

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BANCADA PARA ENSAIOS DE
FILTRAÇÃO DE GASES A ALTA PRESSÃO**

Edison Ricco Junior

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE BANCADA PARA ENSAIOS
DE FILTRAÇÃO DE GASES A ALTA PRESSÃO**

Edison Ricco Junior
Orientadora: Prof . Dra. Mônica Lopes Aguiar

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, área de Controle Ambiental.

**São Carlos – SP
2009**

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

R494pc

Ricco Junior, Edison.

Projeto e construção de bancada para ensaios de filtração de gases a alta pressão / Edison Ricco Junior. -- São Carlos : UFSCar, 2009.

112 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2009.

1. Filtração de gases. 2. Filtros a pressão. I. Título.

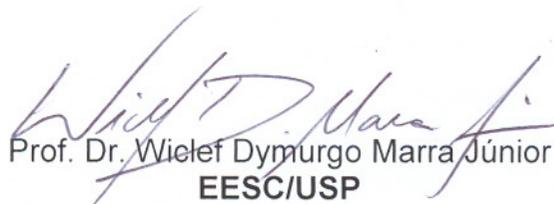
CDD: 660 (20^a)

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE
EDISON RICCO JÚNIOR APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS, EM
30 DE MARÇO DE 2009.

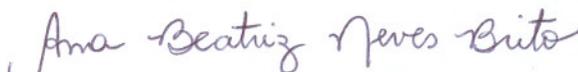
BANCA EXAMINADORA:



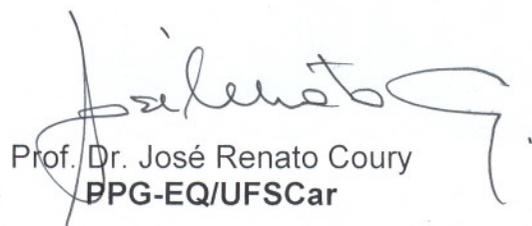
Prof^a. Dr^a. Mônica Lopes Aguiar
Orientadora, PPG-EQ/UFSCar



Prof. Dr. Wielef Dymurgo Marra Júnior
EESC/USP



Prof^a. Dr^a. Ana Beatriz Neves Brito
DEQ/UFSCar



Prof. Dr. José Renato Coury
PPG-EQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente a Deus pelo direcionamento dos meus caminhos.

À minha esposa Annelise pelo amor, e por estar sempre ao meu lado.

Aos meus filhos Bruno e os gêmeos que estão a caminho.

Aos meus pais, Edison e Lia, por acreditarem em mim e sempre estarem presentes em todos os momentos da minha vida. Quero dedicar também a minha irmã Flávia que sempre me ajudou. Uma dedicação ao meu sogro Oduvaldo e aos cunhados, Meire, Fábio, Maira, Cesar e Jorge pela cooperação e incentivo neste trabalho.

À Professora Mônica Lopes Aguiar pela dedicação, sugestões, apoio, compreensão e pela confiança em meu trabalho. Gostaria de agradecer também pela grande amizade construída durante todo esse tempo de mestrado a qual levarei para sempre.

Ao Professor José Renato e a Doutora Ana Beatriz pela contribuição e sugestões no Exame de Qualificação.

Ao amigo Eduardo pela amizade e o incentivo construídos durante todo este tempo de mestrado.

Aos amigos do DEQ.

Aos amigos do laboratório de controle ambiental, aos técnicos Juliana e Oscar, e a todas as pessoas que me ajudaram direta e indiretamente neste trabalho.

Aos amigos da Apexfil Marcel e Lourival pelo apoio.

Aos velhos amigos Fábio, Fábio, Luis, Ricardo e Pedro pela grande amizade construída.

À Apexfil pelo apoio financeiro.

Ao departamento de Engenharia Química pela estrutura e equipamentos utilizados no trabalho.

Ao CNPq pelo financiamento pelo projeto de pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	vii
SIMBOLOGIA	viii
LETRAS GREGAS	ix
RESUMO	x
ABSTRACT	xii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 O GÁS NATURAL	3
2.1.1 Origem do gás natural	3
2.1.2 Composição do gás	6
2.1.3 Características do gás natural	9
2.1.4 Produção e reservas mundiais de gás natural	10
2.1.5 História do gás natural no Brasil	11
2.1.6 Extração do gás natural	14
2.1.7 Armazenamento e distribuição do gás natural	16
2.1.8 Meios de transportes utilizados para a distribuição do gás natural	16
2.1.9 Gasoduto Brasil - Bolívia	19
2.1.10 Aplicação do gás natural na indústria	21
2.1.11 Equipamentos que utilizam gás natural	23
2.1.12 Aplicação de Gás Natural Veicular (GNV)	24
2.1.13 Origem das partículas no sistema	25
2.1.14 Pó preto em gasodutos	25
2.2 FILTRAÇÃO	28
2.3 FILTRAÇÃO DE GASES	29
2.3.1 A importância da perda de carga	31
2.3.2 Permeabilidade	34
2.3.3 Cálculo da eficiência de filtração (Razão Beta)	35
2.4 FILTROS E MEIOS FILTRANTES	35
2.4.1 Definição de meios filtrantes	35
2.4.2 Definição de filtros	36

2.4.3	Propriedades dos meios filtrantes	37
2.4.4	Meios filtrantes superficiais	38
2.4.5	Meios filtrantes de profundidade	40
2.4.6	Vida útil do elemento filtrante	42
3	ELABORAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL	45
3.1	PRIMEIRO PROJETO	45
3.2	SEGUNDO PROJETO	52
3.2.1	Realização dos experimentos de filtração	57
3.3	TERCEIRO PROJETO	59
3.4	MATERIAIS	76
3.4.1	Materiais Pulverulentos	76
3.4.2	Meios filtrantes	77
3.4.3	Gás – Ar comprimido	78
3.4.4	Procedimento experimental	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	80
4.1	ENSAIOS DE FILTRAÇÃO	80
4.2	PERMEABILIDADE DOS MEIOS FILTRANTES	81
4.3	ENSAIO DE PERDA DE CARGA	83
4.4	EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO	84
4.5	TORTA FILTRANTE	85
4.6	EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO E PERDA DE CARGA PARA PAPEL CELULOSE VARIANDO A PRESSÃO	85
5	CONCLUSÃO	88
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
	APÊNDICE A	95
	ANEXO AN	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Reservas provadas de gás natural no Brasil	13
Figura 2.2:	Campo de Tupi na camada de pré-sal	14
Figura 2.3:	Extração do gás natural	15
Figura 2.4:	Unidade de descompressão de GNC	16
Figura 2.5:	Caminhão equipado com carreta para transporte de GNC	17
Figura 2.6:	Gasoduto GNC	18
Figura 2.7:	Gasoduto Bolívia – Brasil	20
Figura 2.8:	Gasodutos na América Latina	21
Figura 2.9:	Participação setorial em 2006	23
Figura 2.10:	Sistema de resfriamento e aquecimento de máquinas	24
Figura 2.11:	Pó preto nas paredes internas da tubulação	27
Figura 2.12:	Desgaste na parte superior entre o diafragma e o regulador Trim	28
Figura 2.13:	Faixa de tamanho de partículas	29
Figura 2.14:	Esquema de filtração de superfície	38
Figura 2.15:	Tecido simples	39
Figura 2.16:	Tecido reps	39
Figura 2.17:	Esquema de montagem de filtros de profundidade	41
Figura 2.18:	Partícula grudada nas fibras pela força de Van der Waals	41
Figura 2.19:	Filtração de profundidade	42
Figura 2.20:	Perda de carga de um elemento filtrante	43
Figura 3.1:	Esquema de montagem da bancada de ensaios de meios filtrantes	47
Figura 3.2:	Esquema de compressão do ar e tratamento do ar comprimido	48
Figura 3.3:	Bancada de ensaios de meios filtrantes a alta pressão	54
Figura 3.4:	Foto da bancada do segundo projeto no laboratório	55
Figura 3.5:	Foto da bancada no tramo principal	56
Figura 3.6:	Aspersor de pó no tramo secundário	56
Figura 3.7:	Montagem final da bancada	57
Figura 3.8:	Filtro de linha com manômetro diferencial e filtro absoluto	58
Figura 3.9:	Aspersor de pó	58
Figura 3.10:	Montagem do filtro absoluto	59

Figura 3.11:	Bancada de ensaio na terceira versão do projeto	60
Figura 3.12:	Dimensional da bancada na terceira versão do projeto	61
Figura 3.13:	Dimensional da bancada na terceira versão do projeto	61
Figura 3.14:	A pressão interna do sistema formando um abaulamento na tampa do suporte da rosca sem fim.	63
Figura 3.15:	Mascara de aço inox na chapa de acrílico	63
Figura 3.16:	Tampa do alimentador de partículas	64
Figura 3.17:	Bancada final na terceira versão de projeto	65
Figura 3.18:	Desenho do motorreductor e a rosca sem fim	66
Figura 3.19:	Motorreductor para o sistema de alimentação de partículas por rosca sem fim	67
Figura 3.20:	Alimentador do pó com rosca sem fim	67
Figura 3.21:	Sistema de alimentação de partículas com a abertura rápida, o visor de acrílico e a mangueira de pressurização do sistema	68
Figura 3.22:	Dimensões do porta filtro	68
Figura 3.23:	Dimensões do suporte do meio filtrante, porcas de fixação e a junta de vedação	69
Figura 3.24:	Filtro onde se colocam os diferentes meios filtrantes	70
Figura 3.25:	Dimensões do filtro absoluto	71
Figura 3.26:	Filtro absoluto	72
Figura 3.27:	Sistema de limpeza dos meios filtrantes	72
Figura 3.28:	Sistema de preparação do ar comprimido composto de pré filtro, filtro coalescente fino, secador de ar comprimido e coalescente super fino	73
Figura 3.29:	Contador de partículas marca Klotz	74
Figura 3.30:	Esquema do painel da automação	75
Figura 3.31:	Caixa de automação com os sensores	75
Figura 3.32:	Monitor da automação e controle da perda de carga	76
Figura 3.33:	Distribuição granulométrica da rocha fosfática retida no meio filtrante	77
Figura 3.34:	Distribuição granulométrica da rocha fosfática alimentada	77
Figura 4.1:	Formação de torta filtrante	80
Figura 4.2:	Permeabilidade darciana para os meios filtrantes metálico, poliéster	81

	tratado e papel celulose	
Figura 4.3:	Permeabilidade não darciana para os meios filtrantes metálico, poliéster tratado e papel celulose	82
Figura 4.4:	Perda de carga obtida para os meios filtrantes de metal, poliéster tratado e papel celulose	83
Figura 4.5:	Eficiência fracionária dos meios filtrantes de metal, poliéster tratado e papel celulose	84
Figura 4.6:	Imagem obtida por MEV com aumento de 100x da penetração das partículas de rocha fosfática no meio filtrante de poliéster tratado	85
Figura 4.7:	Eficiência fracionária do papel celulose variando a pressão de 1, 3 e 7 bar	86
Figura 4.8:	Perda de carga do papel celulose variando a pressão em função do tempo de filtração para pressões de 1, 3 e 7 bar	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Composição típica do gás natural	6
Tabela 2.2:	Composição do gás natural bruto em alguns países	7
Tabela 2.3:	Especificação para o gás natural comercializado no Brasil	8
Tabela 2.4:	Constante física dos hidrocarbonetos	9
Tabela 2.5:	Quadro comparativo gás natural X óleo combustível X GLP	22
Tabela 2.6:	Equações para o cálculo da abertura da tela	40
Tabela 3.1:	Caracterizações dos filtros	78
Tabela 4.1:	Diferença do peso da massa retida nos meios filtrantes com a diferença de pressão	87

SIMBOLOGIA

A	Área de filtração [L^2]
AA	Área aberta [%]
dp	Diâmetro de partículas [L]
E	Eficiência [%]
G_1	Fluxo de partículas [M^3T^{-1}]
K_1	Resistência específica do meio filtrante [ML^2T^2]
K_2	Resistência específica da torta [T^{-1}]
L	Espessura do meio filtrante [L]
L_c	Espessura da torta [L]
L_F	Espessura do meio filtrante [L]
L_t	Espessura total [L]
M	Massa de torta [M]
P	Peso [M]
P_e	Pressão medida na entrada do meio filtrante [$ML^{-1}T^{-2}$]
P_s	Pressão medida na saída do meio filtrante [$ML^{-1}T^{-2}$]
PM	Peso por metro [ML^{-2}]
Q	Vazão mássica de pó [$M T^{-1}$]
S_E	Arraste efetivo do filtro [$M L^2 T^{-1}$]
S_F	Arraste do filtro [$M L^2 T^{-1}$]
T	Temperatura [K]
V	Volume [M^3]
V_s	Velocidade do fluido [LT^{-1}]
W	Massa de pó depositada por unidade de área [ML^{-2}]

LETRAS GREGAS

α	Coeficiente de resistência viscosa [L^{-2}]
β	Efeito beta [%]
ΔP	Perda de carga [$ML^{-1}T^{-2}$]
ΔP_c	Queda de pressão devido à formação da torta [$ML^{-1}T^{-2}$]
ΔP_f	Queda de pressão no filtro [$ML^{-1}T^{-2}$]
ΔP_T	Queda de pressão total [$ML^{-1}T^{-2}$]
μ	Viscosidade do fluido [$ML^{-1}T^{-1}$]
ρ	Densidade do fluido [ML^{-3}]
ρ_p	Densidade da partícula de pó [ML^{-3}]

RESUMO

Com a expansão industrial e o aumento de veículos montados diariamente, houve um aumento crescente na utilização do gás natural como combustível. Além de mais barato o nível de emissão de poluentes com a queima do gás natural como combustível é mais baixo que todos os combustíveis utilizados até hoje.

O crescente aumento do consumo do gás natural e a rigorosidade da legislação em relação ao meio ambiente ocasionaram uma maior procura pelo conhecimento do comportamento dos diversos meios filtrantes que pudessem ser utilizados na filtração a alta pressão.

Diante desta situação, foi projetado e desenvolvido um equipamento capaz de suportar altas pressões durante a filtração de gases. Ao longo dos ensaios, foram necessárias algumas alterações neste projeto, com o objetivo de se obter a configuração mais adequada para a realização dos experimentos.

Para verificar o funcionamento deste equipamento realizou-se uma investigação preliminar, não só dos meios filtrante de celulose, que são bastante utilizados neste tipo de filtração, mas também, de poliéster tratado e metálico, que pudessem ser reutilizados evitando o acúmulo de resíduos com seu descarte.

Os ensaios foram realizados com pressões relativas manométricas variando de 98 a 900 KPa e vazões de ar de 0,00028 a 0,0019 m³/s, para determinação do coeficiente de permeabilidade. Para verificar a formação de torta filtrante e a eficiência dos meios filtrantes, realizou-se ensaios a 500 KPa e 0,0016 m³/s utilizando rocha fosfática como material particulado.

Ao final do estudo, verificou-se que os coeficientes de permeabilidade darciana e não-darciana (k_1 e k_2) aumentaram com a elevação da pressão do sistema. As curvas de pressão versus velocidade apresentaram comportamento linear, mostrando que as forças viscosas foram predominantes em relação às forças inerciais.

O meio filtrante de celulose, quando submetido à pressão de 500 KPa, apresentou a maior perda de carga, menor eficiência e menor permeabilidade.

Os meios filtrantes de poliéster tratado e metálico apresentaram perda de carga e eficiência bastante similares, porém o tecido mostrou uma permeabilidade um pouco menor que do metálico.

Os três meios filtrantes apresentaram eficiência fracionária semelhantes para coleta

de partículas maiores que 15 μm (aproximadamente 90%), porém para partículas menores que 0,5 μm , o meio filtrante de celulose, mostrou ser menos eficiente que os outros meios estudados neste projeto, devido a sua alta perda de carga e menor permeabilidade.

Isto mostra que apesar do filtro celulósico ter um custo relativamente mais barato para a filtração de gás natural, este apresenta um desempenho inferior aos meios filtrantes metálicos e de poliéster tratado, sendo os dois últimos os mais indicados para a filtração em alta pressão.

Foi escolhido o meio filtrante em papel celulose, pois é o que apresentou o desempenho mais baixo para ensaio com variação de pressão. Foi submetido a pressões de 1, 3 e 7 bar. Ao analisar a eficiência fracionária, percebe-se que quanto maior a pressão, menor é a eficiência do meio filtrante.

ABSTRACT

With the industrial expansion and the increase of vehicles assembled daily, there was an increase in the use of natural gas as combustible. Beyond the cheaper the level of emission of pollutants by burning natural gas as fuel it is lower than all the fuels used until today.

The increasing consumption of natural gas and the severity of the legislation in respect to the environment caused a greater search for knowledge of the behavior of various filter media that could be used in high pressure filtration.

In face of this situation, it was projected and developed an equipment capable to support high pressures during the filtration of gases. During the tests, some changes in this project were needed, with the objective of obtaining the most suitable configuration for the accomplishment of the experiments.

To verify the operation of this equipment there was a preliminary investigation, not only of cellulose filter media, that sufficiently are used in this type of filtration but also, the polyester treated and metallic, which could be reused to avoid the accumulation of residues with its discard.

The tests were conducted with pressures ranging from 98 to 900 KPa and fair flow from 0.00028 to 0.0019 m³/s, to determine the coefficient of permeability. To verify the formation of filter cake and efficiency of the filter media, it was made tests from 500 KPa and 0.0016 m³/s using phosphate rock as particulate material.

At the end of this study, it was verified that the permeability coefficients darciana and non-darciana (k_1 and k_2) increased with increasing pressure of the system. The curves of pressure versus velocity showed linear behavior, showing that the viscous forces was predominant in relation to the inertial forces.

The cellulose filter media, when subjected to pressure of 5 bar, showed the greatest loss, lower efficiency and lower permeability.

The filter media made of polyester and metal showed loss of load and efficiency quite similar, but the fabric has a permeability a slightly smaller than the metallic one.

Three filter media showed similar fractional efficiency for collecting particles larger than 15 μm (~ 90%), but for particles smaller than 0.5 μm , the cellulose filter media, was shown to be less efficient than the other studies in this project, because of its high back pressure and lower permeability.

This shows that despite the cellulosic filter has a relatively cheaper cost for the filtration of gas, this gives a performance below the metallic filter media polyester treated and the last two the most suitable for filtration at high pressure.

It was chosen the filter media of cellulose paper, which was showed the lowest performance for the assays with pressure variaty. It was submitted to pressures of 1, 3 and 7 bar. When analyzing the fractional efficiency, we find out that the higher the pressure, the smaller the efficiency of the filter media.

1. INTRODUÇÃO

A demanda crescente pelo uso do gás natural como alternativa energética no campo automotivo, entre outros, tem gerado uma procura maior por tecnologias mais baratas e eficientes para limpeza de gases. O gás natural, quando transportado em gasodutos a alta pressão, está “sujo” ou “contaminado” com material particulado, seja na forma de gotas resultante de processos de condensação, ou como pó preto (sulfeto de ferro). Em um gasoduto típico, a concentração de pó preto é em média de 15 mg/m^3 .

Os principais equipamentos para limpeza do gás natural são os filtros e os ciclones. Entretanto, a filtração de gás natural é hoje realizada de uma maneira bastante empírica, sem se preocupar com as condições operacionais e qual o melhor meio filtrante para tais condições. Atualmente, um simples filtro, na maioria dos casos, de papel, é colocado para separar os contaminantes, sem se ter o conhecimento se aquele meio filtrante utilizado é o mais adequado para retirar as impurezas do gás, para proteger os equipamentos e os componentes dispostos na linha do gasoduto de possíveis danos, desgastes ou paradas dos equipamentos pela entrada de contaminantes nos equipamentos.

Assim sendo, a filtração dentro do campo de gás natural tem que ser mais do que uma ação empírica, ou uma obrigação de se colocar um simples filtro antes do componente para a proteção de danos.

Com todos estes atrativos, o mercado de gás foi obrigado a se estruturar com equipamentos modernos para atender esta demanda crescente. Estes equipamentos, tais como reguladores de pressão, medidores de vazão, válvulas, etc, requerem controles rigorosos de contaminantes. Os filtros de pressão são equipamentos que, cada vez mais vêm ganhando importância nas estações de regulagem de gás natural.

A filtração é uma importante operação utilizada na separação gás sólido, pela passagem do fluido através de um meio poroso permeável (DICKENSON, 1994). Pode ocorrer pela captura de partículas sólidas ou líquidas no interior do meio filtrante, denominada filtração interna ou pela impregnação do meio filtrante e a formação de uma camada de material particulado denominada torta de filtração.

Como o gás natural é pressurizado pode-se trabalhar com pressões de 7 a 70 KPa. Devido às altas pressões de trabalho os filtros utilizados para separar as partículas do gás são conhecidos como vasos de pressão e são projetados com diversas normas. O Brasil adotou a

norma americana ASME VIII (American Society Mechanical Engineering) e são inspecionadas pela norma regulamentadora NR-13.

No interior dos vasos encontram-se os elementos filtrantes, que podem ter diversos formatos, tipos, retenções e materiais. Os mais comuns são do tipo cesto ou cartucho que se diferem pelo fato de que no cesto a filtração ocorre de dentro pra fora e o particulado fica dentro do cesto e no cartucho ocorre de fora para dentro.

Contrariamente ao que acontece com quase todos os equipamentos, a grande maioria dos vasos de pressão são projetados e construídos sob encomenda e sob medida para atender a uma determinada finalidade ou determinações de desempenho. O projeto de um vaso de pressão inclui não somente o seu dimensionamento físico para resistir à pressão e demais cargas atuantes como também a seleção técnica e econômica dos materiais adequados.

Normalmente os fabricantes de meios filtrantes informam a classe de retenção média e a eficiência. Esta informação é o fator mais importante para o projeto, dimensionamento e fabricação do filtro, pois se consegue garantir a melhor aplicação no sistema empregado. Para confrontarmos as informações fornecidas pelos fabricantes de meios filtrantes utilizou-se as equações no cálculo da eficiência.

Os meios filtrantes mais utilizados para a filtração de gás natural são as telas metálicas, papel celulose e tecido sintético. A faixa de tamanho das partículas que ficam retidas nesses meios filtrantes pode variar de 5 a 50 μm dependendo de cada aplicação.

Desta forma, este trabalho teve como objetivo construir um equipamento para trabalhar com filtrações de gases a alta pressão (até 1000 KPa), realizando ensaios preliminares para determinar a perda de carga, a eficiência e os parâmetros de permeabilidade, verificando o comportamento das fibras dos meios filtrantes quando submetidos a uma filtração de gases a alta pressão.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O GÁS NATURAL

O gás natural é como o próprio nome indica, uma substância em estado gasoso nas condições ambiente de temperatura e pressão. Por seu estado gasoso e suas características físico-químicas naturais, qualquer processamento desta substância, seja compressão, expansão, evaporação, variação de temperatura, liquefação ou transporte exigirá um tratamento termodinâmico como qualquer outro gás.

O gás natural é empregado diretamente como combustível, tanto em indústrias, casas e automóveis. É considerado uma fonte de energia mais limpa que os derivados do petróleo e do carvão. Alguns dos gases de sua composição são eliminados porque não possuem capacidade energética (nitrogênio ou CO₂) ou porque podem deixar resíduos nos condutores devido ao seu alto peso molecular em comparação ao metano (COMGÁS, 2006).

Quando utilizado como combustível, a emissão de poluentes é mais limpa e, portanto, dá uma vida mais longa aos equipamentos e um menor custo de manutenção do sistema.

O gás natural, quando utilizado em motores de ônibus, automóveis e caminhões substituindo a gasolina e o álcool, pode ser até 70% mais barato que outros combustíveis, além de menos poluente. Também pode ser utilizado na indústria para a produção de metanol, amônia e uréia.

No Brasil o consumo de gás natural cresceu com a construção do gasoduto Brasil - Bolívia, porém o gás natural contém muitas partículas provenientes da extração e do transporte, o que ocasiona um mal funcionamento dos equipamentos instalados no gasoduto. As empresas de gás natural do Brasil tem se preocupado com a instalação de equipamentos mais modernos e os filtros tem uma maior preocupação tanto em funcionamento, quanto em eficiência de filtração.

2.1.1 Origem do gás natural

A história do gás natural confunde-se com a própria evolução da Terra. Após a formação da Terra há 5,5 bilhões de anos – consolidação de sua crosta e condensação dos

oceanos – os primeiros gases a constituírem a atmosfera foram o Hidrogênio (H₂) e o Hélio (He), expelidos pela crosta terrestre.

O hidrogênio, combinado com outros elementos – inclusive carbono, nitrogênio e oxigênio, deu origem aos primeiros compostos, tais como metano, amônia, água e outros, alterando de forma significativa as características da atmosfera (POULALLION, 1986). O gás natural pode ser proveniente de três diferentes fontes: da degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbicas, do carvão a temperatura e pressões elevadas, ou da alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos.

A matéria orgânica fóssil é também chamada de querogêneo. Este pode ser de dois tipos: seco, quando derivado de matéria vegetal, e gorduroso, quando proveniente de algas e matéria animal.

A celulose e a lignina submersas foram hidrolisadas, umidificadas e transformadas em querogêneo seco, alcançando lentamente maiores profundidades do solo. Sofrendo um processo gradual de cozimento este querogêneo foi, posteriormente, transformado em linhito, carvão negro, antracito, xisto carbonífero e metano.

Como a maioria destas substâncias é sólida, formadas por cadeias de anéis aromáticos – estruturas mais compactas – não provaram ser muito destrutíveis ao longo da história geológica, exceto em algumas áreas onde possa ter ocorrido erosão. Este fato explica as consideráveis reservas de carvão em comparação ao petróleo: aproximadamente 663 bilhões de toneladas contra 92 bilhões de toneladas de reservas de petróleo (reservas provadas).

Desta forma, cada estágio na alteração deste querogêneo corresponde, a um retorno à atmosfera e/ou à matriz de um de seus principais constituintes, razão pela qual é muito comum encontrar-se reservas de óleo e gás associado. Nos últimos estágios de degradação do querogêneo gorduroso, o petróleo se apresenta como condensado volátil associado aos hidrocarbonetos gasosos, onde predomina o metano (GÁS BRASIL, 2006).

Estima-se então, que as reservas de gás natural existentes sejam muito maiores que as de óleo e de carvão, visto que ele pode ser encontrado na natureza na presença de carvão ou de óleo, ou procedente deles, dependendo de sua origem.

Todavia, os volumes de gás encontrado dependem do estágio de degradação alcançado pelos sedimentos orgânicos e das próprias características do gás natural que, sendo de baixa densidade, migra facilmente através das camadas do solo em direção à superfície, se dispersando a menos que encontre no caminho “capeadores” que favorecem sua acumulação.

O gás natural é a designação genérica para uma mistura de hidrocarbonetos gasosos contendo principalmente metano.

Segundo a GASENERGIA (2006), registros antigos mostram que a descoberta do gás natural ocorreu no Irã entre 6.000 e 2.000 a.C. e que, na Pérsia, utilizavam o combustível para manter aceso o "fogo eterno", símbolo de adoração de uma das seitas locais. O gás natural já era conhecido na China desde 900 a.C, mas foi em 211 a.C. que o país começou a extrair a matéria-prima com o objetivo de secar pedras de sal. Utilizavam varas de bambu para retirar o gás natural de poços com profundidade aproximada de 1000 metros.

Na Europa, o gás natural só foi descoberto em 1659, não despertando interesse por causa da grande aceitação do gás resultante do "town gas", um carvão carbonizado, que foi o primeiro combustível responsável pela iluminação de casas e ruas desde 1790. Já nos Estados Unidos, o primeiro gasoduto com fins comerciais entrou em operação na cidade de Fredonia, no Estado de Nova York, em 1821, fornecendo energia aos consumidores para iluminação e preparação de alimentos.

Mais tarde, o gás natural passou a ser utilizado em maior escala na Europa no final do século XIX, devido à invenção do Queimador Bunsen, em 1885 (por Robert Bunsen), que misturava ar com gás natural, e a criação de um gasoduto à prova de vazamentos, em 1890. Mesmo assim, as técnicas de construção eram modestas e os gasodutos tinham no máximo 160 km de extensão, impedindo o transporte de grandes volumes a longas distâncias, e, conseqüentemente, reduzindo a participação do gás natural no desenvolvimento industrial, marcado pela presença de óleo e carvão.

No final de 1930, os avanços em tecnologia viabilizaram a construção de gasodutos para o transporte do gás natural para longos percursos. O mercado industrial do gás natural era relativamente pequeno até a II Guerra Mundial, quando então o gás natural tornou-se extremamente disponível. Entre 1927 e 1931 já existiam mais de 10 linhas de transmissão de gás natural de grande porte nos Estados Unidos, mas sem alcance interestadual. A descoberta de vastas reservas também contribuiu para reduzir o preço do gás natural, que o tornou uma opção mais atraente que o "town gas" (GASENERGIA, 2006).

O "boom" de construções pós-guerra durou até o ano de 1960 e foi responsável pela instalação de milhares de quilômetros de dutos, proporcionado pelos avanços em metalurgia, técnicas de soldagem e construção de tubos. Desde então, o gás natural passou a ser utilizado em grande escala por vários países, devido às inúmeras vantagens econômicas e ambientais.

2.1.2 Composição do gás

A composição do gás natural bruto é função de uma série de fatores naturais que determinaram os seus processos de formação e as condições de acumulação do seu reservatório de origem.

O gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos em muitos lugares do planeta, tanto em terra quanto no mar, tal qual o petróleo, sendo considerável o número de reservatórios que contém gás natural associado ao petróleo. Nestes casos, o gás recebe a designação de gás natural associado. Quando o reservatório contém pouca ou nenhuma quantidade de petróleo, o gás natural é dito não associado.

A composição típica do gás natural é mostrada na *Tabela 2.1*.

Tabela 2.1: Composição típica do gás natural (COMGÁS, 2006)

Elemento	Percentual %
Metano	89%
Etano	6%
Propano	1,8%
C4+	1,0%
CO ₂	1,5%
N ₂	0,7%

A) Composição do Gás Natural Bruto

Para exemplificar a diversidade e a variabilidade da composição do gás natural bruto, bem como a predominância do gás metano, apresenta-se na *Tabela 2.2* a composição do gás natural bruto em alguns países. Mesmo no Brasil existem diferenças na composição entre as companhias de gás natural, pois a sua exploração está ligada à exploração do petróleo, e cada região possui uma bacia com características diferentes, o que resulta em diferentes poderes caloríficos.

Tabela 2.2: Composição do gás natural bruto em alguns países (COMGÁS, 2006)

ORIGEM	COMPOSIÇÃO EM % VOLUME						Densidade	Poder Calorífico Superior (MJ / Nm ²)
	País / Campo	Metano CH ₄	Etano C ₂ H ₆	Propano C ₃ H ₈	C ₄ e Maiores	CO ₂		
USA	81,8	5,6	3,4	2,2	0,1	6,9	-	42,7
Canadá	88,5	4,3	1,8	1,8	0,6	2,6	-	43,4
Rússia	97,8	0,5	0,2	0,1	0,1	1,3	-	39,6
Austrália	76	4	1	1	16	2	-	35
França	69,2	3,3	1	1,1	9,6	0,6	-	36,8
Alemanha	74	0,6	-	-	17,8	7,5	-	29,9
Venezuela	78,1	9,9	5,5	4,9	0,4	1,2	0,702	47,7
Argentina	95	4	-	-	-	1	0,578	40,7
Bolívia	90,8	6,1	1,2	0	0,5	1,5	0,607	38,8
Brasil								
São Paulo	89,44	6,7	2,26	0,46	0,34	0,8	0,623	40,22
Bahia	88,56	9,17	0,42	-	0,65	1,2	0,615	39,25
Rio G. do Norte	83,48	11	0,41	-	1,95	3,16	0,644	38,54
Rio de Janeiro	84,8	8,9	3	0,9	0,3	1,58	0,664	45,4
Ceará	76,05	8	7	4,3	1,08	1,53	-	52,4

B) Composição do Gás Natural Comercial

A composição comercial do gás natural é variável e depende da composição do gás natural bruto, do mercado atendido, do seu uso final e do produto que se deseja. Apesar desta variabilidade da composição, são parâmetros fundamentais que determinam a especificação comercial do gás natural como teor de enxofre total, gás sulfídrico, gás carbônico, gases inertes, o ponto de orvalho da água e dos hidrocarbonetos e o seu poder calorífico.

Apresentam-se a seguir as normas para a especificação do gás natural a ser comercializado no Brasil, de origem interna e externa, igualmente aplicáveis às fases de produção, de transporte e de distribuição desse produto, determinadas pela Agência Nacional do Petróleo – ANP na Portaria N. ° 41, de 15 de Abril de 1998. O Gás Natural deverá atender às especificações apresentadas na *Tabela 2.3*.

Tabela 2.3: Especificação para o gás natural comercializado no Brasil (COMGÁS, 2006)

Características ⁽¹⁾	Unidades	GRUPOS			Métodos de Ensaio
		B (baixo)	M (médio)	A (alto)	
Poder calorífico superior (PCS)	kcal/m ³	8.000 a 9.000	8.800 a 10.200	10.000 a 12.500	ASTM D 3588
Densidade relativa ao ar		0,54 a 0,60	0,55 a 0,69	0,66 a 0,82	ASTM D 3588
Teor máximo de gás sulfídrico (H ₂ S)	mg/m ³	20	20	20	ASTM D 5504 ou ISO 6326-3
Teor máximo do enxofre (H ₂ S e enxofre mercaptídico)	mg/m ³	80	80	80	ASTM D 5504 ou ISO 6326-3
Teor máximo de dióxido de carbono (CO ₂) ⁽²⁾	% volume	2	2	2	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Teor máximo de inertes ⁽³⁾	% volume	4	4	4	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Teor máximo de oxigênio (O ₂)	% volume	0,5	0,5	0,5	ASTM D 1945 ou ISO 6974
Ponto de orvalho máximo da água à 1atm ⁽⁴⁾	° C	-45	-45	-45	ASTM D 5454

Observações:

- (1) - Limites especificados são valores referidos a 20°C a 101,33 KPa (1 atm), exceto onde indicado.
- (2) - Para as regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 3,5.
- (3) - Para as regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de 6,0.
- (4) - Para as regiões Norte e Nordeste, admite-se o valor de - 39.

Além de obedecer aos índices da *Tabela 2.3*, o gás natural deve estar sempre livre de poeira, água condensada, odores objetáveis, gomas, elementos formadores de goma, glicóis, hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos que possam interferir com a operação dos sistemas de transporte e distribuição e a utilização pelos consumidores.

O gás natural pode ser transportado sem odorização, exceto quando requerido por normas de segurança aplicáveis, porém, é obrigatória a presença de odorante na distribuição.

Para adquirir as características comerciais desejadas o gás natural bruto passa por tratamento em uma Unidade de Processamento de Gás Natural – UPGN, que efetua a retirada de impurezas e a separação dos hidrocarbonetos pesados.

Na UPGN o gás natural passa por um sistema de filtração eficiente para remover quaisquer partículas que estejam em suspensão, que podem ser sólidas, como sujeira ou líquidas, como traços de óleo do sistema de pressurização.

Dependendo da quantidade de partículas no sistema, podem ser removidas com filtros simples, ou com filtros progressivos para evitar um entupimento prematuro e trocas constantes de elementos filtrantes, sendo um sistema mais eficiente.

2.1.3 Características do gás natural

O gás natural comercializável é quase completamente metano e a partir deste ponto do texto será tratado como gás natural. Referências ao gás natural bruto serão explícitas.

Pela predominância do metano na composição do gás natural todas as análises físicas e termodinâmicas podem ser realizadas como se este fosse o único gás presente na mistura, sem comprometimento dos resultados, como tem mostrado a prática. As equações de estado do gás natural são apresentadas no Anexo AN.

Para facilitar a identificação das características do gás natural a *Tabela 2.4* mostra os principais valores de interesse dos hidrocarbonetos.

Tabela 2.4: Constante física dos hidrocarbonetos (COMGÁS, 2006)

Composto	Fórmula	Ponto de vaporização (°C) à 1 atm	Ponto de solidificação (°C) à 1 atm	Temperatura crítica (°C)	Densidade do gás à 16 °C e 1 atm		Calor específico à 16 °C e 1 atm [KJ/Kg°C]		Poder calorífico [MJ/Nm³]		Ar requerido para Combustão [m³ ar/m³ combustível]	Limites de inflamabilidade em mistura com o Ar [%Vol.]	
					Densidade relativa (Ar=1)	[Kg/m³]	Cp	Cv	Superior	Inferior		Inferior	Superior
Metano	CH ₄	-162	-183	-82,2	0,555	0,679	2,20	1,67	40	36	9,53	5,00	15,00
Etano	C ₂ H ₆	-89	-184	32,3	1,046	1,286	1,71	1,45	71	64	16,7	3,22	12,45
Propano	C ₃ H ₈	-43	-188	96,8	1,547	1,916	1,62	1,44	102	93	23,8	2,37	9,50
n-Butano	C ₄ H ₁₀	-11	-139	152,2	2,071	2,534	1,66	1,51	135	124	31	1,86	8,41
Isobutano	C ₄ H ₁₀	-12	-160	135,0	2,067	2,534	1,62	1,46	134	123	31	1,80	8,44
n-Pentano	C ₅ H ₁₂	35	-130	196,9	2,491	3,050	1,66	1,55	170	157	38,1	1,40	7,80
n-Hexano	C ₆ H ₁₄	68	-96	235,0	2,975	3,643	1,67	1,57	211	195	45,3	1,25	6,90
n-Octano	C ₈ H ₁₈	125	-57	196,1	3,943	-	1,67	1,60	233	216	59,6	0,84	3,20
n-Decano	C ₁₀ H ₂₂	173	-30	-	4,912	-	-	1,62	289	268	73,9	0,67	2,60

As importantes características do gás natural são a densidade inferior à do ar, baixo ponto de vaporização e o limite de inflamabilidade em mistura com o ar superior a outros gases combustíveis.

1. Densidade – o gás natural é o único gás cuja densidade relativa é inferior a 1,0, sendo portanto mais leve que o ar. Este fato tem importância decisiva para segurança;
2. Ponto de vaporização – é o ponto em que ocorre a mudança de fase do estado líquido para o estado gasoso em certa combinação de temperatura e pressão. A vaporização do gás natural ocorre à temperatura de $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$;
3. Limites de inflamabilidade – os limites de inflamabilidade podem ser definidos como a percentagem mínima e máxima de gás combustível em composição com o ar, a partir das quais a mistura não irá inflamar-se e permanecer em combustão. O limite inferior representa a menor proporção de gás em mistura com o ar que irá queimar sem a aplicação contínua de calor de uma fonte externa. Em proporções menores ao limite inferior a combustão cessa quando interrompida a aplicação de calor. O limite superior é a proporção de gás na mistura a partir da qual o gás age como diluente e a combustão não pode se autopropagar. Para o gás natural, os limites de inflamabilidade inferior e superior são, respectivamente, 5% e 15% do volume (COMGÁS, 2006).

2.1.4 Produção e reservas mundiais de gás natural

Segundo ANDRADE (1991), ao lado do crescimento da produção do petróleo, observa-se o crescimento da produção e do consumo do gás natural, utilizado não só nas habitações, como sobretudo, na indústria química, como combustível e como matéria-prima; vem-se processando ainda uma verdadeira revolução na indústria siderúrgica, uma vez que a injeção de gás natural ou de óleo combustível nos fornos substitui parcialmente o coque obtido da destilação do carvão mineral.

Daí a exploração de áreas produtoras apenas de gás, assim como a utilização do gás obtido nos poços de petróleo e até nas refinarias.

Dados da Agência Nacional do Petróleo (ANP) mostraram que em 2004, as reservas provadas mundiais de gás natural somaram 155,8 trilhões m^3 , registrando um crescimento de 0,1% em comparação com o ano anterior.

Os países que concentraram a maior parte das reservas provadas de gás natural do mundo foram à Rússia, o Irã e o Catar, que responderam por 30,5%, 14,8% e 9,2% do total das reservas provadas, respectivamente. A Arábia Saudita, maior detentora de reservas de petróleo e maior produtora desse recurso natural no mundo foi o quarto país no ranking de reservas provadas de gás natural, com 4,1% do total.

Em 2002 a produção mundial de gás natural alcançou 2,5 trilhões m³, apresentando um aumento de 1,4% em relação ao ano de 2001. As taxas de crescimento dos países pertencentes a Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP) e dos externos a ela foram de 2,4% e 1,2% respectivamente. Cabe ressaltar que a produção de gás natural dos países pertencentes a OPEP, nos últimos 10 anos, vem crescendo a taxas superiores às observadas nos países que não fazem parte desta organização. Assim a participação da OPEP na produção mundial de gás natural, de 12,3% em 1993, passou para 16,1% em 2002.

Entre 2001 e 2002, a região Ásia-Pacífico exibiu o maior índice de crescimento da produção de gás natural no mundo (6,5%). A única região a apresentar decréscimo no volume produzido em 2002 foi a América do Norte (-1,8%), segunda maior região produtora de gás, concentrando 30,3% do total.

2.1.5 História do gás natural no Brasil

Segundo MOUTINHO (2001), o Brasil iniciou a utilização do gás em 1828, com D. Pedro I licenciando uma empresa para executar a iluminação das ruas da cidade do Rio de Janeiro. Em São Paulo a iluminação iniciou-se em 1872, propiciada pela empresa inglesa denominada The São Paulo Gas Company Ltda.

Sua utilização começou a ser modestamente difundida por volta de 1940, com as descobertas de óleo e gás na Bahia, na bacia de Candeias, atendendo as indústrias localizadas no Recôncavo Baiano. Depois de alguns anos, as bacias do Recôncavo, Sergipe e Alagoas foram destinados quase em sua totalidade para a fabricação de insumos industriais e combustíveis para a Refinaria Landolfo Alves (RLAM) e o Pólo Petroquímico de Camaçari (GASENERGIA, 2006).

Segundo a GASNET (2006), as duas crises mundiais do petróleo na década de 70, impuseram a revisão na política energética brasileira, principalmente em decorrência da nossa grande dependência dos combustíveis derivados do refino do petróleo para o setor de transporte (Óleo Diesel e Gasolina). Em 1979 chegou-se a importar 90% do consumo.

Dentre as diretrizes tomadas, a fim de minimizar a dependência e o impacto do aumento dos preços do petróleo no mercado internacional sobre a economia brasileira, destacam-se o Plano Nacional de Gás Natural (PLANGAS), desenvolvido em meados dos anos 80, pela Comissão Nacional de Energia, objetivando buscar um substituto para o óleo diesel utilizado no transporte rodoviário de cargas e passageiros, principalmente nos grandes centros urbanos, onde também já se tornavam críticos os problemas ambientais decorrentes de

poluentes atmosféricos. Este combustível correspondia a aproximadamente 52% do consumo energético do país, enquanto o gás natural representava apenas 1,8% desse total.

O grande marco do gás natural ocorreu com a exploração da Bacia de Campos, no estado do Rio de Janeiro, na década de 80 (GASENERGIA, 2006). Com a exploração de um expressivo volume de combustíveis fósseis na Bacia de Campos, viabilizou-se a distribuição também do combustível para os grandes centros urbanos (MOUTINHO, 2001).

O desenvolvimento da bacia proporcionou um aumento no uso da matéria-prima, elevando em 2,7% a participação do gás natural na matriz energética nacional (GASENERGIA, 2006). A primeira empresa a realizar distribuição de gás para uso comercial e residencial foi a Companhia CEG no Estado do Rio de Janeiro em 1983. Em 1988, iniciou-se a distribuição deste energético em São Paulo, através da COMGÁS, que era alimentada pelo gasoduto RJ/SP, posteriormente foi conectada a Bacia de Santos, e atualmente também está interligada ao Gasoduto Brasil-Bolívia (MOUTINHO, 2001).

Segundo a GASNET (2006), no início da década de 90, em decorrência das dificuldades registradas nos anos 80, o governo, através de uma série de medidas, procurou viabilizar o uso do gás natural em outros segmentos do transporte rodoviário. Somente a partir destas medidas, o programa de gás natural brasileiro iniciou seu desenvolvimento efetivo. Viabilizou-se, então, o gás natural como combustível alternativo (seja para o álcool, a gasolina ou mesmo para o diesel) em função das suas reservas, qualidades, preço competitivo e outros aspectos positivos em relação ao meio ambiente.

A conversão de automóveis para o gás natural tornou-se então, extremamente atrativa para os proprietários de táxis. A demanda pelo combustível passou a ter um ritmo de crescimento constante, estimulando investimentos na abertura de novas estações de abastecimento nas cidades como o Rio de Janeiro e São Paulo.

A maior parte dos investimentos no programa de gás natural automotivo é proveniente do capital privado, especialmente das companhias distribuidoras de petróleo. Ao contrário do pró-álcool que foi criado, desenvolvido e controlado totalmente pelo Governo Federal.

Exemplos como a Lei Municipal nº. 3.123 do Rio de Janeiro, de novembro/2000, que determina que os táxis da cidade do Rio de Janeiro utilizem o gás natural, somente mostram o tamanho potencial que o gás natural tem pela frente.

Uma análise realizada pela ANP (2004) mostra que, durante o período compreendido entre os anos de 1964 e 2001, as reservas de gás natural cresceram a uma taxa média de 6,8% ao ano, conforme ilustra a *Figura 2.1*.

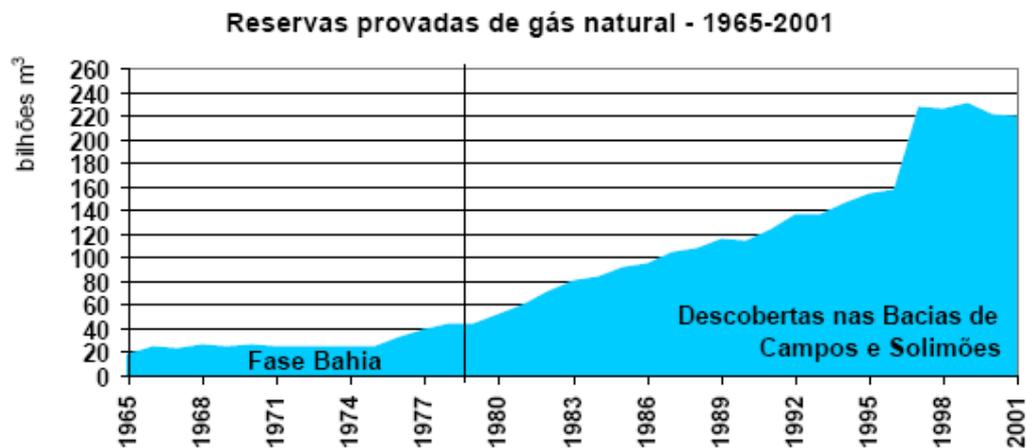


Figura 2.1: Reservas provadas de gás natural no Brasil (ANP, 2004)

Este crescimento, no entanto, está relacionado principalmente às descobertas decorrentes do esforço contínuo do país para diminuir o grau de dependência do petróleo importado.

Dentre as principais descobertas, destacam-se:

- a) Bacia de Campos, uma bacia sedimentar onde se encontra a maior concentração de campos gigantes do país, tais como Albacora, Marlim e Roncador;
- b) Bacia do Solimões, onde se encontram o Pólo de Urucu, onde todo o gás é reinjetado;
- c) Jazida de Juruá, ainda sem aplicação comercial.

A evolução das reservas de gás natural no país apresenta um comportamento muito próximo ao das reservas de petróleo, devido principalmente à ocorrência de gás natural sob a forma associada. Em 2001, as reservas provadas de gás natural ficaram em torno de 220 bilhões m³, com redução de 0,5% em relação a 2000. Estas reservas, apesar de estarem em sua maior parte na forma associada, encontram-se pulverizadas por várias regiões do território brasileiro (ANP, 2004).

De todo o gás natural descoberto no país, 35,1% está em terra – principalmente no campo de Urucu (AM) e em campos produtores no estado da Bahia - enquanto que os 64,9% restantes estão localizados em mar, principalmente na Bacia de Campos, a qual detém 48,3% de todas as reservas deste energético no Brasil (ANP, 2004).

Em 2002, o Brasil possuía uma produção de 10 bilhões m³, um crescimento de 19,8% comparativamente a 2001 e permaneceu ocupando a 37^a posição mundial no ranking dos produtores de gás natural mundial (ANP, 2004).

Com as novas descobertas realizadas pela Petrobrás no campo de Tupi na bacia de Santos na camada de pré-sal como mostra a *Figura 2.2*, o Brasil torna-se um dos principais produtores de petróleo e gás natural no mundo, pois as reservas são muito grandes não sendo necessário a importação de petróleo da Arábia Saudita e de gás natural da Bolívia.

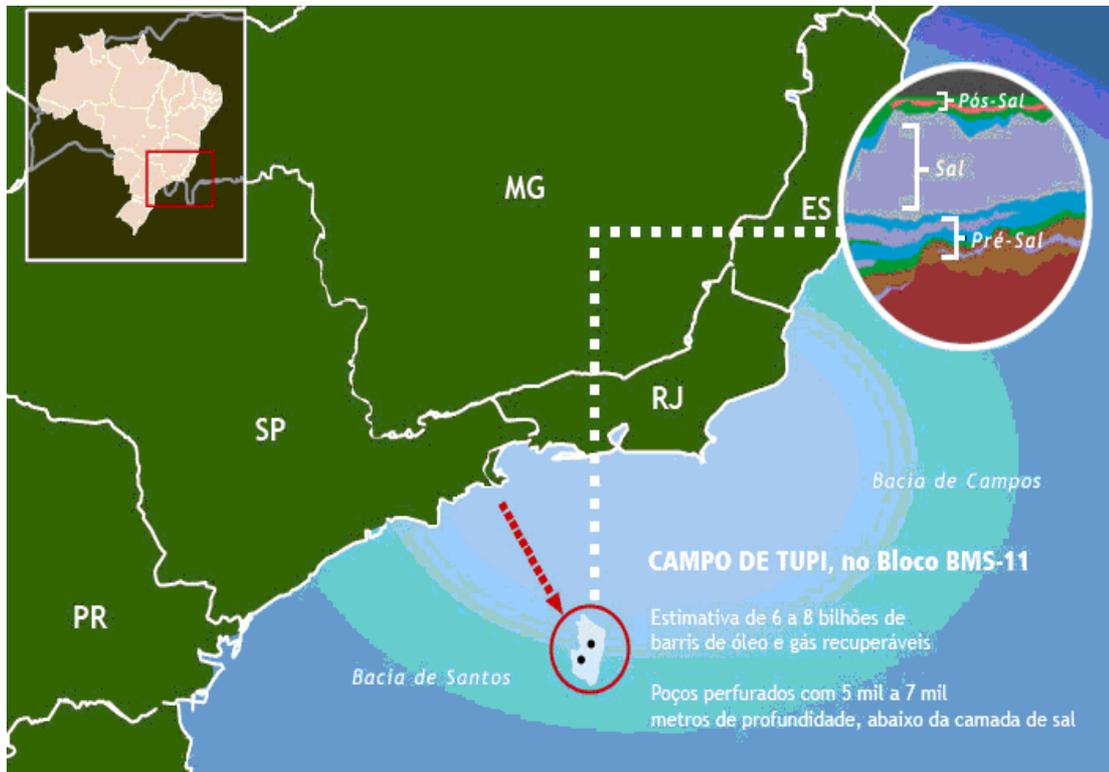


Figura 2.2: Campo de Tupi na camada de pré-sal (ANP, 2004)

2.1.6 Extração do gás natural

O primeiro passo para explorar uma reserva de gás natural é a verificação da existência de bacias sedimentares portadoras de rochas reservatórias ricas na acumulação de hidrocarbonetos, através de testes sísmicos, como ilustra a *Figura 2.3*. Caso o resultado das pesquisas seja positivo, iniciará a perfuração de um poço pioneiro para comprovar o nível da acumulação. Em seguida, através de testes de formação e perfuração de poços de delimitação, será possível constatar a viabilidade da jazida para fins comerciais. A última etapa é o mapeamento do reservatório, que será encaminhado para o setor de produção.

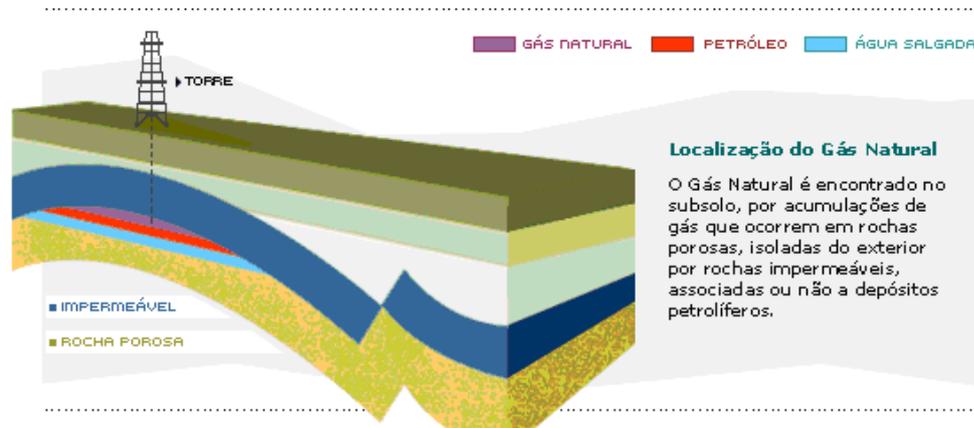


Figura 2.3: Extração do Gás Natural (GASENERGIA, 2006)

A produção é semelhante a do petróleo. O gás natural precisa ser tratado antes de sua comercialização. Com base nos mapas do reservatório, são definidas as curvas de produção e a infra-estrutura necessária para a extração. Assim que o gás natural é retirado de uma jazida, passa por vasos depuradores para separar as partículas líquidas (água e hidrocarbonetos líquidos) e sólidas (pó, produtos de corrosão). Se o nível de resíduos de enxofre estiver em excesso, o gás passa por unidades de dessulfurização. Depois, o gás é transferido para as Unidades de Processamento do Gás Natural (UPGN). Parte do gás natural pode ser aproveitada para estimular a recuperação do petróleo através dos métodos de reinjeção de gás (GASENERGIA, 2006)

Nas UPGN's, o gás natural passa por algumas etapas até estar pronto para comercialização. Inicialmente, é desidratado para retirar o vapor d'água existente, e em seguida, sofre um processo de absorção com refrigeração ou de turbo expansão, com a finalidade de separar as frações pesadas, atendendo às exigências do mercado e do meio ambiente. O resultado final é a produção de gás natural residual (metano e etano), gás natural liquefeito (propano e butano) e gasolina natural transportada para as refinarias para futuro processamento.

No estado gasoso, o transporte do gás natural é feito por meio de dutos ou, em casos muito específicos, em cilindros de alta pressão como gás natural comprimido (GASENERGIA, 2006).

A distribuição é a etapa final do sistema, quando o gás chega ao consumidor, que pode ser residencial, comercial, industrial (como matéria-prima, combustível e redutor siderúrgico) ou automotivo. Nesta fase, o gás já deve estar atendendo a padrões rígidos de especificação e estar praticamente isento de contaminantes, para não causar problemas aos equipamentos onde será utilizado como combustível ou matéria-prima. Quando é necessário,

deverá também estar odorizado, para ser detectado facilmente em caso de vazamentos (GASENERGIA, 2006).

2.1.7 Armazenamento e distribuição do gás natural

Segundo GÁS BRASIL (2006), dentre as tecnologias utilizadas para armazenamento e distribuição do gás natural, destaca-se o gás natural comprimido (GNC) que utiliza o gás natural em sua forma comprimida para transportá-lo a curtas distâncias viabilizando sua utilização em locais próximos a gasodutos conforme mostra a *Figura 2.4*.



Figura 2.4: Unidade de descompressão de GNC (GÁS BRASIL, 2006)

2.1.8 Meios de transportes utilizados para a distribuição do gás natural

Dentre os meios de transporte utilizados para distribuição do gás natural no mundo, destacam-se: rodoviário e o dutoviário.

A) Transporte Rodoviário

No transporte rodoviário de GNC, o gás natural necessita ser comprimido para ser transportado em caminhões equipados de semi-reboque composto de 90 cilindros de 230 litros de capacidade, que permite o transporte de 5.175 m³ de gás em cada viagem, conforme ilustra a *Figura 2.5*.



Figura 2.5: Caminhão equipado com carreta para transporte de GNC (GÁS BRASIL, 2006)

Neste tipo de transporte, a estratégia é ter sempre, no mínimo, uma unidade em consumo, ou seja, o semi-reboque fica estacionado em local apropriado e conectado à unidade de descompressão, até que sua pressão caia de 250 bar até aproximadamente 30 bar.

Na estação de enchimento, teremos outra unidade em carregamento, e uma unidade em trânsito. Esta configuração de três unidades operacionaliza o sistema de forma a viabilizar um consumo contínuo de até 2.000 m³/h, para uma distância média de 120 km entre o ponto de enchimento e o ponto de consumo.

Para cada vazão de consumo deverá ser feito um estudo logístico, para definir o número de unidades de transporte para atender a demanda necessária.

Dentre as categorias de consumidores deste tipo de logística, destacam-se os segmentos residenciais, industriais e veiculares.

B) Transporte Dutoviário

RODRIGUES (2001) definiu o transporte dutoviário como o transporte de granéis, por gravidade ou pressão mecânica, através de dutos adequadamente projetados à finalidade a que se destinam. A dutovia utilizada para o transporte de gás natural também é conhecida como gasoduto.

O gasoduto é um conjunto de tubos, todos fechados, enterrados no chão a uma profundidade média de 1,5 m e que serve para transportar o gás, pois nem sempre as reservas de gás natural estão perto dos centros consumidores, fazendo-se necessário a existência dos gasodutos.

Em países desenvolvidos, a transferência de mercadorias pelo transporte dutoviário representa atualmente uma parcela expressível da matriz de transportes desses países.

No Brasil, a participação das dutovias na matriz de transportes ainda é pequena, visto que os dutos são monopólios da Petrobrás e diferem da realidade mundial.

O transporte dutoviário do gás é composto por gasodutos, sistemas de compressão, redução de pressão, medição e supervisão e controle, com a finalidade de colocar o gás natural disponível às companhias distribuidoras em todos os pontos de entrega localizados ao longo da diretriz do gasoduto.

Os dutos utilizados para o transporte são de aço especial de grande resistência e durabilidade, totalmente soldado para evitar vazamentos, sendo revestido com uma fita plástica colada para evitar corrosão, o que o torna bastante seguro, conforme ilustra a *Figura 2.6*.

Depois de serem enterrados, são colocadas placas de concreto de 50 centímetros acima dos tubos para protegê-los contra acidentes no caso de escavação do local. Além disso, é colocada, sobre as placas de proteção, uma faixa laranja indicando o gasoduto enterrado (ANP, 2004).

Em muitos casos estes dutos recebem um tratamento com tintas especiais, existe uma pequena chance de perfuração da tubulação ocasionando um possível vazamento de gás natural para a atmosfera. Isso pode ocasionar um grande transtorno, pois se trata de um fluido inflamável.



Figura 2.6: Gasoduto GNC (GASENERGIA, 2006)

Os gasodutos representam a maior parte dos dutos do Brasil e destinam-se ao transporte de gases entre centros produtores e centros consumidores (RODRIGUES, 2001).

A operação do gasoduto é feita à distância, sendo moderna e monitorada por instrumentos ao longo da tubulação, seja com a utilização de comunicação por satélites, seja com fibras óticas na faixa de domínio do gasoduto. Esta instrumentação acompanha a evolução da pressão na tubulação, com o objetivo de identificar eventual perda de gás para a atmosfera e também mede o fluxo que passa ao longo dela, inclusive as saídas nos pontos de entrega das estações distribuidoras, também conhecidas como “city-gates”.

Nestas estações, normalmente não existem operadores para a medição e controle de pressão. Através do sistema de comunicação à distância, tudo é controlado remotamente da estação central de acompanhamento. No caso de um acidente, as válvulas automáticas bloqueiam o trecho afetado.

Mesmo assim, frequentemente são feitas inspeções terrestres e aéreas ao longo dos dutos, por pessoal especializado, para constatação de qualquer eventual ação de terceiros que possa colocar em risco a segurança e a integridade física das instalações.

O custo de implantação do duto depende fundamentalmente da ocupação humana das áreas atravessadas, das dificuldades impostas pelo relevo, de eventuais obras especiais exigidas (travessias de grandes rios, estradas, etc).

Segundo a Petrobrás (2006), a década de 80 teve a construção de um grande número de gasodutos, ampliando o aproveitamento do gás natural produzido no Espírito Santo e principalmente na Bacia de Campos, no litoral do Rio de Janeiro.

2.1.9 Gasoduto Brasil – Bolívia

O gasoduto Brasil-Bolívia foi um importante passo para o campo industrial brasileiro, gerando um aumento considerável de oferta de gás natural no país. Operado pela Transportadora Brasileira Gasoduto Brasil-Bolívia S/A – TBG, este gasoduto tem 2.593 km de extensão em território nacional e 557 km na Bolívia, conforme ilustra a *Figura 2.7*, e um custo total aproximado de US\$ 2 bilhões. A rede de dutos atravessa os estados de Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul e beneficia indiretamente Rio de Janeiro e Minas Gerais.



Figura 2.7: Gasoduto Bolívia – Brasil (GÁS BRASIL, 2006)

O empreendimento foi construído em duas etapas. O trecho norte foi inaugurado em 09/02/1999 e entrou em operação em 01/06/1999. Este trecho começa no Rio Grande, na Bolívia, chega ao Brasil pela cidade de Corumbá (Mato Grosso) e se estende até Campinas, em São Paulo. O trecho sul foi concluído em 31/03/2000, ligando São Paulo até Canoas, no Rio Grande do Sul.

O traçado do gasoduto foi amplamente estudado, inclusive por meio de satélites, e segundo as orientações do Estudo de Impacto Ambiental (EIA/Rima), do Instituto Brasileiro do meio ambiente (IBAMA), zelando rigorosamente pela preservação do meio ambiente. Sua construção exigiu avançadas técnicas de engenharia, possibilitando a passagem sob rios, fazendas e estradas, totalizando a travessia de 135 municípios brasileiros.

A Petrobrás investiu cerca de R\$ 30 milhões em programas de compensação ambiental e se preocupou com a preservação dos 617 sítios arqueológicos encontrados. O contrato com a Bolívia é de 20 anos e renovável. A *Figura 2.8* ilustra os gasodutos em operação na América Latina.



Figura 2.8: Gasodutos na América Latina (Gás Brasil, 2006)

2.1.10 Aplicação do gás natural na indústria

O gás natural é uma fonte de energia segura, versátil e econômica. Sua queima produz baixa emissão de poluentes, graças a uma combustão mais limpa e eficiente. A utilização de gás natural na indústria vem proporcionando benefícios significativos para o meio ambiente, além de diminuir o custo operacional com manutenção de máquinas, transporte e armazenamento de combustível. O gás natural proporciona a otimização do uso de matérias-primas e consequente melhora nos processos de produção; aumenta a segurança, a eficiência dos equipamentos e a qualidade do produto final.

A aplicação do gás natural no mercado industrial proporciona mais segurança, eficiência, produtos de melhor qualidade e abastecimento contínuo. A queima do gás natural é uniforme, exige menor quantidade de ar e elimina resíduos de combustão incompleta, resíduos metálicos e de óxidos de enxofre. Nos segmentos de vidro, cerâmico, alimento e bebida, por exemplo, a utilização do gás natural como combustível influencia significativamente a qualidade final dos produtos. O gás natural tem substancial participação na indústria, sendo utilizado na geração de calor e em processos como aquecimento de banhos e fluidos térmicos, fundição e secagem de pintura em estufas.

Atualmente, o gás natural é bastante utilizado na queima direta, proporcionando um produto final de melhor qualidade e com uso mais racional de energia. Além das vantagens técnicas, há facilidade na obtenção dos certificados de qualidade ambiental.

O gás natural não exige transporte nem estocagem, dispensa controle logístico, elimina veículos transitando na fábrica, custos e riscos de armazenagem e manuseio de combustíveis líquidos. Além disso, o gás natural também diminui o custo operacional da indústria, evitando gastos com manutenção, limpeza e compra de equipamentos antipoluição como filtros, lavadores de gás e multiciclones (COMGÁS, 2006). Alguns benefícios do uso do gás natural na indústria:

- Não exige gasto de energia com o pré-aquecimento para queima.
- Elimina o custo financeiro de estocagem.
- Retarda os investimentos em troca de equipamentos.
- Reduz significativamente as restrições dos órgãos ambientais e contribui para a melhoria da qualidade do ar.
- Por ser mais leve que o ar, facilita a dispersão em caso de vazamento.

Entre os diferentes combustíveis disponíveis ocorre uma espécie de “disputa” para se estabelecer qual é o melhor em termos comerciais. As diferenças vão além das questões econômicas, o que deve ser bem observado na *Tabela 2.5*.

Tabela 2.5: Quadro comparativo Gás natural X Óleo combustível X GLP (COMGÁS, 2006)

	Gás Natural	Óleo Combustível	GLP
Investimento inicial	Menor	Maior	Maior
Custo para utilização	Menor	Maior	Maior
Custo de manutenção	Menor	Maior	Maior
Estoque no local de uso	Dispensa	Necessário	Necessário
Condição de pagamento	Após o uso	Antecipado	Antecipado
Uso de área	Menor	Maior	Maior
Pátio de recebimento	Dispensa	Necessário	Necessário
Controle das emissões	Simples	Complexo	Simples
Limpeza do local de uso	Fácil	Difícil	Remoção do condensado
Agressividade das emissões	Muito baixa	Alta	Muito baixa

A participação em segmentos de mercado no ano de 2007 é ilustrada na *Figura 2.9*.

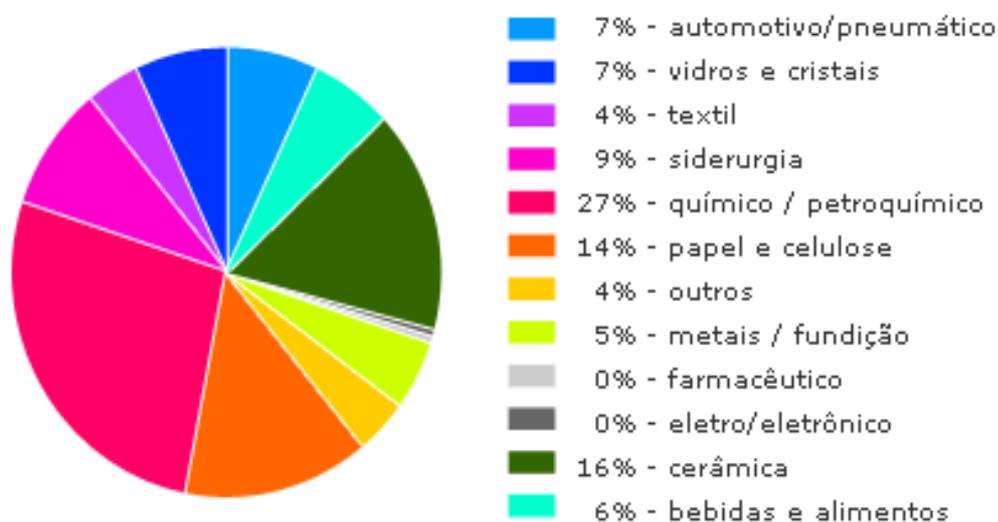


Figura 2.9: Participação setorial em 2006 (COMGÁS, 2006)

2.1.11 Equipamentos que utilizam gás natural

A indústria é intensiva no uso de energia, já que é uma grande consumidora de vapor/calor. Derivados de petróleo e eletricidade são fontes de energia tradicionalmente utilizadas. Nos últimos anos, o gás natural vem substituindo os derivados e até parte da eletricidade utilizada no aquecimento. O gás natural é utilizado nos principais equipamentos deste segmento: geradores de vapor (caldeiras), ar quente (estufas), aquecedores de fluido, fornos de fundição, sistemas de refrigeração, etc.

A utilização de sistemas de ar condicionado movidos a gás natural pode representar uma redução no consumo de energia elétrica entre 91 e 99%, entre diversas outras vantagens. A aplicação do gás natural pode ser feita tanto para o aquecimento quanto para resfriamento de equipamentos e é muito utilizado para sistemas de ar condicionados ou aquecimentos centrais, sendo muito mais vantajosos que outro sistema de energia.

A *Figura 2.10* mostra os equipamentos normalmente utilizados para os tipos de resfriamento e aquecimento em diferentes máquinas.

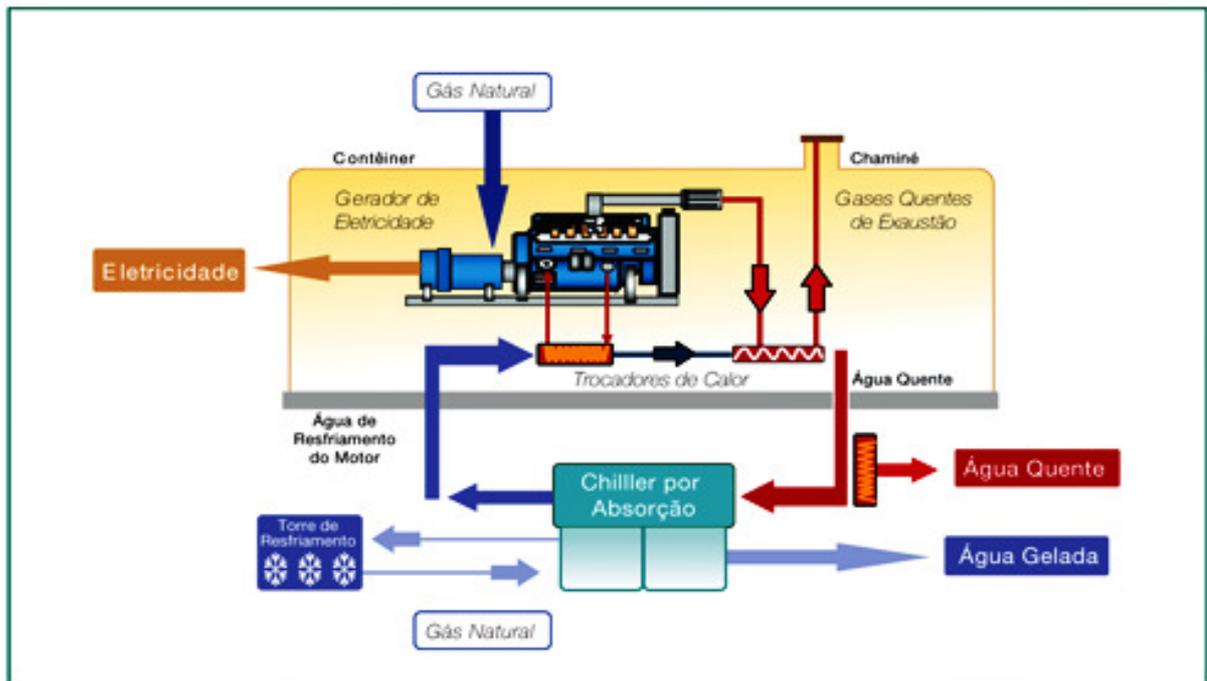


Figura 2.10: Sistema de resfriamento e aquecimento de máquinas (COMGÁS, 2006)

2.1.12 Aplicação de Gás Natural Veicular (GNV)

A frota nacional movida a gás natural veicular atingiu em julho de 2007 a marca de aproximadamente 1,2 milhões de veículos. Até 2010, o Brasil deve ter mais de 2 milhões de veículos abastecidos com GNV. Algumas vantagens do GNV são:

- Economia real de combustível de até 70% em relação à gasolina e de até 50% em relação ao álcool;
- O GNV é ecologicamente correto, pois reduz o nível de emissões de poluentes;
- O GNV é estratégico para as empresas.

O gás natural que abastece a frota de carros é o mesmo gás canalizado, porém armazenado e transportado sob alta pressão em cilindros especiais.

O gás natural é uma alternativa viável para a melhoria dos problemas ambientais associados a veículos automotores. A queima do gás natural é muito mais completa que a da gasolina, álcool ou diesel. Por isso, os veículos que utilizam o GNV emitem menos poluentes como óxidos nitrosos, dióxido de carbono (CO_2) e principalmente monóxido de carbono (CO) – gases responsáveis pelo efeito estufa (ALONSO, 1999).

2.1.13 Origem das partículas no sistema

Normalmente o gás natural arrasta partículas sólidas e líquidas que são provenientes:

1. Do poço, propriamente dito – principalmente quando o gás se encontra na forma associada com água e petróleo, pequenos residuais de algumas destas impurezas não são separadas pelas UPGN (Unidade de Processamento de Gás Natural) e, por conseguinte, são levados juntamente com o fluxo de gás;

2. De estações de compressão – alguns poços apresentam pressão interna suficiente para que o petróleo e/ou o gás possam fluir livremente sem qualquer necessidade de se ter uma bomba. Existem poucos tipos desta formação e, até mesmo estas, normalmente requerem um sistema de aumento de pressão para que o gás flua pela UPGN. Dependendo da distância do duto de transporte, da UPGN até o seu destino, faz-se necessário, ainda, o emprego de compressores que fornecerão energia ao gás, em forma de pressão, para que atinja seu destino nas condições de pressão e vazão requeridas. O tipo dos compressores utilizados nas estações de compressão muitas vezes não é isento de óleo, o que significa que uma parcela de óleo lubrificante do compressor é arrastada pelo gás (GASNET, 2006).

3. Do interior da tubulação de transporte e distribuição – residuais de água, enxofre e dióxido de carbono contidos no gás natural que deixa a UPGN, dependendo das respectivas quantidades e do tempo de operação da tubulação, podem acarretar na corrosão de sua superfície interna. A água pode levar a formação de hidretos e o enxofre à formação de ácidos, sendo que ambos atacarão a tubulação. Desta forma, o fluxo de gás em atrito com a parede interna da tubulação, desprende e arrasta partículas oriundas dessa corrosão. Em linhas novas, podem ainda estar presentes limalhas metálicas, bem como respingos e carepas de solda provenientes de limpeza mal feita, e pequenas quantidades residuais de água oriundas do teste hidrostático, que também são todos arrastados pelo fluxo de gás.

2.1.14 Pó preto em gasodutos

Um gasoduto de transporte pode apresentar uma ampla gama de resíduos sólidos em seu interior, resíduos de sua construção ou manutenção como carepas de laminação, terra, eletrodos, etc ou resíduos oriundos do poço de petróleo como sílica, sais inorgânicos, resíduos da erosão quando existe a conjunção de dois fatores: resíduos sólidos e altas velocidades, resíduos gerados pela corrosão dos tubos de aço carbono não revestidos internamente.

Os resíduos da construção do gasoduto são geralmente eliminados no processo de comissionamento pelos procedimentos de limpeza ou filtração. Os resíduos oriundos dos poços de produção são retidos nos filtros não devendo, portanto passar para gasodutos de transporte e os resíduos da erosão interna dependem de altas velocidades normalmente não encontradas nos gasodutos.

Pó preto é uma definição genérica para o material particulado encontrado em gasoduto de transporte de gás natural. A denominação da cor preta deve-se ao fato do pó ser escuro, em tonalidades que variam entre as cores café, cinza escuro e preto. É comum também que este pó se apresente umedecido, apresentando cheiro forte de hidrocarbonetos, glicol e enxofre.

O pó preto é gerado por processos de corrosão de naturezas diversas, com origem ligada á presença de CO_2 , H_2S , água, bactérias, pH ácido e glicol, portanto as substâncias normalmente encontradas no pó preto são os óxidos de ferro, principalmente Fe_3O_4 (magnetita) e $FeCO_3$ (siderita).

Como na prática é impossível eliminar todas as causas da corrosão em gasodutos, a formação de pó preto é um processo contínuo podendo apenas variar de intensidade.

Embora este processo seja contínuo, nem sempre o fluxo de pó preto medido em determinados pontos da tubulação serve para quantificar a sua velocidade de formação no trecho anterior, devido aos fatores de acúmulo e deslocamento. Quando a velocidade do gás se apresenta baixa, pode haver acúmulo de pó nas alças baixas da tubulação, que se desloca quando a velocidade aumenta.

A quantidade de pó preto gerado será diretamente proporcional à presença e ao potencial dos agentes corrosivos, além da área exposta à corrosão (perímetro interno x comprimento da tubulação).

Portanto, por mais limpo que o gás seja entregue em um ponto de transferência, sua passagem pelo trecho subsequente de tubulação, certamente, implicará na contaminação progressiva com a formação do pó preto devido à corrosão interna neste trecho.

O conceito de limpeza do gás natural, com respeito à presença de pó preto em gasodutos de transporte, deve ser sempre relacionado a pontos bem definidos. Normalmente, este conceito se refere aos pontos de transferência, medição, estações de compressão e CRM (conjunto de regulação e medição) de consumidores. A *Figura 2.11* mostra a tubulação de gás natural com incrustações de partículas no interior da tubulação.

Algumas empresas distribuidoras de gás natural adotam o termo “comercialmente livre de pó” em determinado ponto, o que não deve ser compreendido como absolutamente

livre de pó e sim com um teor e granulometria de pó preto que não venha causar dano ao equipamento instalado (COMGÁS, 2006).



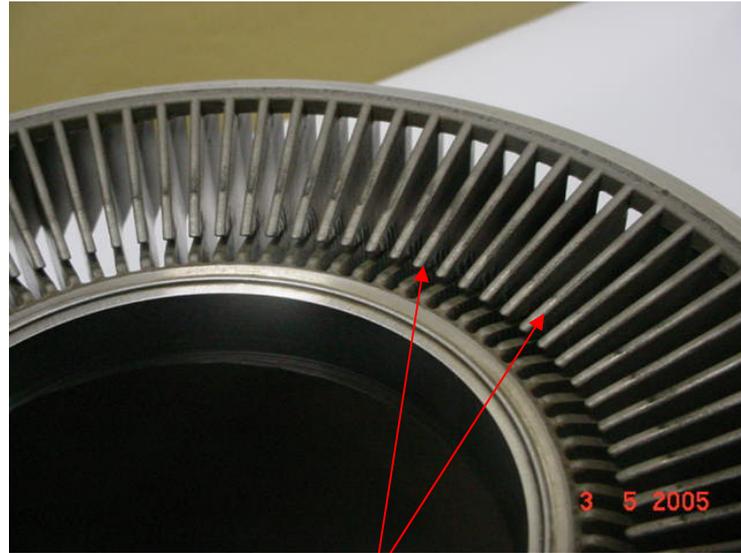
Figura 2.11: Pó preto nas paredes internas da tubulação (DIAS, 2003)

O Regulamento Técnico ANP nº 3/2002, anexo a Portaria nº 104, de 08 de julho de 2002, se refere às partículas no item 4 “O gás natural deve ser tecnicamente isento, ou seja, não deve haver traços visíveis de partículas sólidas e partículas líquidas”. Nesta portaria não estão definidos o conteúdo máximo de partículas, os locais onde seriam válidas tais informações, nem os métodos para sua determinação.

Cada tipo de equipamento apresenta uma exigência particular quanto à granulometria do material particulado presente no gás.

Concluindo, a formação de pó preto em gasodutos de aço carbono não revestidos é um fato inexorável, podendo sua geração variar de acordo com as características do gás, as quais contribuem em maior ou menor escala para reduzir a vida útil do gasoduto devido à corrosão. A presença do pó preto deverá ser controlada nos pontos chaves, como transferência, estações de medição e entrega aos consumidores, sendo para isso necessário regulamentar os parâmetros e métodos para determinação da concentração e granulometria do material particulado presente no gás natural (BALDWIN, 2007).

A *Figura 2.12* apresenta o detalhe das partes internas de uma turbina de medição, de como as partículas suspensas, juntamente com a força de abrasão e com a velocidade, podem fazer com os equipamentos de uma estação. Em alguns casos, o desgaste é tão grande que as peças chegam a desaparecer (COMGÁS, 2006).



Desgaste na parte superior

Figura 2.12: Desgaste na parte superior entre o diafragma e o regulador Trim (COMGÁS, 2006)

A *Figura 2.12* mostra a necessidade de uma filtração eficiente. As partículas agem com um efeito abrasivo, ocasionando um desgaste prematuro em peças das estações do gasoduto. Normalmente são peças especiais onde a substituição pode ser complicada.

Para estes casos onde a quantidade de partículas é muito grande, a necessidade de instalação de um sistema eficiente de filtração é muito importante para evitar o desgaste prematuro de peças, componentes e equipamentos utilizados nos gasodutos.

2.2 FILTRAÇÃO

Filtrar significa separar fases, ou seja, separar sólido de gás, ou líquido de gás. Quando se requer separar sólido a operação é denominada separação. Quando se requer separar líquido de líquido ou gás de gás, a operação é denominada absorção (DICKENSON, 1994).

A filtração de uma maneira geral (tanto para líquido como para gases) com formação de torta, constitui-se num clássico problema de mecânica dos fluidos no qual o fluido escoar através de um meio poroso permeável – a torta – que cresce e pode deformar continuamente (MASSARANI, 1989).

Atualmente a filtração de gases tem apresentado importância crescente nas companhias distribuidoras de gás, com exigência cada vez maior do grau de limpeza do gás

para estações de regulação de pressão e medição de volume, dada a comprovação de vantagens cada vez mais contundentes nos seguintes aspectos:

Manutenção – a remoção de impurezas contidas no gás traduz-se em economia pela redução dos custos de manutenção na substituição de componentes internos que se desgastam mais rapidamente pela erosão causada por tais impurezas, e podem ainda causar problemas de travamento que exigirão a substituição completa do instrumento.

Segurança – a não remoção de algumas impurezas pode acarretar em entupimento ou afetar a vedação de alguns equipamentos de segurança, fazendo com que venham a falhar no momento que deveriam funcionar e, com isso, provocar acidentes diretos e indiretos.

A tecnologia atual utiliza sistemas de filtração para a purificação do gás retendo pó, partículas de sujeira, depósitos de frações pesadas (óleos), líquidos (condensado de água e óleo) e neblinas pulverizados (água e/ou óleo) com capacidade de retenção de até 99,99%, sendo possível a captação de partículas sólidas e líquidas até o tamanho submicrônico (<1 μm).

A *Figura 2.13*, mostra alguns exemplos de faixa de tamanho de partículas. Estas medidas são aproximadas apenas como referências para orientação de grandezas dimensionais.

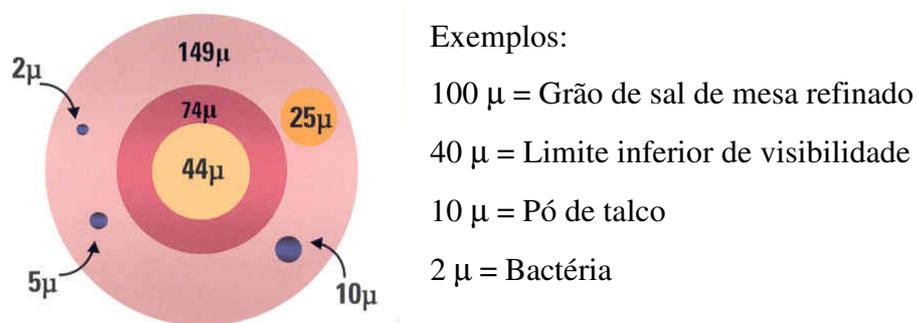


Figura 2.13: Faixa de tamanho de partículas.

2.3 FILTRAÇÃO DE GASES

A filtração de gases pode ser considerada como um dos processos mais antigos e seguros de separação de gás-sólido. Neste processo o gás (ou mistura de gases) atravessa o meio filtrante e as partículas suspensas vão se depositando e se aderindo no meio filtrante.

Em processos de filtração de gás, o filtro é instalado na posição horizontal e através dele passa uma corrente de gás com partículas de diversos diâmetros e formatos em suspensão. As partículas podem ser coletadas na superfície do meio filtrante, ou dependendo

do meio filtrante as partículas podem penetrar nas fibras sendo uma filtração de profundidade. As partículas coletadas no meio filtrante formam uma fina camada de pó, chamada de torta filtrante.

Após a formação da torta, essa também passa a agir como meio filtrante, ou seja, também é responsável pela coleta das partículas que vão se acumulando e aumentando sua espessura, permitindo somente a passagem do gás limpo (SILVA, et. al, 2002).

A remoção de torta, após algum tempo de filtração, é necessária para manter um processo adequado durante o processo de limpeza, ocorre aos pedaços (patch cleaning).

Existem vários processos que podem remover a torta como: vibração mecânica, fluxo de ar reverso, pulso de ar reverso e limpeza. Com a formação de torta, a queda de pressão do sistema aumenta, parte das partículas que permanecem no meio filtrante, causam a chamada queda de pressão residual (ΔPr). A queda de pressão residual tende a alcançar, na prática, um valor constante após vários ciclos de filtração e limpeza ou aumentar sucessivamente dependendo do meio filtrante utilizado. Este parâmetro depende entre outros fatores, da compressibilidade da torta de pó (OSÓRIO, 2006)

Nos processos de filtração e remoção de tortas, vários fatores devem ser avaliados de forma a não interferirem nos mecanismos de coleta e de remoção da torta, sendo a característica do meio filtrante e do material particulado, a velocidade de filtração, a densidade e a viscosidade do gás, a velocidade de limpeza e a espessura da torta formada, e a escolha do equipamento. Estes fatores dependem das características do sistema avaliado como, por exemplo: o diâmetro, a densidade, a concentração da partícula a ser retida, a vazão do gás, a temperatura de operação entre outros. Esses fatores influenciam diretamente na eficiência e na viabilidade econômica deste método de limpeza de gases.

A condição de filtração é específica para a natureza física e química do pó e sua distribuição granulométrica, o tipo de meio filtrante e geometria, as propriedades do gás e a velocidade de filtração na operação.

As partículas dispersas, individuais ou no seu conjunto, apresentam como características principais a distribuição granulométrica (dg), a forma, a densidade (ρ_p), a carga elétrica, a composição química e a concentração mássica.

O meio filtrante é caracterizado por suas dimensões geométricas: a área superficial de filtração (A) e a espessura de filtro (Lf); pela porosidade do meio filtrante (ε), e a sua superfície específica e a natureza química.

Essas variáveis irão influenciar nos principais parâmetros de projeto do filtro: queda de pressão, eficiência de coleta, força de adesão e formação da torta filtrante.

Aumentar a eficiência de retenção, filtrando economicamente maiores volumes de gases, isto é, com menor área filtrante, e ao mesmo tempo manter baixas quedas de pressão, de acordo com requisitos de máxima economia de energia, são os principais objetivos das pesquisas dos meios filtrantes, ou seja, o quanto o filtro se torna mais eficiente podendo capturar mais partículas de diâmetro menores com uma menor perda de carga.

2.3.1 A importância da perda de carga

À medida que a perda de carga aumenta, afeta diretamente a capacidade de equipamentos, reduzindo seus rendimentos. Por exemplo, uma turbina necessita de gás finamente filtrado com uma pressão mínima de admissão, para que produza trabalho com um rendimento mínimo aceitável, o que está intimamente relacionado com a questão econômica da operação. Se a perda de carga do elemento filtrante é muito grande, ou atinge sua saturação em intervalo de tempo muito curto, fará com que o equipamento não consiga produzir dentro do rendimento aceitável, ou por outro lado, com que precise de mais energia para produzir a mesma quantidade de trabalho. Conseqüentemente, isto se traduz em aumento do custo de produção e, finalmente, em redução nos lucros. É importante ressaltar, também como exemplo prático, tendo as mesmas conseqüências econômicas acima descritas, o trabalho de compressores em estações de elevação de pressão ao longo de gasodutos (COMGÁS, 2006).

A diferença de pressão de um filtro é definida pela equação (2.5).

$$\Delta p = p_2 - p_1 \quad (2.5)$$

Sendo p_1 a pressão de gás na saída do filtro e p_2 a pressão de entrada do filtro. Esta quantidade só é dependente das propriedades do fluido e das propriedades de uma substância porosa usada como filtro, no caso de um filtro limpo. Como a filtração procede, a diferença de pressão fica também dependente das propriedades de partículas depositadas em ou no filtro.

Porém, partindo-se do princípio que o comportamento geral da queda de pressão (Δp) em função da velocidade de escoamento do fluido (V) é de forma similar à função correspondente nos sólidos granulares; isto é, a transição do escoamento laminar a turbulento

gradual, por conseguinte a equação possui um termo viscoso e um termo inercial, assim, descrita pela Equação (2.6) (OSÓRIO, 2006).

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \cdot \mu \cdot V + \beta \cdot \rho \cdot V^2 \quad (2.6)$$

Sendo L é a espessura do meio filtrante, μ é a viscosidade do fluido, ρ a densidade, α o coeficiente de resistência viscosa e β o coeficiente de resistência inercial.

Para o caso de escoamento puramente viscoso, o segundo termo da equação torna-se desprezível. Portanto a Equação (2.7) resultante é a conhecida e clássica equação de Darcy para escoamento através de meios porosos, na qual a queda de pressão através do meio filtrante é proporcional à velocidade de escoamento do fluido.

$$\frac{\Delta P}{L} = \alpha \cdot \mu \cdot V \quad (2.7)$$

A espessura do meio filtrante (LF) é descrita conforme a Equação (2.8).

$$\Delta P_F = \frac{V \cdot LF}{BF} \quad (2.8)$$

Onde ΔP_F é a queda de pressão através do meio filtrante, conforme Equação (2.9).

$$\Delta P_F = K_1 \cdot V \quad (2.9)$$

Sendo $K_1 = (LF / BF)$, denominada resistência específica do meio filtrante, pode ser considerada como constante, pois a espessura do meio filtrante e o coeficiente de permeabilidade do meio praticamente não variam com o tempo de filtração.

Para o caso de escoamento através da torta, a espessura da torta (LF) não é constante com o tempo, sendo difícil de mensurá-la na prática. Entretanto, ela pode ser calculada pela massa de pó depositada por unidade de área (W), se a densidade da partícula e a porosidade da torta forem conhecidas assumindo que a torta seja incompressível, conforme as Equações (2.10) e (2.11).

$$W = \rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot LT \quad (2.10)$$

$$LT = \frac{W}{\rho_p \cdot (1 - \varepsilon)} \quad (2.11)$$

Sendo que $K_2 \{=1/[\rho_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot B]\}$ é a resistência específica da torta, geralmente considerada constante.

A queda de pressão total de filtração (ΔP) é a diferença entre a queda de pressão de entrada e a pressão de saída do filtro, ou seja, é a soma da queda de pressão através do meio filtrante (ΔP_f) e através da torta de pó formada, conforme as Equações (2.12), (2.13) e (2.14) (OSÓRIO, 2006).

$$\Delta P_T = K_2 \cdot V \cdot W \quad (2.12)$$

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_f \quad (2.13)$$

$$\frac{\Delta P}{V} = K_1 + K_2 \cdot W \quad (2.14)$$

Essa razão da queda de pressão total pela velocidade de filtração é denominada de arraste de filtro (S), conforme mostra a Equação (2.15).

$$\frac{\Delta P}{V} = S = K_1 + K_2 \cdot W \quad (2.15)$$

Para o estágio de formação de torta de pó, o aumento no arraste de filtro com o aumento na massa depositada por unidade de área (W) não é linear. Pode-se contornar a situação, através de uma extrapolação da parte linear da curva de filtração até o ponto de massa residual por unidade de área após a limpeza (WR), determinada experimentalmente. Neste ponto o arraste é denominado efetivo (SF).

A Equação (2.16) é a principal para este tipo de operação de filtração de gases, pois para uma determinada velocidade superficial de gás, fornecerá a queda de pressão no filtro em função da massa de pó acumulada por unidade de área (W).

$$SF = \frac{\Delta P}{V} = SE + K_2 \cdot (W - WR) \quad (2.16)$$

2.3.2 Permeabilidade

A permeabilidade de um meio poroso é um dos principais parâmetros em aplicações envolvendo filtração.

A permeabilidade é a propriedade que indica a maior ou menor facilidade à passagem do fluido através de um meio poroso. O escoamento do fluido gera uma perda de energia, refletida na forma de queda de pressão ao longo do meio poroso. A permeabilidade pode ser determinada pela Equação (2.17), conhecida como equação de Forchheimer para fluidos compressíveis, onde a queda de pressão através do meio poroso descreve uma dependência não-linear com a velocidade do fluido (SILVA, et. al, 2006).

$$\frac{P_e^2 - P_s^2}{2P_e L} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \quad (2.17)$$

Sendo P_e e P_s as pressões absolutas antes e depois do filtro, μ e ρ , a viscosidade e a densidade do fluido, L , a espessura do meio e v_s , a velocidade superficial do gás, dada pela relação entre a vazão volumétrica e a área de seção transversal, perpendicular ao escoamento do fluido. Os parâmetros k_1 e k_2 são as permeabilidades darciana e não darciana, respectivamente. O primeiro termo da Equação (2.17) representa a contribuição das forças viscosas sobre a queda de pressão, causada pelo atrito entre as moléculas do fluido e pelo atrito entre o fluido e o meio poroso. O segundo termo representa as forças inerciais, causadas pela turbulência do fluido escoante e/ou pela tortuosidade do meio poroso.

A velocidade superficial do gás previamente seco pode ser corrigida pela Equação (2.18):

$$v_s(P) = v_s \frac{T_o}{T} \frac{P}{P_o} \quad (2.18)$$

2.3.3 Cálculo da eficiência de filtração (Razão Beta)

Normalmente os fabricantes de meios filtrantes informam a classe de retenção média e a eficiência. Esta informação é o fator mais importante para o projeto, dimensionamento e fabricação do filtro, pois se consegue garantir a melhor aplicação no sistema empregado. Para confrontar as informações fornecidas pelos fabricantes de meios filtrantes utiliza-se as Equações (2.19) e (2.10) (DIAS, 2003).

$$\beta_x = \frac{N^o X}{N^o Y} \quad (2.19)$$

$N^o X$ = Número de partículas no lado não filtrado

$N^o Y$ = Número de partículas no lado filtrado

$$Eficiência_x \left(1 - \frac{1}{\beta} \right) \cdot 100 \quad (2.20)$$

2.4 FILTROS E MEIOS FILTRANTES

2.4.1 Definição de meios filtrantes

O dicionário de filtração (DEREK, 2002) define um meio filtrante como qualquer material permeável usado em filtração nos quais os sólidos são capturados. Esta definição não era utilizada no passado, pois assume que somente as partículas sólidas são relevantes, e então exclui muitos casos onde estas partículas incluem gotas de líquido. Assim, foi sugerida uma nova definição para meio filtrante como sendo qualquer material que, sob condições operacionais do filtro, é permeável a um ou mais componentes de uma mistura, solução ou suspensão, e é impermeável aos componentes restantes.

Os componentes capturados podem ser partículas de sólido, gotículas de líquido, material coloidal, ou espécie molecular ou iônica em solução, enquanto o penetrante (ou

filtrado) regularmente será o fluido suspenso ou solvente, possivelmente junto com alguns dos outros componentes (DEREK, 2002).

2.4.2 Definição de filtros

Na definição de meio filtrante dada anteriormente, não é levada em consideração a natureza do próprio filtro. Um filtro é qualquer dispositivo no qual uma separação é alcançada entre outros componentes de uma suspensão ou solução, em um fluido - que pode ser um líquido ou um gás - onde a separação é causada através de meios mecânicos, sem o envolvimento de uma mudança em fase (como o derretimento de um sólido, ou a evaporação de um líquido).

Como se buscam uma definição perfeita, os limites envolvidos definindo filtração deste modo são menos precisos. Assim, algumas separações de membrana envolvem uma mudança de fase; alguns processos de filtração envolvem processos elétricos como também forças mecânicas; e alguns processos envolvem forças químicas como também físicas. Significativamente, o processo de peneira envolve a passagem de parte de uma mistura de sólidos granulares por uma tela - o meio filtrante - com pequena passagem de um fluido, contudo este é um dos mais antigos processos de filtração.

O meio filtrante deve ser dimensionado pelo tamanho e eficiência da partícula a ser removida, pode-se variar a passagem da barreira dependendo do resultado final ao qual se espera chegar com o sistema de filtração.

Existe um grande número de meios filtrante utilizados, desde uma simples chapa perfurada, até micro fibras especialmente produzidas para diversas aplicações. Um meio filtrante pode ser permeável incluindo:

- Minerais inorgânicos;
- Carbono e carvão;
- Vidro;
- Metais;
- Óxidos de metais e outros materiais cerâmicos;
- Fibras orgânicas naturais;
- Fibras orgânicas sintéticas;
- Material sintético.

O meio filtrante pode ser fabricado de diversas formas: barras, folhas, grãos, arames, etc. Agora eles são de importância industrial principal, graças à disponibilidade de um alcance continuamente se expandindo de membranas poliméricas, metálicas e cerâmicas robustas.

Certamente, não são todos os materiais permeáveis utilizados como meio filtrante, mas se as propriedades forem aplicadas corretamente, terá um filtro com uma eficiência adequada e com uma boa vida útil.

2.4.3 Propriedades dos meios filtrantes

Um eficiente meio filtrante deve combinar muitas propriedades diferentes, que provavelmente serão as características de filtração. De fato, algumas propriedades significativas foram identificadas para selecionar o correto meio filtrante para aplicações específicas:

- Propriedades mecânicas;
- Rigidez;
- Resistência à expansão;
- Estabilidade de extremidades;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade para vibração;
- Dimensões de materiais disponíveis;
- Facilidade de fabricação;
- Estabilidade química;
- Estabilidade térmica;
- Características de absorção;
- Características de adsorção;
- Aspectos de segurança;
- Disponibilidade;
- Conveniência de reutilização.

Estas propriedades podem ser divididas convenientemente em três categorias principais:

1) Propriedades que restringem o uso do meio filtrante específico, como rigidez, força que deve ser aplicada, processos de fabricação, etc.

2) Propriedades que controlam a compatibilidade do meio filtrante com o ambiente de processo como estabilidade química e térmica, etc.

3) Propriedade de filtração específica que determina a habilidade do meio filtrante para uma tarefa específica como sua eficiência, retenção de partículas de um tamanho pré-definido, resistência de fluir, etc.

2.4.4 Meios filtrantes superficiais

Os filtros superficiais normalmente são fabricados de tela metálica e têm poros com tamanho controlados (praticamente idênticos), localizados a distâncias regulares. A retenção das partículas na superfície é absoluta por impedir a passagem de todas as partículas maiores que o poro. Sua ação pode ser comparada a de uma peneira como mostra a *Figura 2.14* (DIAS, 2003).

O gás passa pelo filtro deixando na sua superfície as partículas dos contaminantes. Isso facilita a eliminação destas partículas e torna este tipo de filtro de fácil regeneração.

Todavia, quanto menor o grau de retenção de partículas, maior é a obstrução que representa para a linha.

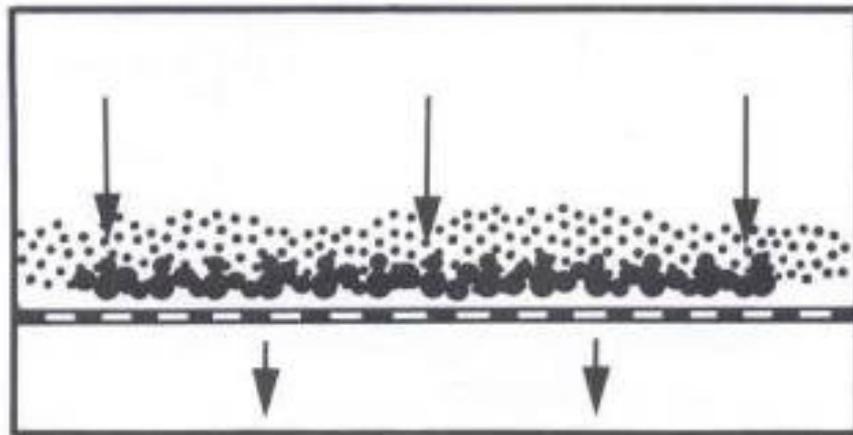


Figura 2.14: Esquema de filtração de superfície (DIAS, 2003)

Seguem alguns exemplos de telas metálicas utilizadas para a fabricação de elementos filtrantes com o tecido simples e a tela reps.

O tecido simples é o mais comum e sua tecelagem resulta do entrelaçamento de cada fio trama sucessivamente passado por cima e por baixo de cada fio urdume e vice-versa, como mostra a *Figura 2.15*.

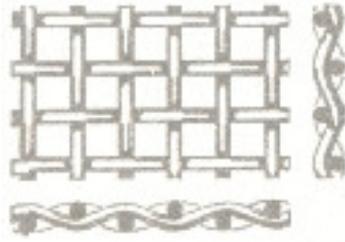


Figura 2.15: Tecido simples (DIAS, 2003)

Outro exemplo de tecido muito utilizado na fabricação de elementos filtrantes é o tecido reps. A tecelagem do tecido reps é similar a do tecido simples, porém o fio urdume é mais grosso que o fio trama, e este se encontra justaposto, compactamente, não apresentando aberturas quando olhado verticalmente, como mostra a *Figura 2.16*. Comparado com o tecido simples de malha quadrada com a mesma capacidade de retenção, ele apresenta duas a três vezes a resistência mecânica e aproximadamente um terço da capacidade de vazão (DIAS, 2003).

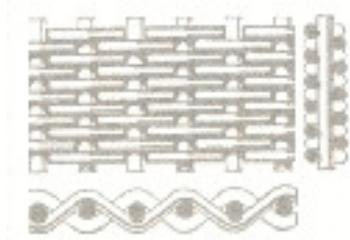


Figura 2.16: Tecido Reps (DIAS, 2003)

A *Tabela 2.6* mostra as fórmulas utilizadas para o cálculo de abertura da tela, Equação (2.1), cálculo da área aberta, Equação (2.2), do peso do fio por metro linear, Equação (2.3) e do peso da tela, Equação (2.4), estes dados podem ser muito importantes para o dimensionamento de elemento filtrante e da eficiência do filtro.

Como a tela metálica é fabricada com os espaçamentos e as aberturas uniformes, possui uma confiabilidade no processo, além de ter uma resistência mecânica maior que os outros tipos de meios filtrantes.

Este meio filtrante é o mais utilizado na fabricação de elementos filtrantes para gás natural, pois além de garantir a passagem do gás pelo meio filtrante com espaços controlados, possui uma resistência mecânica maior, que também é um fator importante para a escolha deste meio filtrante para esta aplicação.

Como a perda de carga também pode influenciar na escolha do meio filtrante, é importante que o elemento filtrante tenha uma boa área de passagem para evitar a perda de carga no sistema.

Tabela 2.6: Equações para o cálculo da abertura da tela

Cálculo da abertura:	$A = \frac{25,4}{M} - F$	Sendo: A = Abertura da malha em mm M = No. de malhas por polegada linear F = Diâmetro do fio em mm	(2.1)
Cálculo da área aberta:	$AA = \left(\frac{A}{A + F} \right)^2 \cdot 100$	Sendo: AA = Área aberta em % A = Abertura em mm F = Diâmetro do fio em mm	(2.2)
Cálculo do peso do fio por metro linear:	$PM = F^2 \cdot 0,006165$	Sendo: PM = Peso por metro F = Diâmetro do fio	(2.3)
Cálculo do peso da tela por m^2:	$P = 78,74 \cdot M \cdot PM \cdot \sqrt{1 + \left(F \cdot \frac{M}{25,4} \right)^2}$		(2.4)

2.4.5 Meios filtrantes de profundidade

Na filtração de profundidade, os contaminantes são removidos por meio de toda a profundidade do meio filtrante em questão e não apenas na superfície de entrada e de contato com estes contaminantes. Os efeitos podem ser operados no mesmo filtro e ao mesmo tempo. Entretanto, um filtro de superfície corretamente projetado deve remover e impedir a migração da partícula pelo meio filtrante. O primeiro objetivo de um filtro de profundidade é a prevenção do carregamento de superfície para permitir que o volume do meio filtrante seja utilizado.

Se um filtro de profundidade forma a torta na superfície de entrada, sua vida útil estará comprometida e o desempenho obtido será bem abaixo do esperado conforme *Figura 2.17* (DIAS, 2003).

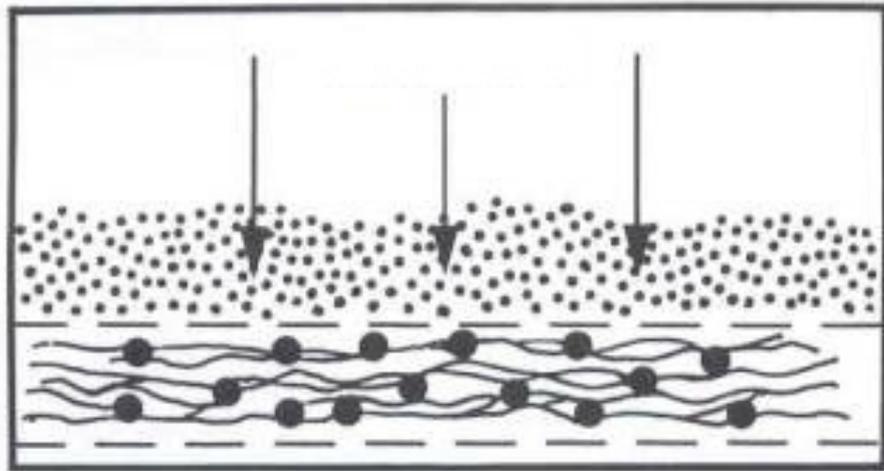


Figura 2.17: Esquema de montagem de filtros de profundidade (DIAS, 2003)

Quando as partículas pesadas encontram uma mudança de velocidade, se sua massa for grande o suficiente, essas partículas podem ser extraídas do fluxo.

A separação inercial pode ser usada para remover as partículas do fluxo e fixá-las nas fibras. Uma vez em contato com as fibras, as partículas mantêm-se fixas pela força de Van der Waals, conforme mostra a *Figura 2.18* (DIAS, 2003).

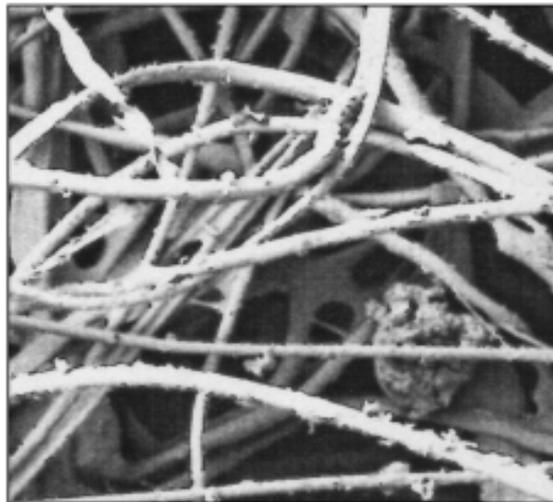


Figura 2.18: Partícula grudada nas fibras pela força de Van Der Waals (DIAS, 2003)

Pela utilização destes princípios da filtração de profundidade, os meios filtrantes podem ser selecionados proporcionando alta capacidade na remoção de partículas, prevenindo sua rápida saturação como também evitando que tenha uma vida curta. A *Figura 2.19* mostra um projeto no qual muitas camadas sucessivas de meio filtrantes fornecem a remoção da

partícula por meio de separação inercial e difusão. As fibras menores presentes no lado da saída do filtro são muitas vezes menores no diâmetro do que as fibras grosseiras do lado da entrada. Isto permite que o fluido e as partículas incorporem a profundidade do meio filtrante sem que nenhuma camada fique bloqueada.

Densidade progressiva da
filtração de profundidade.

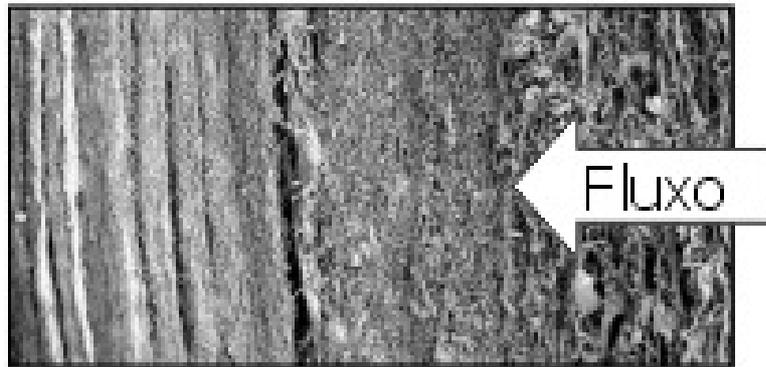


Figura 2.19: Filtração de profundidade (DIAS, 2003)

Deste modo, qualquer processo de filtração poderá envolver uma combinação de dois ou mais mecanismos. Os dois processos fecharão os poros dos meios filtrantes exigindo a implementação de um processo de limpeza.

Por outro lado, os mecanismos de filtração podem resultar na captura de partículas pelos poros. O mecanismo atual ou a combinação de mecanismos depende do conjunto das características do fluido a ser filtrado com os meios filtrantes projetados para sua utilização.

2.4.6 Vida útil do elemento filtrante

A vida útil pode ser um fator econômico decisivo na escolha de um determinado meio filtrante. As dimensões e o plissado do elemento filtrante, que aumentam a área filtrante, determinam a resistência inicial ao gás e sua capacidade volumétrica de filtração em função da velocidade e do grau de retenção de impurezas e podem reduzir a perda de carga no processo.

A *Figura 2.20* mostra o aumento da perda de carga de um elemento filtrante durante o tempo. O ponto X1 é a perda de carga de um elemento no estado novo. O elemento novo

precisa de um tempo para que suas fibras se adaptem com o fluido e haja um balanço entre o sistema e o elemento filtrante, aproximadamente 1 hora depois de usar o filtro novo, todas as suas fibras são umectadas de condensado. Quando o elemento filtrante chega ao ponto de saturação, deve ser substituído, pois no aspecto econômico não é interessante manter um elemento filtrante com o seu nível de saturação alto, pois a perda de carga tende a aumentar rapidamente, assim o elemento deve ser substituído para garantir o conteúdo residual de condensado desejado.

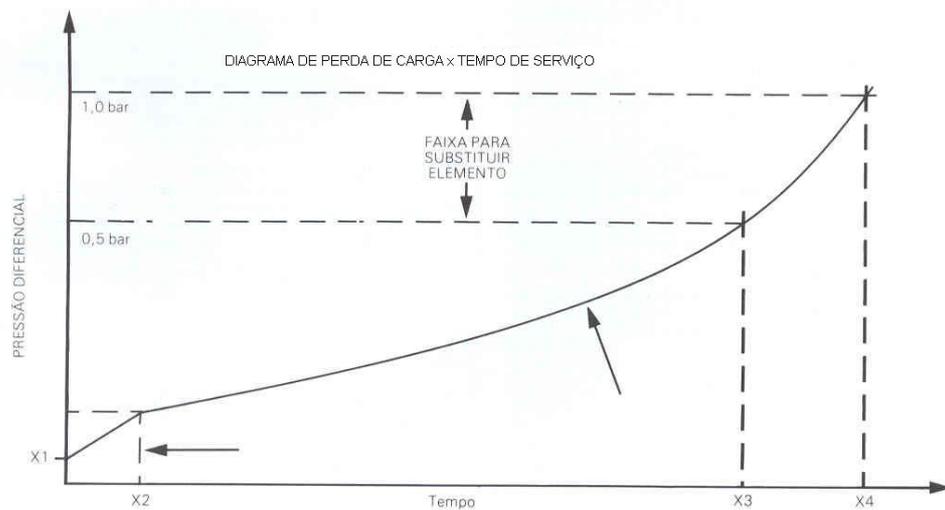


Figura 2.20: Perda de carga de um elemento filtrante (DIAS, 2003)

3. ELABORAÇÃO E CONSTRUÇÃO DE APARATO EXPERIMENTAL

A primeira parte deste trabalho foi projetar e construir o equipamento que seria utilizado para filtração de gases a alta pressão, além de realizar a cotação de materiais que pudessem ser utilizados em pressões superiores à pressão atmosférica. Para isto foram necessárias várias alterações antes de obter a versão atual do equipamento.

A seguir são relacionados os equipamentos, os materiais e métodos que foram utilizados nos procedimentos experimentais para caracterização do meio filtrante, do material pulverulento e realização dos ciclos de filtração.

Foram consideradas três versões no projeto. A primeira versão foi baseada na norma VDI-3926 edição 2003. Esta norma contempla um equipamento de verificação para elementos filtrantes (meios filtrantes) a pressão atmosférica, porém como o objetivo do trabalho é o projeto de uma bancada para filtrações de gases a alta pressão, é necessário que a pressão de ensaio seja maior que a pressão atmosférica, então foi escolhida uma pressão 10 vezes maior que a pressão atmosférica. Com isso foi necessário efetuar uma adaptação na norma VDI-3926, pois os equipamentos deveriam suportar uma pressão maior que a encontrada com a pressão ambiente.

Por este estudo nunca ter sido feito anteriormente, não existem estudos ou trabalhos referentes a este tema.

Esta foi uma das principais dificuldades encontradas, além de encontrar equipamentos para trabalhar com esta faixa de pressão escolhida. O memorial de cálculo da bancada é apresentado no Apêndice A.

3.1 PRIMEIRO PROJETO

Inicialmente foi projetada uma bancada para a realização dos ensaios dos meios filtrantes com os equipamentos expostos verticalmente à linha pressurizada, os quais são apresentados a seguir.

O primeiro equipamento é um dosador gravimétrico incluindo uma balança de precisão. A aplicação deste equipamento na bancada de ensaios seria muito importante, apesar do alto custo. O material particulado poderia ser colocado no reservatório, este seria pesado para quantificar a massa real inserida no sistema com precisão. O dosador gravimétrico funciona com sistemas vibracionais para a movimentação do sistema particulado.

O segundo equipamento a ser instalado na bancada de ensaios seria uma válvula rotativa. A sua importância está no fato de ser ela quem garante a vedação entre o dosador gravimétrico, que trabalha a pressão atmosférica, e o conjunto pressurizado. O funcionamento da válvula rotativa, basicamente, é realizado por uma engrenagem interna de espaçamentos e tempos controlados, pois deve receber a carga de partículas enviada pelo dosador gravimétrico, fazer a rotação e inserir na linha pressurizada. A válvula rotativa foi o equipamento que inviabilizou a primeira versão do projeto, pois não se conseguiu encontrar no mercado e nem a viabilização da fabricação de uma válvula especial rotativa que garantisse a vedação e a estanqueidade entre o dosador e a linha pressurizada.

O dosador trabalha com a pressão atmosférica e o lado da válvula com uma pressão de 10 bar. O problema foi encontrar um equipamento que trabalhasse com esta diferença de pressão. Os equipamentos encontrados no mercado não conseguem garantir uma vedação acima de 2 bar de pressão. A faixa de pressão está muito além da faixa de pressão segura para este equipamento, por este motivo, foi necessário a escolha de novos equipamentos e conseqüentemente a troca dos equipamentos para a fabricação da bancada de ensaios.

Após a válvula rotativa, deveria ser instalado um medidor de vazão, porém para a instalação deste medidor seria necessário um comprimento de 5 vezes o diâmetro da tubulação a jusante e 10 vezes o diâmetro da tubulação a montante do equipamento para o correto funcionamento, com isso a linha da tubulação ficaria muito comprida inviabilizando a montagem do equipamento no laboratório.

Um outro equipamento previsto para a bancada foi a instalação de uma válvula de segurança utilizada em tubulações pressurizadas e vasos de pressão. Porém como o sistema é aberto, não seria necessária a instalação de uma válvula de segurança no sistema. O filtro de linha também sofreu uma modificação, pois inicialmente foi projetado para trabalhar na vertical o que facilitaria a formação de torta filtrante e a remoção do meio filtrante.

Como o foco deste trabalho é o estudo de gases pressurizados, especialmente o gás natural, pensou-se utilizar cilindros de gases para a realização dos ensaios, porém para a segurança do laboratório e a redução de custos, foi instalado um compressor de ar comprimido para a realização dos ensaios, pois a densidade e as características do ar comprimido são parecidas com as do gás natural.

Para se trabalhar com o ar comprimido é necessária a realização de um tratamento para que as partículas de pó não fiquem úmidas e não fiquem grudadas nas paredes da tubulação. Ainda que o gás natural seja seco, é necessário um ar comprimido muito parecido

com as características do gás natural encontrado em campo. Foi previsto uma bateria de filtros coalescentes e um secador para este tratamento.

A *Figura 3.1* mostra o diagrama esquemático inicialmente projetado para a construção da bancada de ensaios de meios filtrantes. Esta configuração apresenta um sistema de bancada vertical.

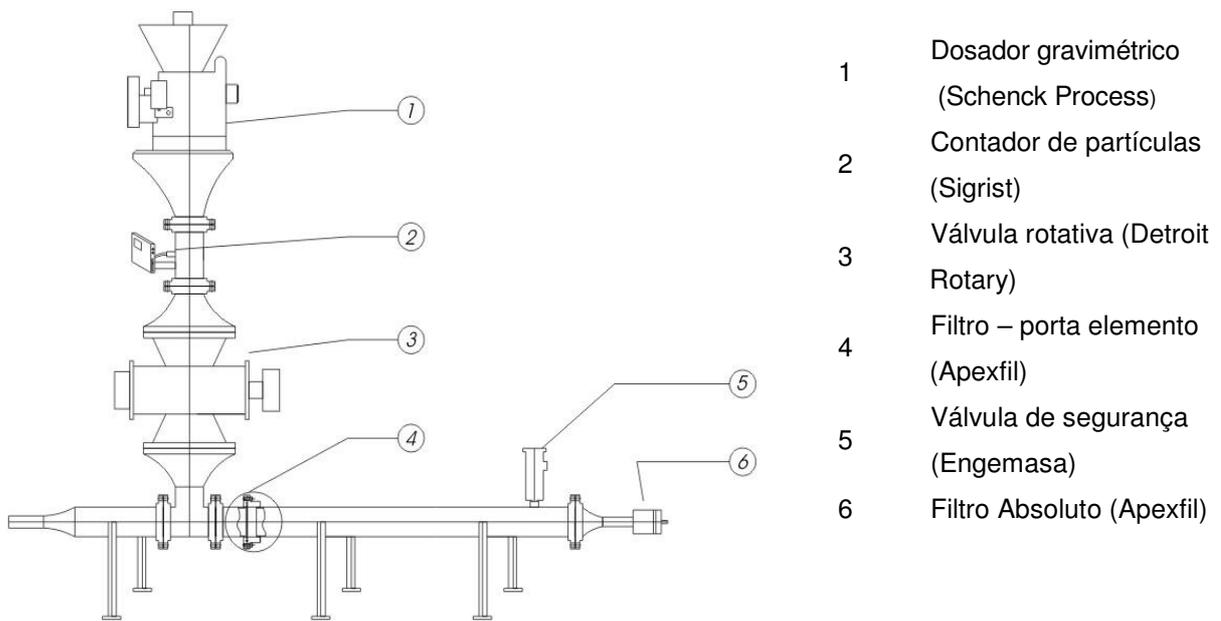


Figura 3.1: Esquema de montagem da bancada de ensaios de meios filtrantes

A *Figura 3.2* mostra a montagem do compressor de ar comprimido e o tratamento da linha com os filtros coalescentes e o secador de ar comprimido.

O compressor de pistão de alta pressão, considerado neste projeto, trabalha com baixo teor de óleo, porém sempre arrasta partículas provenientes do ar ambiente e óleo provenientes do compressor, por este motivo foi considerado uma bateria de filtros coalescentes com um pré-filtro, um coalescente fino e um coalescente super-fino, além do secador, isso garante a qualidade do ar comprimido para não influenciar nos resultados dos meios filtrantes, pois o ar utilizado para os ensaios deve ser seco e isento de partículas sólidas e líquidas.

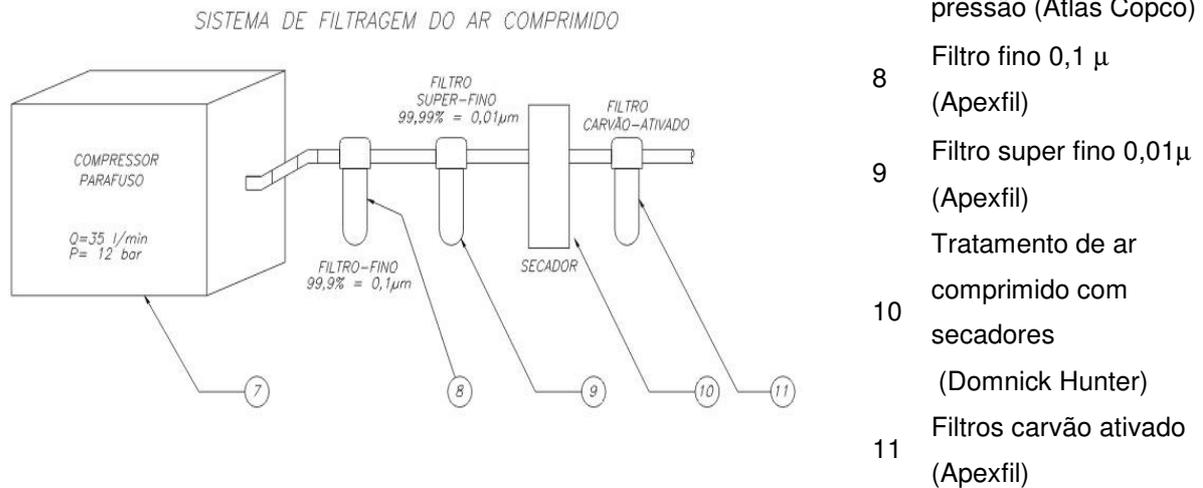


Figura 3.2: Esquema de compressão do ar e tratamento do ar comprimido

1. Dosador gravimétrico (Schenck Process)

A aplicação destina-se ao controle da vazão desejada para os produtos sólidos especificados dentro do processo produtivo, mediante o uso de uma balança dosadora gravimétrica. O dosador é formado por um sistema de dosagem com rosca motorizada montados sobre células de carga.

As células de carga e o circuito de acionamento do motor são interligados num terminal de medição e controle.

Este equipamento funciona com o princípio da perda de peso, onde o terminal efetua a leitura do peso do material que está sendo descarregado, atuando na velocidade da rosca dosadora, de maneira a manter a vazão do processo constante.

O terminal também atua no sistema de descompactação (agitador vertical), que efetua a quebra de pontes, auxiliando assim na movimentação do material, é montada em painel local próximo a balança, para parametrização e controle da mesma.

2. Contador de partículas (Sigrist)

Os gases sob pressão devem estar livres de partículas sólidas ou líquidas, especialmente em processos mais delicados ou rigorosos. As impurezas existentes podem incluir névoa de óleo, fuligem, partículas finas, etc.

Apesar de que possam ser usados sistemas de filtração de alta qualidade para purificar os gases, podem ocorrer problemas devido ao sobrecarregamento, erro, acidentes ou falha de manutenção adequada, que resultam em níveis de contaminação muito superiores ao desejado. Existem situações nas quais as partículas se formam ou são geradas após os filtros (a jusante do elemento filtrante).

Por isso, é óbvia a necessidade de um instrumento que permita detectar, quantificar e alertar sobre a presença de partículas no gás sob pressão, em tempo real, ou seja, que permita que o operador ou o sistema de controle saiba antes que a contaminação possa causar um estrago no equipamento.

Este contador de partículas foi especificado para contar as partículas com laser que quando passam as partículas captam a presença e realizam a contagem. Para determinar o nível de variáveis (cor, concentração, turbidez) é importante saber o quanto a amostra de particulados pode absorver a luminosidade. As variáveis podem ser mensuradas como a cor, intensidade, densidade e a absorção da luz das partículas que deverão ser contadas.

3. Válvula rotativa (Detroit Rotary)

As válvulas rotativas são peças totalmente fundidas e projetadas para serviço pesado. O sistema de selagem do rotor mantém a hermeticidade por meio de parafusos montados sob pressão de mola. As cavidades do rotor são amplas, o que aumenta a capacidade do conjunto e permite que a válvula trabalhe a baixas velocidades, minimizando o desgaste. Removendo a tampa lateral, tem-se acesso ao rotor e ao sistema de selagem, possibilitando fazer manutenção sem desmontar a válvula rotativa do sistema.

Aberturas são previstas para inspeção interna e as juntas de vedação impedem a saída de gases ou material junto ao eixo do rotor.

4. Filtro – Porta elemento (Apexfil)

O porta elemento foi projetado para a fixação do elemento filtrante que deve ser ensaiado. Como o elemento filtrante deve ser posicionado no sentido horizontal, a fixação foi efetuada com parafusos garantindo a fixação do meio filtrante, reduzindo a possibilidade de uma passagem preferencial do gás fora da área de interesse. Esta fixação foi efetuada com um canal usinado soldado internamente ao filtro para a fixação com os parafusos

5. Válvula de segurança (Engemasa)

As válvulas de segurança e alívio foram especialmente desenvolvidas para serem aplicadas em compressores de ar comprimido ou em linhas pressurizadas onde são requeridas válvulas de alto desempenho e qualidade mecânica. As mesmas, por serem guiadas na parte inferior e superior, podem ser empregadas onde se exige vedação estanque e onde as vibrações mecânicas não interfiram no funcionamento. As válvulas são do tipo vertical com extremidades roscadas e fabricadas a partir de material laminado, possuindo um anel de aço para que se possa fazer teste de funcionamento durante a operação.

6. Filtro absoluto (Apexfil)

O filtro absoluto foi projetado para a utilização de uma membrana filtrante com níveis de retenções absolutos. Após o funcionamento pode-se realizar uma pesagem para a verificação do peso das partículas que atravessaram o filtro em questão e se depositaram no filtro absoluto, ou a observação em microscópio óptico para a visualização das partículas no meio filtrante. Fabricado inteiramente em aço inox com os canais internos usinados, facilitando o direcionamento do fluxo interno até a saída total do ar comprimido.

7. Compressor de alta pressão (Atlas Copco)

Para trabalhar a uma pressão de 10 bar foi especificado um compressor tipo pistão de 15 bar de pressão lubrificados e isentos de óleo. A concepção e combinação única de materiais no compressor oferecem benefícios para o trabalho isento de manutenção, trabalhando continuamente com unidades compactas e relativamente silenciosas.

8. Filtro fino 0,1 μm (Apexfil)

Os filtros coalescentes são equipamentos de alta eficiência na filtração de gases. Seus elementos possuem sistemas de filtração plissados que aumentam a área filtrante em até 3 vezes, assim como sua vida útil, separando o óleo e a água.

Composto de materiais filtrantes especiais de densidade graduada para retenção de partículas finas com baixa perda de carga. Os aerossóis suspensos na corrente do ar coalescem

na forma de gotas e são separados da corrente. Com eficiência de 99,9% na separação de condensados e partículas sólidas maiores que 0,1 μm .

9. Filtro super fino 0,01 μm (Apexfil)

Os filtros super finos são idênticos aos filtros finos, porém com uma eficiência de 99,9% separação de condensados e partículas sólidas maiores que 0,01 μm .

10. Tratamento de ar comprimido com secadores (Domnick Hunter)

Os secadores asseguram excelentes resultados no processo de tratamento de ar comprimido. Os pontos importantes para o correto dimensionamento de secador de ar comprimido são considerados como o ponto de orvalho esperado, não congelamento do condensado, com isso, não há a possibilidade de condensados entrarem na rede de ar comprimido protegendo os componentes instalados na sequência do equipamento.

11. Filtros de carvão ativado (Apexfil)

Os filtros de absorção possuem uma camada central de carvão ativado que retém vapores de óleo e odores pelo efeito da absorção. É eficiente na obtenção de ar isento de óleo e inodoro.

12. Analisador de imagens (Image Pró-Plus)

Este equipamento é utilizado para a análise da deposição das partículas no meio filtrante.

13. Microscópio Óptico (Olimpus)

O microscópio óptico é utilizado para a análise do comportamento do meio filtrante após a filtração, bem como, as partículas depositadas na superfície e internamente ao meio filtrante.

Inicialmente, o equipamento foi projetado baseado na norma VDI 3926, que trata de estudar meios filtrantes através de ensaios de filtração, porém como não foi possível encontrar

no mercado, bem como, a fabricação especial da válvula rotativa que garantisse a ligação entre o dosador gravimétrico, que estava à pressão atmosférica, e a tubulação pressurizada a pressão de 10 bar. A válvula rotativa faria a vedação das partículas não permitindo que fosse para o ambiente. No mercado foi encontrada válvula rotativa grande (para aplicação industrial), porém para trabalhar com pressões de 1 a 2 bar.

Este foi o principal problema que inviabilizou a montagem da bancada nesta versão de projeto, sendo assim iniciado o segundo projeto.

3.2 SEGUNDO PROJETO

O segundo projeto começou com a necessidade de uma bancada de ensaios que permitisse trabalhar com fluidos a uma pressão mais alta que o convencional.

Com a dificuldade de se encontrar equipamentos que trabalhem com pressões atmosféricas e altas pressões conjuntamente, a principal característica deste trabalho seria encontrar equipamentos que pudessem realizar o lançamento de partículas para formação de torta filtrante com esta pressão de 10 bar.

O principal problema neste projeto foi encontrar ou fabricar algum equipamento que lançasse partículas em uma tubulação pressurizada para a formação da torta no meio filtrante.

Foi fabricado um aspersor de pó com uma capacidade de 2 kg de partículas no reservatório. O aspersor de partículas funcionava com uma pequena mangueira de 4 mm de diâmetro que girava internamente ao reservatório lançando as partículas contra a parede do reservatório, tendo um aumento de velocidade com a redução da tubulação, lançando estas partículas para a tubulação e o sistema.

O aspersor de pó tinha a grande vantagem do sistema já estar pressurizado, porém para um novo abastecimento de partículas no reservatório era necessário a despressurização do equipamento.

Nesta segunda versão do projeto foi esquematizado um equipamento parecido com os skids de gás natural, que contemplam duas linhas pressurizadas. A linha principal é composta de regulador de pressão, manômetro de segurança, válvula esfera, redução de tubulação para o aumento da velocidade, filtro de linha para a fixação do meio filtrante em questão e filtro absoluto.

No filtro de linha foram instaladas as saídas para a ligação do contador de partículas e o manômetro diferencial. O contador de partículas foi projetado para efetuar a contagem da quantidade de partículas, bem como o tamanho das mesmas. Pode-se programar a contagem

das partículas de 0,3 µm até 10 µm. O contador de partículas deve ser ligado na entrada e na saída do filtro de linha para se calcular a eficiência do meio filtrante em questão.

Foi instalada uma válvula pneumática de três vias com acionamento por alavanca para facilitar as manobras do contador de partículas.

O segundo tramo da linha da bancada era composto de regulador de pressão, manômetro de segurança, válvula esfera e aspersor de partículas. Com isso o lançamento das partículas no meio filtrante era realizado com o equipamento totalmente pressurizado e formava-se a torta filtrante no filtro de linha. As partículas que eventualmente passassem pelo filtro de linha, por serem menores que a abertura do meio filtrante, eram capturadas pelo filtro absoluto.

Um outro item importante foi a fixação do meio filtrante ao filtro de linha, pois este deveria garantir a perfeita vedação no sistema não permitindo uma passagem preferencial de fluxo após o meio filtrante. Primeiramente, foi soldada uma chapa perfurada junto ao topo do encaixe do filtro de linha, e a instalação do meio filtrante ficou em cima do cordão de solda, não garantindo uma perfeita vedação. Desta forma, foi necessário fabricar uma peça inteiriça com os furos padronizados e com o encaixe para o meio filtrante recebendo uma vedação de borracha e um anel metálico aparafusado que não permitisse a passagem preferencial.

A segunda etapa do segundo projeto foi a instalação da automação da perda de carga do sistema, pois o manômetro inicialmente instalado no equipamento não realizava a leitura com uma precisão necessária para os cálculos do projeto. Esta automação foi efetuada com uma placa de orifício previamente aferida, sensores de pressão, sensores de vazão e sensores de temperatura. Estes dados são capturados pelos sensores e enviados para um software para a confecção de um gráfico de diferença de pressão pelo tempo.

Este gráfico possui dados confiáveis para os diferentes tipos de partículas e diferentes meios filtrantes.

A parte da automação foi instalada após o filtro absoluto, que a princípio, havia sido instalado um silenciador de ½"roscado de bronze sinterizado para amenizar os ruídos do ar comprimido. Então foi retirado o silenciador e instalado um tubo flexível com uma válvula agulha para reduzir o fluxo de vazão para a leitura dos dados e envio para o computador.

A *Figura 3.3* mostra a segunda versão do projeto da bancada que foi construído, porém ainda não ficou sendo como versão final da bancada sendo necessário alguns ajustes que serão descritos na terceira versão do projeto.

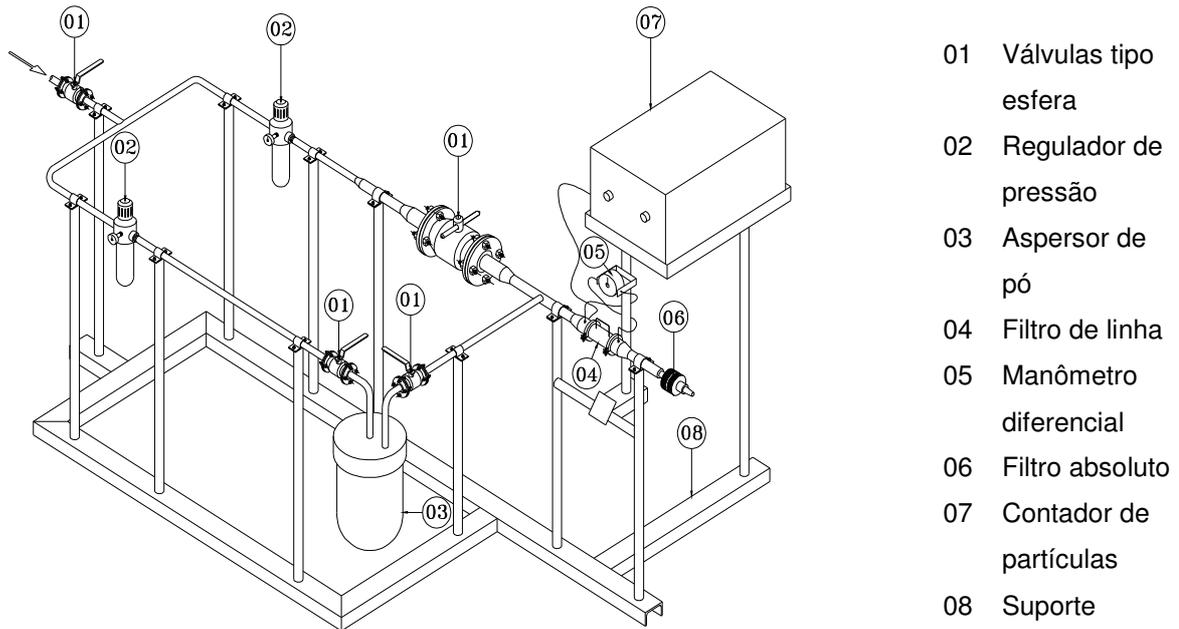


Figura 3.3: Bancada de ensaios de meios filtrante a alta pressão

A segunda bancada de ensaios era composta pela linha principal e linha secundária.

Linha principal: O fluxo de ar passa pela redução da tubulação aumentando a velocidade e arrastando as partículas que são trazidas pela linha secundária. Nesta linha são dispostos os filtros de linha que são colocados os meios filtrante que serão ensaiados e o filtro absoluto que irá segurar as partículas que possam passar pelo filtro de linha.

Os reguladores de pressão, como o próprio nome diz, servem para controlar a pressão da linha, pois o compressor está regulado para trabalhar com 12 bar de pressão.

1. Regulador de pressão;
2. Manômetro de segurança;
3. Válvula de esfera;
4. Redução do diâmetro da tubulação;
5. Filtro de linha;
6. Contador de partículas;
7. Filtro absoluto.

Linha secundária: Esta linha serve para arrastar as partículas até a linha principal, pois os filtros de linha e filtro absoluto estão instalados na sequência desta saída.

1. Regulador de pressão;
2. Manômetro de segurança;
3. Válvula de esfera;
4. Aspersor de pó;
5. Válvula de esfera.

A bancada, bem como todos os componentes que estão pressurizados foram projetados e construídos com o material de aço inox.

Pode-se observar as fotos da bancada na segunda versão de projeto, conforme mostram as *Figuras 3.4; 3.5 e 3.6*.



Figura 3.4: Foto da bancada do segundo projeto no laboratório



Figura 3.5: Foto da bancada no tramo principal



Figura 3.6: Aspersor de pó no tramo secundário

3.2.1 Realização dos experimentos de filtração

Os ensaios foram realizados com uma pressão de operação de 10 bar. Considerando que a maioria dos trabalhos é realizada a pressão atmosférica, a pressão de operação proposta é aproximadamente 10 vezes maior.

O ar contaminado era forçado a passar através de um filtro, que possuía um elemento filtrante, a vazão constante. As partículas ficavam retidas na superfície do meio filtrante, formando a torta de filtração. Foi registrada a queda de pressão total no filtro e a massa de pó depositada no meio filtrante em função do tempo de filtração, conforme mostrado na *Figura 3.7*.



Figura 3.7: Montagem final da bancada

A *Figura 3.8* mostra o “coração” do equipamento onde estava instalado na linha principal da bancada de ensaios e estavam com o filtro de linha, o manômetro diferencial de pressão e o filtro absoluto. Os encaixes do filtro de linha são de flanges de conexão para facilitar a abertura e o fechamento e o filtro absoluto é fabricado com engate rápido de conexão pneumática. Após o filtro absoluto foi colocado um silenciador para diminuir o ruído do ar comprimido da tubulação.



Figura 3.8: Filtro de linha com manômetro diferencial e filtro absoluto

A *Figura 3.9* mostra a linha secundária com detalhe do aspersor de pó. O aspersor de pó era ligado com válvulas esferas na entrada e saída, evitando ter que despressurizar a linha para a colocação de partículas no equipamento.



Figura 3.9: Aspersor de pó

A *Figura 3.10* mostra o encaixe do filtro absoluto na linha principal com o sistema de engate rápido do sistema pneumático. Este encaixe facilita a montagem e desmontagem do equipamento para a colocação da membrana filtrante.



Figura 3.10: Montagem do filtro absoluto

Uma dificuldade neste segundo projeto é que não se tem controle de massa de pó que está sendo inserida no sistema. Pode-se pesar a quantidade de massa antes de colocar no aspersor de pó, porém percebe-se que o trecho da tubulação entre o aspersor e o filtro de linha é grande e uma boa parte das partículas fica aderida ao diâmetro interno da tubulação.

Uma outra parte das partículas que não tem formação na torta, ou se desprendem da torta filtrante ficam depositadas no suporte do meio filtrante.

Ao iniciar a pressão de 10 bar no sistema, quando se abre a válvula esfera de 4" a pressão tende a cair pelo menos 2,5 bar, ficando com 7,5 bar no sistema. No sistema, também percebe-se que há uma considerável perda de carga com o seu comprimento total e todos os seus equipamentos adjacentes como curvas, reguladores de pressão, válvulas, filtros, etc. Com estes dados viu-se a necessidade da criação da terceira versão do projeto.

3.3 TERCEIRO PROJETO

A terceira versão do projeto contempla a instalação de um equipamento motorizado para o lançamento de partículas no sistema. Um item importante que deve ser observado é que o compartimento de partículas deve ser pressurizado com a mesma pressão da bancada para

haver um balanceamento entre a pressão do sistema e as partículas a serem inseridas no sistema.

Nesta etapa foi feito um estudo para a redução do tamanho da bancada substituindo o aspersor de pó por um sistema motorizado incluindo um motorreductor com uma rosca sem fim para levar as partículas ao sistema pressurizado. Com isso foram substituídos alguns equipamentos que não têm mais aplicação na versão anterior do equipamento, conforme mostram as *Figuras 3.11, 3.12 e 3.13*.

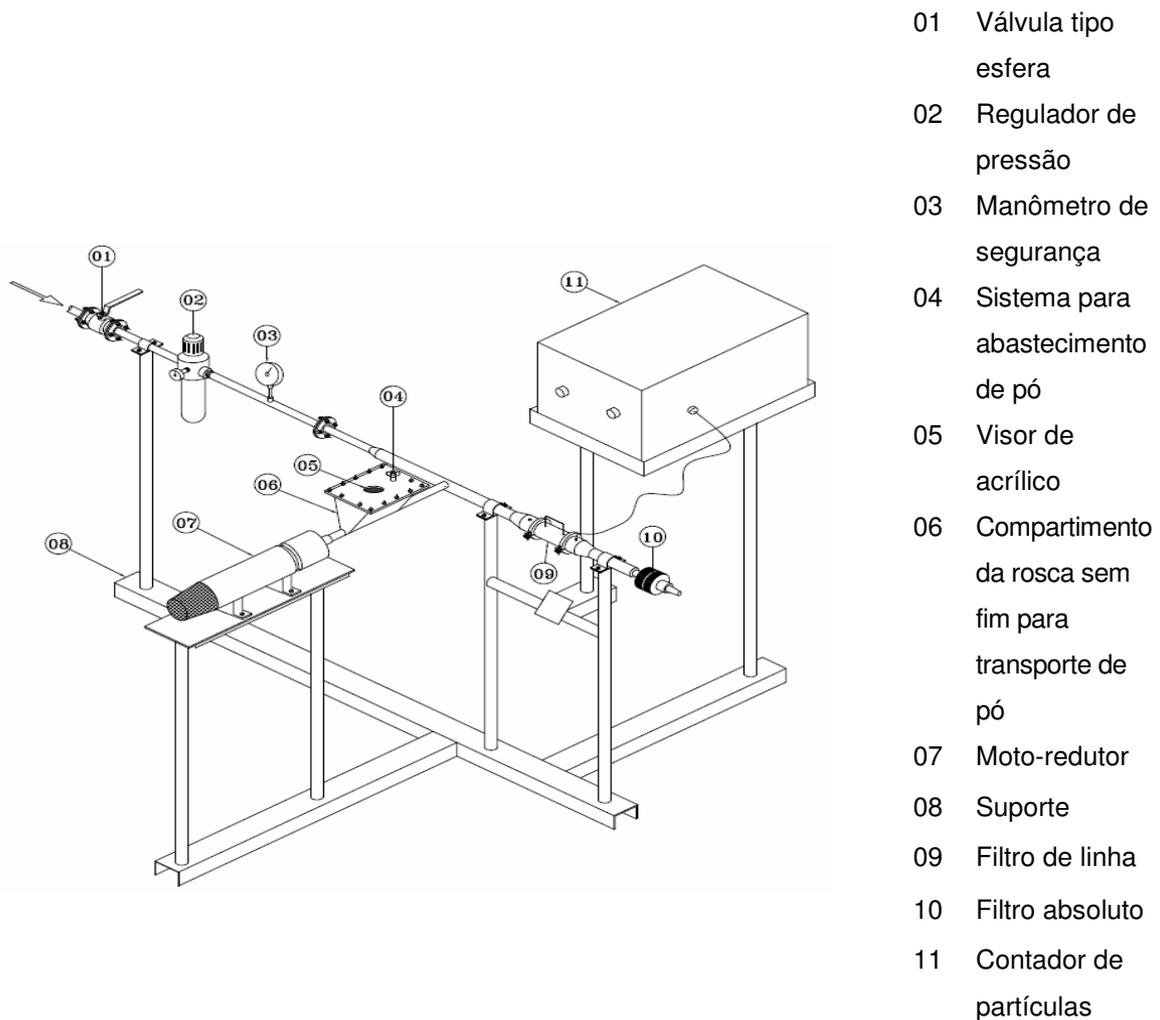


Figura 3.11: Bancada de ensaio na terceira versão do projeto

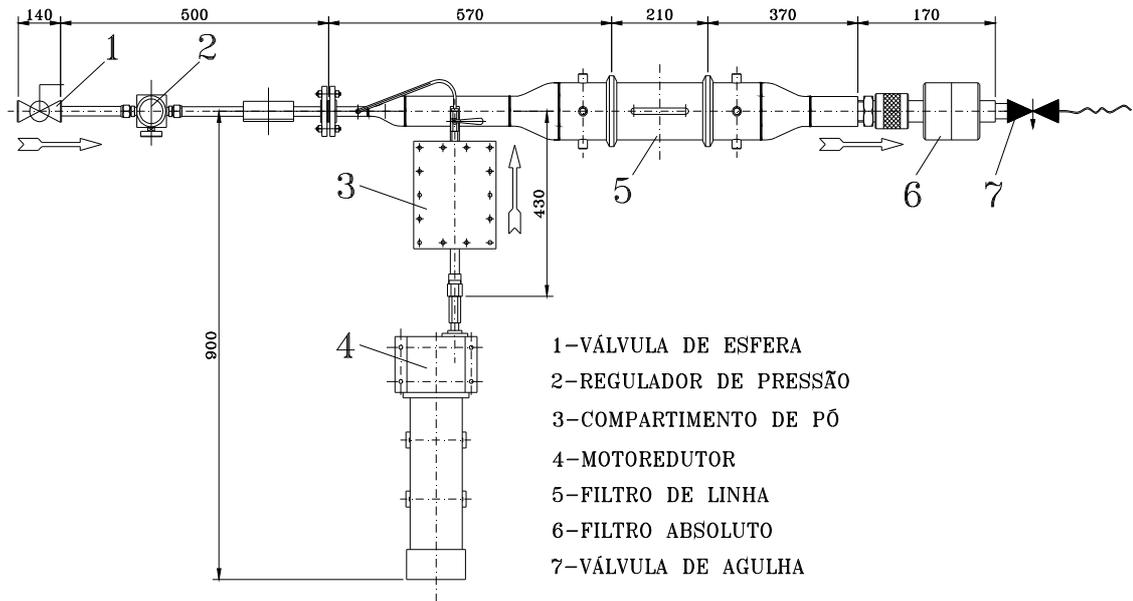


Figura 3.12: Dimensional da bancada na terceira versão do projeto

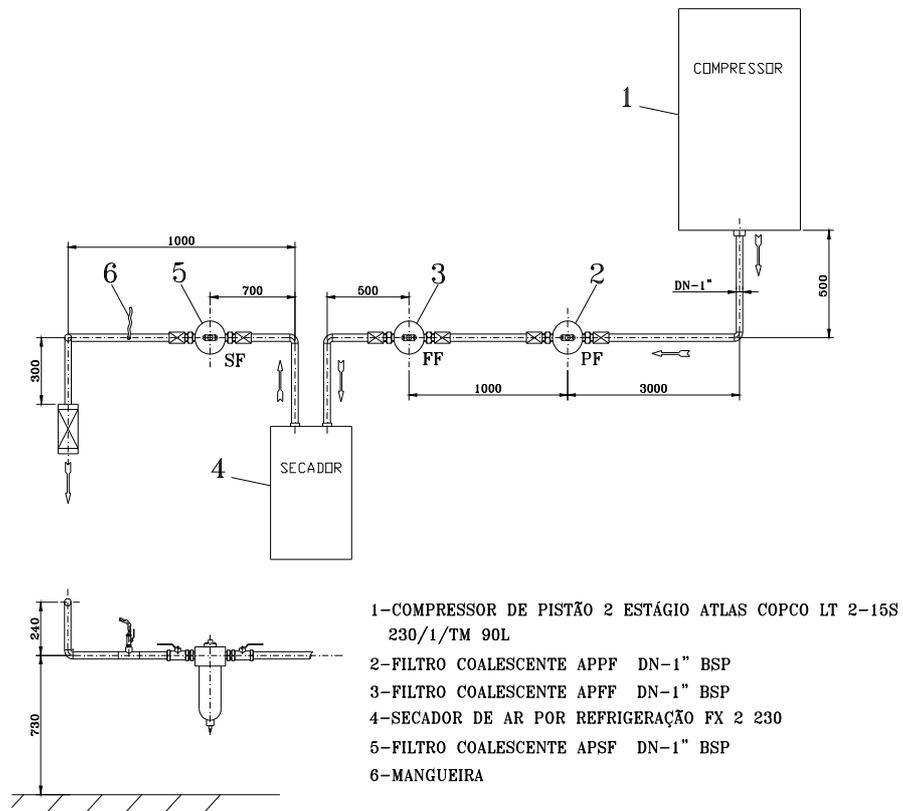


Figura 3.13: Dimensional da bancada na terceira versão do projeto

Com a redução do tamanho da bancada e a retirada de muitos equipamentos que eram utilizados para a formação de torta, conseguiu-se obter uma pressão maior.

Esta versão da bancada foi a última e está sendo utilizada no laboratório, para a obtenção dos dados preliminares e os dados finais, a fim de realizar os estudos dos ensaios dos diferentes meios filtrantes, diferentes partículas e diferentes pressões.

O ajuste da velocidade no variador do motor permitiu um controle mais preciso da quantidade de partículas que eram lançadas no sistema. Com isso foi possível que a maioria das partículas fizessem o fluxo normal no meio filtrante, assim há uma perfeita formação de torta, o que evitou que muitas partículas ficassem no interior da tubulação.

Se as partículas ficassem na tubulação ocorreria uma redução do diâmetro interno da tubulação e conseqüentemente um aumento da velocidade, isso prejudicaria a formação da torta e o valor dos resultados finais seria alterado. A *Figura 3.11* mostra o esquema da bancada final como está disposta no laboratório.

A ideia inicial era a instalação de uma válvula esfera, na seqüência da instalação do equipamento motorizado de rosca sem fim, em seguida o filtro de linha e o filtro absoluto e por fim a automação e leitura dos resultados.

O primeiro equipamento foi projetado e construído com a sua base metálica onde possui um suporte para a rosca sem fim e uma tampa de acrílico de 15 mm de espessura para a verificação da quantidade e o comportamento das partículas no equipamento.

Esta versão do equipamento foi submetido a teste de 0 a 6 bar, porém ao chegar ao patamar de 6 bar a tampa de acrílico apresentou uma trinca. Foi colocado uma máscara com chapa de aço inox de 3 mm em cima da chapa de acrílico, porém o suporte apresentou um abaulamento na tampa do suporte com as mesma pressão de 6 bar e com isso apresentou vazamentos na tampa não sendo possível a estanqueidade do sistema.

A tampa de acrílico é um item importante pois é possível verificar através desta tampa a quantidade de partículas que estão disponíveis, sem a necessidade da abertura do equipamento, para o lançamento no sistema.

As *Figuras 3.14* e *3.15* mostram o ocorrido e a solução encontrada para suportar esta pressão.

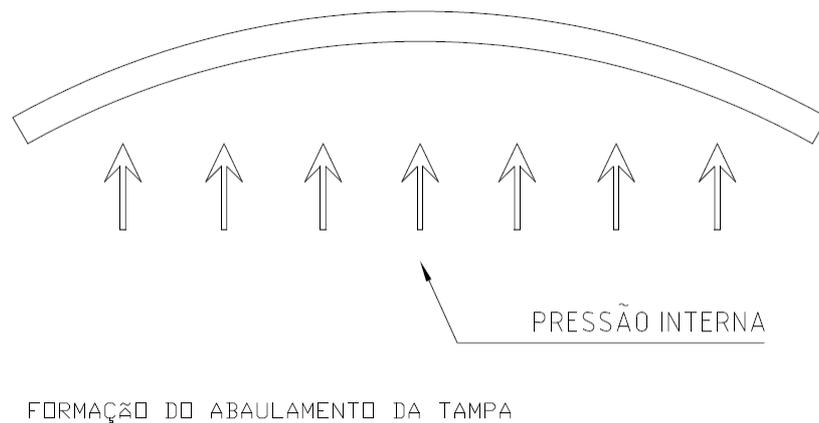


Figura 3.14: A pressão interna do sistema formando um abaulamento na tampa do suporte da rosca sem fim.

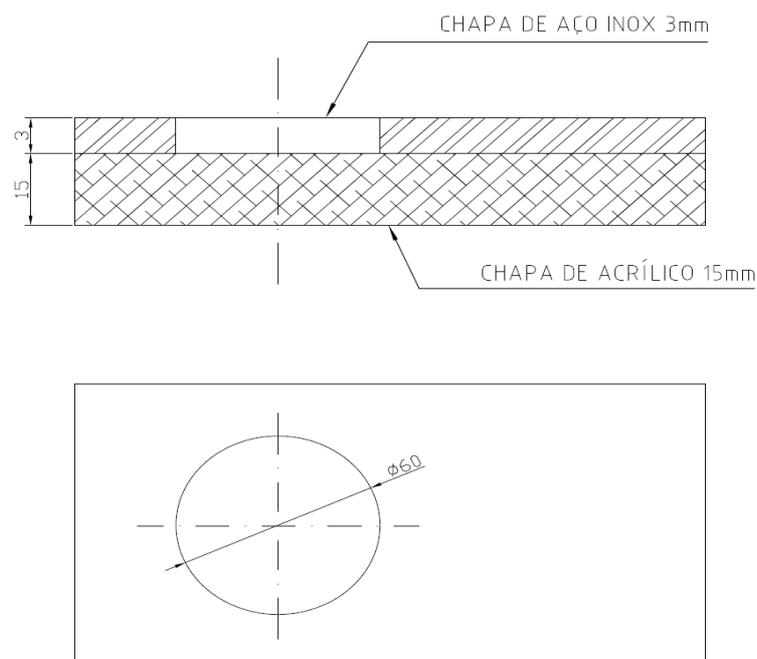


Figura 3.15: Máscara de aço inox na chapa de acrílico

Foi instalado uma chapa de 10 mm de espessura de aço inox com um furo de diâmetro de 60 mm para a instalação do acrílico e uma entrada de 1/2" roscada para a alimentação do particulado. A alimentação foi projetada por um engate roscado com uma borboleta manual e a instalação de um anel de vedação na própria peça, o que permitiu uma perfeita vedação e um engate rápido, não necessitando o uso de ferramentas.

Esta última versão facilitou a alimentação do particulado no sistema não necessitando remover todos os parafusos e dificultando a vedação no componente.

Todos os componentes foram construídos para terem abertura e fechamento rápidos, o que possibilitou uma troca de meios filtrantes mais rápido possível permitindo um conforto ao operador e a viabilidade de mais resultados num menor intervalo de tempo, conforme mostra a *Figura 3.16*.

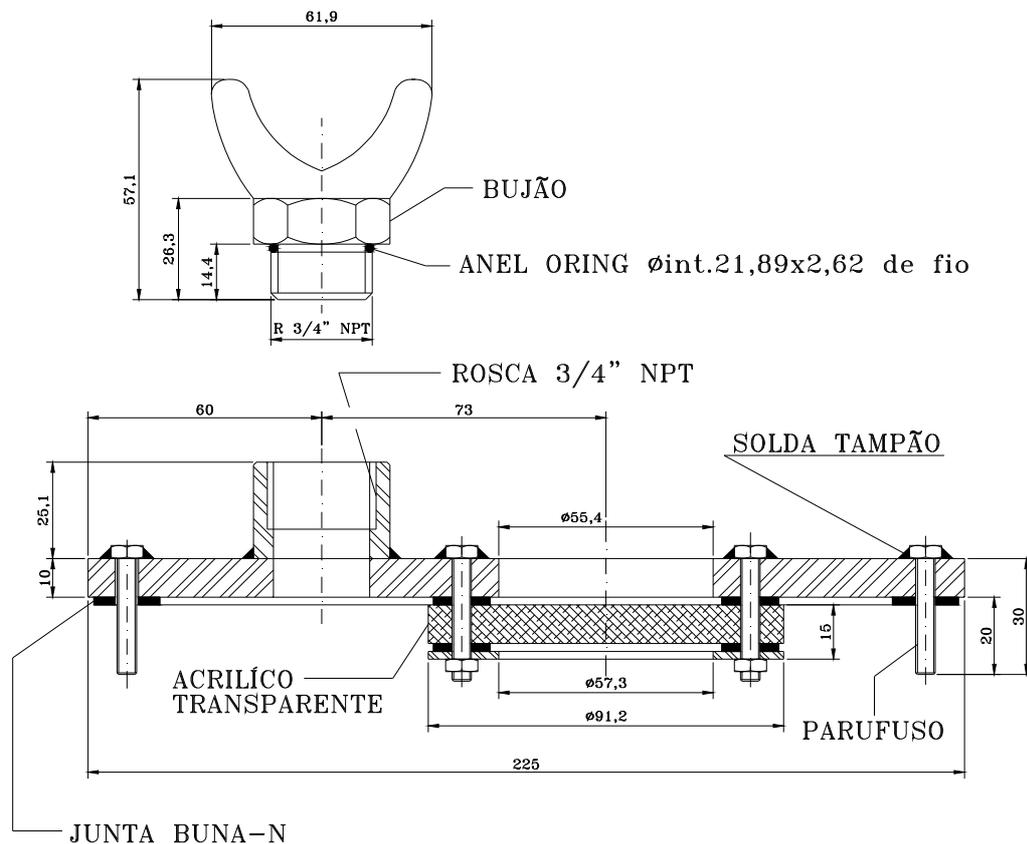


Figura 3.16: Tampa do alimentador de partículas

Nesta etapa foi necessária a mudança de tomada do contador de partículas, pois na primeira versão eram feitas as coletas da faixa de quantidades e do tamanho das partículas antes e depois do meio filtrante que estava sendo feito os estudos, porém o contador de partículas tem um limite máximo de contagem, se extrapolar esta quantidade o contador trava e deve ser feito uma limpeza no seu leitor óptico.

A *Figura 3.17* mostra a bancada em sua última versão. Percebe-se que nesta configuração a bancada para ensaios ficou mais compacta com apenas um tramo de utilização, com isso foi possível melhorar o desempenho eliminando as perdas de carga desnecessárias com curvas, válvulas, etc.

A utilização do alimentador de partículas motorizado ajudou com esta redução de tamanho, além de ser possível ajustar a variação de velocidade com que a rosca sem fim trabalha e assim sendo mais fácil de verificar qual a quantidade de particulados que está sendo inserida no sistema.



Figura 3.17: Bancada final na terceira versão de projeto

As Figuras 3.18 mostra o esquema do motorreductor com o passo da rosca sem fim e a Figura 3.19 mostra o motorreductor com o painel de controle e o variador de velocidade ajustável. Dependendo do ensaio que está necessitando pode-se ajustar uma velocidade previamente estabelecida.

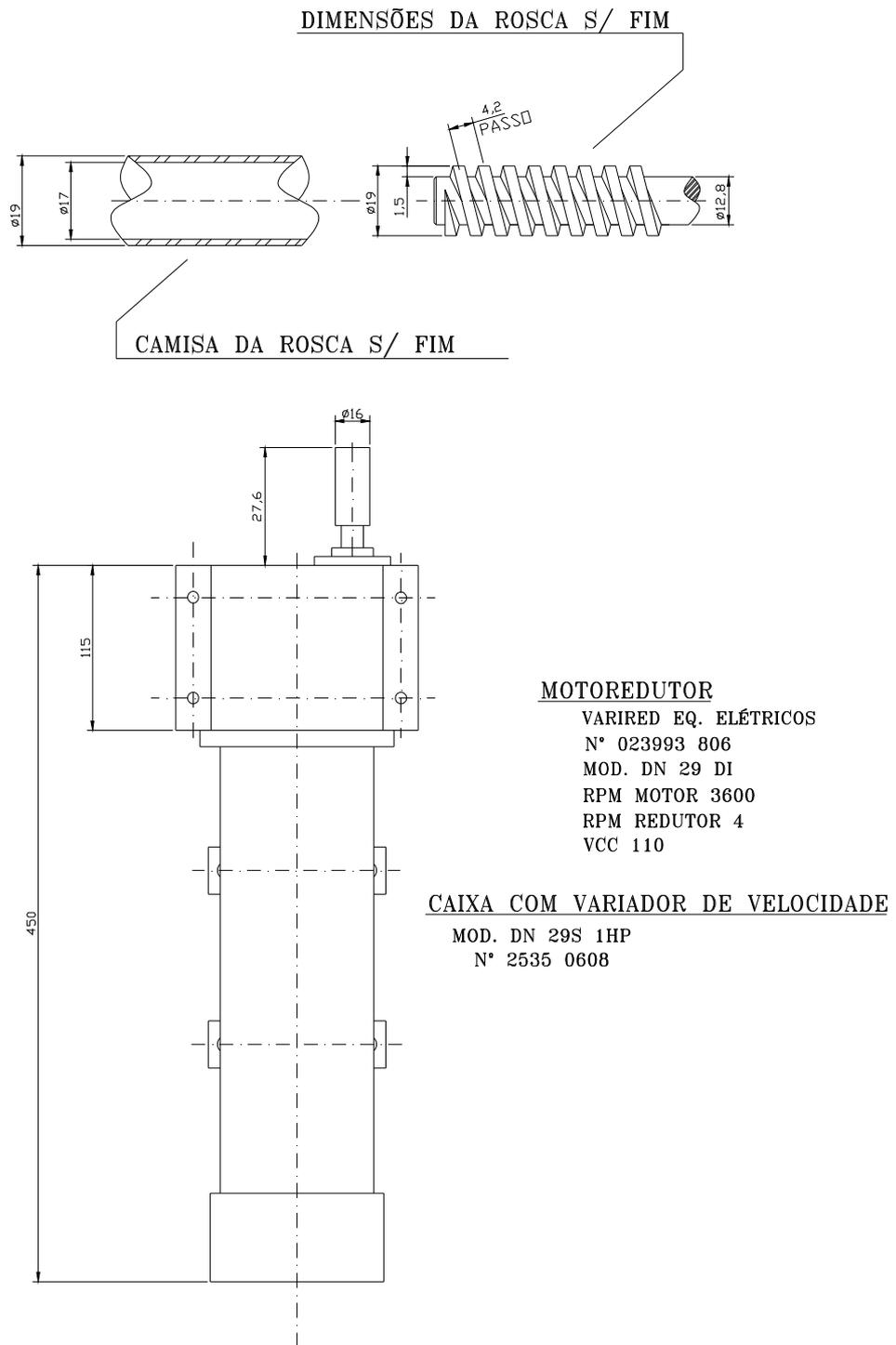


Figura 3.18: Desenho do motorreductor e a rosca sem fim



Figura 3.19: Motorreductor para o sistema de alimentação de partículas por rosca sem fim

A *Figura 3.20* mostra o esquema do alimentador de partículas do sistema, que basicamente foi composta de um suporte de uma rosca sem fim, que transporta as partículas para o sistema, o suporte das partículas, o visor de acrílico para a verificação da quantidade de partículas no compartimento, o suporte para alimentação com abertura rápida e a mangueira de pressurização, que ajusta a mesma pressão da bancada, fazendo o balanceamento da pressão das partículas, com a pressão da bancada. A *Figura 3.21* mostra o alimentador de partículas do sistema.

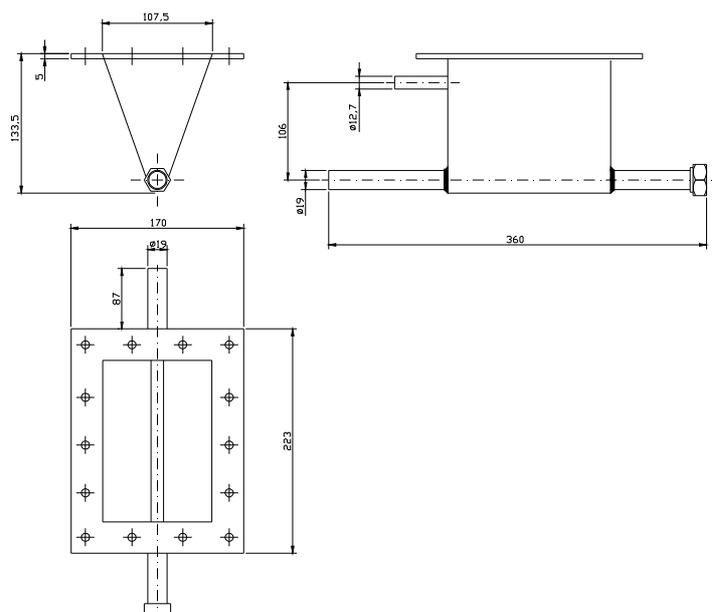


Figura 3.20: Alimentador de pó com rosca sem fim



Figura 3.21: Sistema de alimentação de partículas com a abertura rápida, o visor de acrílico e a mangueira de pressurização do sistema

A *Figura 3.22* mostra o esquema do porta elemento filtrante com os internos perfurados permitindo a passagem do fluxo de gás. A *Figura 3.23* mostra o suporte do elemento filtrante com a junta de vedação e as porcas de fixação, permitindo o fluxo de gás pelo elemento filtrante.

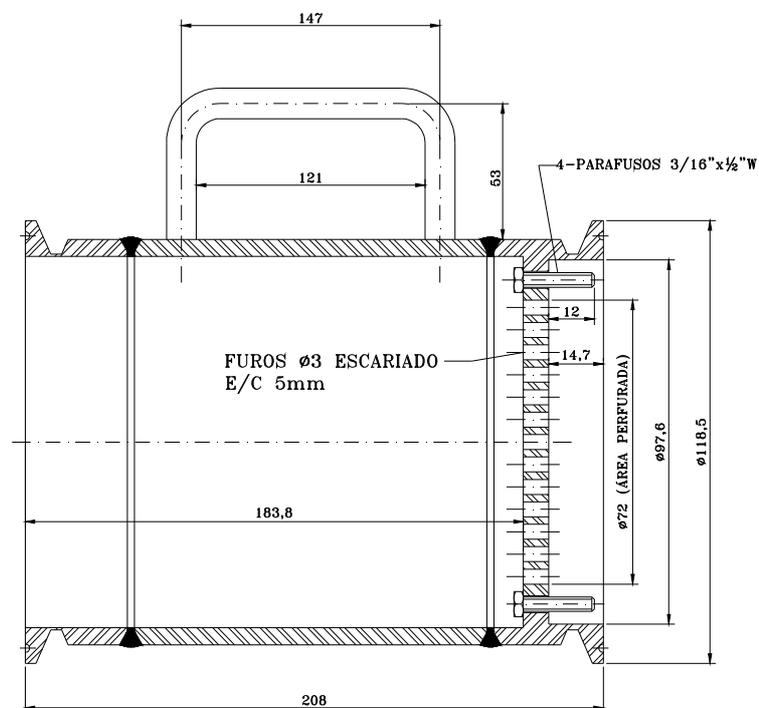


Figura 3.22: Dimensões do porta filtro

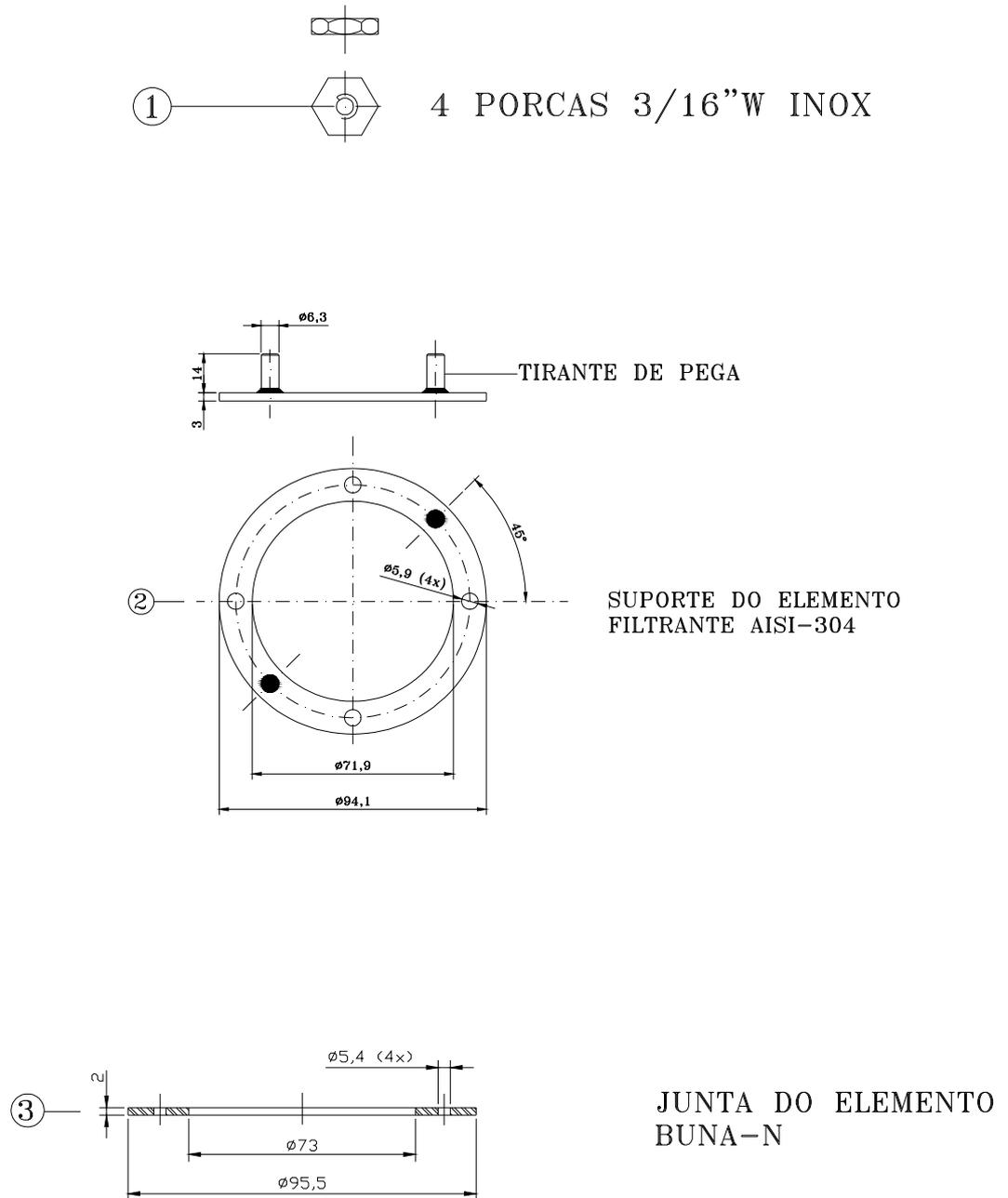


Figura 3.23: Dimensões do suporte do meio filtrante, porcas de fixação e a junta de vedação

A *Figura 3.24* mostra o filtro ajustado na linha pressurizada. Com este filtro é possível montar qualquer tipo de elemento filtrante que se queira realizar um ensaio para verificação do comportamento do meio. Internamente ao filtro foi soldado um suporte perfurado para ajustar o fluxo de ar comprimido, este suporte ajuda a fixação do meio filtrante e deve ser colocado um outro suporte preso a parafusos, sendo seu posicionamento de fácil ajuste. A alça superior auxilia e facilita a retirada do filtro para a montagem ou a retirada do meio filtrante na bancada.

A fixação do filtro na bancada foi feita por engates tipo clamp, que são engates rápidos e precisos, são suportados com juntas de vedações tipo silicone com encaixes perfeitos, garantindo a perfeita fixação e vedação do sistema.



Figura 3.24: Filtro onde se colocam os diferentes meios filtrantes

A *Figura 3.25* mostra o esquema do filtro absoluto que é instalado após o filtro de linha. Este filtro tem a finalidade de capturar todas as partículas que passarem pelo filtro de linha, deve ser instalado um tecido filtrante, também conhecido como membrana filtrante, normalmente com a retenção de 0,3 μm de abertura.

Todas as partículas que passarem pelo filtro absoluto serão contadas pelo contador de partículas que envia os dados para o computador.

Na terceira versão foi confeccionado um novo modelo de filtro absoluto, pois na segunda versão do projeto o filtro absoluto era composto de duas partes roscadas, o elemento

era inserido em um das partes e colocados os suporte de fixação do meio filtrante, ao se roscar as duas partes o meio filtrante, que é muito sensível, se danificava criando passagem preferencial de partículas.

Nesta versão foi confeccionado um equipamento usinado bi-partido com encaixes tipo clamp e anel de vedação de silicone instalado nos canais do suporte, sendo o encaixe preciso garantindo a vedação evitando vazamentos e garantindo o perfeito funcionamento do sistema.

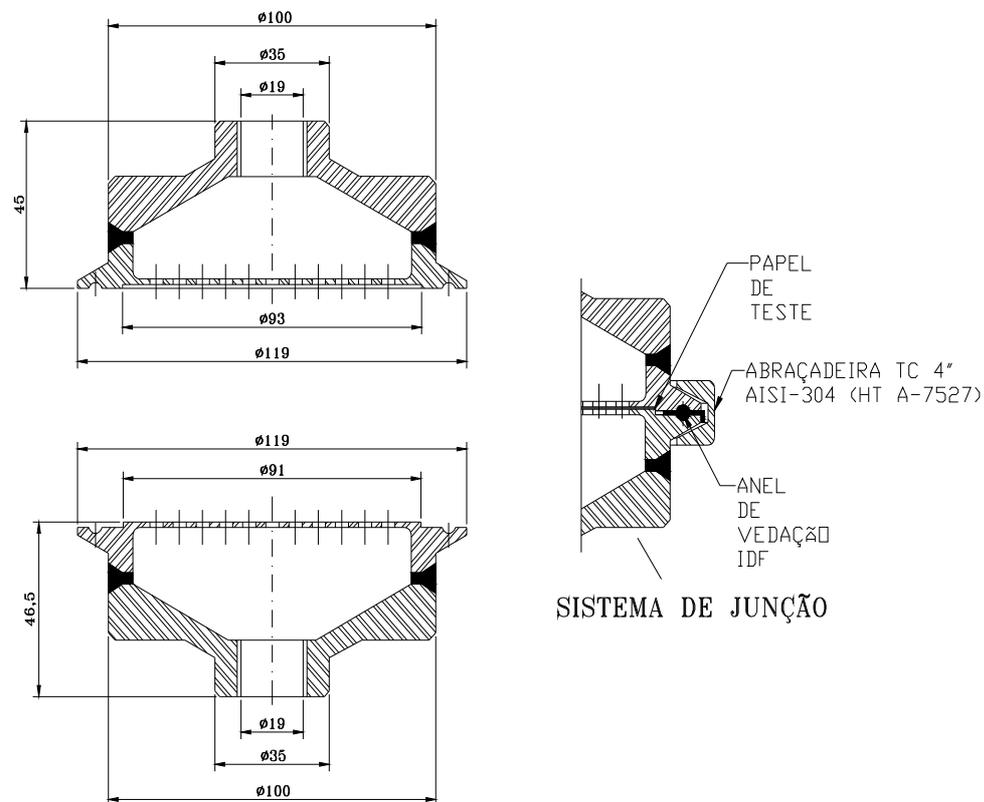


Figura 3.25: Dimensões do filtro absoluto

Após a colocação do elemento filtrante e o encaixe da abraçadeira, devem ser fixados na bancada por engate rápido, garantindo a estanqueidade, além de ser fácil e rápido a instalação no sistema, conforme mostra a *Figura 3.26*.



Figura 3.26: Filtro absoluto

Também foi previsto um sistema de limpeza do filtro de linha com fluxo reverso de ar comprimido, como se fosse um pulso reverso. Este equipamento irá retirar todas as partículas que ficarão retidas no meio filtrante, inclusive a torta filtrante. Com isso tem-se a massa real capturada no meio filtrante no tempo total de ensaio, porém, é necessário retirar o filtro da linha e instalar fora da bancada, conforme mostra a *Figura 3.27*.



Figura 3.27: Sistema de limpeza dos meios filtrantes

A *Figura 3.28* mostra o sistema de preparação do ar comprimido, como o ar está sendo utilizado como meio de transporte das partículas, além de auxiliar no aumento da pressão no sistema. O compressor utilizado na bancada é um compressor de pistão de alta pressão chegando até 15 bar de pressão. E como o compressor sempre arrasta aerossóis de óleo e água, poderia prejudicar muito o funcionamento de partículas com o aerossol. Para a captura deste condensado é preciso a instalação de uma bateria de filtros coalescentes com secador de ar comprimido.

O tratamento do ar comprimido funciona com uma bateria de filtração para que tenha a melhor vida útil dos elementos, começou com a instalação do pré-filtro com uma retenção de 10 μm , em seguida a instalação do filtro coalescente fino com uma retenção de 0,1 μm , na seqüência o secador de ar comprimido e por fim o filtro coalescente super-fino com retenção de 0,01 μm . Com estas etapas de preparação do ar comprimido pode-se garantir uma confiabilidade no ar comprimido isentando de partículas sólidas e líquidas também o ar comprimido seco para sua utilização.



Figura 3.28: Sistema de preparação do ar comprimido composto de pré filtro, filtro coalescente fino, secador de ar comprimido e filtro coalescente super fino

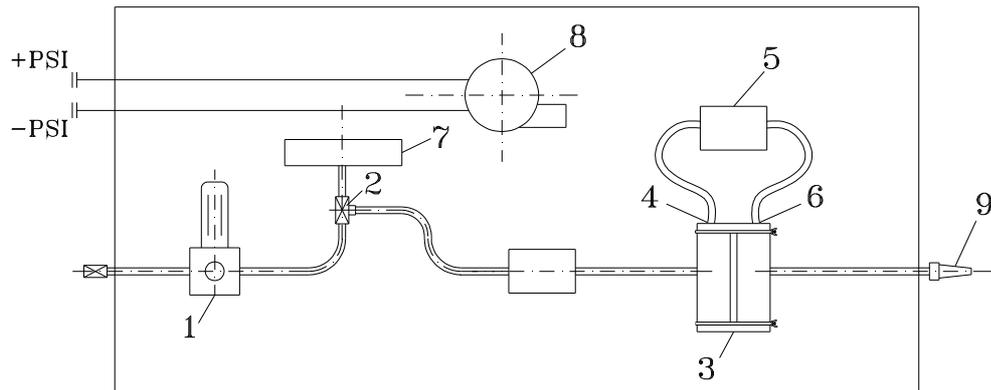
Outro equipamento de extrema importância na bancada de ensaios é o contador de partículas. A *Figura 3.29* mostra contador de partículas para ar e gases modelo Abakus Air.



Figura 3.29: Contador de partículas marca Klotz

O Abakus mobil air foi utilizado para medições do tamanho e número de partículas em um meio gasoso ou ar. O equipamento pode ser utilizado tanto no laboratório quanto no campo (estático ou móvel) cobrindo uma faixa entre 0.1 μm a 20 μm . Este equipamento monitora e verifica as partículas que são inseridas na bancadas para ensaios nos filtros para as determinações de eficiência dos meios filtrantes. Possui verificação de calibração automática e se necessário re-calibrar o equipamento.

A automação do sistema captura os dados com os sensores de pressão, vazão e temperatura e alimenta no software para a análise dos dados conforme mostra o esquema da *Figura 3.30*.



- 1-REGULADOR DE PRESSÃO
- 2-VALVULA AGULHA
- 3-PLACA DE ORIFICIO $\varnothing 55\text{mm}$
- 4-ENTRADA DO SENSOR DE PRESSÃO
- 5-SENSOR DE PRESSÃO
- 6-SAÍDA DO SENSOR DE PRESSÃO
- 7-CONTROLADOR DA VALVULA AGULHA
- 8-TRANSMISSOR DE PRESSÃO
- 9-SILENCIADOR

Figura 3.30: Esquema do painel da automação

As *Figuras 3.31 e 3.32* mostram a caixa de automação com os sensores e o monitor da automação e o controle da perda de carga.

Os dados são registrados em um software, ou seja, captação do valor da perda de carga em função do tempo.



Figura 3.31: Caixa de automação com os sensores

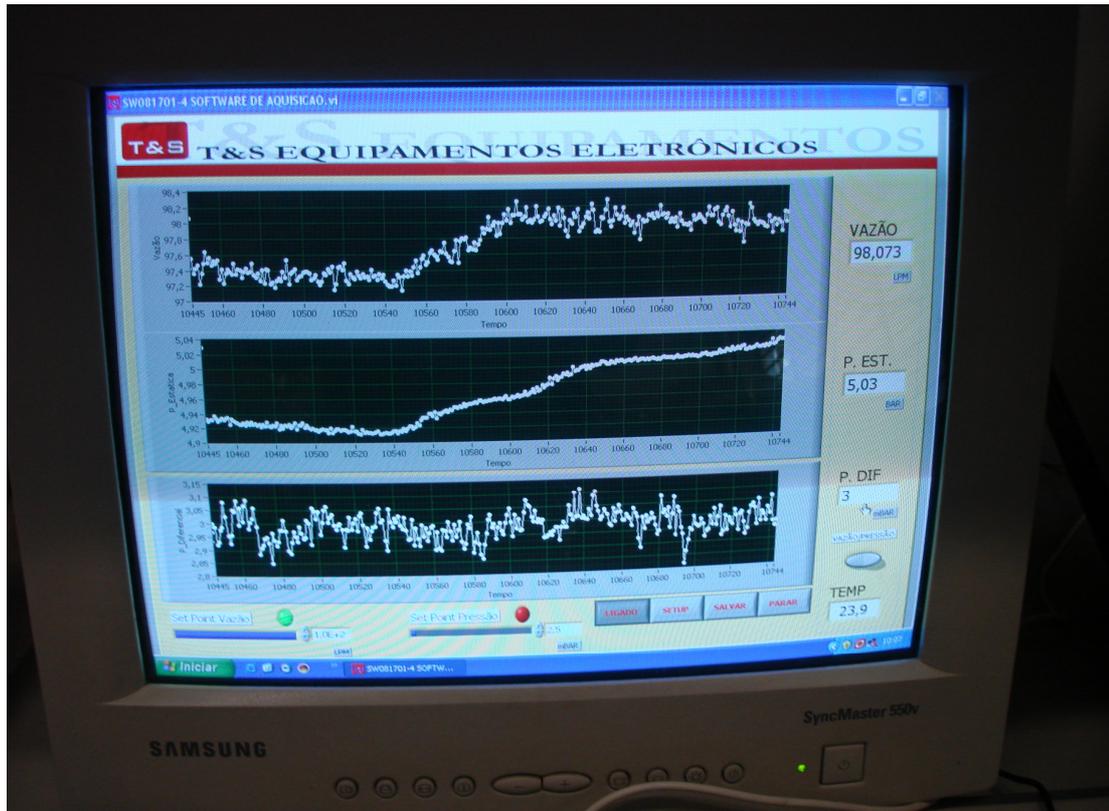


Figura 3.32: Monitor da automação e controle da perda de carga

3.4 MATERIAIS

3.4.1 Materiais pulverulentos

Com a finalidade de testar o sistema de alimentação da terceira versão da bancada de filtração a alta pressão foram realizados ensaios de filtração a alta pressão com rocha fosfática (densidade igual a $2,973 \text{ g/cm}^3$) peneirada com diferentes faixas granulométricas e observou-se que o pó que atingia o meio filtrante possuía uma faixa granulométrica entre 0 e $40 \mu\text{m}$. Por este motivo a rocha fosfática peneirada com diâmetro médio de $44,65 \mu\text{m}$ foi selecionada para os ensaios preliminares, como mostram as Figuras 3.33 e 3.34, obtidas com o auxílio do analisador de diâmetro por difração de laser (Malvern Mastersizer).

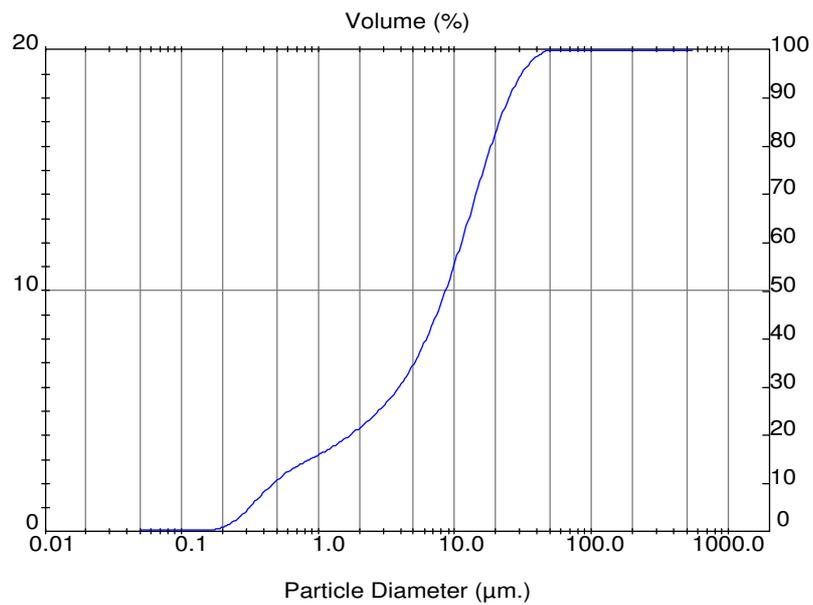


Figura 3.33: Distribuição granulométrica da rocha fosfática retida no meio filtrante

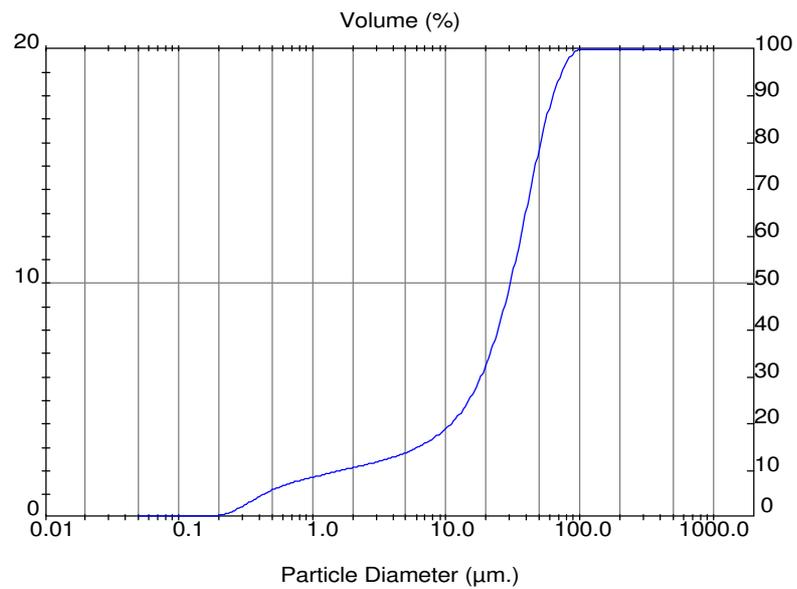


Figura 3.34: Distribuição granulométrica da rocha fosfática alimentada

3.4.2 Meios filtrantes

Após selecionar o pó que seria utilizado nos ensaios, foram escolhidos três meios filtrantes diferentes: poliéster tratado, celulose e metálico, cujas caracterizações estão apresentadas na Tabela 3.1, para avaliar o funcionamento do contador e do sistema de automação para coleta de dados experimentais.

Tabela 3.1: Caracterizações dos filtros

Meio Filtrante	Espessura (m)	Gramatura (g/m^2)
Metálico	0,0006	266
Poliéster tratado	0,0025	550
Celulose	0,0035	120

Os primeiros ensaios foram realizados com diferentes meios filtrantes para perceber o comportamento das diversas fibras, tramas e fios e para verificar a diferença do ensaio à pressão atmosférica e a pressão de 10 bar.

3.4.3 Gás – ar comprimido

Como o foco deste trabalho é o estudo de gases pressurizados, especialmente o gás natural, pensou-se utilizar cilindros de gases para a realização dos ensaios, porém para a segurança do laboratório e a redução de custos, foi instalado um compressor de ar comprimido para a realização dos ensaios, pois a densidade e as características do ar comprimido são parecidas com a do gás natural.

Para se trabalhar com o ar comprimido é necessária a realização de um tratamento deste para que as partículas de pó não fiquem úmidas e não fiquem grudadas nas paredes da tubulação. Ainda que o gás natural seja seco, é necessário um ar comprimido muito parecido com as características do gás natural encontrado em campo.

3.4.4 Procedimento experimental

- Ligar o compressor e esperar o reservatório pressurizar com as válvulas fechadas;
- Abrir a válvula de entrada para a pressurização da linha, ajustar a pressão do regulador em 100 KPa.
- Ligar a automação e ajustar a vazão desejada para o ensaio;
- Ligar o contador de partícula na posição desejada, na entrada ou saída do filtro;
- Ligar o alimentador de pó, ajustando a velocidade em 50% e atentar para que a válvula do alimentador deve ficar aberta para a pressurização da rosca sem fim;

- Colocou-se o elemento filtrante na unidade experimental ajustando a pressão do sistema em 100 KPa, variando a vazão do gás de 10 l/min até 50 l/min.
- Com esta variação coletou os dados da perda de carga através do sistema de controle, sem a adição de material particulado.
- Posteriormente ajustou-se outros valores de pressão do sistema (200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800 KPa) seguindo o mesmo procedimento.
- A vazão mássica de pó alimentada no sistema foi de 0,005 g/s.
- Colocou-se o elemento filtrante na unidade experimental ajustando-se a vazão do ar em 30 l/min para uma pressão do sistema em 100 KPa.
- Com esta variação coletou os dados da perda de carga através do sistema de controle. A perda de carga diferencial admitida no elemento de $\Delta P = 10$ mbar;
- Posteriormente ajustou-se outros valores de pressão do sistema (P=300 KPa e P=700 KPa), mantendo a vazão de ar em 30 l/min.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados preliminares obtidos para a perda de carga e eficiência de filtração em diferentes meios filtrantes e diferentes pressões.

A primeira etapa deste estudo teve como objetivo estudar os comportamentos dos meios filtrantes como papel celulose, poliéster tratado e tela metálica e a verificação da permeabilidade dos elementos filtrantes citados.

Na segunda etapa deste trabalho foi realizado um estudo de perda de carga em função do tempo, como os mesmos meios filtrantes. Posteriormente, foi escolhido o meio filtrante de papel celulose, por ser o mais utilizado para esta aplicação em gás natural, para realizar um estudo sobre a eficiência de filtração variando a pressão.

4.1 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO

Com o intuito de avaliar o funcionamento da bancada, foi realizado um ensaio preliminar com farinha de trigo com o mesmo diâmetro médio do óxido de alumínio, pois era o único material particulado disponível para o ensaio. O teste teve a duração de 10 minutos, e foi possível observar uma perda de carga no manômetro diferencial, por este motivo teve a duração estabelecida neste tempo e foi possível observar a formação da torta filtrante com 3 mm de espessura. Este ensaio preliminar pode ser visualizado na *Figura 4.1*.



Figura 4.1: Formação de torta filtrante

Este teste foi realizado na segunda versão de projeto da bancada, e ainda não estava instalada a automação para a análise da perda de carga e da eficiência de filtração. O objetivo nesta etapa era a verificação da formação de torta filtrante. Esta etapa foi concluída com sucesso, porém podia observar uma quantidade muito grande de material particulado no suporte do meio filtrante e na tubulação. Este foi o principal motivo que não era possível ter o controle das partículas que estavam sendo lançadas para o sistema, com a pressurização do equipamento, praticamente todas as partículas colocadas no aspersor de pó eram lançadas no equipamento, e não era possível controlar esta quantidade. Este fato estava complicando a captura de dados para a perda de carga e a eficiência do meio filtrante, pois a quantidade de partículas estava muito alta.

Com estas informações foi realizada uma revisão no equipamento e construída a terceira versão de projeto com este controle de partículas lançadas no sistema.

4.2 PERMEABILIDADE DOS MEIOS FILTRANTES

Os ensaios de permeabilidade ao escoamento do fluido foram realizados para os três meios filtrantes diferentes como papel celulose, poliéster tratado e tela metálica, para uma faixa de pressão de 98 a 600 KPa. Os resultados da constante de permeabilidade darciana estão apresentados nas *Figuras 4.2*.

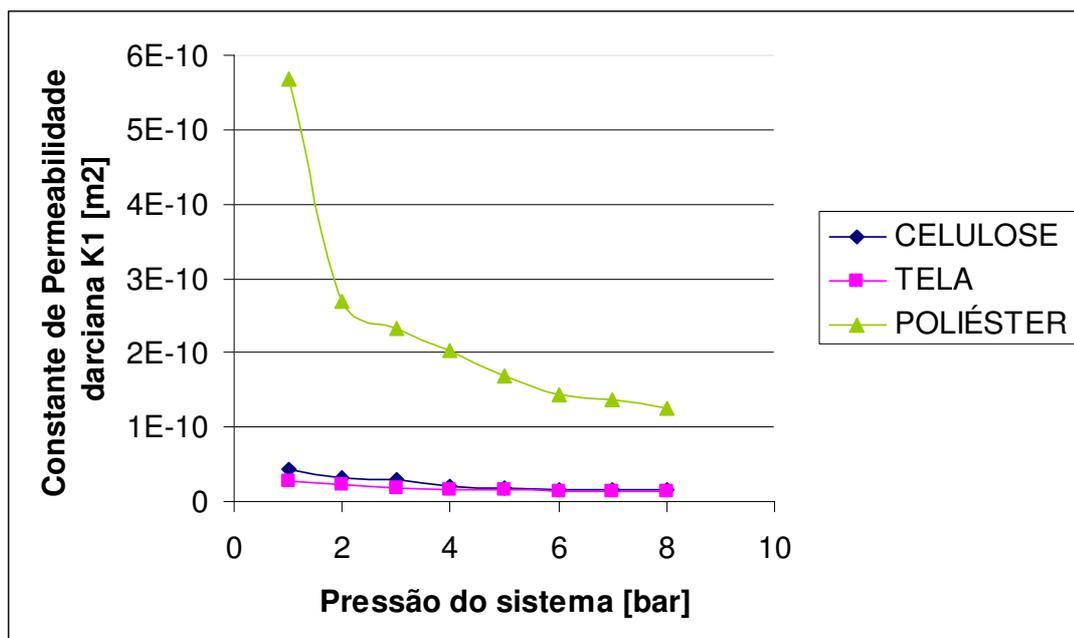


Figura 4.2: Permeabilidade darciana para os meios filtrantes metálico, poliéster tratado e papel celulose

A análise da Figura 4.2 mostra que as constantes de permeabilidade darciana aumentaram com a variação da pressão do sistema. Isto indica que os ensaios de permeabilidade a pressões elevadas contribuem para alterações nas propriedades dos fluidos como a viscosidade e a densidade, bem como a estrutura dos elementos filtrantes. Tais mudanças podem estar ocorrendo nas fibras, sendo forçadas à passagem do gás com o aumento da pressão.

Observa-se que a tela metálica apresentou a maior permeabilidade entre os tecidos estudados, o que mostra que os espaços calibrados da tela metálica conferem uma maior estabilidade às fibras do meio filtrante.

A Figura 4.3 apresenta a constante de permeabilidade não darciana para os meios filtrantes metálicos, poliéster tratado e papel celulose.

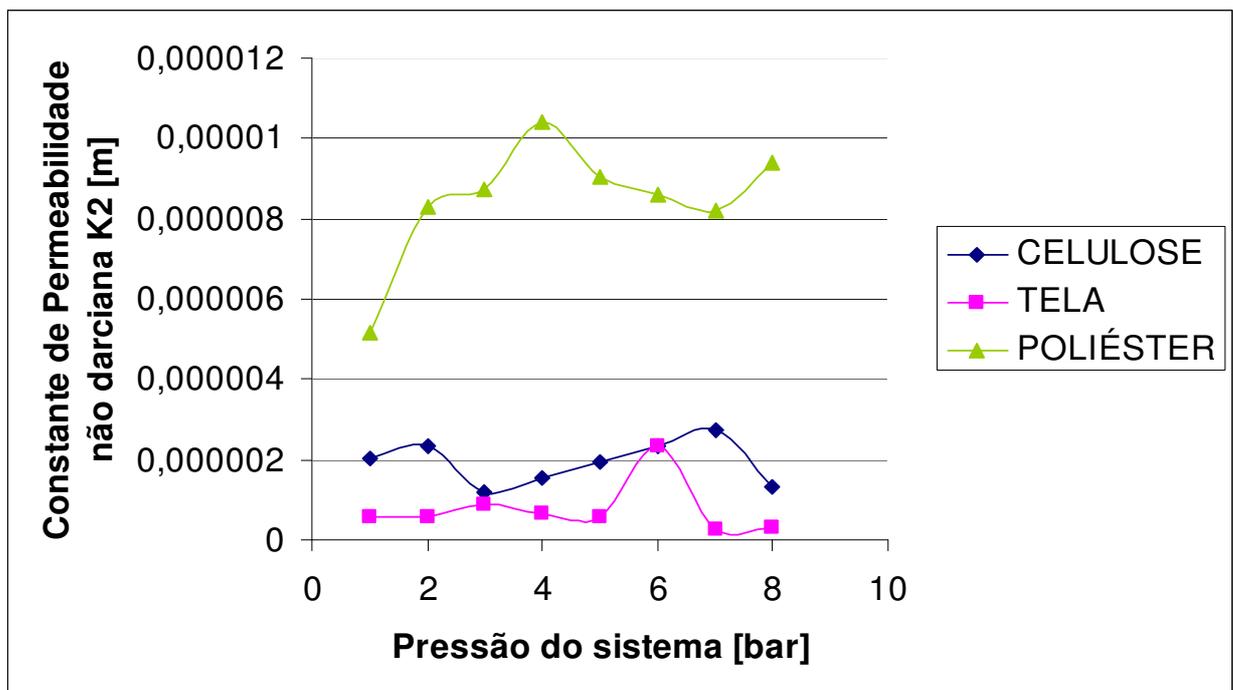


Figura 4.3: Permeabilidade não darciana para os meios filtrantes metálico, poliéster tratado e papel celulose

A análise da Figura 4.3 mostra que as constantes de permeabilidade não darciana aumentaram com a variação da pressão do sistema.

Observa-se que o poliéster tratado apresentou a maior permeabilidade não darciana entre os tecidos estudados, e a tela metálica e o papel celulose apresentaram praticamente os mesmos valores.

Comparando as Figuras 4.2 e 4.3, visualiza-se entre os tecidos estudados, o que teve a maior a maior permeabilidade darciana foi o meio filtrante em tela metálica e a menor foi o

papel celulose e a melhor permeabilidade não darciana foi obtida com o poliéster tratado enquanto os meios filtrantes de tela metálica e papel celulose praticamente mantiveram os mesmos resultados.

Este comportamento foi atribuído às diferentes características dos meios filtrantes, como a permeabilidade, observando-se que quanto maior a permeabilidade ao ar mais significativa era a filtração interna.

Comportamentos similares foram observados por (OSÓRIO, 2006), que comparou dois meios filtrantes de celulose, chegando à mesma conclusão em relação à permeabilidade dos meios filtrantes e o período de filtração interna.

4.3 ENSAIO DE PERDA DE CARGA

Os ensaios de perda de carga foram realizados com rocha fosfática e três diferentes meios filtrantes. Neste experimento foi determinada a perda de carga de cada filtro.

A *Figura 4.4* apresenta, o resultado da filtração realizada a 5 bar (500 KPa) de pressão no sistema, para 100 l/min (0,0016 m³/s) de vazão de ar, utilizando os meios filtrantes de tecido metálico, de poliéster tratado e de papel celulose.

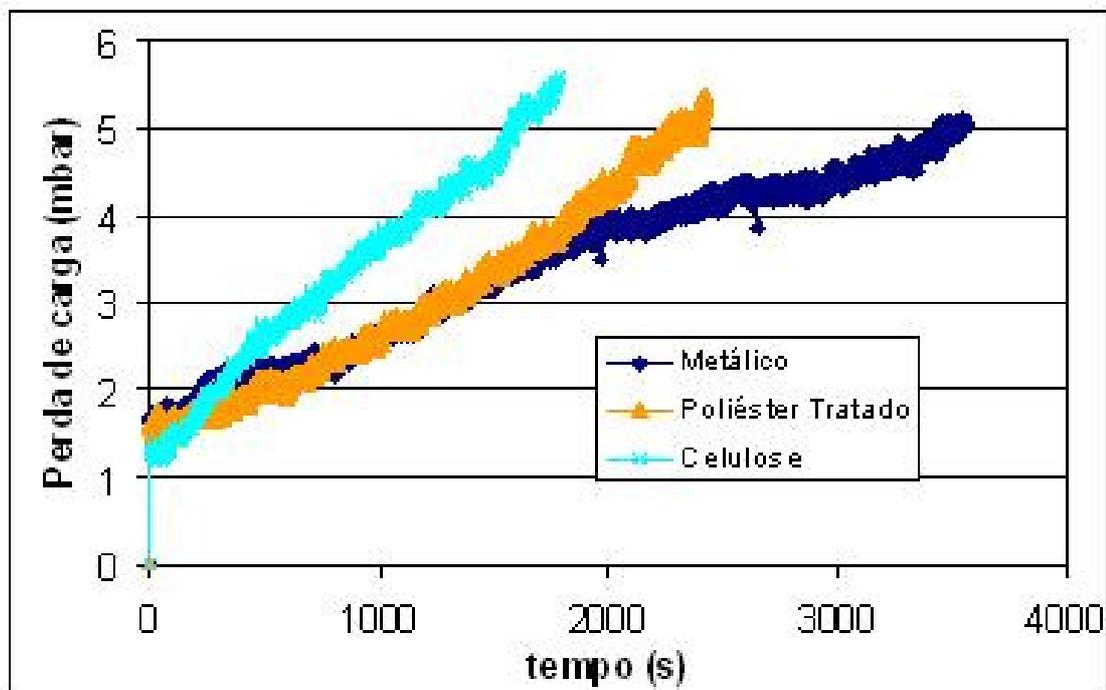


Figura 4.4: Perda de carga obtida para os meios filtrantes de metal, poliéster tratado e papel celulose

Observando a *Figura 4.4* nota-se que meio filtrante em tecido metálico apresentou uma perda de carga similar ao meio filtrante de poliéster tratado até os primeiros 2000 s. Porém após este tempo, o tecido de poliéster atingiu uma saturação mais rápida que o elemento metálico. Já o filtro de celulose foi o que proporcionou a maior perda de carga diferencial entre os tecidos estudados. Isto mostra que a menor permeabilidade deste tecido realizou uma rápida formação da torta diminuindo o período de filtração.

4.4 EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO

A eficiência de filtração é verificada com a quantidade de partículas que chegam ao meio filtrante e a quantidade de partículas que atravessam o meio filtrante. Isso se dá pelo fato de que o elemento é eficiente para determinado diâmetro de partículas. Se o elemento filtrante consegue reter todas as partículas iguais ou maiores que um determinado diâmetro de partículas, significa que este meio filtrante é 100% eficiente a esta classe de partículas.

Com o auxílio do contador de partículas (marca Klotz) foi possível medir o número de partículas presentes durante a filtração antes e após os meios filtrantes (metálico, poliéster tratado e celulose), quando submetidos a uma pressão do sistema igual a 5 bar (500 KPa) e 100 L/min (0,0016 m³/s) de vazão de ar. Primeiramente os ensaios foram feitos antes do filtro, ou seja, as partículas que chegaram no meio filtrante e em seguida o equipamento foi ligado após o meio filtrante, sendo possível a observação da eficiência do meio filtrante. Com estes dados foram obtidas as eficiências fracionárias apresentada na *Figura 4.5*.

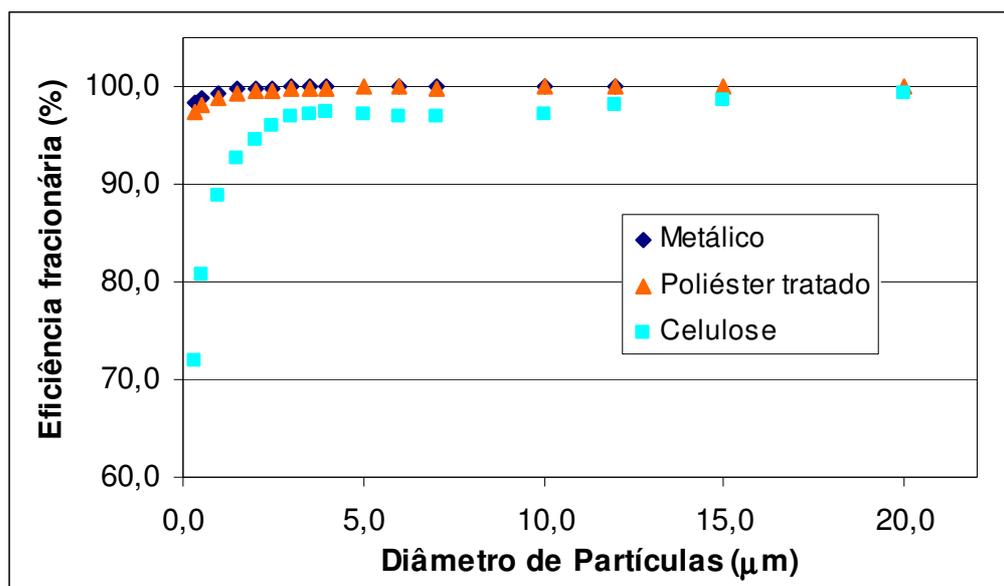


Figura 4.5: Eficiência fracionária dos meios filtrantes de metal, poliéster e papel celulose.

Ao analisar a eficiência fracionária dos meios filtrantes na *Figura 4.5*, percebe-se que, independente do tamanho de partícula, o filtro metálico e o poliéster tratado mostraram-se bastante eficientes (aproximadamente 99%) para remoção de particulados com pressões de 5 bar, enquanto a celulose apresentou eficiência baixa para partículas menores de 0,5 μm (aproximadamente 70%) e uma eficiência máxima igual a 93%.

4.5 TORTA FILTRANTE

Foram obtidas imagens por microscopia eletrônica (MEV) para examinar a formação de torta e a penetração do pó nas fibras do meio filtrante de poliéster tratado quando submetido à pressão de 5 bar e velocidade superficial de 2 m/s, como apresentada na *Figura 4.6*.

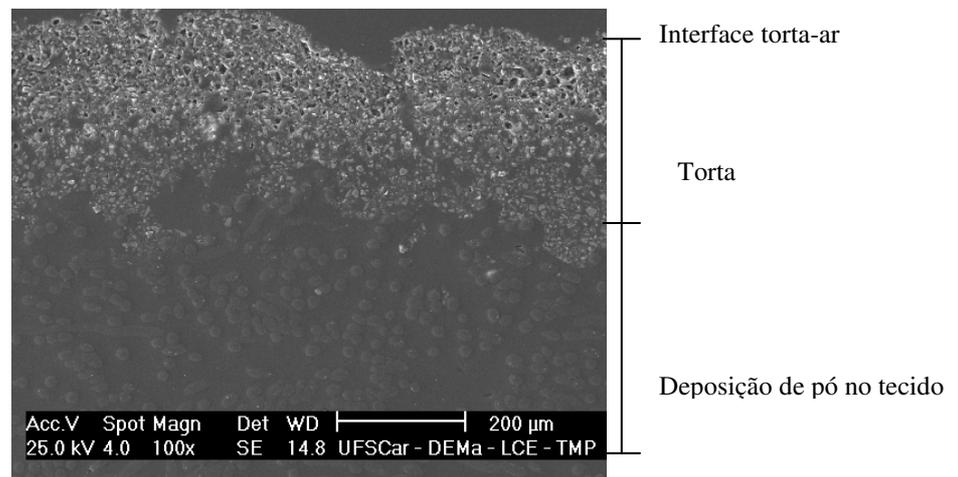


Figura 4.6: Imagem obtida por MEV com aumento de 100x da penetração das partículas de rocha fosfática no meio filtrante de poliéster tratado.

Analisando *Figura 4.6* observa-se uma grande presença de partículas depositadas nas camadas internas do meio filtrante. Esta grande deposição pode aumentar a eficiência na captura das partículas finas, por outro lado também pode ocorrer um aumento na perda de carga residual, diminuindo a permeabilidade do tecido.

4.6 EFICIÊNCIA DE FILTRAÇÃO E PERDA DE CARGA PARA PAPEL CELULOSE VARIANDO A PRESSÃO

O meio filtrante em papel celulose foi escolhido para a realização dos ensaios de eficiência de filtração e perda de carga variando a pressão, pois é o meio filtrante mais

utilizado nas companhias de gás natural para esta aplicação. Além de ser fácil encontrar em diferentes retenções e gramaturas em vários fornecedores locais, este meio filtrante é mais barato que os outros testados anteriormente.

A *Figura 4.7* mostra a curva de eficiência de filtração variando a pressão de 1, 3 e 7 bar. Este estudo comprova que quanto maior a pressão menor é a eficiência de filtração.

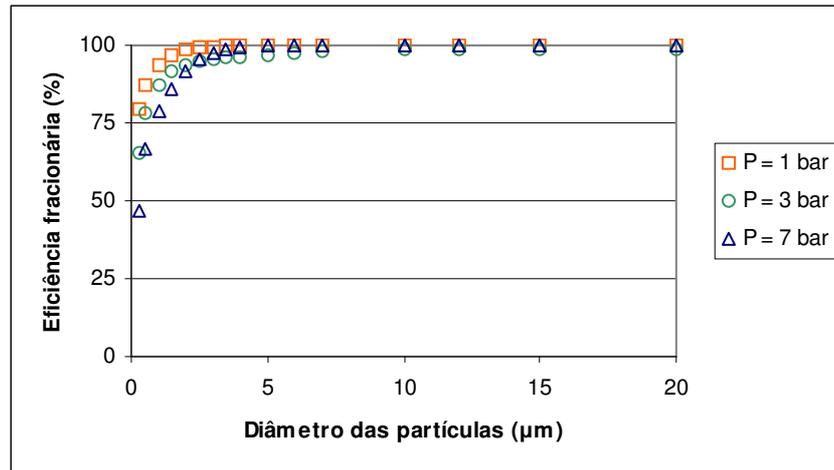


Figura 4.7: Eficiência fracionária do papel celulose para pressões de 1, 3 e 7 bar

Ao analisar a eficiência fracionária do papel celulose, percebe-se que quanto maior a pressão, menor é a eficiência do meio filtrante. Acima da retenção de 10 µm a eficiência fica igual para todas as faixas de pressão, porém abaixo dos 10 µm a faixa de pressão de 7 bar fica abaixo da faixa de 3 bar e conseqüentemente abaixo da faixa de 1 bar.

A *Figura 4.8* mostra a diferença de perda de carga do mesmo elemento de papel celulose, variando a pressão de 1, 3 e 7 bar.

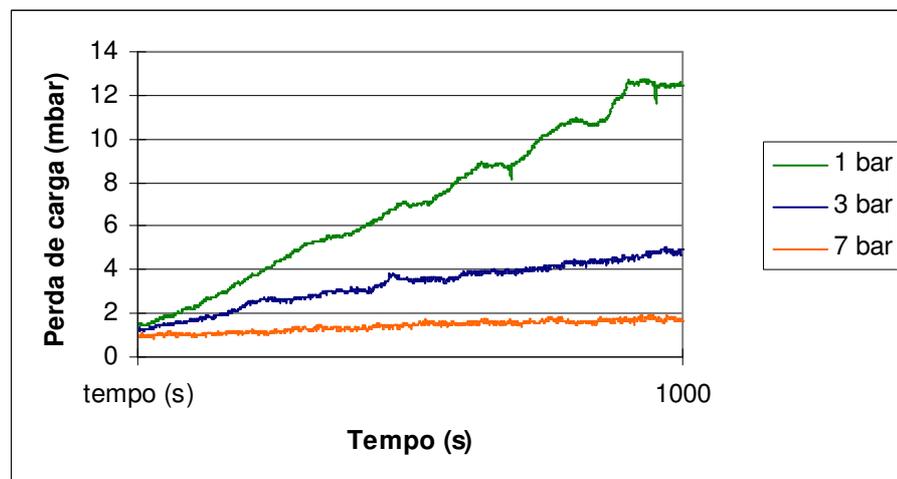


Figura 4.8: Perda de carga do papel celulose em função do tempo de filtração para pressões de 1, 3 e 7 bar

A *Figura 4.8* mostra que para a menor pressão, mais rápida é a formação da torta filtrante e conseqüentemente maior é a perda de carga. Observou-se que a quantidade de partículas no meio filtrante com uma pressão mais baixa é muito maior que a do meio filtrante que recebeu a maior pressão. A Tabela 4.1 mostram os resultados.

Um outro detalhe observado no ensaio, é que com o aumento da pressão, uma quantidade maior de partículas ficam depositadas nas paredes da tubulação. Este fato também tem influência na eficiência do elemento filtrante.

Tabela 4.1: Diferença do peso da massa retida nos meios filtrantes com a diferença de pressão

Pressão (bar)	Peso de massa retida (g)
Elemento limpo	0,6090
1	0,9749
3	0,8420
7	0,6745

O meio filtrante em papel celulose foi mais barato que o de tela metálica e poliéster tratado, porém foi o que apresentou menor permeabilidade, menor eficiência e maior perda de carga entre os outros meios mencionados, e mesmo assim é o mais utilizado nas companhias de gás natural do Brasil.

Isto mostra que apesar do filtro celulósico ter um custo relativamente mais barato para a filtração de gás natural, este apresenta um desempenho inferior aos meios filtrantes metálicos e de poliéster tratado, sendo os dois últimos os mais indicados para a filtração em alta pressão.

5. CONCLUSÃO

A seguir são apresentadas as principais conclusões obtidas através da bancada de ensaios de filtração de gás a alta pressão.

Foi necessário a montagem de três versões de projetos até a última versão da bancada que está em operação atualmente.

O primeiro projeto não foi plausível a sua viabilidade porque não foi possível instalar um componente de extrema importância para esta versão da bancada, que era a válvula rotativa para suportar uma pressão de 1000 Kpa. Não existe um equipamento disponível no mercado para esta aplicação.

O segundo projeto foi idealizado como um skid de gás natural com duas linhas de transmissão e foi montado com um aspersor de pó que lançavam as partículas para o sistema. Porém a quantidade de partículas era muito grande, não sendo possível a obtenção de dados como perda de carga e eficiência do meio filtrante.

O terceiro e último projeto foi montado aproveitando a estrutura do segundo projeto, porém com a ligação de um motorredutor que lançava as partículas no sistema. Nessa nova versão o alimentador de pó funcionou com boa precisão, sendo agora possível alimentar o pó continuamente e na vazão requerida. Nesse novo equipamento foram realizados ensaios para os meios filtrantes de tela metálica, de poliéster tratado e de papel celulose.

Os coeficientes de permeabilidade Darciana e não darciana (k_1 e k_2) apresentaram um aumento com o aumento da pressão do sistema, devido às variações das propriedades dos fluidos e, possivelmente, da disposição das estruturas das fibras o que facilita a passagem do gás através do meio filtrante.

O meio filtrante de celulose, quando submetido à pressão de 5 bar, apresentou a maior perda de carga, menor eficiência e menor permeabilidade.

Os meios filtrantes de poliéster e o metálico apresentaram perda de carga e eficiência bastante similares, porém o tecido mostrou uma permeabilidade um pouco menor que do metálico.

Na pressão de operação de 500 KPa, os três meios filtrantes apresentaram eficiência fracionária semelhantes para coleta de partículas maiores que 15 μm (aproximadamente 90%), porém para partículas menores que 0,5 μm , o meio filtrante de celulose, mostrou ser menos eficiente que os outros meios estudados neste projeto, devido a sua alta perda de carga e menor permeabilidade.

Para comparar a filtração submetida a várias pressões de operação, utilizou-se o meio filtrante de celulose, por ser o mais utilizado no mercado, verificou-se que quanto menor a pressão no filtro mais rápida foi a formação da torta e conseqüentemente maior foi a perda de carga. Também, com esses experimentos, foi possível observar que a eficiência fracionária diminuiu com o aumento da pressão de operação assim como a quantidade de partículas no meio filtrante.

Através desse estudo concluiu-se que apesar do filtro celulósico ter um custo relativamente mais barato para a filtração de gás natural, este apresentou um desempenho inferior aos meios filtrantes metálicos e de poliéster tratado, sendo os dois últimos os mais indicados para a filtração em alta pressão.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como prosseguimento dos estudos realizados neste trabalho ainda existem alguns aspectos importantes a serem investigados, tais como:

- Estudar diferentes meios filtrantes;
- Mudança do material pulverulento;
- Estudar determinado meio filtrante alterando a classe de pressão para a verificação do comportamento;
- Estudar a diferença de pressão em função da mudança do tempo;
- Estudar o reaproveitamento do meio filtrante após uma ou mais limpezas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, M.L. **Filtração de ar em filtros de tecido: deposição e remoção da camada de pó formada**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de São Carlos, 1995.

ALONSO, P.S.R. **O Gás Natural na Matriz Energética Brasileira: avaliação global de seus impactos, estratégias para disseminar sua utilização e criação de um suporte de tecnologias para o Brasil**. UFRJ/COPPE, 1999.

ANDRADE, M.C. **Geografia Econômica**, 11^o ed., São Paulo, Atlas, 1991.

ANP - Agência Nacional do Petróleo. **Material técnico sobre gás natural**. Home page: <<http://www.anp.gov.br>>, 2004.

BALDWIN, R.M. **Black Powder in the gas industry**, Oil & Gas Journal, Volume 105 issue 10, March 2007.

COMGÁS, **Norma L-11.06, Rev 02, 2006**.

COMGÁS. **Material técnico sobre gás natural**. Home page: <<http://www.comgas.com.br>> 2006

COSTA, F.C. **Pó Preto em gasoduto**, Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009.

COURY, J. R. **Electrostatic effects in granular bed filtration of gases**. Tese de Doutorado, Cambridge Univ., Inglaterra, 1983.

DEREK, B.P., SUTHERLAND, K. **Handbook of filter media** second edition, Elsevier, 2002.

DIAS, A. **Manual de filtração Apexfil**, São Paulo, 2003.

DICKENSON, C. **Filters and Filtration Handbook**. 3 ed. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 1994.

GÁS BRASIL. **Material técnico sobre gás natural**. Home page: <<http://www.gasbrasil.com.br>> 2006

GASENERGIA. Material técnico sobre gás natural. Home page:<<http://www.gasenergia.com.br>> 2006

GASNET. Material técnico sobre gás natural. Home page:<<http://www.gasnet.com.br>> 2006

GEMINI, Projeto. Marcio Balthazar. **Coordenador do Setor de Desenvolvimento, Negócios e Tecnologia do Gás Natural**, 2004.

INNOCENTINI, M. D.M., RODRIGUES, V. P., ROMANO, R. C.O., PILEGGI, R. G., SILVA, G. M.C., COURY, J. R. **Permeability optimization and performance evaluation of hot aerosol filters made using foam incorporated alumina suspension**, *Journal of Hazardous Materials*, 2008.

ITO, L. X. **Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases**. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2002.

MARTINS, J.C. **Estudo da deposição de material particulado no meio filtrante durante a filtração gás-sólido**. Dissertação mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2001.

MASSARANI, G., **Aspectos da Fluidodinâmica em Meios Porosos**, COPPE, Rio de Janeiro, R.J., 1989.

MOUTINHO, E. Curso, **Introdução ao Petróleo e Gás Natural**, Instituto de Eletrotécnica e Energia - PIPGE - IEE/USP, 2001.

ORR, C. **Filtration, Principles and Pratices**, New York, Ed. Marcel Dekker, 1979.

OSÓRIO, V. M., **Comportamento da Filtração de gases em meios filtrantes de celulose**, Tese de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2006.

PETROBRÁS. **Material técnico sobre gás natural.** Home page:<<http://www.petrobras.com.br>> 2006.

POUPALLION, P., **Manual do Gás Natural**, São Paulo, Ed. Caminhos, 1986.

PURCHAS, D., SUTHERLAND, K., **Handbook of filter media**, Ed. Elsevier, 2002.

RODRIGUES, B. **Projeto para transporte de CNC feito sob encomenda.** Tese de Mestrado, Universidade Paulista, 2004.

RODRIGUES, E. C. **Crise nos Transportes**, Editora Unidas, 1975.

RODRIGUES, P. R. A. **Introdução aos sistemas de transporte no Brasil.** 2. ed., São Paulo: Aduaneiras, 2001.

SILVA, J. M.; VILLELA, T.; CAVALCANTI, E.; COBUCCI, J. C.; PIMENTA, G.; FERREIRA, P. A., **Caracterização de resíduos sólidos colhidos em dutos de gás natural.** 6º COTEQ Conferencia sobre tecnologia de equipamentos, Salvador – BA, 2002.

TIENE, E. F. **Filtração de gases: Estudo do fenômeno da limpeza por blocos.** Tese de mestrado. Universidade Federal de São Carlos, 2005.

VDI 3926 Part 1. **“Testing of filter media for cleanable filters Standard test for the evaluation of cleanable filter media”** Dusseldorf, Germany, 2003

WALKERMAN, R., TARLETON, E. **Filtration**, Ed. Elsevier, 1999.

APÊNDICE A

A.1 – Memorial de cálculo das espessuras da bancada

O projeto da bancada foi baseado na norma americana ASME VIII div. 1 2007. Como o equipamento é pressurizado, foi utilizado a norma para cálculo de vasos de pressão, e todos os ensaios previstos para um equipamento pressurizado. Após o término da montagem foi realizado um teste hidrostático e um ensaio pneumático para a integridade das juntas de vedação e seguem os resultados das espessuras de parede encontrados.

A.2 - Dados de Entrada

Tipo de equipamento.....	Bancada horizontal
Material do costado	SA-312 TP TP304
Material do tampo esquerdo	SA-240 TP 304
Material do tampo direito	SA-240 TP 304
Tampo esquerdo	Tampo plano ASME
Tampo direito	Tampo plano ASME
Diâmetro interno.....	102,00 mm
Comprimento do costado.....	204,00 mm
Pressão interna.....	15,000 kgf/cm ²
Pressão externa	0,0000 kgf/cm ²
Vácuo.....	0,0000 kgf/cm ²
Temperatura de projeto.....	80,000 °C
Densidade do produto.....	0,89800 kg/m ³

A.3 - Cálculo do Costado

Material.....	SA-312 TP TP304
Pressão interna de projeto (P_D).....	15,000 kgf/cm ²
Temperatura interna de projeto (T_D)	80,000 °C
Diâmetro interno (D)	102,00 mm
Sobreespessura interna de corrosão (t_{ic})	0,0000 mm
Sobreespessura de corrosão externa (t_{ec})	0,0000 mm
Eficiência da junta do costado	sem costura
Junta costado x tampo esquerdo	Categoria C - Sem Rad. UW-11(c) Tipo 7

Junta Costado x Tampo Direito	Categoria C - Sem Rad. UW-11(c) Tipo 7
Eficiência da junta longitudinal (E_l)	0,70000
Eficiência da junta cirunferencial (E_c).....	1,0000
Densidade do produto (ρ)	0,89800 kg/m ³
Densidade do produto de teste (ρ_T)	1000,0 kg/m ³

A.4 - Cálculo da coluna de líquido

Altura da coluna de líquido (H_S)	102,00 mm
Coluna de líquido de operação (P_S).....	9,1596E-6 kgf/cm ²
Altura do líquido para teste hidrostático de fábrica (H_{th})	102,00 mm
Coluna de líquido para teste hidrostático de fábrica (P_{th}).....	0,01020 kgf/cm ²
Altura do líquido para teste hidrostático de campo (H_{tv})	102,00 mm
Coluna de líquido para teste hidrostático de campo (P_{tv}).....	0,01020 kgf/cm ²

A.5 - Cálculo da pressão interna

Raio interno da seção do costado corroída (R).....	51,000 mm
Pressão interna de projeto ($P = P_D + P_S$).....	15,000 kgf/cm ²
Espessura mínima sob pressão interna (t_D).....	1,5000 mm
Tensão circunferencial governa para pressão interna G-27(c)(1), como segue a equação A.1:	

$$t_D = \frac{P R}{S E - 0,6 P} \quad (A.1)$$

onde:

E : eficiência da junta longitudinal

P : pressão interna de projeto, em kgf/cm²

R : raio interno da seção do costado corroída, em mm

S : tensão de projeto, em kgf/cm²

t_D : espessura mínima, em mm

$$t_D = \frac{15 \times 51}{1230,4 \times 0,7 - 0,6 \times 15}$$

$$t_D = 0,89761 \text{ mm}$$

Espessura para tensão longitudinal é dada por UG-27(c)(2), como segue a equação

A.2:

$$t_D = \frac{P R}{2 S E + 0,4 P} \quad (\text{A.2})$$

onde:

E : eficiência da junta circunferencial

P : pressão interna de projeto, em kgf/cm^2

R : raio interno da seção do costado corroída, em mm

S : tensão de projeto, em kgf/cm^2

t_D : espessura mínima, em mm

$$t_D = \frac{15 \times 51}{2 \times 1230,4 \times 1 + 0,4 \times 15}$$

$$t_D = 0,31013 \text{ mm}$$

Por UG-16(b) a espessura mínima não pode ser menor do que 1,5000 mm. A espessura mínima será ajustada para: $t = 1,5000 \text{ mm}$

A.6 - Tensão de Compressão Admissível por UG-23(b)

Tabela A.1: Resumo dos resultados para o cálculo do equipamento pressurizado

Condição	R _o mm	t mm	Fator A	Fator B kgf/cm ²	S kgf/cm ²	S _c kgf/cm ²
Temperatura de Projeto/Corroído	57,000	5,2500	0,011513	925,44	1230,4	925,44
Temperatura de Projeto/Novo	57,000	5,2500	0,011513	925,44	1230,4	925,44
Temperatura de Teste/Corroído	57,000	5,2500	0,011513	993,45	1406,1	993,45
Temperatura de Teste/Novo	57,000	5,2500	0,011513	993,45	1406,1	993,45

- a) R_o = raio externo
- b) t = espessura
- c) $A = 0,125/(R_o/t)$ - UG-23(b) Step 1
- d) S = tensão máxima admissível de tração - UG-23(a)
- e) S_c = menor entre S e B

A.7 - Cálculo da espessura nominal mínima

Espessura mínima (t)1,5000 mm
 Sobreespessura de corrosão : interna + externa (t_{cc}).....0,0000 mm
 Mínima espessura incluindo a sobreespessura de corrosão (t_{min}).....1,5000 mm
 Tolerância para menos: 12,5% para tubos (t_{tol})0,21429 mm
 Espessura mínima do tubo mais corrosão (t_c = t_{min}/0.875).....1,7143 mm
 Espessura nominal (t_n)6,0000 mm
 Como t_n e t_c, a espessura nominal é adequada.

A.8- Cálculo da PMTA (Pressão máxima de trabalho admissível)

Máxima tensão admissível na temperatura de projeto (S).....	1230,4 kgf/cm ²
Espessura corroída da seção do costado (t)	5,2500 mm
Raio interno da seção do costado corroída (R).....	51,000 mm
Pressão máxima de trabalho admissível (MAWP).....	83,502 kgf/cm ²

Tensão circunferencial governa para pressão interna. A PMTA para pressão interna, na temperatura de projeto (80,000 °C), é (ver UG-27(c)(1)) conforme mostra A.3:

$$MAWP = \frac{S E t}{R + 0,6 t} \quad (A.3)$$

onde:

E : eficiência da junta longitudinal

MAWP : Pressão máxima de trabalho admissível, em kgf/cm²

R : raio interno da seção do costado corroída, em mm

S : Máxima tensão admissível na temperatura de projeto, em kgf/cm²

t : espessura após corrosão, em mm

$$MAWP = \frac{1230,4 \times 0,7 \times 5,25}{51 + 0,6 \times 5,25}$$

$$MAWP = 83,502 \text{kgf/cm}^2$$

A tolerância de fabricação para menos dos tubos de 12,5% foi descontada da espessura.

A.9 - Cálculo dos Tamos

Tampo.....	Tampo Plano ASME
Material.....	SA-240 TP 304
Espessura nominal (t _n).....	9,5250 mm

Pressão interna (P_D)	15,000 kgf/cm ²
Temperatura interna (T_i)	80,000 °C
Temperatura de projeto (T_D)	80,000 °C
Tensão admissível na temperatura de projeto (S)	1230,4 kgf/cm ²
Tensão admissível na temperatura de teste (S_T)	1406,1 kgf/cm ²
Corrosão interna (t_{ic})	0,0000 mm
Corrosão externa (t_{ec})	0,0000 mm
Esmagamento	0,0000 mm

A.10 - Seção Plana

Altura da coluna de líquido (H_S)	102,00 mm
Coluna de líquido de operação (P_S)	9,1596E-6 kgf/cm ²
Altura do líquido para teste hidrostático de fábrica (H_{th})	102,00 mm
Coluna de líquido para teste hidrostático de fábrica (P_{th})	0,01020 kgf/cm ²
Altura do líquido para teste hidrostático de campo (H_{tv})	102,00 mm
Coluna de líquido para teste hidrostático de campo (P_{tv})	0,01020 kgf/cm ²

A.11 - Cálculo da Pressão Interna

Sketch	UG-34 (h)
Fator de acoplamento pela UG-34 : C	0,33000
Diâmetro interno corroído (D_i)	102,00 mm
Pressão interna de projeto ($P_D = P + P_S$)	15,000 kgf/cm ²
Tensão admissível (S)	1230,4 kgf/cm ²
Fator de acoplamento (C)	0,33000
Eficiência de junta (E)	1,0000
Espessura mínima (t)	6,4697 mm

A espessura mínima sob pressão interna é dada por UG-34(c)(2) conforme A.4:

$$t = D_i \sqrt{\frac{C P}{S E}}$$

(A.4)

onde:

C : fator C (UG-34)

D_i : diâmetro interno corroído, em mm

E : eficiência de junta

P : pressão interna de projeto, em kgf/cm^2

S : tensão admissível, em kgf/cm^2

t : espessura mínima, em mm

$$t = 102 \times \sqrt{\frac{0,33 \times 15}{1230,4 \times 1}}$$

$$t = 6,4697\text{mm}$$

A.12 - Cálculo da espessura nominal mínima

Espessura mínima (t)6,4697 mm

Espessura mínima mais esmagamento e corrosão (t_c).....6,4697 mm

Espessura nominal (t_n).....9,5250 mm

Como t_n e t_c , a espessura nominal é adequada.

A.13 - Cálculo da PMTA

Sketch UG-34 (h)

Fator de acoplamento pela UG-34 : C 0,33000

Diâmetro interno corroído (D_c) 102,00 mm

Espessura após corrosão (t_c)9,5250 mm

Máxima tensão admissível (S)..... 1230,4 kgf/cm^2

Eficiência de junta (E) 1,0000

Pressão máxima de trabalho admissível (MAWP)..... 32,513 kgf/cm^2

PMTA é dada por UG-34(c)(2), conforme A.5:

$$\text{MAWP} = \frac{S E t_c^2}{C D_c^2}$$

(A.5)

onde:

C : fator C (UG-34)

D_c : diâmetro interno corroído, em mm

E : eficiência de junta

MAWP : Pressão máxima de trabalho admissível, em kgf/cm^2

S : máxima tensão admissível, em kgf/cm^2

t_c : espessura após corrosão, em mm

$$\text{MAWP} = \frac{1230,4 \times 1 \times 9,525^2}{0,33 \times 102^2}$$

$$\text{MAWP} = 32,513 \text{kgf/cm}^2$$

A.14 - Teste hidrostático horizontal baseados na PMTA por UG-99(b)

PMTA para o vaso	32,513 kgf/cm^2
Pressão hidrostática de teste a 21,000 °C	48,304 kgf/cm^2
Fator UG-99 da pressão	1,3000
Relação entre as tensões - UG-99	1,1429

A.15 – Cálculo do costado seção cilíndrica 1

Espessura com sobreespesura de corrosão incluída (t)	5,2500 mm
Raio interno (R)	51,000 mm
Pressão de teste com coluna de líquido (P)	48,315 kgf/cm^2
Tensão em condições de teste (S)	711,90 kgf/cm^2

Tensão circunferencial governa para pressão interna. A tensão em condições de teste é dada por UG-27(c)(1), conforme mostra A.6:

$$S = \frac{P(R + 0,6t)}{Et}$$

(A.6)

onde:

E : eficiência da junta longitudinal

P : pressão de teste com coluna de líquido, em kgf/cm^2

R : raio interno, em mm

S : stress, em kgf/cm^2

t : espessura com sobreespessura de corrosão incluída, em mm

$$S = \frac{48,315 \times (51 + 0,6 \times 5,25)}{0,7 \times 5,25}$$

$$S = 711,9 \text{kgf/cm}^2$$

A.16 - Cálculo da tensão nos tampos

Diâmetro Interno :d102,00 mm

Espessura com Sobreespessura de Corrosão Incluída :t.....9,5250 mm

Eficiência de Junta : E 1,0000

Fator de Acoplamento : C.....0,33000

Pressão de teste com coluna de líquido :P 48,315 kgf/cm^2

Tensão em condições de teste :S 1828,4 kgf/cm^2

A tensão máxima sobre pressão de teste é dada por UG-34(c)(2), conforme mostra

A.7:

$$S = \frac{C P d^2}{E t^2} \quad (\text{A.7})$$

onde:

C : fator C (UG-34)

d : diâmetro interno, em mm

E : eficiência de junta

P : pressão de teste com coluna de líquido, em kgf/cm^2

S : tensão em condições de teste, em kgf/cm^2

t : espessura com sobreespessura de corrosão incluída, em mm

$$S = \frac{0,33 \times 48,315 \times 102^2}{1 \times 9,525^2}$$

$$S = 1828,4 \text{ kgf/cm}^2$$

A.17 - Sumário do Cálculo do Vaso

Temperatura de projeto.....	80,000 °C
Pressão Interna de projeto.....	15,000 kgf/cm ²
Pressão Máxima de trabalho admissível (PMTA) por UG-98(a)	32,513 kgf/cm ²
Pressão Máxima externa admissível(PMEA)	1,01972E25 kgf/cm ²
Pressão Máxima admissível (PMA) por Apêndice 3-2	0,0000 kgf/cm ²

A.18 - Resumo da Pressão

PMTA : Pressão máxima de trabalho admissível no topo do vaso (UG-98(a)).

Se o cálculo da PMTA é parte do relatório de cálculo do projeto do vaso pela Norma, então o teste hidrostático (ou pneumático) deve ser baseado no valor da PMTA e a PMTA calculada deve ser fornecida na placa de identificação e no relatório de dados. Pressão máxima de trabalho admissível para o vaso (UG-98(a)): 32,513 bar.

ANEXO AN

AN.1 Equação de Estado do Gás

O comportamento das variáveis pressão, temperatura e volume dos gases reais é bastante difícil de descrever e para modelá-lo utiliza-se a Lei do Gás Perfeito ou Ideal. A partir de observações experimentais foi estabelecido que o comportamento das variáveis pressão, temperatura e volume dos gases à baixa densidade pode ser representado com bastante precisão pela equação de estado, chamada “Equação de Estado dos Gases Ideais”, conforme a equação (AN.1):

$$P.V = n.R.T \quad (AN.1)$$

Sendo:

P = Pressão [Pa = N/m²];

V = Volume [m³];

n = N.º de Moles;

R (Constante Universal dos Gases Ideais) = 8,3144 N m / (mol K);

T = Temperatura Absoluta [K].

O peso molecular do Metano (CH₄) é 16,04, o que significa dizer que cada mol de CH₄ pesa 16,04 gramas. Assim, conhecida a massa de gás, pode-se calcular o número de moles.

Em densidades muito baixas, todos os gases e vapores reagem de maneira bastante próxima a relação P-V-T da equação de estado dos gases ideais. Como a densidade é uma função da pressão e da temperatura, verifica-se que em pressões muito baixas e temperaturas superiores tal comportamento se verifica. Em pressões maiores, o comportamento dos gases pode desviar-se substancialmente da equação de estado dos gases ideais. Para corrigir este desvio introduz-se, então, um fator de correção variável chamado de fator de compressibilidade (z), e a equação de estado dos gases reais, é representada pela equação (AN.2):

$$P.V = z.n.R.T \quad (AN.2)$$

Tal fator pode ser uma função gráfica ou matemática de temperatura, pressão e composição do gás. Para um gás perfeito, $z = 1$; para o gás natural pode-se considerar o fator de compressibilidade do metano dado no seu diagrama de compressibilidade.

AN.2 Expansão do Gás

A expansão do gás natural tem algumas aplicações importantes como a liquefação do gás em pequenas proporções e a realização de trabalho recuperando energia do gás natural liquefeito quando da sua vaporização.

Assim como ocorre na compressão, a expansão de um gás se aproxima de uma expansão adiabática e obedece à equação teórica, conforme mostra a equação (AN.3):

$$W_1^2 = \int_{P_1}^{P_2} V_{dp} \quad (AN.3)$$

Sendo:

W é o trabalho requerido para comprimir o gás do estado 1 ao 2;

V é o volume;

p_1 e p_2 são as pressões inicial e final.

Os processos termodinâmicos são semelhantes, com a única diferença de que a expansão libera energia enquanto a compressão consome energia. Assim, se a expansão é feita através de uma turbina (turbo-expansor), pode-se realizar trabalho útil vencendo uma resistência (carga) sobre seu eixo. Neste processo de expansão adiabática as variáveis de estado (P-V-T) comportam-se de tal forma que a temperatura final é significativamente menor que a inicial, permitindo sua aplicação em processo de liquefação. Pode-se verificar o fator de compressibilidade do metano na *Figura AN.1*.

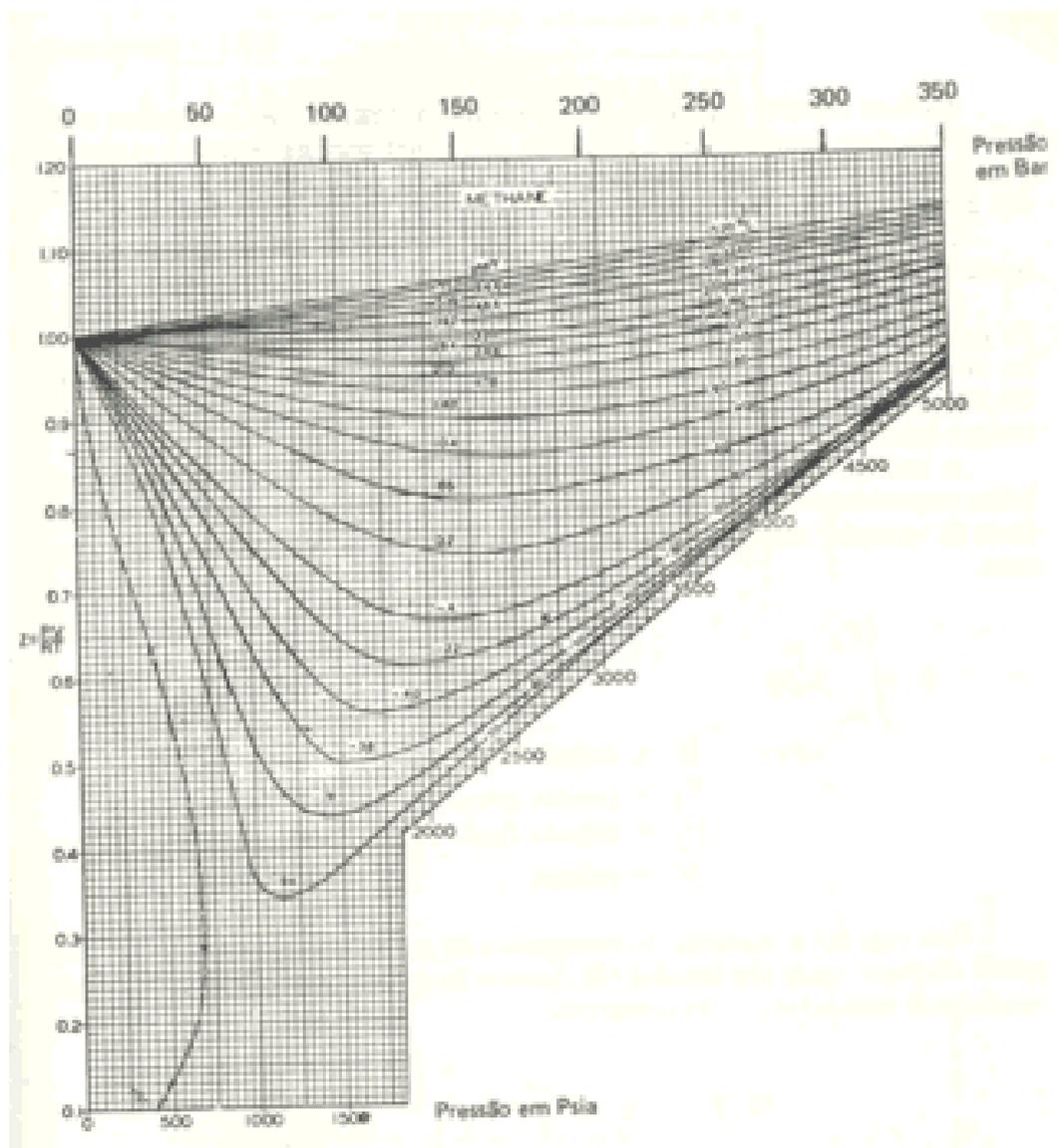


Figura AN.1: Fator de compressibilidade do metano (COMGÁS, 2006)

AN.3 Compressão do Gás

A compressão do gás natural tem papel importante em toda sua cadeia, desde a produção até o consumo, seja para desenvolver as atividades de transporte, armazenagem ou alimentação de equipamentos.

Conhecido o comportamento das variáveis de pressão, temperatura e volume para o gás natural pode-se calcular a potência teoricamente necessária para comprimí-lo através de expressões analíticas que consideram o desvio dos gases reais da Lei de Estado dos Gases

Ideais. Quando está disponível, pode-se obter este valor diretamente no Diagrama de Mollier para gases reais.

Quando um gás real é comprimido em um único estágio, a compressão se aproxima de um processo adiabático, ou seja, praticamente sem troca de calor entre o gás comprimido e o ambiente.

Os cálculos teóricos de uma compressão adiabática resultam no máximo trabalho teórico necessário para comprimir o gás entre dois níveis de pressão. Por outro lado, os cálculos teóricos de uma compressão isotérmica, ou seja, na qual a temperatura do gás comprimido não altera com a elevação de pressão, determinam o valor do mínimo trabalho necessário para se efetuar a compressão.

Portanto, estes dois resultados indicam os limites inferiores e superiores da potência necessária para a compressão do gás. A dedução das expressões analíticas para o cálculo do trabalho necessário para a compressão de um gás parte sempre da Equação B.4, considerando-se inexistentes as variações na energia cinética, potencial e perdas.

Para calcular de forma prática a potência necessária à compressão do gás natural pode-se utilizar a Equação (AN.4).

$$W_1^2 = 0,0281 \cdot \frac{Q \cdot z}{\eta} \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - h \right] \quad (\text{AN.4})$$

Sendo:

W é a potência de compressão [kW];

Q é a vazão [Nm³/h];

z é o fator de compressibilidade;

h é a eficiência do compressor;

k é a razão entre os calores específicos do gás (C_p/C_v). Para o gás natural é 1,31;

P₁ e P₂ são as pressões de entrada e saída;

AN.4 Variação de Temperatura do Gás

O fenômeno de variação de temperatura que ocorre com um gás quando da sua compressão ou expansão, pode ser facilmente calculada através da Equação (AN.5):

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (\text{AN.5})$$

Sendo:

T_2 e T_1 são as temperaturas de saída e entrada [K];

P_2 e P_1 são as pressões de saída e entrada;

k é a razão entre os calores específicos do gás (C_p/C_v). Para o gás natural é 1,31, C_p é o calor específico a pressão constante e C_v é o calor específico a volume constante;

AN.5 Liquefação do Gás

A liquefação consiste em processos termodinâmicos que promovem a mudança de estado de gas para o líquido. Devido às características de alguns gases, o metano entre eles, será mudança para o estado líquido não ocorre com a elevação da pressão, é necessário a adoção de resfriamento. Para tais gases, chamados criogênicos, a temperatura acima da qual não existe uma mudança distinta das fases líquidas e vapor, a temperatura crítica, se encontra abaixo da temperatura ambiente.

O Gás Natural Liquefeito (GNL) é uma mistura em fase líquida, de vários constituintes. Seu comportamento, na presença dos vapores destes componentes obedece às leis da termodinâmica do equilíbrio de fases das misturas. Na prática, são usadas, as curvas e tabelas do componente de maior proporção, o metano. Para representar comportamento termodinâmico são usados os diagramas de entropia (temperatura/entropia), de entalpia (entalpia/pressão) e de Mollier (entalpia/entropia) do metano com excelente aproximação, para GNL de alto teor de metano, no cálculo das mudanças de fase Gás-GNL.

A liquefação do gás natural permite estocá-lo e transportá-lo sob forma condensada em condições técnico-econômicas viáveis. Como pesa menos de 500 Kg/m^3 , não necessita de uma estrutura mais forte do que se fosse para água. Se o gás fosse comprimido, a estrutura necessitaria de mais aço.

AN.6 Composição e Características Físicas do GNL

A composição do gás natural liquefeito, igualmente à do gás natural comercial depende fundamentalmente do seu reservatório de origem. Antes da liquefação é necessário submeter o gás natural bruto a tratamentos que dependem das características originais do gás e normalmente consistem dos seguintes processos:

- Desidratação total para evitar o risco de formação de hidratos ou a formação de gelo;
- Dessulfurização, para evitar riscos de corrosão dos equipamentos;
- Descarbonatação e eliminação dos C5+, para evitar a formação de partículas abrasivas;
- Separação eventual do mercúrio cuja condensação pode provocar estragos nas canalizações de alumínio;
- Retirada de hélio.

Dentre as características relevantes do Gás Natural Liquefeito, pode-se ressaltar:

- Incolor;
- Temperatura do líquido à pressão atmosférica é entre (-165) °C e (-155) °C, dependendo da composição;
- Pressão operacional da planta entre poucos mbar até 75 bar;
- Densidade relativa entre 0,43 a 0,48, conforme a composição;
- Calor de vaporização latente de 120 Kcal/Kg;
- Elevada taxa de expansão. A vaporização de 1 m³ de GNL produz entre 560 e 600 Nm³ de gás.