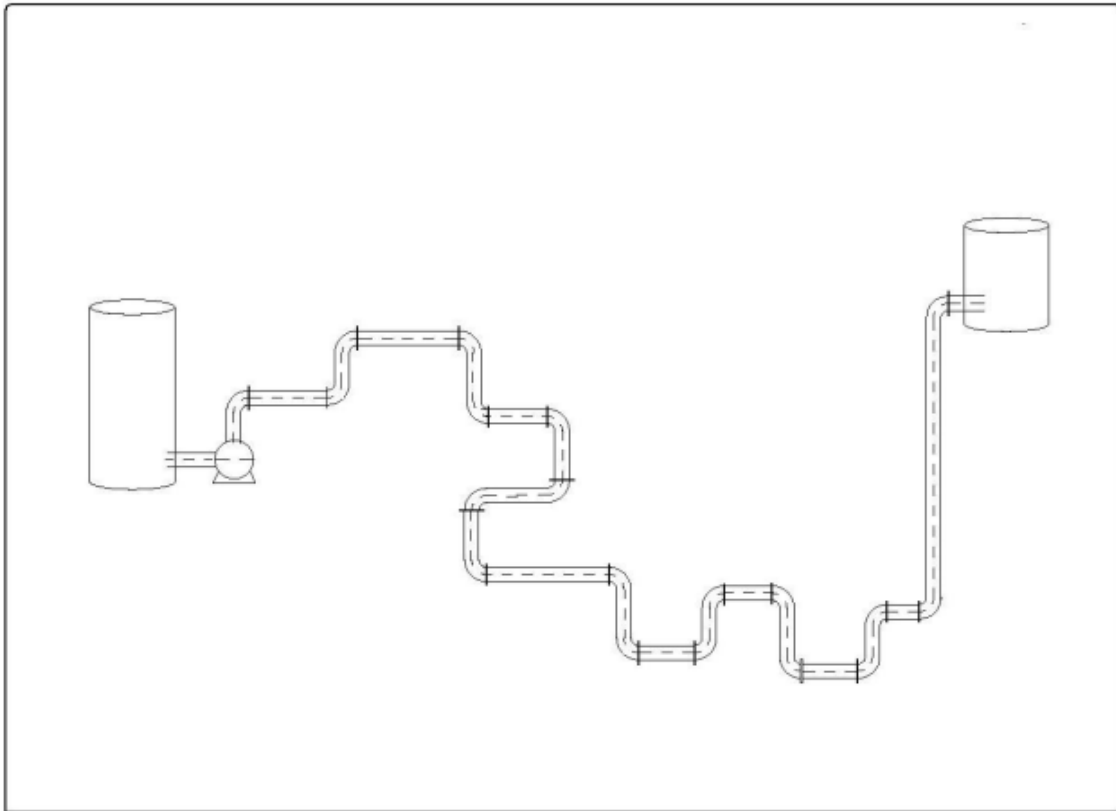


Figura 4.22 – Instalação - Caso 9

Tabela 4.11: Memorial de perdas de carga – Caso 9

CASO 9	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
Inox	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,300	300	920,0	0,07065	1000	0,2778	3,9	1167845	0,0100	0,00003	0,0098	23,7
TOTAL	0,300	300	920,0	0,07065	988	0,2744	3,9	1153831	0,0500	0,00017	0,0132	31,2

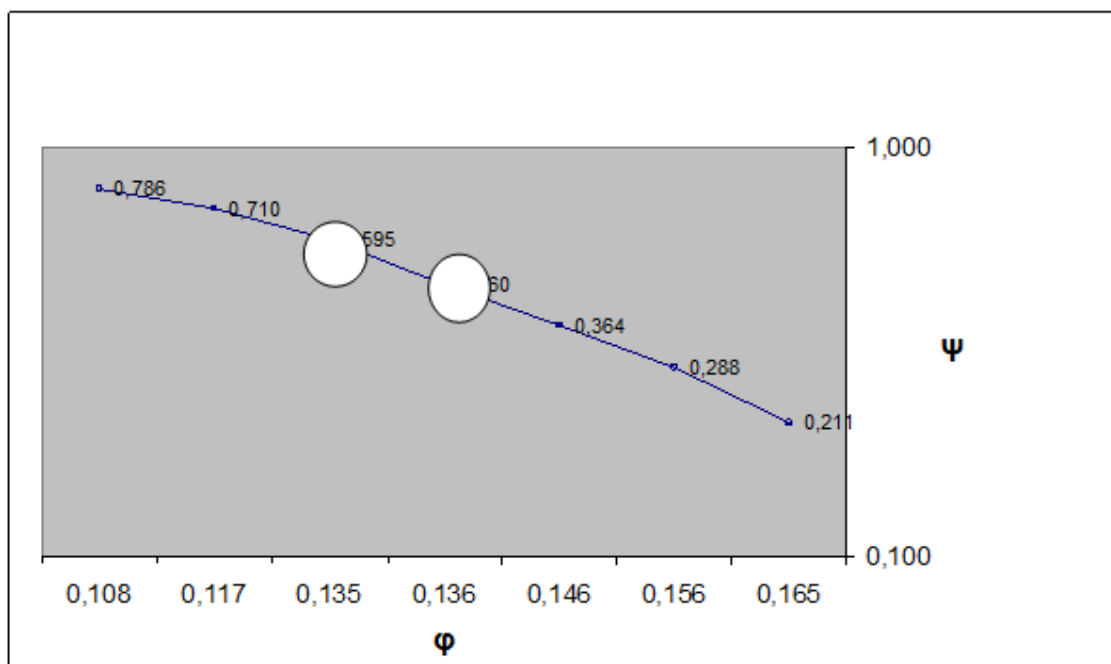


Figura 4.23 Curva característica adimensional – Caso 9

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.11 CASO 10

PROJETO	
Ht (mca)	48,2
Q (m³/h)	4,4
h _{fl} (%)	3,9 (9 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Inox
k SELECIONADO (mm)	0,0100
MEDIÇÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	57,3
Q (m³/h)	3,9
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	100
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	25
Faixa (m³/h)	0,5 - 25
Precisão (%)	1,0
NÃO CONFORMIDADE	
Vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0550 mm IP 1,8%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do diâmetro do rotor da bomba centrífuga e serviços (desmontagem, montagem) – Motor II Polos	
Para k = 0,0100	Ht = 48,2 mca Q = 4,4 m³/h Pc = 0,7 kw
Para k = 0,0550	Ht = 64,6 mca Q = 4,4 m³/h Pc = 0,9 kw

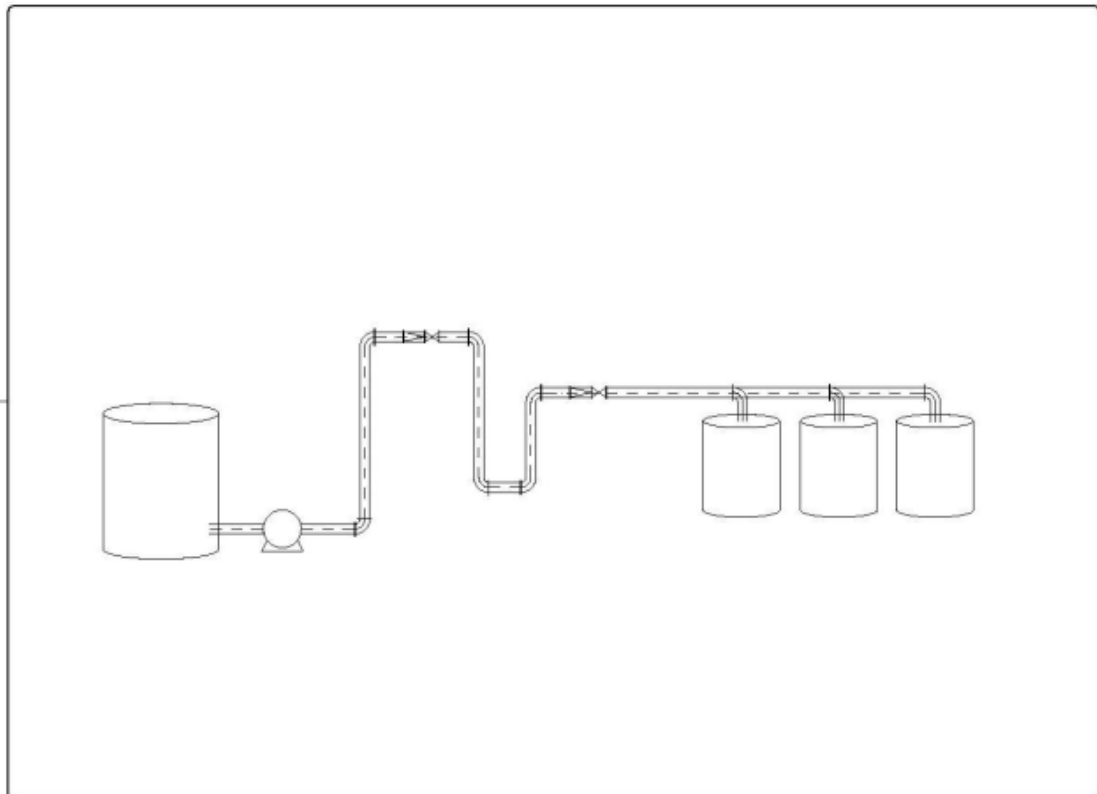


Figura 4.24 – Instalação – Caso 10

Tabela 4.12 – Memorial de perdas de carga – Caso 10

CASO 10	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
Inox	m	mm	m	m ²	m ³ /h	m ³ /s	m/s		mm			m
TOTAL	0,025	25	240,0	0,00049063	4,4	0,0012	2,5	61662	0,0100	0,00040	0,0159	48,2
TOTAL	0,025	25	240,0	0,00049063	3,9	0,0011	2,2	54655	0,0550	0,00220	0,0240	57,3

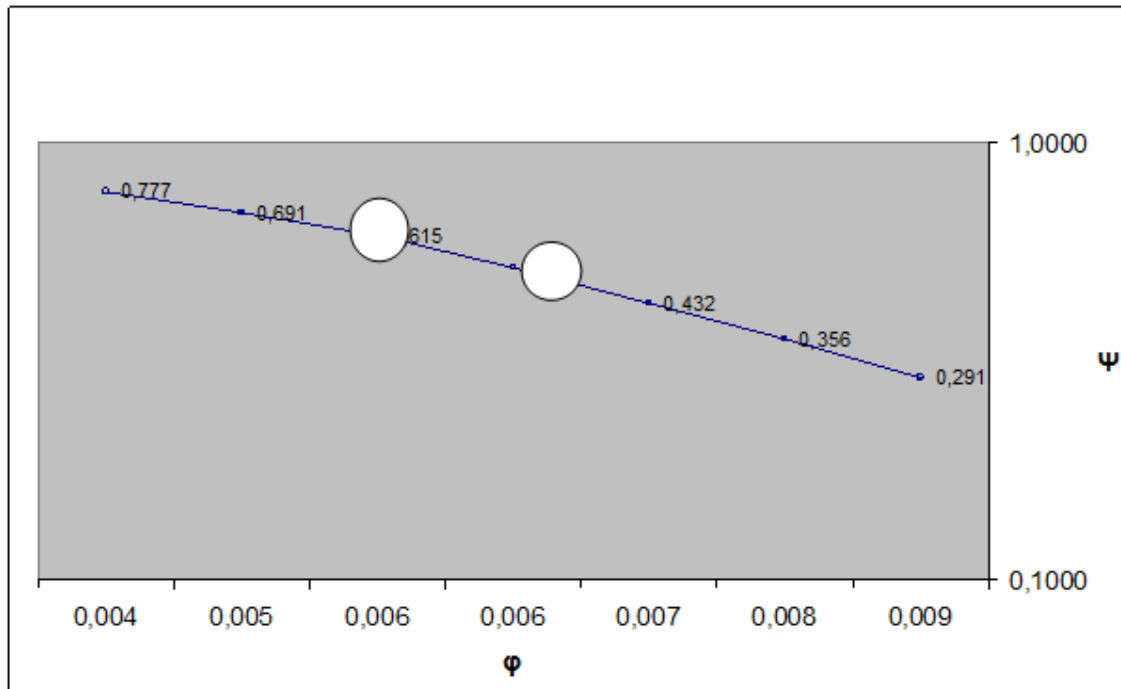


Figura 4.25 - Curva característica adimensional – Caso 10

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do rotor da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.12 CASO 11

PROJETO	
Ht (mca)	15,9
Q (m³/h)	510,0
h _{fl} (%)	8,5 (32 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Inox
k SELECIONADO (mm)	0,0020
MEDICÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	24,1
Q (m³/h)	470,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	40
Precisão (%)	1,0
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	200
Faixa (m³/h)	50 - 1250
Precisão (%)	0,25
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0500 mm IP 6,1%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 45 para 75 kw(VIII Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0020	Ht = 15,9 mca Q = 510,0 m³/h Pc = 35,1 kw
Para k = 0,0500	Ht = 26,2 mca Q = 510,0 m³/h Pc = 57,8 kw

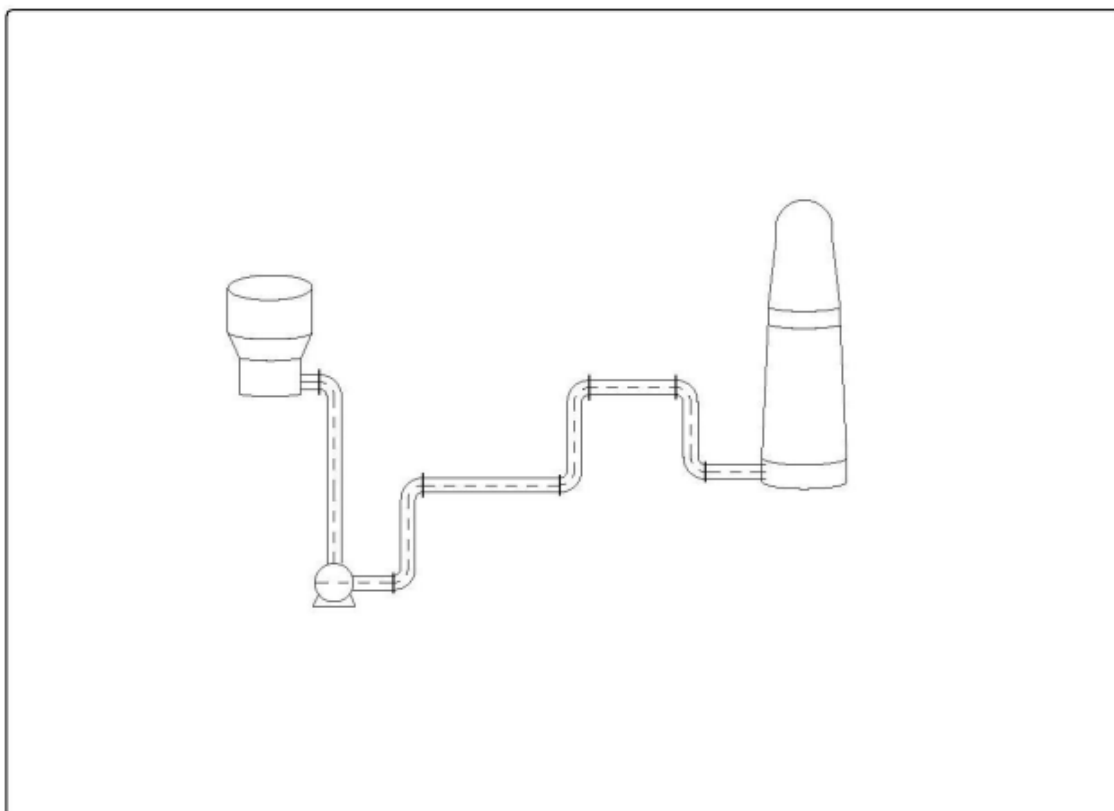


Figura 4.26 – Instalação – Caso 11

Tabela 4.13 – Memorial de perdas de carga – Caso 11

CASO 11	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
Inox	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,200	200	380,0	0,0314	510	0,1417	4,5	893401	0,0020	0,00001	0,0081	15,9
TOTAL	0,200	200	380,0	0,0314	470	0,1306	4,2	823331	0,0500	0,00025	0,0144	24,1

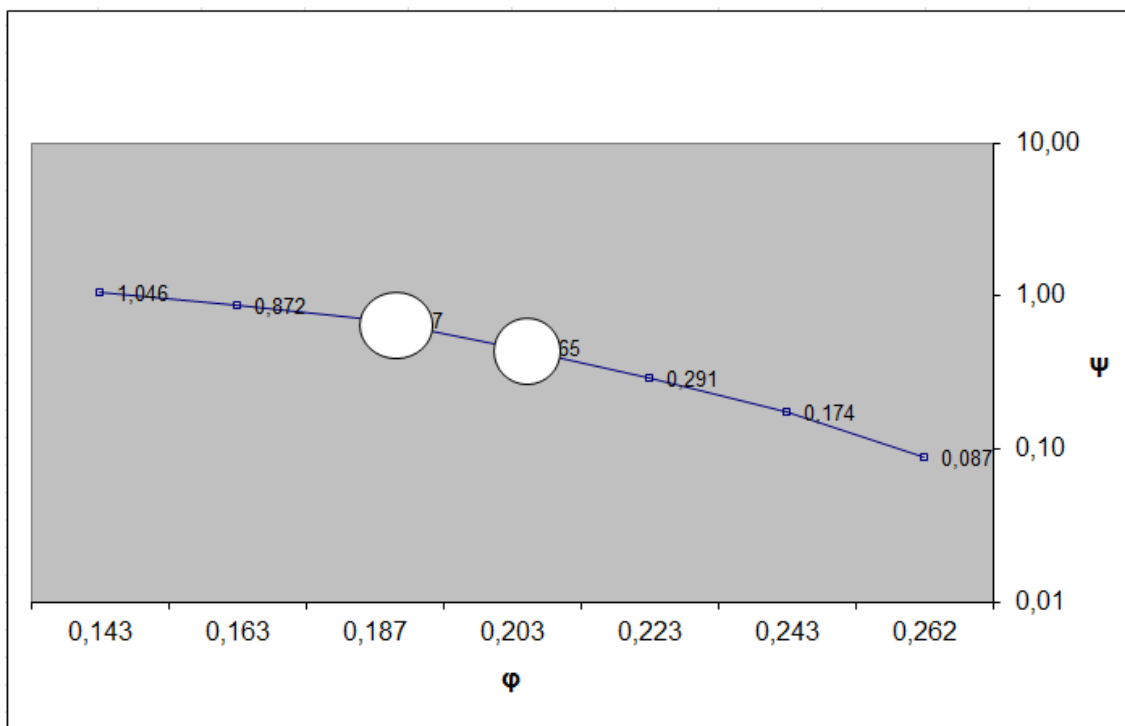


Figura 4.27 – Curva característica adimensional – Caso 11

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.13 CASO 12

PROJETO	
Ht (mca)	31,0
Q (m³/h)	44,0
h _{fl} (%)	5,6 (26 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Inox
k SELECIONADO (mm)	0,0100
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	38,7
Q (m³/h)	41,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	60
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	75
Faixa (m³/h)	5 - 150
Precisão (%)	0,5
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0550 mm IP 5,7%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 7,5 para 9,2 kw (IV Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento do diâmetro do rotor da bomba centrífuga e serviços (desmontagem, montagem)	
Para k = 0,0100	Ht = 31,0 mca Q = 44,0 m³/h Pc = 6,0 kw
Para k = 0,0550	Ht = 41,5 mca Q = 44,0 m³/h Pc = 8,0 kw

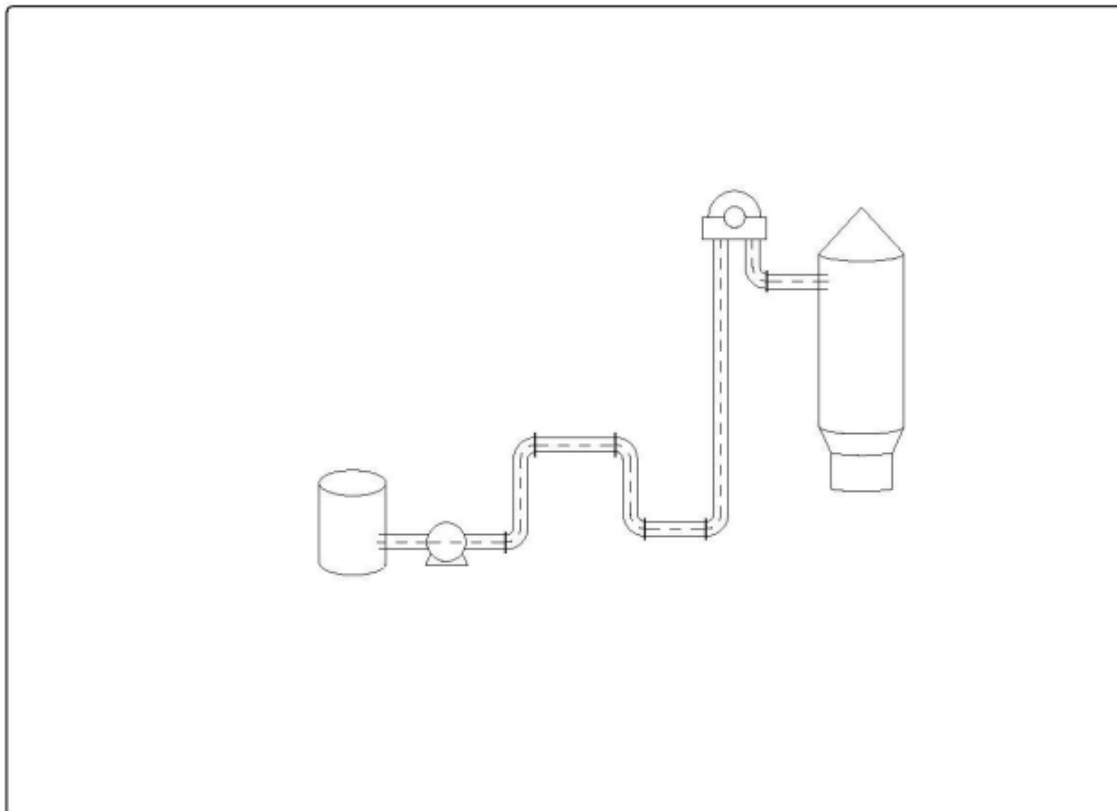


Figura 4.28 – Instalação – Caso 12

Tabela 4.14 – Memorial de perdas de carga – Caso 12

CASO 12	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
Inox	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,075	75	470,0	0,00441563	44	0,0122	2,8	205541	0,0100	0,00013	0,0127	31,0
TOTAL	0,075	75	470,0	0,00441563	41	0,0114	2,6	191527	0,0550	0,00073	0,0182	38,7

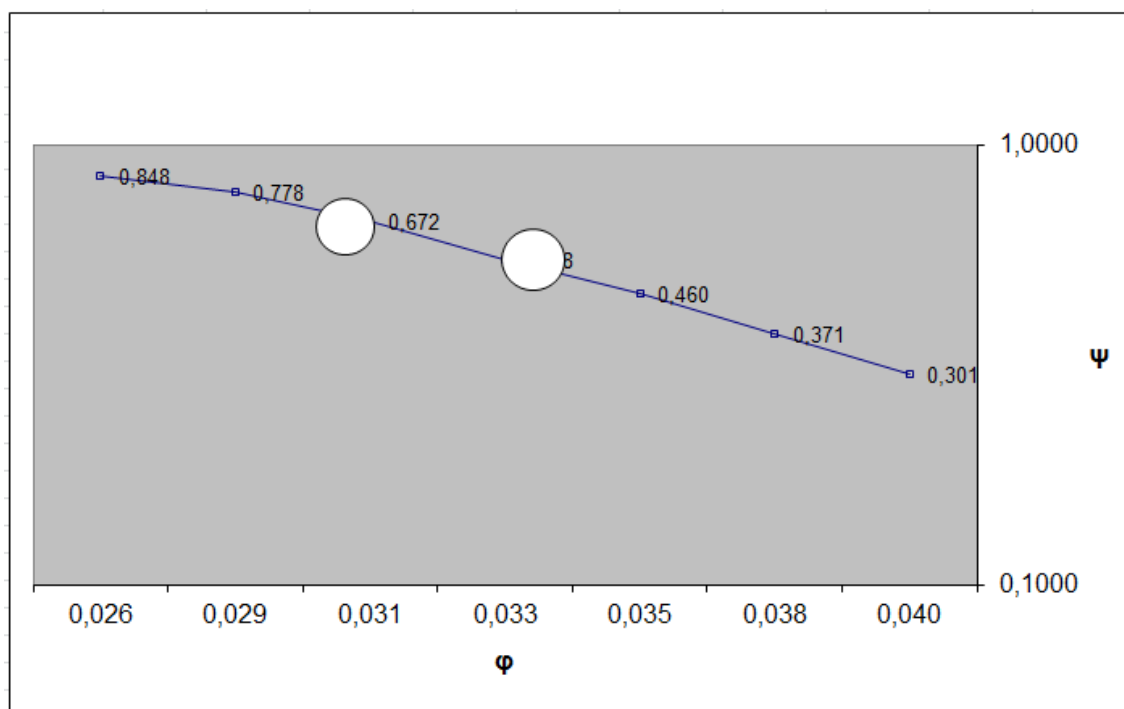


Figura 4.29 – Curva característica adimensional – Caso 12

O círculo à direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e do rotor da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.14 CASO 13

PROJETO	
Ht (mca)	19,8
Q (m³/h)	740,0
h _{fl} (%)	10,6 (78 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Inox
k SELECIONADO (mm)	0,0016
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	27,5
Q (m³/h)	653,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	60
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	250
Faixa (m³/h)	50 - 1750
Precisão (%)	0,25
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,04500 mm IP 14,2%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 55 para 90 kw(VIII Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0016	Ht = 19,8 mca Q = 740,0 m³/h Pc = 46,4 kw
Para k = 0,0450	Ht = 31,2 mca Q = 740,0 m³/h Pc = 73,2 kw

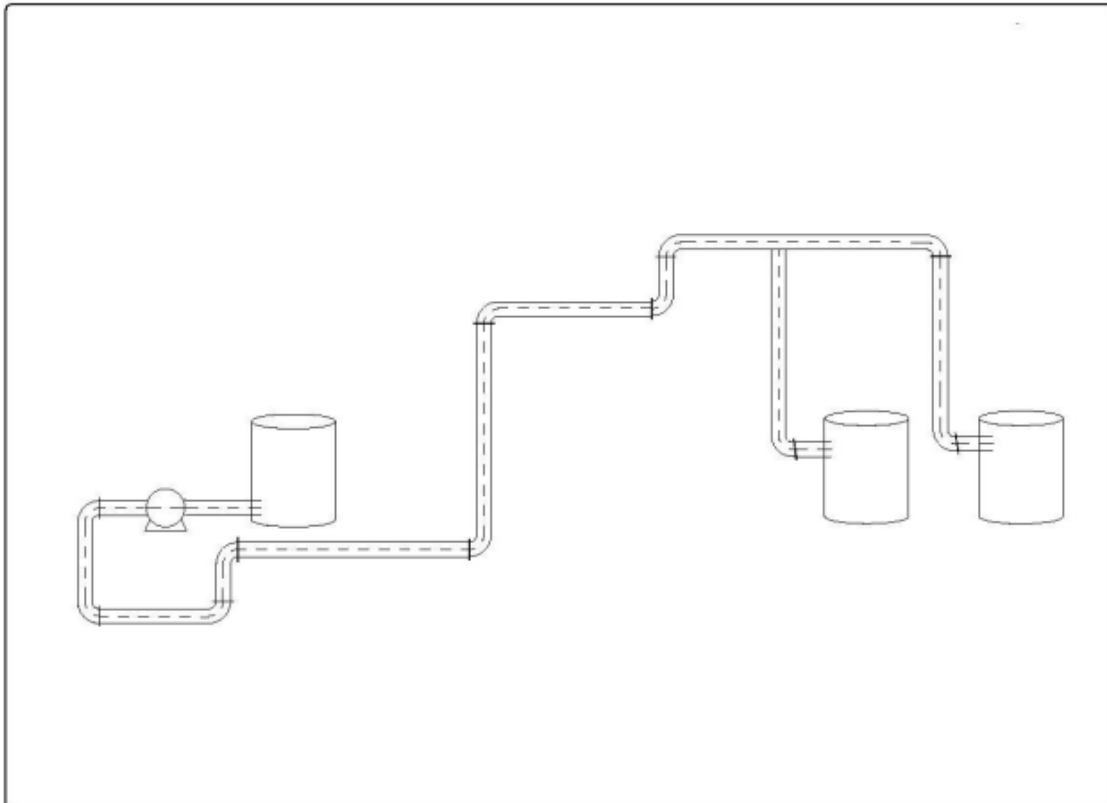


Figura 4.30 – Instalação – Caso 13

Tabela 4.15 – Memorial de perdas de carga – Caso 13

CASO 13	COLUNA 4	COLUNA 5	COLUNA 7	COLUNA 8	COLUNA 9	COLUNA 10	COLUNA 11	COLUNA 12	COLUNA 13	COLUNA 14	COLUNA 15	COLUNA 16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
Inox	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,250	250	735,0	0,0490625	740	0,2056	4,2	1037046	0,0015	0,00001	0,0075	19,6
TOTAL	0,250	250	735,0	0,0490625	653	0,1814	3,7	915123	0,0450	0,00018	0,0134	27,5

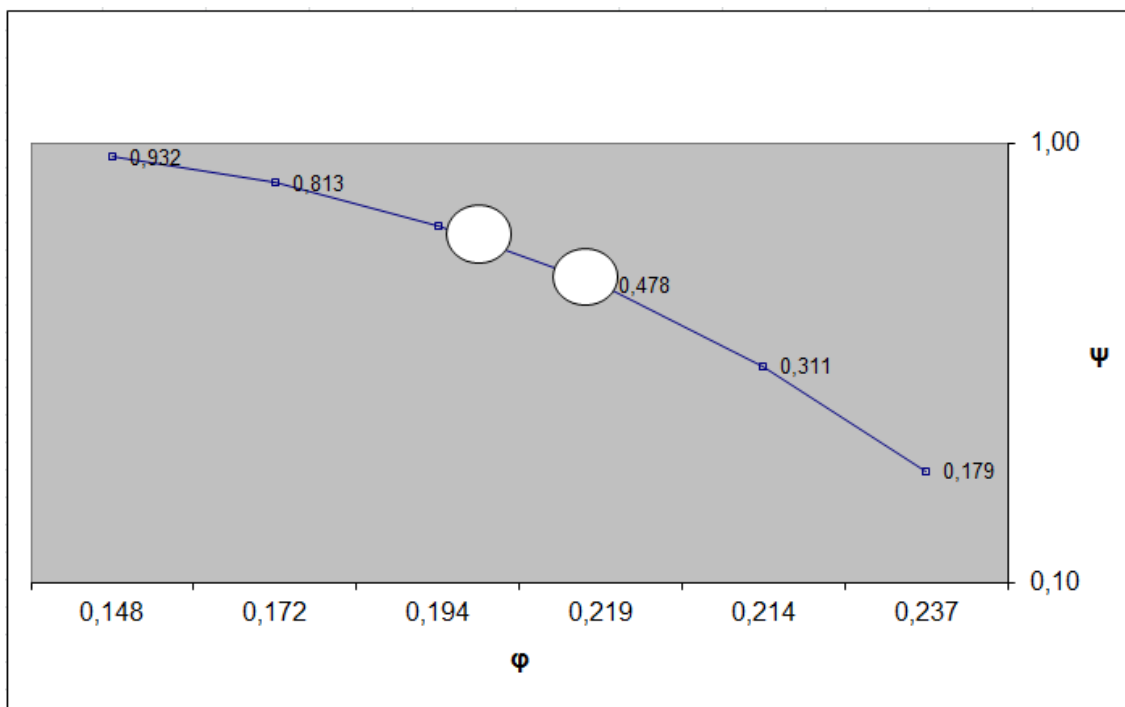


Figura 4.31 – Curva característica adimensional – Caso 13

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.15 CASO 14

PROJETO	
Ht (mca)	37,5
Q (m³/h)	25,0
h _{fl} (%)	5,3 (15 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Inox
k SELECIONADO (mm)	0,0020
MEDICÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	50,0
Q (m³/h)	21,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	60
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	50
Faixa (m³/h)	2,5 - 75
Precisão (%)	1,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0450 mm IP 2,9%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 3,7 para 7,5 kw(II Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,0020	Ht = 37,5 mca Q = 25,0 m³/h Pc = 3,5 kw
Para k = 0,0450	Ht = 59,0 mca Q = 25,0 m³/h Pc = 5,5 kw

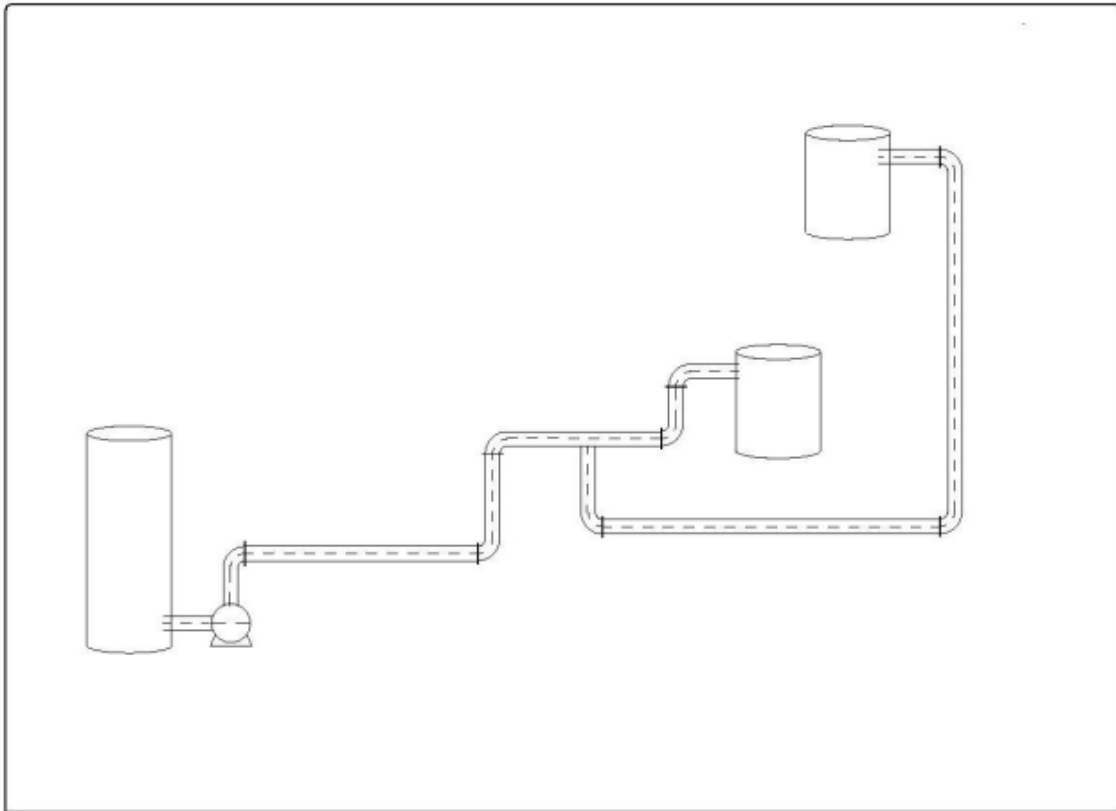


Figura 4.32 – Instalação – Caso 14

Tabela 4.16 – Memorial de perdas de carga – Caso 14

CASO 14	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leq†	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
Inox	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,050	50	290,0	0,001963	25	0,0069	3,5	175177	0,0020	0,00004	0,0101	37,5
TOTAL	0,050	50	290,0	0,001963	21	0,0058	3,0	147148	0,0450	0,00090	0,0191	50,0

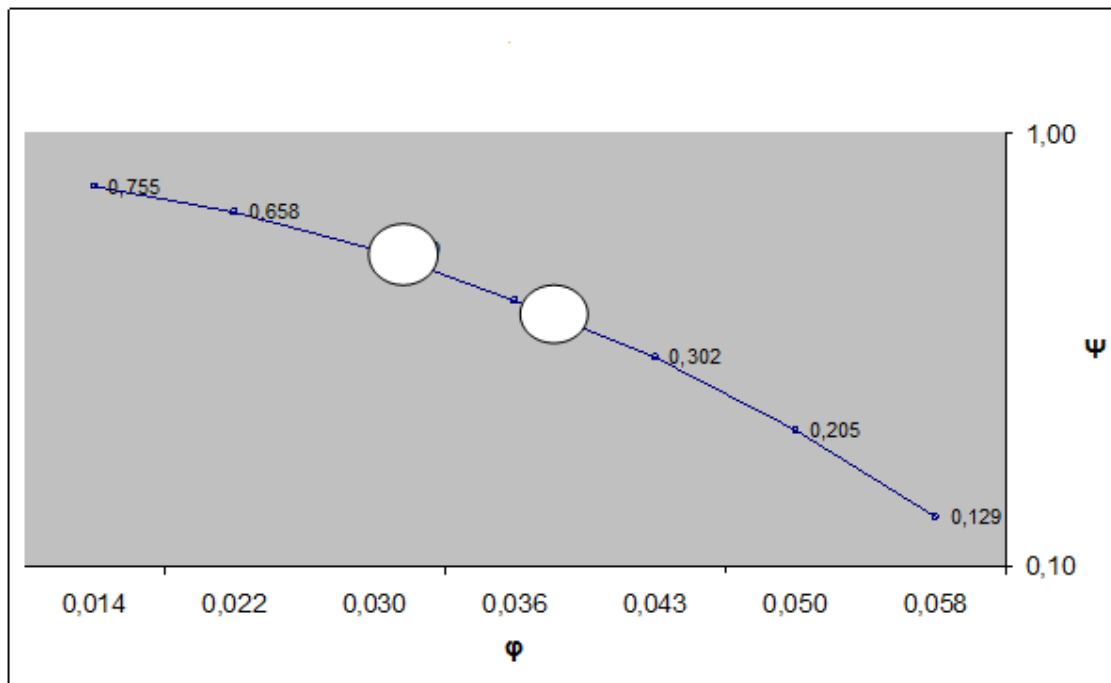


Figura 4.33 – Curva característica adimensional - Caso 14

O círculo à direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão contudo numa curva paralela acima da atual.

4.16 CASO 15

PROJETO	
Ht (mca)	73,6
Q (m³/h)	4,6
h _{fl} (%)	4,0 (13 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	Aço Inox
k SELECIONADO (mm)	0,0100
MEDIÇÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	99,5
Q (m³/h)	4,3
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	100
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Eletromagnético	
Diâmetro (mm)	25
Faixa (m³/h)	0,5 - 25
Precisão (%)	1,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,0350 mm IP 2,6%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 2,2 para 3,0 kw(IV Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento do diâmetro do rotor da bomba centrífuga e serviços (desmontagem, tornearia, balanceamento, montagem)	
Para k = 0,0100	Ht = 73,6 mca Q = 4,6 m³/h Pc = 1,4 kw
Para k = 0,0350	Ht = 118,0 mca Q = 4,6 m³/h Pc = 2,2 kw

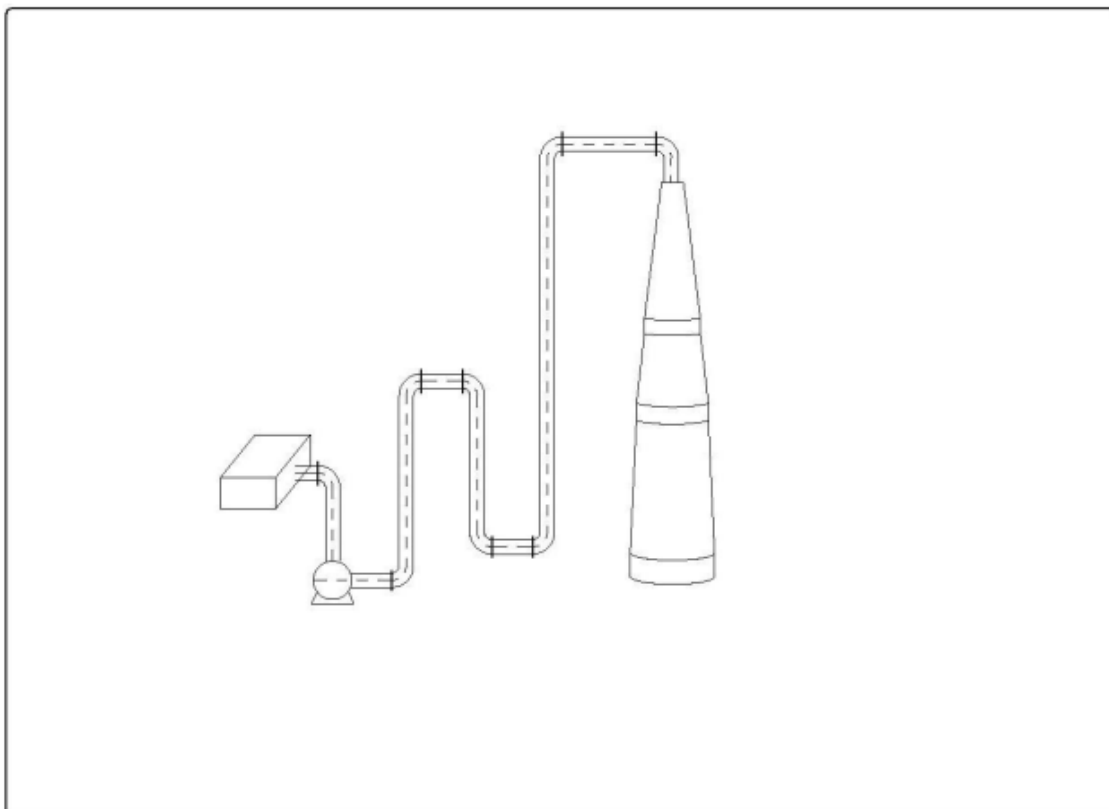


Figura 4.34 – Instalação – Caso 15

Tabela 4.17 – Memorial de perdas de carga – Caso 15

CASO 15	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
Inox	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,025	25	335,0	0,000491	4,6	0,0013	2,6	64465	0,0100	0,00040	0,0159	73,6
TOTAL	0,025	25	335,0	0,000491	4,3	0,0012	2,4	60261	0,0600	0,00240	0,0246	99,5

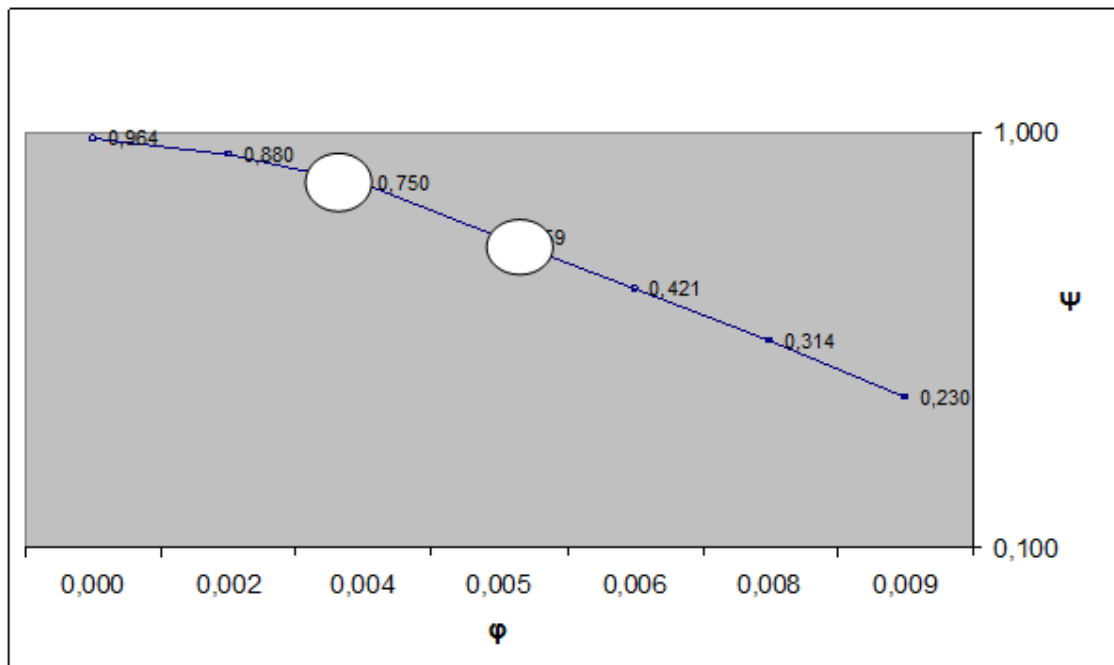


Figura 4.35 – Curva adimensional – Caso 15

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e do rotor da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.17 CASO 16

PROJETO	
Ht (mca)	69,8
Q (m³/h)	405,0
h _{fl} (%)	9,3 (98 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	FoFo
k SELECIONADO (mm)	0,2300
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	80,9
Q (m³/h)	380,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	100
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Ultra Sônico	
Diâmetro (mm)	200
Precisão (%)	2,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,6500 mm IP 17,9%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 132 para 185 kw(IV Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,2300	Ht = 69,8 mca Q = 405,0 m³/h Pc = 104,1 kw
Para k = 0,6500	Ht = 94,7 mca Q = 405,0 m³/h Pc = 141,2 kw

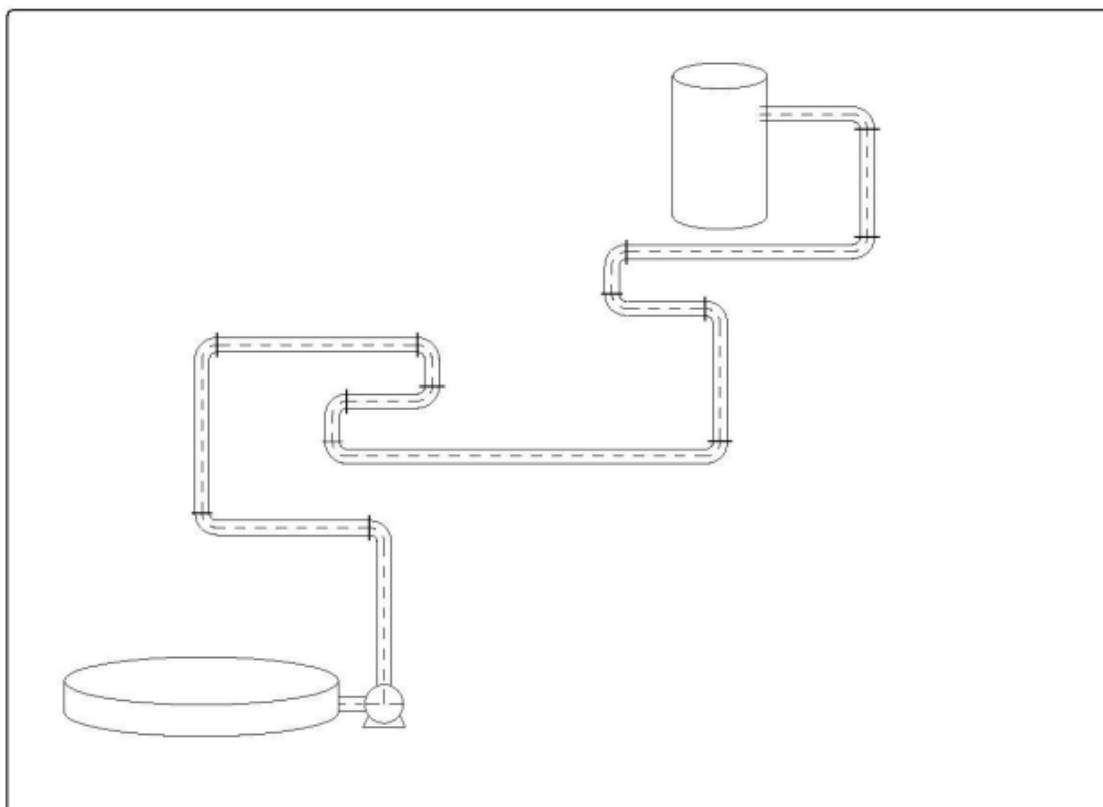


Figura 4.36 – Instalação – Caso 16

Tabela 4.18 – Memorial de perdas de carga – Caso 16

CASO 16	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
FoFo	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,200	200	1050,0	0,0314	405	0,1125	3,6	709466	0,2300	0,00115	0,0203	69,8
TOTAL	0,200	200	1050,0	0,0314	380	0,1056	3,4	665672	0,6500	0,00325	0,0268	80,9

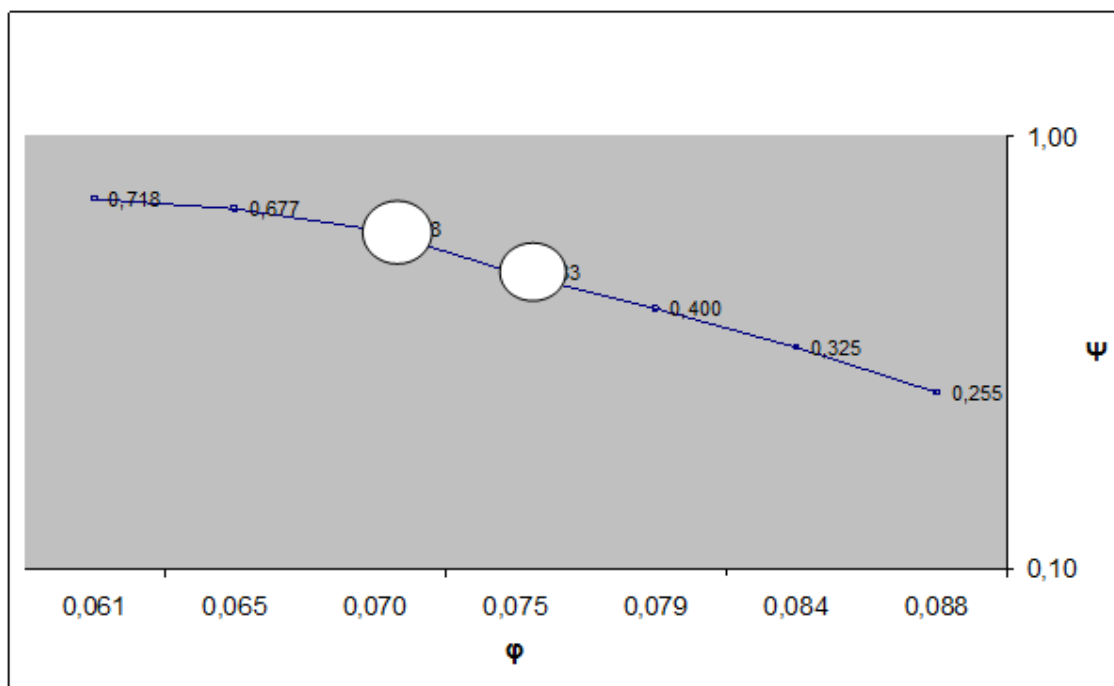


Figura 4.37 – Curva característica adimensional – Caso 16

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.18 CASO 17

PROJETO	
Ht (mca)	31,7
Q (m³/h)	155,0
h _{fl} (%)	8,2 (69 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	FoFo
k SELECIONADO (mm)	0,1219
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	41,6
Q (m³/h)	137,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	60
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Ultra Sônico	
Diâmetro (mm)	150
Precisão (%)	2,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,8400 mm IP 12,7%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 18,5 para 30,0 kw (VI Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,1219	Ht = 31,7 mca Q = 155,0 m³/h Pc = 15,9 kw
Para k = 0,8400	Ht = 49,0 mca Q = 155,0 m³/h Pc = 24,6 kw

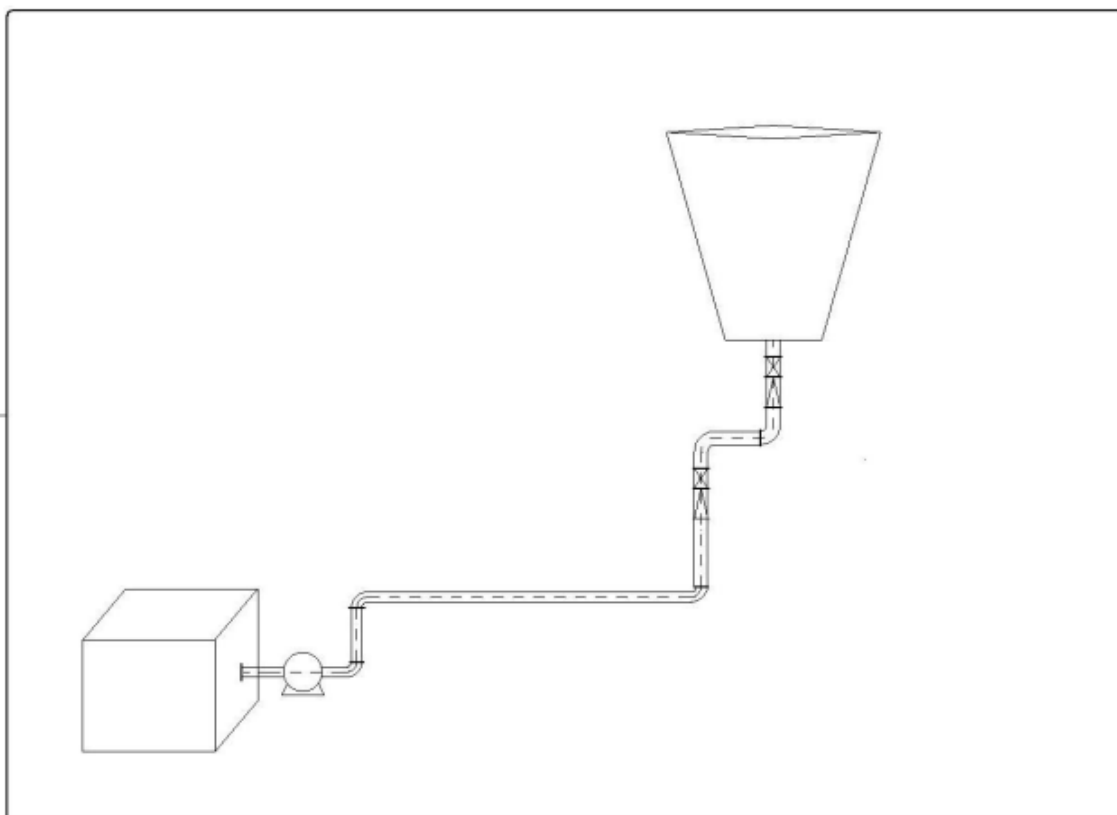


Figura 4.38 – Instalação – Caso 17

Tabela 4.19 – Memorial de perdas de carga – Caso 17

CASO 17	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
FoFo	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,150	150	840,0	0,017663	155	0,0431	2,4	362032	0,1219	0,00081	0,0187	31,7
TOTAL	0,150	150	840,0	0,017663	137	0,0381	2,2	319990	0,8400	0,00560	0,0314	41,6

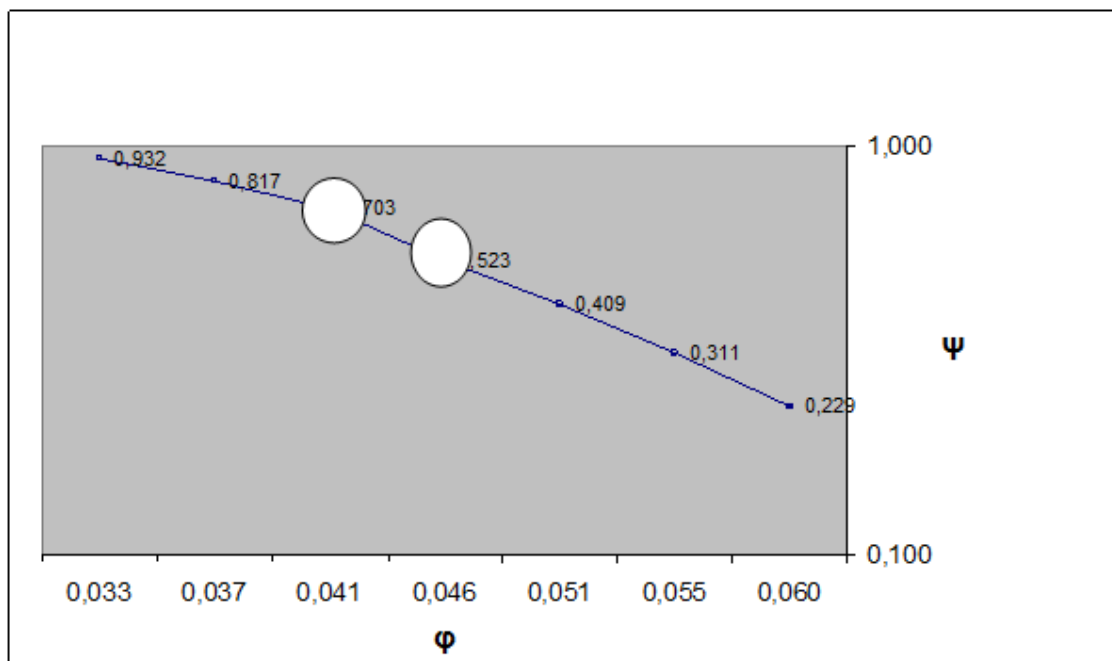


Figura 4.39 – Curva característica adimensional – Caso 17

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4. 19 CASO 18

PROJETO	
Ht (mca)	22,7
Q (m³/h)	105,0
h _{fl} (%)	7,4 (10 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	FoFo
k SELECIONADO (mm)	0,2500
MEDIÇÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	30,1
Q (m³/h)	97,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	40
Precisão (%)	1,0
Medidor de Vazão Ultra Sônico	
Diâmetro (mm)	100
Precisão (%)	1,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 1,0500 mm IP 2,1%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 11,0 para 15,0 kw(II Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,2500	Ht = 22,7 mca Q = 105,0 m³/h Pc = 8,7 kw
Para k = 1,0500	Ht = 32,5 mca Q = 105,0 m³/h Pc = 12,4 kw

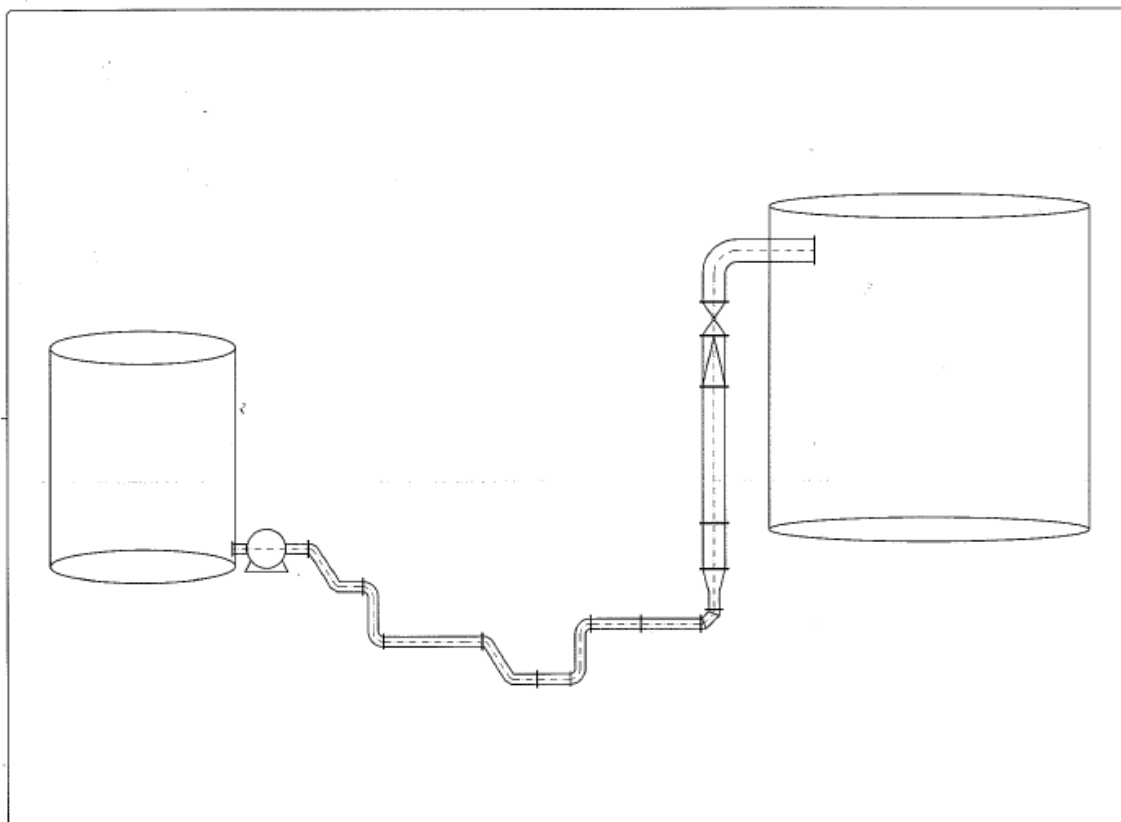


Figura 4.40 – Instalação – Caso 18

Tabela 4.20 – Memorial de perdas de carga – Caso 18

CASO 18	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
FoFo	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,100	100	130,0	0,00785	105	0,0292	3,7	367871	0,2500	0,00250	0,0249	22,7
TOTAL	0,100	100	130,0	0,00785	97	0,0269	3,4	339843	1,0500	0,01050	0,0385	30,1

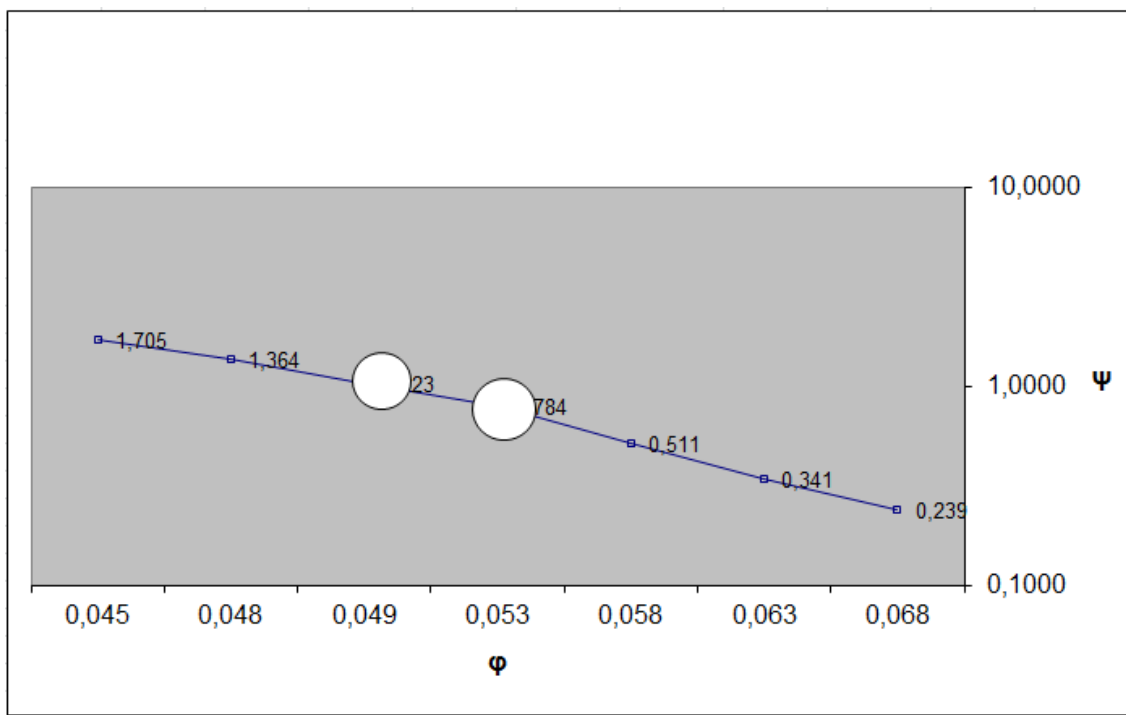


Figura 4.41 – Curva característica adimensional – Caso 18

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.20 CASO 19

PROJETO	
Ht (mca)	59,2
Q (m³/h)	64,0
h _{fl} (%)	6,3 (57 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	FoFo
k SELECIONADO (mm)	0,2500
MEDIDÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	71,1
Q (m³/h)	61,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	100
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Ultra Sônico	
Diâmetro (mm)	100
Precisão (%)	1,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 0,6500 mm IP 10,8%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 18,5 para 30,0 kw(II Pólos) e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,2500	Ht = 59,2 mca Q = 64,0 m³/h Pc = 16,9 kw
Para k = 0,6500	Ht = 74,5 mca Q = 64,0 m³/h Pc = 21,3 kw

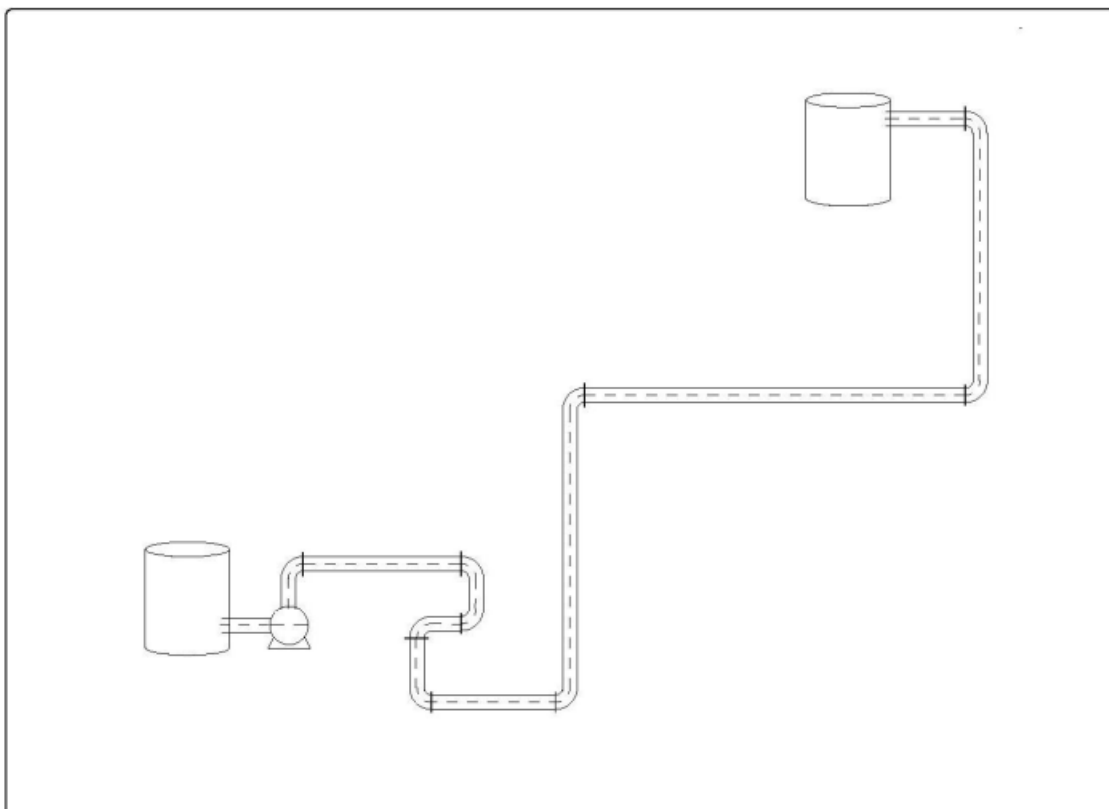


Figura 4.42 – Instalação – Caso 19

Tabela 4.21 – Memorial de perdas de carga – Caso 19

CASO 19	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
FoFo	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,100	100	910,0	0,00785	64	0,0178	2,3	224226	0,2500	0,00250	0,0249	59,2
TOTAL	0,100	100	910,0	0,00785	61	0,0169	2,2	213716	0,6500	0,00650	0,0329	71,1

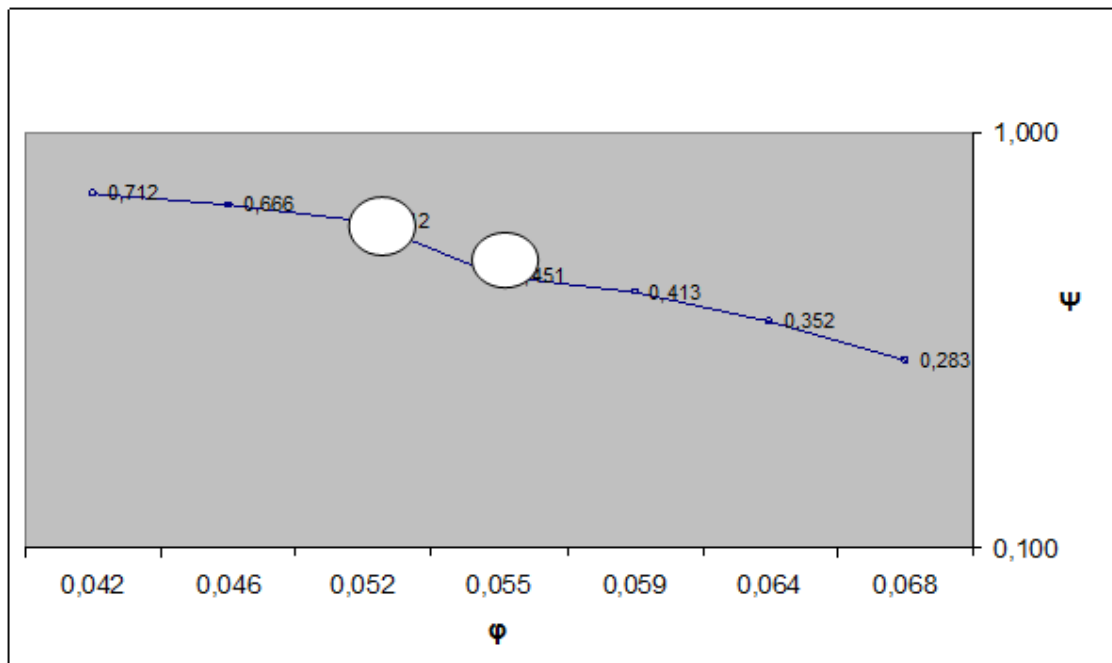


Figura 4.43 – Curva característica adimensional – Caso 19

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

4.21 CASO 20

PROJETO	
Ht (mca)	56,2
Q (m³/h)	770,0
h _{fl} (%)	10,4 (204 m equivalente)
MATERIAL DO TUBO	
MATERIAL	FoFo
k SELECIONADO (mm)	0,2300
MEDICÃO DO CAMPO	
Ht (mca)	63,0
Q (m³/h)	665,0
Medidor de Pressão	
Fundo de Escala (mca)	100
Precisão (%)	0,5
Medidor de Vazão Ultra Sônico	
Diâmetro (mm)	300
Precisão (%)	3,0
NÃO CONFORMIDADE	
Potência consumida pelo motor acima da nominal e vazão da bomba abaixo da requerida.	
CAUSA PROVÁVEL	
Escolha inadequada do valor de k	
CONCLUSÃO	
Valor mais apropriado para k = 1,100 mm IP 42,0%	
AÇÃO CORRETIVA	
Redimensionamento do acionador de 220,0 para 260,0 kw (IV Pólos)e proteção respectiva (cabos, chave magnética, contadoras, fusíveis)	
Redimensionamento da bomba centrífuga e acessórios (acoplamento, base)	
Para k = 0,2300	Ht = 56,2 mca Q = 770,0 m³/h Pc = 180,4 kw
Para k = 1,1000	Ht = 74,9 mca Q = 770,0 m³/h Pc = 241,8 kw

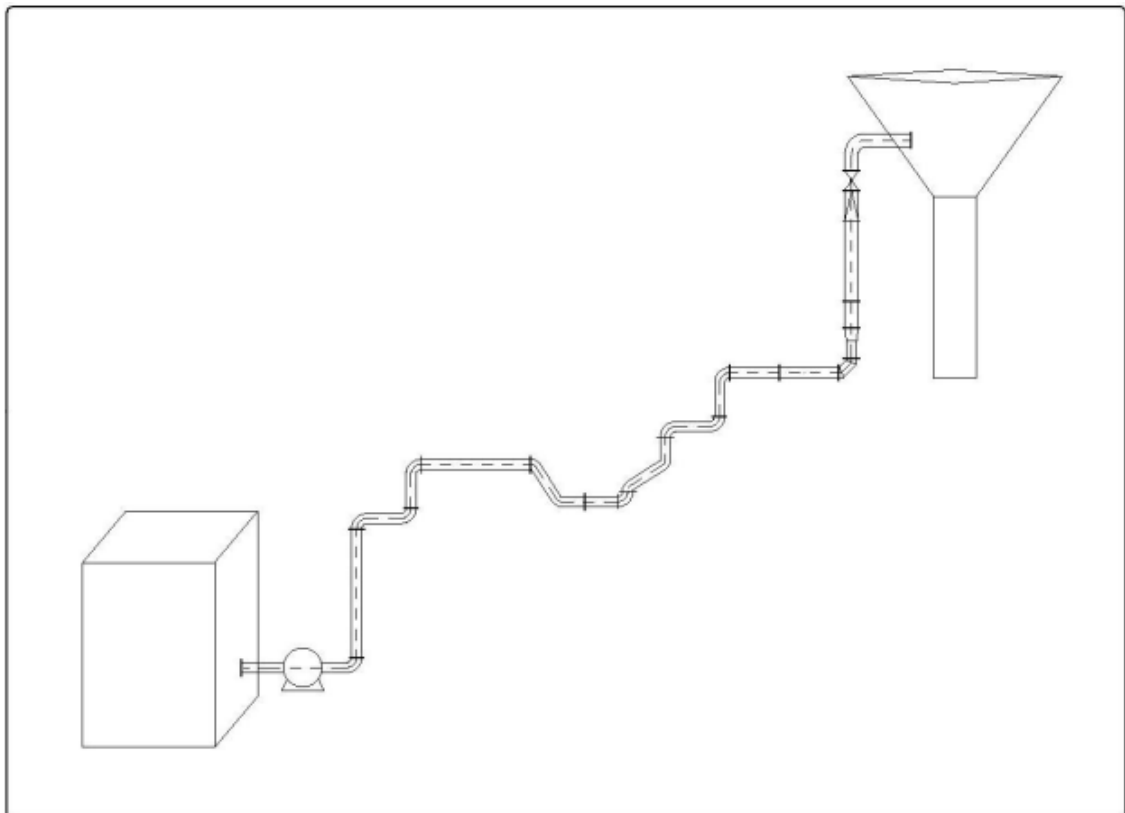


Figura 4.44 – Instalação – Caso 20

Tabela 4.22 – Memorial de perdas de carga – Caso 20

CASO 20	COLUNA4	COLUNA5	COLUNA7	COLUNA8	COLUNA9	COLUNA10	COLUNA11	COLUNA12	COLUNA13	COLUNA14	COLUNA15	COLUNA16
Tubo	D	D	Leqt	S	Q	Q	u	Re	k	ks	f	hf
FoFo	m	mm	m	m2	m3/h	m3/s	m/s		mm			m
TOTAL	0,300	300	1960,0	0,07065	770	0,2139	3,0	899241	0,2300	0,00077	0,0184	56,2
TOTAL	0,300	300	1960,0	0,07065	665	0,1847	2,6	776617	1,1000	0,00367	0,0277	63,0

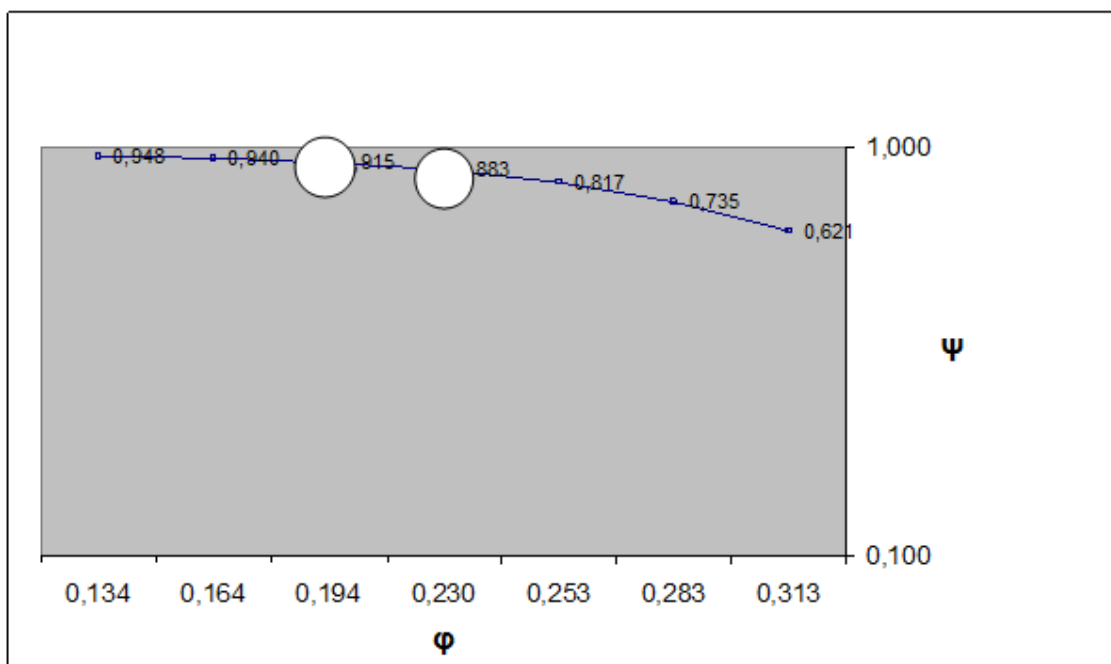


Figura 4.45 – Curva característica adimensional – Caso 20

O círculo á direita da curva representa o ponto de operação de projeto, e o da esquerda o ponto medido em campo.

O ponto de operação com o redimensionamento do motor e da bomba é de mesma coordenada da vazão, contudo, numa curva paralela acima da atual.

5. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste capítulo, dividimos os estudos de caso de acordo com o material do tubo e utilizando um número significativo de referências elaboramos uma análise e discussão dos desvios observados, procuramos as causas prováveis envolvidas na escolha da rugosidade equivalente, bem como tentamos estabelecer correlação com os valores mais apropriados dos estudos de caso.

5.1 TUBO DE AÇO COMERCIAL

Para o tubo de aço comercial com 08 (oito) casos, todos os valores da rugosidade equivalente selecionados inicialmente pelos projetistas, permaneceram dentro da faixa das referências publicadas e todos os valores considerados como apropriados na conclusão do estudo (ilustrado na figura 5.1) também permaneceram dentro da faixa referenciada.

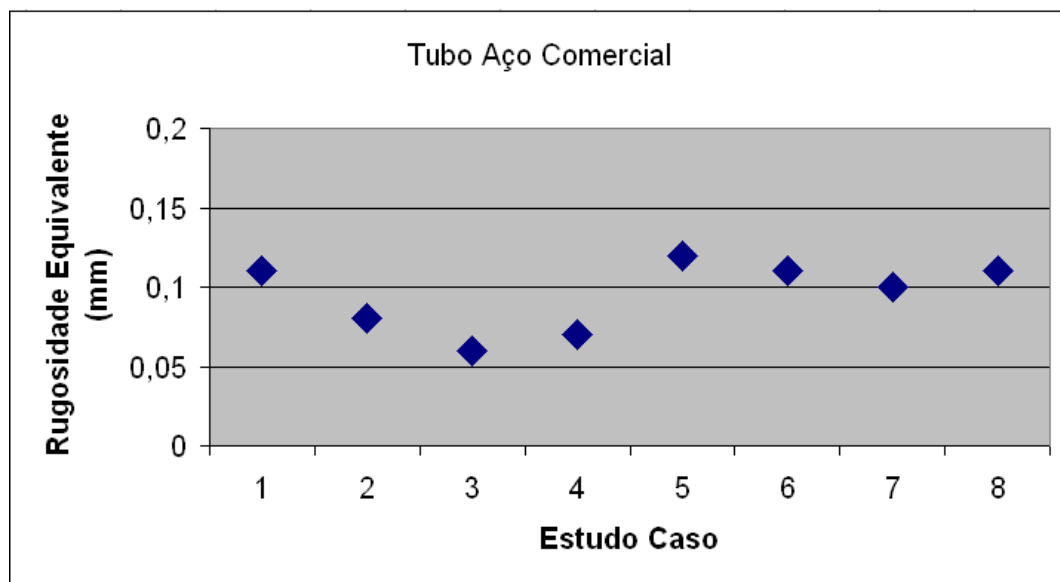
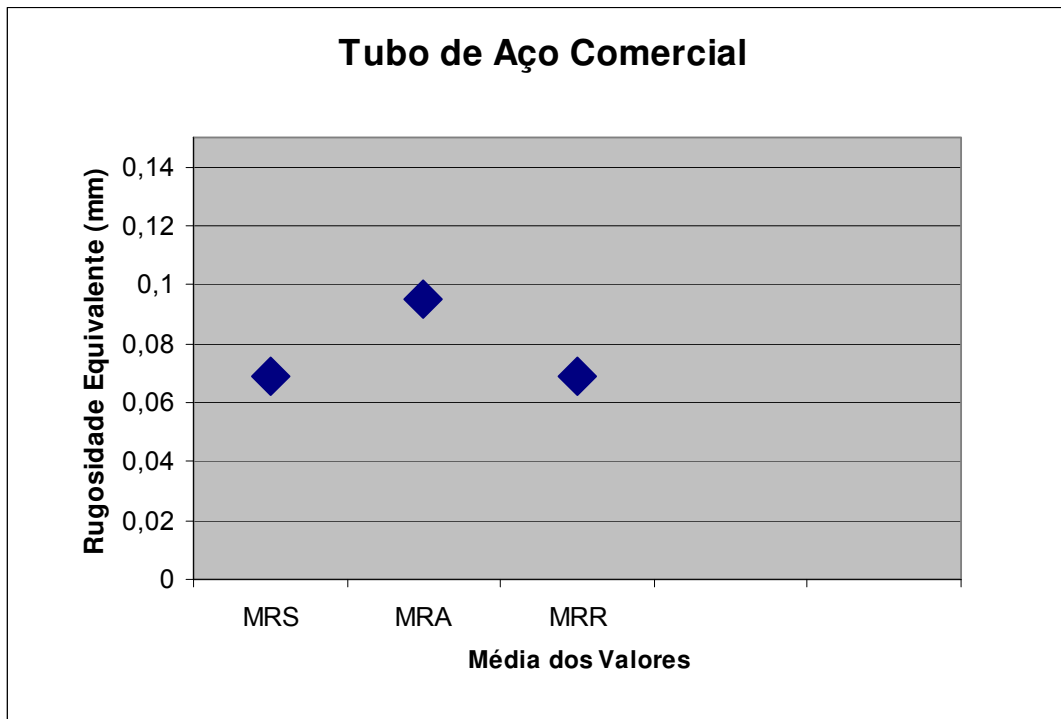


Figura 5.1 – Estudo de caso tubo de aço comercial

Nos casos 3 e 4 cabe salientar que a velocidade da água no interior do tubo (7,4 e 5,3 m/s respectivamente) estão acima das faixas recomendadas e podem ter exercido influência na escolha dos valores apropriados para a rugosidade equivalente. Tal confirmação requer mais experimentos diretos.

O gráfico da figura 5.2 ilustra as divergências com relação à média aritmética simples dos valores selecionados inicialmente pelos projetistas, mais apropriados conforme a conclusão do estudo e das referências publicadas, num número de 16(dezesseis).



MRS – Média da rugosidade equivalente selecionada
MRA – Média da rugosidade equivalente mais apropriada
MRR – Média da rugosidade equivalente referenciada

Figura 5.2 – Média dos valores do tubo aço comercial

Apesar da coincidência numérica das médias selecionadas e referenciadas, o perfil de distribuição de ambas é desigual, com os estudos de caso apresentando valores próximos dos limites inferior e superior das tabelas de referência, provavelmente devido a escolhas aleatórias baseadas em fator de segurança (limite superior) e com objetivo de redução de custos de investimentos em tubos (limite inferior).

Conforme a tabela 5.1 a faixa de valores da rugosidade equivalente são semelhantes nos estudos de caso tanto na escolha dos projetistas como nas referências disponíveis, sendo, entretanto os valores mais apropriados localizados na região intermediária.

Tabela 5.1 Menores e maiores valores da rugosidade de tubo aço comercial

Tubo Aço Comercial	Menor Valor (mm)	Maior Valor (mm)
Selecionado	0,0200	0,1500
Apropriado	0,0600	0,1200
Referenciado	0,0200	0,1500

5.2 TUBO DE AÇO INOX

Para o tubo de aço inox com 07(sete) casos, todos os valores da rugosidade equivalente selecionados inicialmente pelos projetistas, permaneceram dentro da faixa das referências publicadas, contudo, somente em dois casos (13 e 14) os valores considerados como apropriados na conclusão do estudo (ilustrado na figura 5.3) permaneceram dentro das faixas das referências, sendo que os demais indicaram valores superiores aos limites citados em publicações.

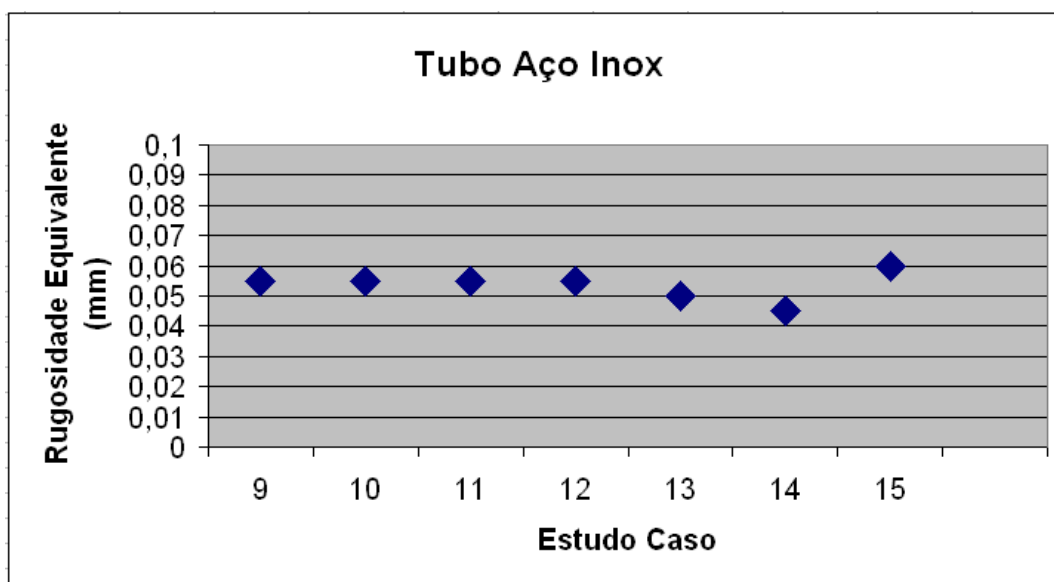
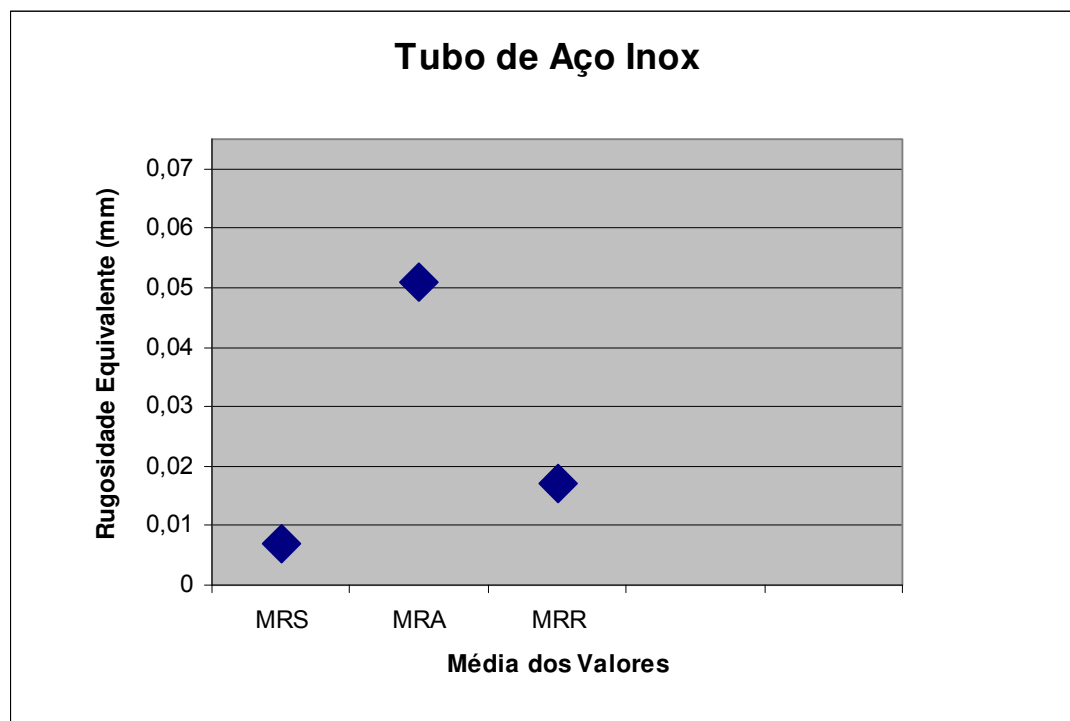


Figura 5.3 – Estudo de caso tubo inox

O gráfico da figura 5.4 ilustra as divergências com relação à média aritmética simples dos valores selecionados pelos projetistas inicialmente, mais apropriados conforme a conclusão do estudo e das referências publicadas, num número de 06(seis).



MRS – Média da rugosidade equivalente selecionada
MRA – Média da rugosidade equivalente mais apropriada
MRR – Média da rugosidade equivalente referenciada

Figura 5.4 – Média dos valores do tubo aço inox

Nos tubos de aço inox os valores médios apresentaram grandes diferenças, com as rugosidades equivalentes selecionadas inicialmente pelos projetistas notadamente no limite inferior das referências, provavelmente pela associação da reduzida aspereza dos materiais inoxidáveis.

Os valores apropriados mostram pouco desvio absoluto e relativo, conforme tabela 5.2, em desacordo com as referências que apresentam diferenças entre o menor e maior valor de magnitude igual a 30(trinta) vezes.

Tabela 5.2 Menores e maiores valores da rugosidade de tubo inox

Tubo Aço Inox	Menor Valor (mm)	Maior Valor (mm)
Selecionado	0,0015	0,0100
Apropriado	0,0450	0,0600
Referenciado	0,0015	0,0450

5.3 TUBO DE FERRO FUNDIDO DÚCTIL

Para o tubo de ferro fundido dúctil com 05(cinco) casos, todos os valores selecionados inicialmente pelos projetistas, permaneceram dentro da faixa das referências publicadas contudo somente em três casos (16,17 e 19) os valores considerados como apropriados na conclusão do estudo (ilustrado na figura 5.5) permaneceram dentro das faixas das referências, sendo que os demais indicaram valores superiores aos limites citados em publicações.

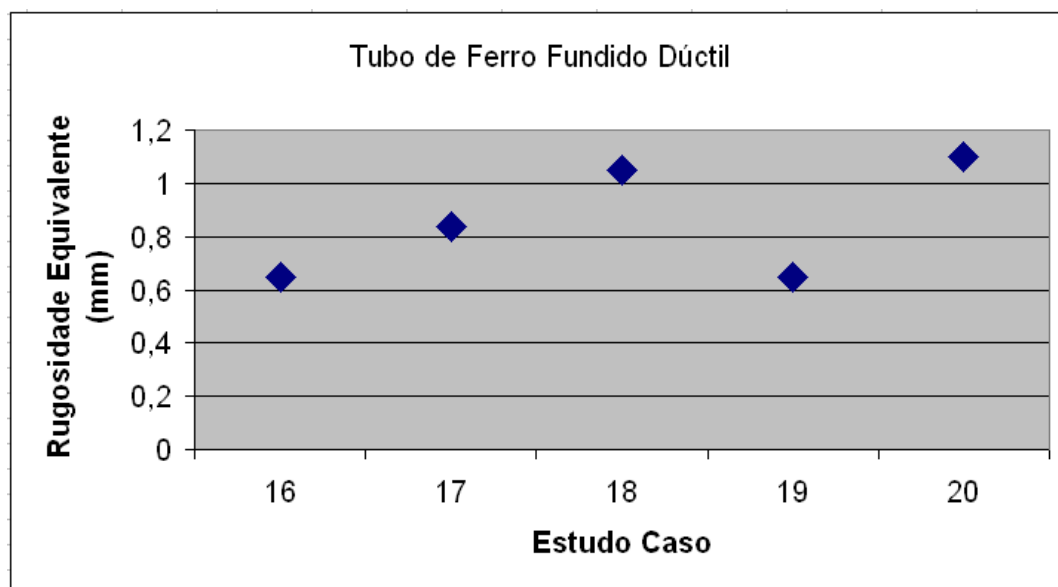
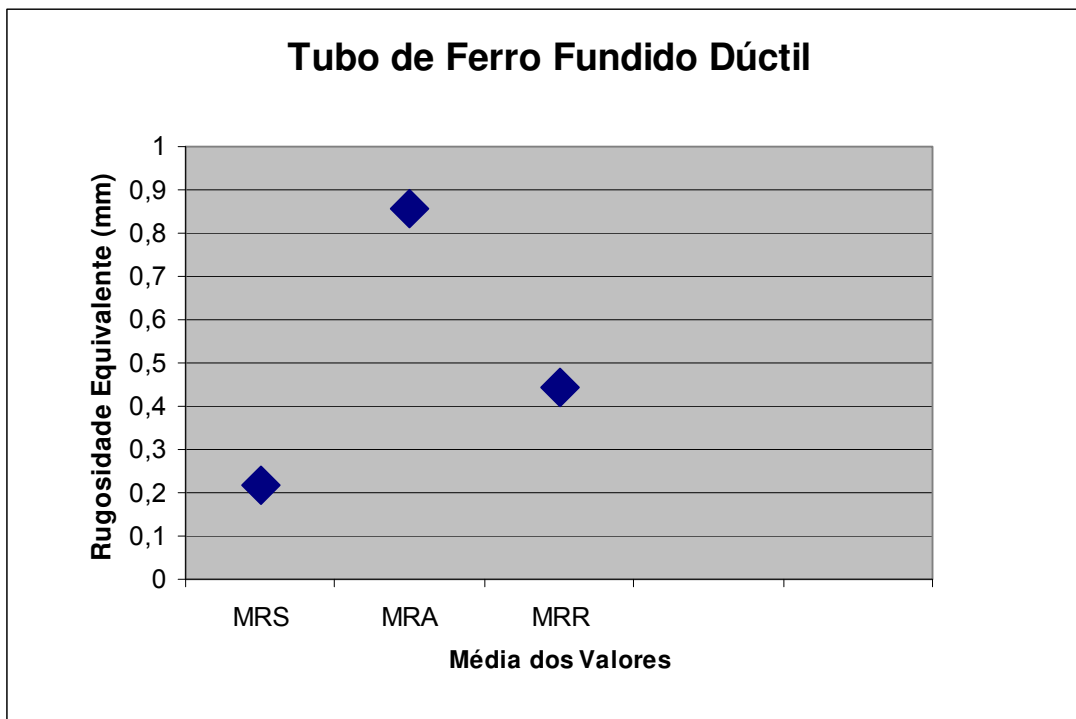


Figura 5.5 – Estudo de caso tubo ferro fundido dúctil

O gráfico da figura 5.6 ilustra as divergências com relação à média aritmética simples dos valores selecionados inicialmente pelos projetistas, mais apropriados conforme a conclusão do estudo e das referências publicadas, num número de 10 (dez).



MRS - Média da rugosidade equivalente selecionada
MRA - Média da rugosidade equivalente mais apropriada
MRR - Média da rugosidade equivalente referenciada

Figura 5.6 – Média dos valores do tubo ferro fundido dúctil

No tubo de ferro fundido dúctil as rugosidades equivalente apresentaram maiores diferenças quando comparadas aos outros materiais , com valores selecionados notadamente no limite inferior das referências conforme tabela 5.3.

Num total de 10 (dez) publicações o perfil de distribuição em relação à média é uniforme com cinco referências menores e cinco maiores que a média.

Tabela 5.3 – Menores e maiores valores da rugosidade de ferro fundido dúctil

Tubo Ferro Fundido Dúctil	Menor Valor (mm)	Maior Valor (mm)
Selecionado	0,1219	0,2500
Apropriado	0,6500	1,1000
Referenciado	0,1219	1,0000

Os valores mais apropriados obtidos experimentalmente correspondem ao limite superior das publicações, contudo é necessário observar alguns dados específicos que podem ter distorcido estes valores coletados.

- Os casos de ferro fundido possuem em média o dobro do comprimento linear de tubo que os demais e podem sofrer influência do número excessivo de conexões através do sistema ponta-bolsa.

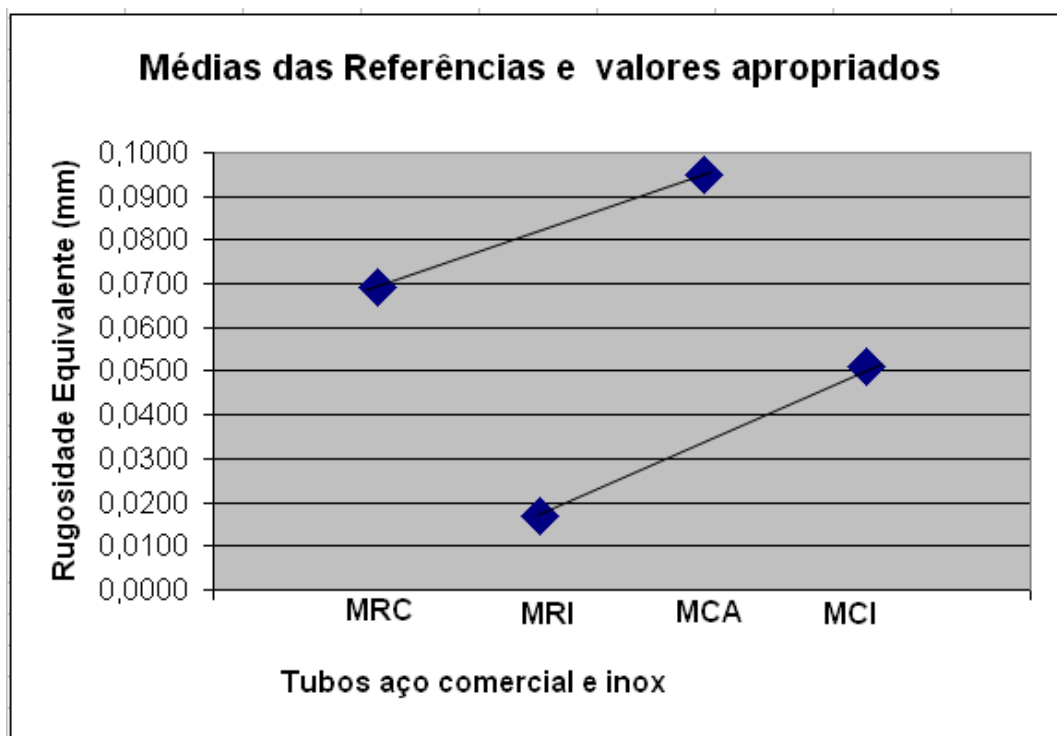
- As medições de vazões por instrumento ultrassônico apresentam menor precisão que os instrumentos eletro magnéticos.

Tais considerações sinalizam ressalvas quantos aos resultados obtidos especificamente para o tubo de ferro fundido dúctil.

5.4 VALORES MAIS APROPRIADOS E REFERÊNCIAS

Valores mais apropriados de acordo com a conclusão dos estudos de caso e das referências consultadas.

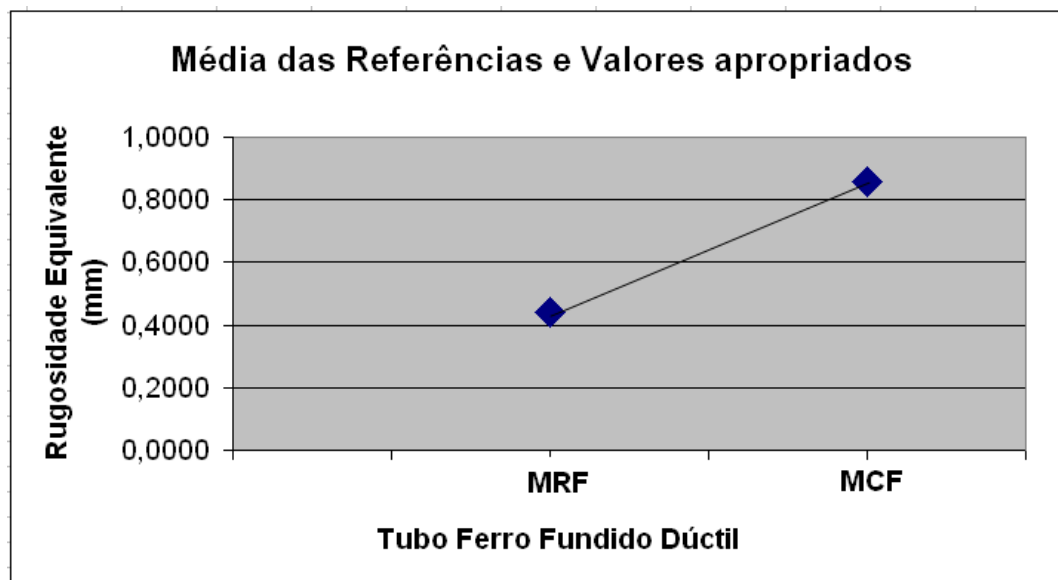
A figura 5.7 ilustra os desvios relativos às médias das referências e valores mais apropriados escolhidos na conclusão dos estudos de caso para os tubos de aço comercial e inox.



- MRC Média aritmética dos valores das referências para o tubo de aço comercial
- MRI Média aritmética dos valores das referências para o tubo de aço inox
- MCA Média aritmética dos valores mais apropriados para o tubo de aço comercial
- MCI Média aritmética dos valores mais apropriados para o tubo de aço inox

Figura 5.7 – Médias das Referências e valores apropriados (tubos aço comercial e inox)

A figura 5.8 ilustra os desvios relativos às médias das referências e valores mais apropriados escolhidos na conclusão dos estudos de caso para o tubo de ferro fundido dúctil.



MRF Média aritmética dos valores das referências para o tubo de ferro fundido dúctil
MCF Média aritmética dos valores mais apropriados para o tubo de ferro fundido dúctil

Figura 5.8 – Médias das Referências e Valores Apropriados

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Vários experimentos nos últimos cinquenta anos demonstraram divergências significativas entre os valores obtidos com superfícies de tubos comerciais e os deduzidos a partir de formulações teóricas ou ensaios com rugosidade criada por elementos artificiais.

A necessidade de uma tecnologia de medição direta para a rugosidade dos tubos com comprovada eficiência de caracterização da superfície real é fundamental para melhorar a estimativa da rugosidade em tubos fabricados atualmente, cujos materiais e processos estão em contínua evolução.

A utilização de elementos artificiais apesar de comumente empregados , precisa ser substituída por varreduras de superfícies em situações práticas para esclarecimentos das verdadeiras correlações embutidas nos cálculos de perdas de carga bem como para aumentar a confiabilidade que impacta diretamente nos custos de investimento e operacionais das instalações hidráulicas.

As medições experimentais diretas precisam também definir de modo mais claro as especificações do material conforme norma, processo de fabricação, tipo de revestimento básico, nomenclatura comercial comumente utilizada em catálogos técnicos e faixa de diâmetro ou velocidade ou mesmo região do ábaco de Moody, e precisão esperada para a obtenção do fator de atrito aplicado nas formulações de perdas de cargas distribuídas.

Tais experimentos seriam refletidos em novas referências publicadas para recomendações, possibilitando melhores resultados manométricos na fase de projetos ou de avaliação de instalações pré-existentes.

Sem dúvida com aumento da confiabilidade de valores da rugosidade, menores fatores de segurança seriam requeridos, conseqüentemente, menores investimentos, superdimensionamentos, incerteza operacional e não conformidades em campos são esperadas.

Os vinte estudos de caso são representativos mas certamente um número maior de diagnósticos com outros materiais comuns em aplicações de bombeamento. Materiais como aço galvanizado, laminado, ferro fundido com outros revestimentos e materiais não metálicos como concretos e plásticos podem demonstrar mais claramente a importância de definições acerca das diferenças dos valores equivalentes da rugosidade obtidos em campo e das tabelas publicadas muitas vezes sem explicações da metodologia para obtenção destas referências.

Sobre os dados obtidos nos estudos citados, são feitas as recomendações a seguir:

- Tubo de aço comercial conforme especificação nas características dos sistemas analisados, a rugosidade equivalente média é melhor representada pelos valores compreendidos entre 0,090 e 0,1000 mm.
- Tubo de aço inox conforme especificação dos sistemas analisados, a rugosidade equivalente média é melhor representada pelo maior valor das referências 0,045 mm contra a média mais apropriada de 0,050 mm obtida nos casos estudados.
- Tubo de ferro fundido dúctil conforme especificação dos sistemas analisados, a rugosidade equivalente média obtida apesar de compreendida próxima do limite superior das referências, não pode ser recomendada em função das observações do capítulo anterior que relaciona várias condicionantes que podem ter sido responsável pela elevação da média. Provavelmente a melhor escolha situa-se na média das referências entre 0,4000 e 0,5000 mm.

Como recomendação geral estendida a outros tubos, quando da seleção dos valores da rugosidade equivalente, consultar o maior número possível de fontes confiáveis (autores, associações, instituições); desconsiderar os limites inferiores das tabelas e escolher preferencialmente valores que correspondam à média aritmética destas referências consultadas.

A principal conclusão acerca dos estudos certamente refere-se ao questionamento de inúmeras referências publicadas que embora contribuam para a elaboração de projetos de perdas de carga, sem dúvida merecem maior atenção quanto a determinação dos métodos e campo de aplicabilidade cujo impacto técnico e econômico muitas vezes é ignorado.

O trabalho é também um alerta sobre a necessidade de medições reais das superfícies investigadas para garantir melhor confiabilidade para engenheiros, estudantes, orçamentistas, projetistas, técnicos, vendedores de equipamentos hidráulicos e outros profissionais envolvidos na elaboração de projetos de bombeamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZAL, N. Friction factor directly from transitional roughness in a turbulent pipe flow. Journal of Fluids Engineering, 2009 Oct, vol.129.

ALE, J.V. Apostila de escoamentos viscosos. Porto Alegre: Departamento de engenharia mecânica da PUC, 2010. Apostila de aula.

ALLEN, J.J., et all. Turbulent flow in smooth and rough pipes. Royal Society, acesso em 2010, Nov 11, disponível em:

<http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/p65/1852/699.full>

AMARAL, H.M.C. Escoamento Viscoso. Parte 3. São Luis: Universidade Federal do Maranhão, 2009. Apostila de Aula.

AMARAL, R. e CHONG, L.H. Surface roughness. 2002 Dec 2. .

ANDRADE, L. e CARVALHO, J.A. Análise da equação de Swamee-Jain para cálculo do fator de atrito. V.5, nr. 3 Goiânia: Editora Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 2001. p. 554-557.

.ARCELORMITTAL. Tubos Inox: catálogo. Ribeirão Pires, 2009.

BALBY INTERNATIONAL, The computer software for computation head losses in water supply systems according Darcy-Weisbach formula, acesso em 2010 Oct 22, disponível em <http://www.balby.com/software/hidro-kanENG3.html>

BASTOS, F.A.A. Problemas de Mecânica dos Fluidos. Aparecida: Editora Santuário, 1983. 483 p.

BRACKBILL, T.P. e KANDLIKAR S. Effect of sawtooth roughness drop and turbulent transition in microchannels, acesso em 2010 Jun 12, disponível em

www.informaworld.com/smpp/title-content=

BRADLEY, J.N. e THOMPSON, L.R. Friction factors for large conduits flowing full. Denver: Hydraulics Branch of the Bureau of Reclamation's Division of Research , 1951.67 p.(Engineering Monograph)

BURMESTER, C.L. Uso do perfilador a laser na estimativa da rugosidade em planícies de inundação.Curitiba: UFPR, 2004.86 p.(Projeto de pesquisa).

COLEBROOK, C.F. Experiments with fluid friction in roughened pipes.The Royal Society, acesso em 2010 Nov 11, disponível em

<http://rspa.royalsocietypublishing.org/subscriptions>

CHAURETTE, J. Pipe roughness values, acesso em 2010 Oct 22, disponível em

http://www.pumpfundamentals.com/download-free/pipe_rough_values.pdf

FARSHAD, F., RIEKE, H., GARBER, J. New development in surface roughness measurements characterization and modeling fluid flow in pipe. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2001 nr. 29 p. 139-150.

FLACK, K.A. e SCHULTZ, M.P. Review of hydraulic roughness scales in the fully rough regime. Journal of Fluids Engineering, 2010 Apr, vol.132.

FOX, R.W. e Mcdonald, A.T. Introdução á Mecânica dos Fluidos. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2001. 504 p.

FLUID ENGINEERING, Flow in pipes, acesso em 2010 Oct 22, disponível em

http://www.roymech.co.uk/Related/Fluids/Fluids_Pipe.html

FTC, Influence of the Tyfo Fibrwrap system on the water flow in a retrofitted concrete pipe. San Diego: Test Report, 2008, acesso em 2010 Oct 22, disponível em

www.fyfeco.com/resources/abstracts/ftc-010.pdf

GILES, R.V. Mecânica dos Fluidos e Hidráulica. São Paulo: Editora McGraw-Hill, 1972. 412 p.

GRASSIA, T.T. Análise das equações de Churchill, Swamee-Jain e Haaland na determinação do fator de atrito de D-W, São Paulo: Faculdade Educacional Inaciana, 2007. (projeto de pesquisa)

KNOWLEDGE BASE, Absolute roughness, acesso em 2010 Oct 22, disponível em <http://knowledgebase.nativedynamics.com.au/articles/010003/010003.php>

JESWIET, J., Manufacturing Engineering. Kingston: Queens University, 2007. 23 p.

LAMONT, P.A. Common pipe flow formulas compared with the theory of roughness. American Water Works Association, 1981. p274-280.

LANGELLANDSVIK, L.I., KUNKEL, G.J., SMITS, A.J. Flow in a commercial steel pipe. Journal Fluid Mechanik. 2008. vol. 595 p.323-339.

LENCASTRE, A. Manual de Hidráulica Geral. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1972. 411 p.

LESTER, C.B. Hydraulics for Pipeliners. Vol.1 Houston: Editora Gulf Publishing Company, 1994. p.227-236 .

MITUTOYO. Medição de forma: catálogo. Suzano, 2009.

MSPC, Fluidos V-50: Dinâmica dos fluidos viscosos, acesso em 2010 Oct 22, disponível em http://mspc.eng.br/FLDETC/FLUID_0550.SHTML

MOODY, L.F. Friction factors for pipe flow. New York: Princeton University, 1944.

NETTO, J.M. Manual de Hidráulica. 4 ed. São Paulo: Editora USP, 1966. 861 p.

NEVES, E.T. Curso de Hidráulica. Porto Alegre: Editora Globo, 1960. 567 p.

NIEVES, S.N.T. Turbulent boundary layers : Free-Stream turbulence, surface roughness and favorable pressure gradient. New York: Faculty Rensselaer Polytechnic Institute Troy, 2007. 91 p. (Thesis for the degree of Master of Science).

PAIVA e MURAMATSU, Desenvolvimento de um rugosímetro a laser. Revista de física aplicada e instrumentação, vol.17, nr.2 . 2004, Jun.

NIKURADSE, J. Laws of Flow in Rough Pipes. Washington: Naca, 1950. 62 p.(Translation of “Stromungsgesetze in Rauhen Rohren” VDI-Forschungsheft 361.Beilage zu “ Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens” Ausgabe Band 4, July/August 1933.

PORTO, R.M. Hidráulica Básica. 4 ed. São Carlos: Editora EESC-USP, 2006. 519P.

REBRAC, Rugosidade Parâmetros.Apostila de treinamento, Sorocaba 2009. 32 p.

RIJ, J.A.V; BELNAP,B.J; LIGRANI,P.M. Analysis and experiments on three dimensional irregular surface roughness. Journal of Fluids Engineering.2002 Sept, vol.124 .

RODRIGUES, T.R.I. Perda de Carga provocada por engate rápido em tubulações de aço zincado. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Campinas, 1998. 133 p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

ROSA, E.S Características e propriedades gerais de escoamentos turbulentos. Campinas: Faculdade de engenharia mecânica da UNICAMP. Notas de aula.

SAINT-GOBAIN.Linha Adução Água: catálogo, Rio de Janeiro, 2010.

SCHLICHTING, H. Experimental Investigation of the problem of surface roughness. Washington: Naca nr.823, 1937. 59 p.(Ingenieur-Archiv vol. VII nr.1, February 1936).

SCHULTZ, M.P. The relationship between frictional resistance and roughness for surfaces smoothed by sanding. ASME, 2002 Jun, vol.124.

SCHOCKLING, M.A., ALLEN, J.J., SMITS, A.J. Roughness effects in turbulent pipe flow. Journal Fluids Mechanik, 2006 vol.564 p.267-285.

SOUZA,E.R. Sistema de Adução. Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2001.50 p.(trabalho da disciplina Saneamento Ambiental)

TAYLOR, J.B., CARRANO, A.L., KANDLIKAR,S.G. Characterization of the effect of surface roughness and texture on fluid flow – past, present and future. International Journal of Thermal Sciences. 2006 vol.45 p.962-968.

TEBECHERANI, C.T.P., Noções básicas sobre tubos de aço carbono com costura, acesso em 2010 Oct 22, disponível em <http://www.ebah.com.br/nocoas-basicas-sobre-tubos-de-aco-carbono-com-costura-pdf-a45565.html>

TELLES, P.C.S. Tubulações Industriais: materiais, projeto, montagem. 10 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008. 252 p.

THE ENGINEERING PAGE, Typical surface roughness, acesso em 2010 Oct 22, disponível em http://www.the-engineering-page.com/forms/dp/typ_eps.html

THE ENGINEERING TOOL BOX, Major loss in ducts, tubes and pipes, acesso em 2010 oct 22, disponível em http://www.engineeringtoolbox.com/major-loss-ducts-tubes-d_459.html

THOMAS, T.R. Trends in surface roughness. Tools Manufactur , 1998, vol. 38, nr.5-6, p.405-411.

TRAVIS, Q.B. e MAYS, L.W. Relationship between Hazen-Williams and Colebrook-White roughness values. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, Nov . p.1270-1273.

WATERGEMS, Typical roughness values for pressure pipes, acesso em 2010 Oct 22, disponível em http://docs.bentley.com/en/HMWaterCAD/Bentley_WaterGEMS_Help-19-40.html

WHITE, F.M. Mecânica dos Fluidos. 4 ed. Rio de janeiro: Editora McGraw-Hill, 2002.p.229-250.

YOO,D.H. e SINGH,V.P. Two methods for the computation of commercial pipe friction factors. Journal of Hydraulics Engineering, 2005 Aug, p.694-704.

**ANEXO 1 – VALORES DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE
TUBOS. FONTE: LIVROS**

1 A

RUGOSIDADE DOS TUBOS
(Valores de k, em metros)

MATERIAL	TUBOS NOVOS
Aço galvanizado	0,00015 a 0,00020
Aço rebitado	0,0010 a 0,0030
Aço revestido	0,0004
Aço soldado	0,00004 a 0,00006
Chumbo	lisos
Cimento-amianto	0,000025
Cobre ou latão	lisos
Concreto bem acabado	0,0003 a 0,0010
Concreto ordinário	0,0010 a 0,0020
Ferro forjado	0,00004 a 0,00006
Ferro fundido	0,00025 a 0,00050
Ferro fund. c/ revest. asfáltico	0,00012
Madeira em aduelas	0,0002 a 0,0010
Manilhas cerâmicas	0,0006
Vidro	lisos **
Plásticos	lisos

Fonte:Manual de hidráulica
Neto, Azevedo J.M.

1 B

Valores de algumas alturas médias (k)

Material do conduto	Valor usual de k (em mm)	Faixa de variação de k (em mm)
Aço-carbono preto, soldado ..	0,061	0,0305 a 0,0915
Aço laminado (polido)	0,015	0,005 a 0,100
Aço revestido de asfalto ...	0,04	—
Aço galvanizado	0,1525	0,061 a 0,244
Cimento-amianto	0,025	—
Cobre	0,0015	—
Concreto centrifugado	0,17	—
Concreto alisado	1,22	0,305 a 3,05
Ferro fundido centrifugado, com revestimento:		
— de cimento	0,024	—
— de piche	0,122	0,061 a 0,26
Latão	0,015	0,010 a 0,020
PVC	0,015	0,009 a 0,050
Vidro	0,015	—

Fonte: Problemas de Mecânica dos Fluidos
Bastos, F.A.A

1 C

RUGOSIDADE PARA TUBOS DE MATERIAIS COMUNS DE ENGENHARIA

Tubo	Rugosidade, e
	Milímetros
Aço rebitado	0,9–9
Concreto	0,3–3
Madeira	0,2–0,9
Ferro fundido	0,26
Ferro galvanizado	0,15
Ferro fundido asfaltado	0,12
Aço comercial ou ferro forjado	0,046
Trefilado	0,0015

Fonte: Introdução à Mecânica dos Fluidos
Fox, R.W. e McDonald A. T.

1 D

VALORES DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE TUBOS

Tipos de Tubo ou revesti- mento (Novo)	Valores de ϵ em ft	
	Intervalo	Valor Utilizado
Latão	0,000005	0,000005
Cobre	0,000005	0,000005
Concreto	0,001-0,01	0,004
Ferro fundido — s/revestimento	0,0004-0,002	0,0008
" " — rev. asfáltico	0,0002-0,0006	0,0004
" " — rev. cimento	0,000008	0,000008
" " — rev. betuminoso	0,000008	0,000008
" " — centrifugado	0,00001	0,00001
Ferro Galvanizado	0,0002-0,0008	0,0005
Ferro Forjado	0,0001-0,0003	0,0002
Aço Comercial Soldado	0,0001-0,0003	0,0002
Aço Rebitado	0,003-0,03	0,006
"Fibro-cimentado"	0,000008	0,000008
Madeira	0,0006-0,003	0,002

Fonte: Mecânica dos Fluidos e Hidráulica
Giles, R.V.

VALORES PARA A RUGOSIDADE DOS MATERIAIS

Ferro fundido novo	$e = 0,26$ — 1 mm
" " enferrujado	1 — 1,5 mm
" " incrustado	1,5 — 3 mm
" " asfaltado	0,12 — 0,26 mm
Aço laminado novo	0,0015 mm
" comercial	0,046 mm
" rebitado	0,92 — 9,2 mm
" asfaltado	0,04 mm
" galvanizado	0,15 mm
" soldado liso	0,1 mm
" muito corroído	2 mm
" rebitado, com cabeças cortadas	0,3 mm
cobre ou vidro	0,0015 mm
concreto centrifugado	0,07 mm
cimento alisado	0,3 — 0,8 mm
" bruto	1 — 3 mm
madeira aplainada	0,2 — 0,9 mm
" não aplainada	1 — 2,5 mm
Alvenaria de pedra bruta	8 — 15 mm
Rocha bruta	0,2 mm
Tijolo	5 mm
Alvenaria de pedra regular	1 mm

Fonte: Curso de Hidráulica
Neves, E. T.

VALORES DA RUGOSIDADE ABSOLUTA EQUIVALENTE

Material	ϵ (mm) Rugosidade absoluta equivalente
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço galvanizado, com costura	0,15 a 0,20
Aço galvanizado, sem costura	0,06 a 0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido em uso com cimento centrifugado	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de uso	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epoxi, PVC, plásticos em geral, tubos extrudados	0,0015 a 0,010

Fonte: Hidráulica Básica 4º ed
Porto, R. M.

1 G

Valores recomendados de rugosidade para dutos comerciais

<i>e</i>							
Material	Condição	mm	Incerteza, %	Material	Condição	mm	Incerteza, %
Aço	Chapa metálica, nova	0,05	± 60	Latão	Estirado, novo	0,002	± 50
	Inoxidável, novo	0,002	± 50	Plástico	Tubo estirado	0,0015	± 60
	Comercial, novo	0,046	± 30	Vidro	—	Liso	± 60
	Rebitado	3,0	± 70	Concreto	Alisado	0,04	± 60
	Oxidado	2,0	± 50		Rugoso	2,0	± 50
Ferro	Fundido, novo	0,26	± 50	Borracha	Alisada	0,01	± 60
	Fojado, novo	0,046	± 20	Madeira	Aduela	0,5	± 40
	Galvanizado, novo	0,15	± 40				
	Fundido asfaltado	0,12	± 50				

Fonte: Mecânica dos Fluidos
White, F.M. 4º Ed.

ANEXO 2 – VALORES DA RUGOSIDADE EQUIVALENTE DE TUBOS. FONTE: INTERNET

2 A

TYPICAL PIPE ROUGHNESS VALUES

Material	Pipes condition	Roughness height (mm) K
Glass, cooper, bronze, aluminum, plastic	New made pipes	0- 0.0015
PE	New made pipes- old pipes	0.002-0.004
PVC	New made pipes- old pipes	0.006-0.012
Rolled steel	New made pipes, technical smoothed	0.01- 0.05
Welded and from steel plate	New made pipes	0.05- 0.10
	Old pipes - started scurf	0.15- 0.2
	Matured scurf	max 3.0
Mettle	New made pipes	0.05
Gray cast	New made pipes, shifted	0- 0.12
	New made pipes, no shifted	0.15
	Old pipes, started scurf	max 1.5
	Matured scurf	max 3
Asbestos cement	New made pipes	0- 0.3
Concrete	New made pipes, reinforced, smoothed	0- 0.15
	New made pipes, roughed	0- 0.8
	Old pipes, good treated	0.2- 0.3

Fonte: [http:// www.balby.com/software/hidro-kanenge3.html](http://www.balby.com/software/hidro-kanenge3.html)

2 B

Comparative Pipe Roughness Values

Material	Darcy-Weisbach Roughness Height
	k (mm)
Asbestos cement	0.0015
Brass	0.0015
Brick	0.6
Cast-iron, new	0.26
Concrete:	
Steel forms	0.18
Wooden forms	0.6
Centrifugally spun	0.36
Copper	0.0015
Corrugated metal	45
Galvanized iron	0.15
Glass	0.0015
Lead	0.0015
Plastic	0.0015
Steel	
Coal-tar enamel	0.0048
New unlined	0.045
Riveted	0.9
Wood stave	0.18

Fonte: http://docs.bentley.com/em/hmwaterCAD/Bentley_watergems_help_19_40.html

2 C

RELATIVE ROUGHNESS FOR SOME COMMON MATERIALS

	$10^{-3} (m)$
Copper, Lead, Brass, Aluminum (new)	0.001 - 0.002
PVC and Plastic Pipes	0.0015 - 0.007
Epoxy, Vinyl Ester and Isophthalic pipe	0.005
Stainless steel	0.015
Steel commercial pipe	0.045 - 0.09
Stretched steel	0.015
Weld steel	0.045
Galvanized steel	0.15
Rusted steel (corrosion)	0.15 - 4
New cast iron	0.25 - 0.8
Worn cast iron	0.8 - 1.5
Rusty cast iron	1.5 - 2.5
Sheet or asphalted cast iron	0.01 - 0.015
Smoothed cement	0.3
Ordinary concrete	0.3 - 1
Coarse concrete	0.3 - 5
Well planed wood	0.18 - 0.9
Ordinary wood	5

Fonte: http://www.engineeringtoolbox.com/major_loss_ducts_tubes_d_459.html

2 D

Internal roughness (e) of common pipe materials.

Materials	e (mm)
Cast iron (Asphalt dipped)	0.1220 mm
Cast iron	0.4000 mm
Concrete	0.3000 mm
Copper	0.0015 mm
PVC	0.0050 mm
Steel	0.0450 mm
Steel (Galvanised)	0.1500 mm

Fonte: http://knol.google.com/k/d_gardiner/how_to_calculate_pressure_drop_and/35e6sqhxsbdsg/

2 E

RUGOSIDADE

Material	Roughness (mm)
Drawn Tubing, Glass, Plastic	0.0015-0.01
Drawn Brass, Copper, Stainless Steel (New)	>0.0015-0.01
Flexible Rubber Tubing - Smooth	0.006-0.07
Flexible Rubber Tubing - Wire Reinforced	0.3-4
Stainless Steel	0.03
Wrought Iron (New)	0.045
Carbon Steel (New)	0.02-0.05
Carbon Steel (Slightly Corroded)	0.05-0.15
Carbon Steel (Moderately Corroded)	0.15-1
Carbon Steel (Badly Corroded)	01/mar
Asphalted Cast Iron	0.1-1
Cast Iron (new)	0.25
Cast Iron (old, sandblasted)	1
Sheet Metal Ducts (with smooth joints)	0.02-0.1
Galvanized Iron	0.025-0.15
Riveted Steel	0.91-9.1
Brickwork, Mature Foul Sewers	3

Fonte: <http://knowledgebase.nativedynamics.com.au/articles/010003/010003.php>

2 F

rugosidades médias absolutas de alguns materiais.

Material	Rugosidade média mm	Material	Rugosidade média mm
Aço laminado novo	0,0015	Ferro fundido c/ incrustação	1,5 - 3
Aço laminado usado	0,046	Ferro fundido enferrujado	1 - 1,5
Aço galvanizado	0,15	Ferro fundido novo	0,26 - 1
Aço soldado liso	0,1	Ferro fundido revestido c/ asfalto	0,12 - 0,26
Alvenaria de pedra fina	1 - 2,5	Madeira aplainada	0,2 - 0,9
Alvenaria de pedra grosseira	8 - 15	Madeira bruta	1 - 2,5
Alvenaria de tijolo	5	Polietileno	0,001
Cobre	0,0015	PVC rígido	0,005
Concreto alisado	0,3 - 0,8	Vidro	0,0015
Concreto centrifugado	0,07		

Fonte: http://mspc.eng.br/FLDETC/FLUID_0550_SHTML

2 G

Pipe absolute roughness values	
Material	Absolute roughness (micron or $m \times 10^{-6}$)
Riveted steel ¹	915-9150
Concrete ¹	305-3050
Ductile iron ²	2591
Wood stave ¹	91-183
Galvanized iron ¹	152
Cast iron – asphalt dipped ¹	122
Cast iron uncoated ¹	254
Carbon steel or wrought iron ¹	45
Stainless steel ¹	45
Fiberglass ³	5
Drawn tubing – glass, brass, plastic ¹	1.5
Copper ²	1.5
Aluminium ²	1.5
PVC ²	1.5
Red brass ²	1.5

Fonte: http://www.pumpfundamentals.com/download_free/pipe_rough_values.pdf

2 H

VARIOUS TYPICAL VALUES OF HYDRAULICS ROUGHNESS

Type of Pipe	$\varepsilon \cdot 10^3 \text{ .. } (\varepsilon_{\text{mm}})$
Cast Iron	0,203
Galvanised Steel	0,152
Steel/Wrought Iron	0,051
Riveted Steel	0,91 - 9,1
Asphalted Cast Iron	0,12
Wood-Stave	0,18 - 0,91
Concrete	3,0
Spun Concrete	0,203
Drawn Copper, Brass Steel, Glass	Smooth

Fonte: http://www.roymech.co.uk/related/fluids_pipe.html

TYPICAL SURFACE ROUGHNESS		
Material	Nature of Material	Roughness [mm]
Steel pipe	drawn, new	0.02 - 0.1
	welded, new	0.05 - 0.1
	galvanized, new	0.15
	used, cleaned	0.15 - 0.2
	lightly corroded	0.1 - 0.4
	severely corroded	0.4 - 3
	light scaling	1 - 1.5
	heavy scaling	1.5 - 4
	bitumed coated	0.05
cast - iron pipe	new	0.25 - 1
	corroded	1 - 2
	with scaling	1 - 4
concrete pipe	smooth finish	0.3 - 1
	rough	1 - 3
Sheet steel	smooth	0.07
Glass, lead, copper, brass		0.0001 - 0.0015

Fonte: www.the.engineering_pag.com/forms/dp/typ_eps.html