



FUNDAMENTOS DA PNEUMÁTICA I

Introdução

Muito já foi escrito a respeito do ar comprimido, de sua existência desde a civilização grega até os dias atuais em que foi definida como Pneumática, portanto não é o intuito deste trabalho repeti-lo. Por estar fundamentada em conceitos da Física, da Química e da Matemática podemos sintetizar a Pneumática como a ciência que estuda a utilização do ar atmosférico como fonte de energia, cabendo aos equipamentos pneumáticos e outros artefatos a transformação desta energia em trabalho. A Pneumática abrange também o estudo sistemático da utilização do ar comprimido na tecnologia de acionamentos, comando e controle de sistemas automáticos. Este trabalho não pretende acrescentar nada ao que já existe em outras obras do gênero assim como não tem o intuito de esgotar o assunto. Mas tem a finalidade de lembrar àqueles que não **estudarem com a devida seriedade esta matéria com certeza jamais terão o domínio desta tecnologia.**

1.0 - Fundamentos Físicos da Pneumática

O que veremos a seguir visa principalmente entender e fixar os principais conceitos que definem e explicam os fenômenos inerentes à Pneumática e ao ar comprimido propriamente dito

1.1 - Unidades Básicas

Grandeza	Símbolo	Sistema Internacional S.I.	Sistema Técnico
Comprimento	l	Metro (m)	Metro (m)
Massa	m	Quilograma (kg)	kp • s ² / m
Tempo	t	Segundo (s)	Segundo (s)
Temperatura	T	Kelvin (K)	grau Celsius (°C)
Intensidade da corrente	I	Ampère (A)	Ampère (A)
Intensidade luminosa	<i>l</i>	Candela (cd)	--
Quantidade de substância	n	Mol (mol)	--

1.2 - Unidades Derivadas

Grandeza	Símbolo	Sistema Internacional S.I.	Sistema Técnico
Força	F	Newton (N) 1N=1kg • m/s ²	Kilopond (kp) Kilogr. Força (kgf)
Área	A	Metro quadrado (m ²)	Metro quadrado (m ²)
Volume	V	Metro cúbico (m ³)	Metro cúbico (m ³)
Vazão	Q	m ³ / s	m ³ / s
Pressão	<i>p</i>	Pascal (Pa) 1 Pa = 1 N/ m ² 1 bar = 100 kPa	Atmosfera (atm) kp/cm ² kgf/cm ²

1.3 - Indicação e Medição de Pressão

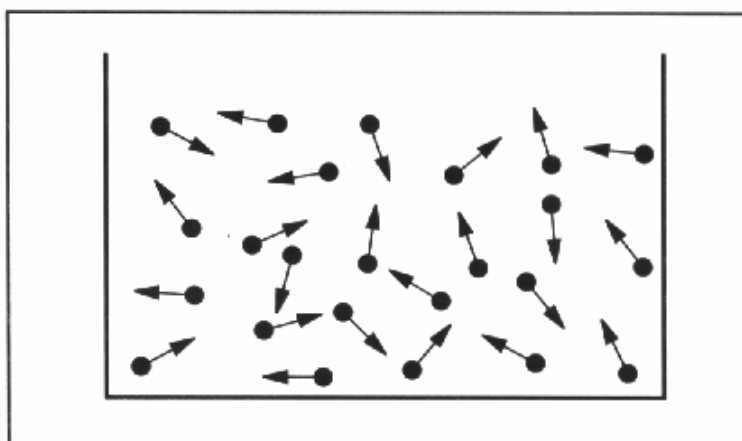
O ar atmosférico, (não poluído) embora insípido, inodoro e incolor tem sua presença perfeitamente perceptível através dos ventos que balançam as árvores e dos pássaros e aviões que nele se sustentam para voar.

Isto prova que o ar tem corpo (massa) e ocupa um lugar no espaço.

As propriedades físicas do ar foram definidas há séculos por vários cientistas que nos deixaram um legado precioso mas, devido a matéria ser muito complexa, até hoje permanece desconhecida por muitos. A seguir veremos em detalhes suas características físicas.

1.3.1 – Características físicas do ar

O ar é um gás composto por 78% do seu volume de Nitrogênio (Azoto) e 21% do volume de Oxigênio perfazendo um volume total de 99%. O restante 1% se compõe de dióxido de carbono e da presença de vários gases nobres como Argônio, Xenônio, Hélio, Neônio, Hidrogênio e também de vapor de água (umidade). Como conceito básico, quando tratarmos com este elemento, devemos ter sempre em mente o seu comportamento. Em estado de repouso devemos imaginar partículas em suspensão se chocando uma nas outras em um movimento constante, as forças de atração e repulsão, nos gases estão praticamente em equilíbrio, e assim tendem a permanecer se nenhum outro fenômeno não influir. A quantidade estimada de partículas em cada m³ de ar depende da altitude de onde é feita a amostragem, isto é, depende da pressão atmosférica, as pesquisas de Avogadro e Cannizzaro nos dão subsídios mas completos. A tabela abaixo, simplificada, nos dá uma estimativa.



1.3.2 - Comportamento das partículas de ar

pressão mbar	10^{-15}	10^{-9}	10^{-3}	1	10^3
número por cm ³	~10	~ 10^7	~ 10^{13}	~ 10^{16}	~ 10^{19}

1.3.3 - Densidade das partículas em função da pressão

Portanto podemos concluir neste conceito que quanto maior for a altitude da medição menor será a densidade do ar e conseqüente pressão. Por exemplo: ao subir uma montanha temos dificuldade em respirar não porque falta ar mas sim falta pressão para *empurrar* o ar para dentro de nossos pulmões, que precisam fazer mais esforço para *aspirar* o ar. Os povos que habitam Países em grandes altitudes não sofrem estes efeitos. As cabinas de aviões que voam a grandes altitudes são pressurizadas pelo mesmo motivo.

A tabela abaixo nos dá uma estimativa.

Altitude (m)	Pressão (mbar)
0	1 013
500	955
1 000	899
2 000	795
5 000	540
8 000	356

1.3.4 - Tabela da pressão atmosférica em relação à altitude.

1.4 - Propriedades físicas do ar

Até agora descrevemos o ar em seu estado natural, isto é, à **pressão atmosférica**, mas nosso objetivo principal é o ar comprimido.

Como todos os gases o ar é elástico, e por ser *comprimível* ele pode assumir qualquer formato e está presente em todo lugar preenchendo todos os espaços acessíveis. Podemos alterar sua forma e seu **volume** através de **forças** adicionais ou alterando sua **temperatura** mas uma vez que estas forças ou fenômenos deixam de atuar, o ar voltará ao seu estado **normal** e ao **volume** inicial.

Resumindo, o ar, em seu estado normal, ao nível do mar (referência) e a temperatura de **0°C** (273 Kelvin) registra uma pressão de 1 atmosfera ou **1,013 bar** (760mm de Hg experiência de Torricelli).

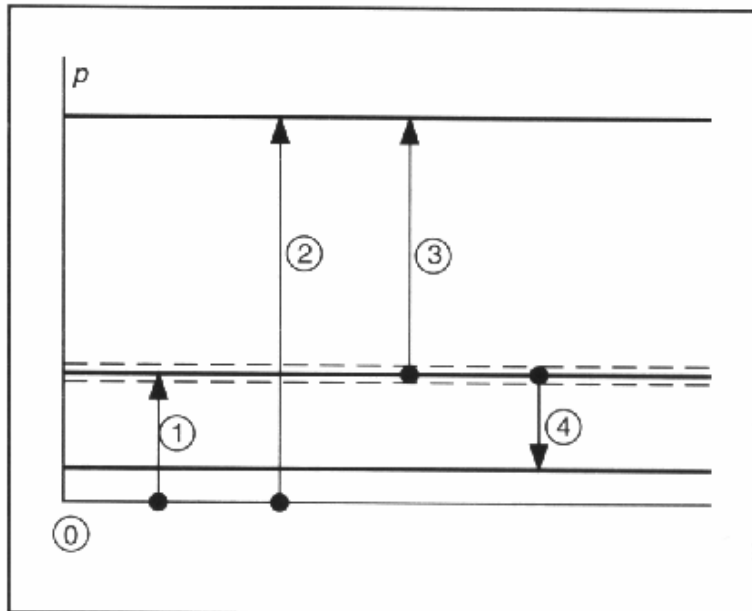
Sempre que for necessário calcular as mudanças de estado do ar comprimido ou o consumo nas instalações de sistemas pneumáticos, no sistema físico, deve-se utilizar estas unidades.

No **Sistema Internacional** (S.I.) ficou convencionado que o estado normal a temperatura seria de **20°C** (293°K) e a pressão de **100Kpa** (1bar).

Portanto 1 Nm³ de ar comprimido é um metro cúbico de ar a uma pressão de 100Kpa e a 20°C (293 K).

Qualquer valor de pressão acima da pressão atmosférica será chamada de sobrepressão, **pressão relativa** ou **manométrica**, isto é, a pressão indicada no manômetro é pressão relativa. Para valores abaixo desta chamamos de pressão negativa ou **depressão**, a ausência parcial ou total da pressão atmosférica também é chamada de **vácuo**.

A gráfico abaixo esclarece melhor este conceito. A soma da pressão atmosférica e da pressão manométrica é chamada de **pressão absoluta** que deverá ser utilizada nos cálculos de vazão e consumo de ar comprimido.



Definição de pressão
 0 Ausência de pressão (vácuo absoluto)
 1 Pressão Atmosférica
 2 Pressão Absoluta p_a
 3 Pressão Relativa positiva $+p_e$
 4 Pressão Relativa negativa $-p_e$ ou depressão (vácuo relativo)

O ponto (linha tracejada) que define a pressão relativa é variável pois depende da altitude de referência em relação ao nível do mar.

1.4.1 - Gráfico simplificado da pressão atmosférica, relativa e absoluta

As unidades de medida de pressão utilizadas atualmente na maioria dos Países são as do S.I. Mas é comum ainda encontrarmos unidades antigas e mesmo as de origem anglo/americana como o psi, gl/m etc.. Abaixo temos uma tabela de conversão simplificada das unidades de pressão.

Pa N/m ²	bar	lbf/sq. in. psi	Torr mm Hg
1	10^{-5}	$1,45 \cdot 10^{-4}$	$75 \cdot 10^{-4}$
$9,81 \cdot 10^4$	0,981	14,22	736
$1,013 \cdot 10^5$	1,013	14,68	760
10^5	1	14,5	750
133	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$1,92 \cdot 10^{-2}$	1
9,81	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$7,36 \cdot 10^{-2}$
$69 \cdot 10^3$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	1	51,72

1.4.2 - Tabela de conversão de algumas unidades de pressão

1.4.3 - Valores característicos para o ar

Constante do gás R:	287 (J/Kg * K)
Temperatura crítica t_k :	-140,7 (°C)
Pressão crítica p_k :	37,7 (bar)
Densidade (0°C, 1,013 bar):	1,29 (Kg/m ³)
Densidade (15°C, 1,013 bar):	1,21 (Kg/m ³)
Ponto de ebulição (1 bar):	-193 (°C)
Ponto de congelamento (1 bar):	-216 (°C)
Peso molecular:	28,96 (Kg/Kmol)
Volume molar $p/1$ mol de gás:	22,4 l (1bar – 27°C)

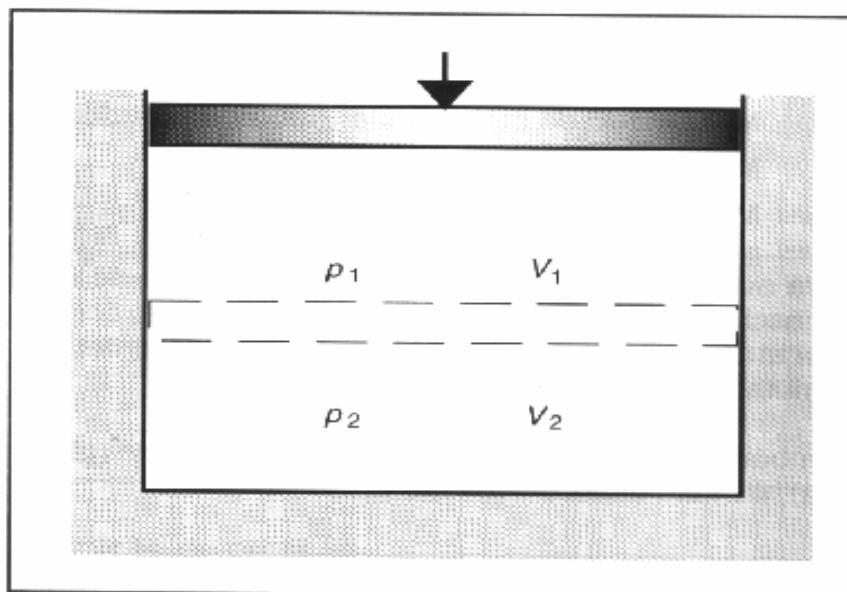
1.5 - Mudança de estado dos gases

O ar tem um comportamento similar ao de gases perfeitos, portanto é possível utilizar a “lei dos gases” sem muitos problemas pois as diferenças são pequenas. Estas leis levam em conta as variáveis envolvidas na mudança de estado, sendo elas o **volume** do ar, a **pressão**, a **temperatura** e o peso molecular ou **volume molar** (mol).

1.5.1 - Transformação isotérmica

A lei de Boyle (Robert Boyle-1627-1691) propõe: a uma **temperatura constante**, a pressão de uma determinada massa de gás é inversamente proporcional ao seu volume, isto é, se a pressão aumenta o volume diminui, se o volume aumenta a pressão diminui. Então teremos uma pressão inicial p_1 multiplicado pelo volume inicial V_1 igual a uma pressão final p_2 multiplicado pelo volume final V_2 ou seja:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$



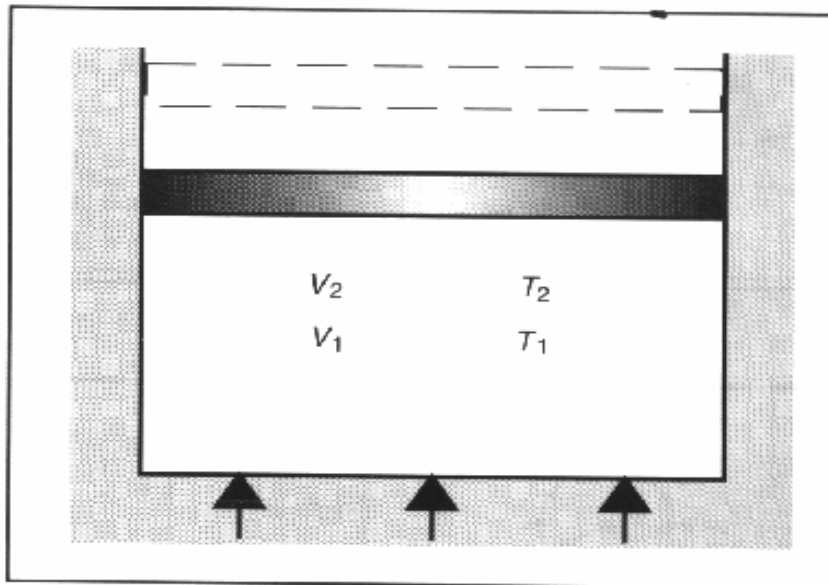
Exemplo: se um volume de 1 Nm^3 de ar for reduzido a um volume de $0,5\text{m}^3$ teremos uma pressão p_2 , a uma **temperatura constante**, igual a:

$$p_2 = \frac{101.325 \text{ Pa} * 1 \text{ m}^3}{0,5 \text{ m}^3} = 202.650 \text{ Pa} \Rightarrow 202,65 \text{ KPa} (2 \text{ bar}).$$

1.5.2 - Transformação **isobárica**

A lei de Charles (J. A. C. Charles –1746~1823) propõe: a uma **pressão constante**, o volume de uma determinada massa de gás aumenta (se expande) em $1/273$ a cada grau $^{\circ}\text{C}$ (A . Celsius 1701~1744) de aumento da temperatura. Esta definição foi ratificada pela lei de Gay-Lussac (J.L. Gay-Lussac-1778~1850) que define que a relação $V/T = \text{constante}$. Assim um volume inicial V_1 dividido pelo volume final V_2 é igual a uma temperatura inicial T_1 dividido pela temperatura final T_2 . Portanto teremos:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



Exemplo: Um volume $V_1 = 100\text{m}^3$ a uma temperatura $T_1 = 0^{\circ}\text{C}$, sofre uma alteração para $T_2 = 20^{\circ}\text{C}$, qual será o volume final V_2 ?

Lembrando que teremos que usar a escala Kelvin para temperatura absoluta temos:

$$V_2 = V_1 \cdot T_2 \div T_1 = 100 \text{ m}^3 \cdot 293 \text{ K} \div 273 \text{ K} = 107,326 \text{ m}^3$$

1.5.3 - Transformação **isocórica ou isométrica**

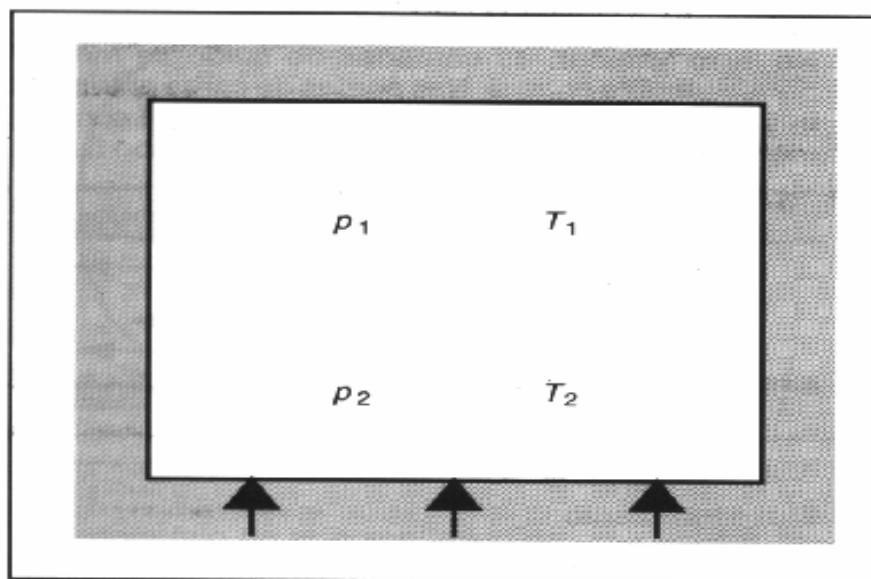
Sempre de acordo com a lei de Gay-Lussac define-se que a um **volume constante** a pressão é diretamente proporcional à temperatura, isto é, se a temperatura aumenta a pressão também aumenta e vice-versa.

Deduzimos então que em um recipiente indeformável e de volume fixo a pressão aumenta em **1/273** a cada grau de aumento da temperatura.

Lembramos que **1°C = 1°K e 0°C = 273°K**. Portanto temos uma pressão inicial p_1 dividido pela pressão final p_2 igual a temperatura inicial T_1 dividido pela temperatura final T_2 .

Desta forma as fórmulas são as seguintes:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$$



Exemplo: em um reservatório estão armazenados 10m³ de ar comprimido a uma temperatura ambiente de 20°C e a uma **pressão relativa** de 600Kpa (6 bar). No período da tarde, com o Sol incidindo diretamente no reservatório a temperatura aumenta, o termômetro indica uma temperatura de 45°C. De quanto será o aumento (**acrécimo**) de pressão?

Pela fórmula teremos:

$$p_2 = p_1 \cdot T_2 \div T_1 \rightarrow p_2 = 700\text{kPa} \cdot 318\text{K} \div 293\text{K} = 759,7 \text{ kPa absoluta};$$

759,7 kPa - 100kPa = 659.7 kPa de pressão relativa; subtraindo a pressão relativa inicial de 600kPa, teremos um acréscimo de pressão de 59,7 kPa (0,597 bar) com 25°C de aumento de temperatura.

1.5.4 - Equação geral dos gases

A equação $pV/T = K$ (constante). Por convenção, a constante K para os gases é designada com a letra **R** quando se trata de **1 mol de gás**, que equívale a um volume de 22,4 litros nas condições normais de pressão e temperatura, (equação de Clapeyron).

Assim temos: $pV = nRT$ onde n define a quantidade de mol.

É importante ressaltar novamente que ao calcular o consumo de ar comprimido das instalações pneumáticas assim como as mudanças de estado de pressão e temperatura devemos sempre utilizar as grandezas e **unidades absolutas do S.I.**

1.5.5 - Transformação **adiabática ou isoentrópica**

As leis anteriormente apresentadas estão baseadas em transformações lentas onde apenas duas grandezas são consideradas, na prática não é isto que acontece. Quando o ar é comprimido pelo compressor ou o fluxo de ar comprimido entra nas câmaras dos cilindros pneumáticos as transformações são rápidas, por isto a transformação é adiabática onde o aumento de temperatura é maior e na qual nenhuma energia sob forma de calor é trocada com o meio exterior. Felizmente as diferenças não são dramáticas a ponto de preocupar pois o ar já estará frio quando da utilização.

1.6 - Volume e vazão

Sempre que estas grandezas forem usadas devemos especificá-las sempre nas condições normais de pressão e temperatura. O volume será sempre em Nm^3 ou em Nl , a vazão ou o consumo em Nm^3/h ou Nl/m e a temperatura na **escala absoluta Kelvin**, sendo que o fracionamento pode ser indicado em graus °C (Celsius).

O S.I. recomenda que os símbolos que definem as grandezas ou unidades não aceitam o plural, assim 1 bar , 2 bar e não bares, 1 Kelvin e não Kelvins etc.

1.6.1 - Vazão

Uma confusão usual é confundir fluxo com vazão, grosso modo podemos dizer que fluxo define um fluido em movimento e vazão define a quantidade de fluido escoando num determinado espaço de tempo e se designa com a letra V ou melhor com a letra Q .

Portanto quando $Q = 2 Nm^3/h$ definimos uma vazão de 2 metros cúbicos de um gás por hora e em seu estado normal de pressão e temperatura.

1.6.2 - Equação de Bernoulli (D. Bernoulli – 1700 ~1782)

Esta equação explica a lei da conservação de massa dos líquidos em movimentos. Isto quer dizer que um líquido de peso específico ρ (densidade rho) fluindo horizontalmente através de uma tubulação com diâmetros variáveis tem sua massa conservada, pois a quantidade não se altera variando apenas a velocidade do fluido. A energia nos pontos de estrangulamentos também é a mesma. Assim temos:

$$Q = A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \quad \text{ou: } p_1 + \frac{1}{2} \rho * v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho * v_2^2$$

Q = vazão

A_1 = velocidade do fluido na área 1

A_2 = velocidade do fluido na área 2

ρ = (rho) densidade do fluido (1,29 kg/m³ para o ar).

Esta equação se aplica também para os gases desde que sua velocidade não supere 330 m/s aprox. (velocidade do som = 334 m/s). Em aplicações normais a velocidade do ar depende do Δp e da características da tubulação, em geral ela varia de 6m/s a 25m/s.

Um exemplo de aplicação desta equação é o tubo de **Venturi** e os chamados **geradores de vácuo**.

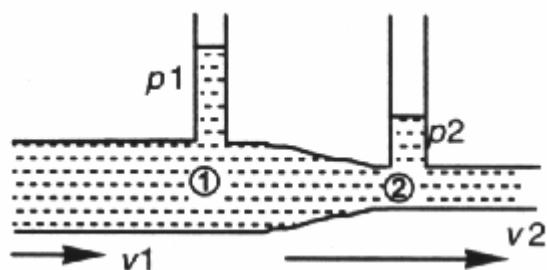
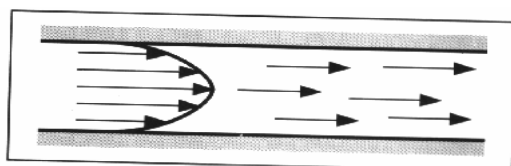


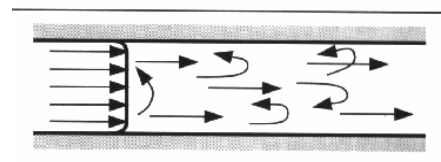
Ilustração simplificada da Lei de Bernoulli

1.6.2 - Regime de fluxo

O comportamento de um fluido dentro de uma tubulação depende muito da geometria desta. Quando a tubulação apresenta trechos longos e retos teremos um **fluxo laminar**, e dependendo da rugosidade interna do tubo é o que apresenta a **menor perda de carga**. As conexões, curvas acentuadas, cotovelos, derivações em “T”, válvulas e registros de fechamento além de gerarem uma acentuada perda de carga (perda de pressão) contribuem para provocar o chamado **fluxo turbulento**, que muitas vezes desestabilizam o sistema. Por isto, instrumentos de indicação e medição, não devem ser instalados muito próximo destes pontos.



Fluxo laminar



fluxo turbulento

2.0 - Umidade do ar

O ar atmosférico contém sempre uma porcentagem de água em forma de **vapor**.

A quantidade depende da **umidade** da atmosfera e principalmente da **temperatura**. Quando o ar atmosférico esfria, chega-se a um certo ponto em que ocorre a **saturação**.

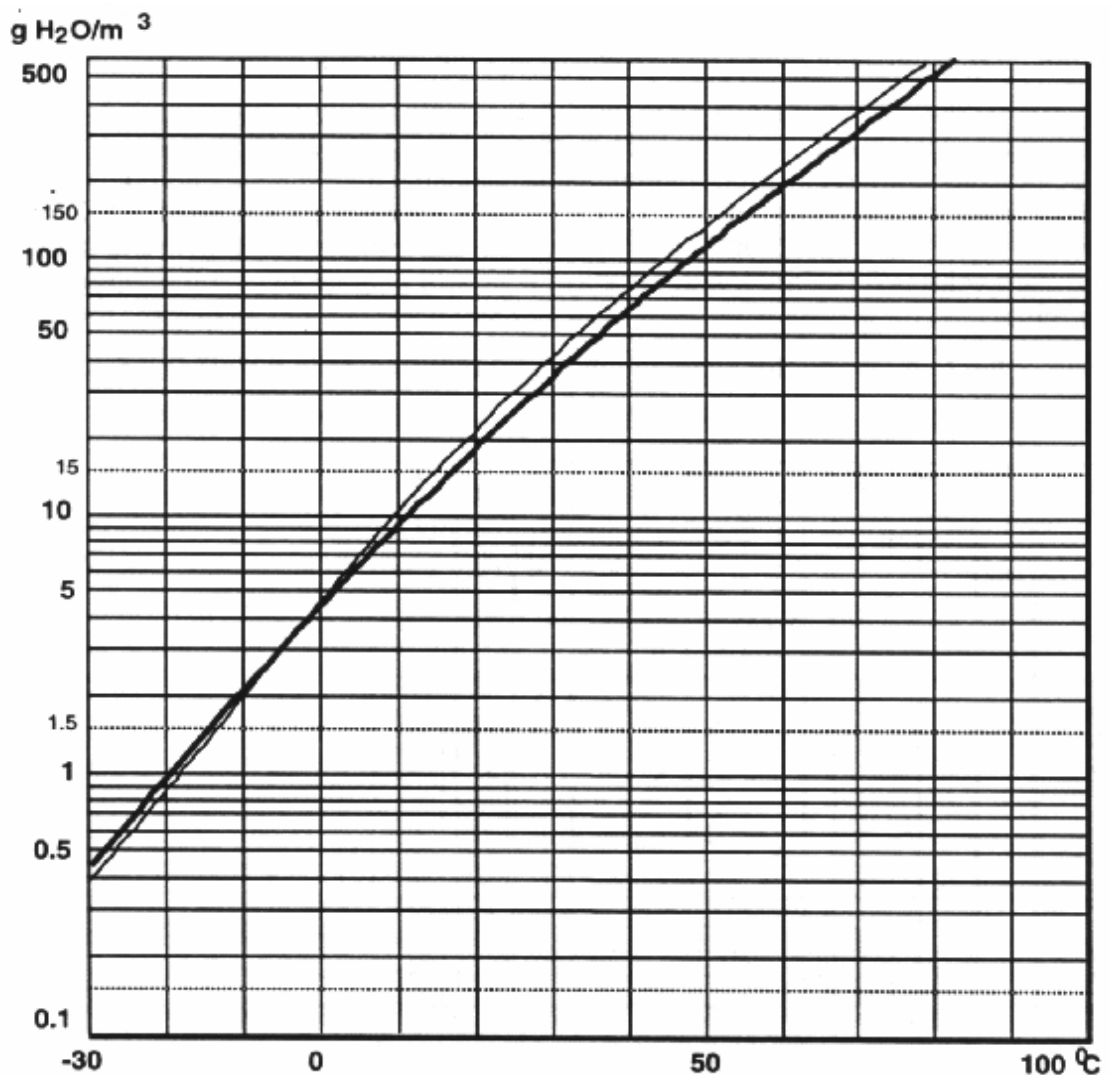
Este fenômeno é conhecido como ponto de condensação ou **ponto de orvalho**. Se o ar esfria mais, a umidade se condensa formando pequenas gotas de água que se separam do ar em forma de **condensado**.

A quantidade de água que o ar pode reter depende **inteiramente** da temperatura; 1 m³ de ar comprimido é capaz de reter a mesma quantidade de vapor de água que 1 m³ de ar a pressão atmosférica.

A tabela abaixo nos mostra a quantidade de água, em gramas por metro cúbico (g/m^3) que o ar pode conter, para uma ampla faixa de temperaturas, desde -40°C até $+40^\circ\text{C}$, e um gráfico que mostra uma faixa de -30°C a $+80^\circ\text{C}$. Em caso de ter de calcular a quantidade de condensado que se produz numa instalação recomenda-se o uso do Nm^3/h (ar aspirado pelo compressor).

Temperature °C	0	5	10	15	20	25	30	35	40
g/m^3 *(Standard)	4.98	6.99	9.86	13.76	18.99	25.94	35.12	47.19	63.03
g/m^3 (Atmospheric)	4.98	6.86	9.51	13.04	17.69	23.76	31.64	41.83	54.11
Temperature °C	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35	-40
g/m^3 (Standard)	4.98	3.36	2.28	1.52	1.00	0.64	0.4	0.25	0.15
g/m^3 (Atmospheric)	4.98	3.42	2.37	1.61	1.08	0.7	0.45	0.29	0.18

2.0.1 - Tabela da saturação de vapor de água no ar



2.0.2 - Gráfico do ponto de condensação (ponto de orvalho) em relação à

temperatura. A linha em **negrito** indica o conteúdo de água para um metro cúbico e a uma dada temperatura, a linha fina para um volume em normal metro cúbico (N/m³).

2.1 - Umidade relativa do ar

Com exceção de condições atmosféricas extremas, como uma queda brusca da temperatura, o ar atmosférico nunca se satura. O coeficiente do conteúdo real de água e da quantidade máxima de água que o ar pode reter (ponto de saturação) é chamado de **umidade relativa** do ar e se expressa em porcentagem.

$$\text{Umidade relativa (U.R.)} = \frac{\text{Conteúdo real de água}}{\text{Quantidade de saturação}} \times 100\% \text{ ou } \frac{\text{Umidade absoluta}}{\text{Ponto de saturação}} \times 100\%$$

Exemplo 1: Temperatura = 25°C, umidade relativa do ar 65%. Qual a quantidade de água em 1 m³ de ar ? O ponto de condensação a 25°C é aprox. 24 g/m³ • 0,65 = **15,6 g/m³**.

Quando o ar atmosférico é comprimido a capacidade de retenção de vapor de água é o equivalente ao seu “volume reduzido”, a menos que a temperatura não aumente substancialmente, a água excedente será eliminada por condensação.

Exemplo 2: 10 m³ de ar atmosférico a 15°C e umidade relativa 65% se comprime a uma pressão relativa de **6 bar**, a temperatura sofre um incremento de 10°C e chega a 25°C. Qual a quantidade de água que será eliminada?

Pela tabela, 1 m³ de ar atmosférico a 15°C, pode conter um máx. de 13,04 g/m³, em 10 m³ teremos **130,4 g** ; a 65% de umidade relativa o ar poderá conter 130,4 x 0,65 = **84,9 g** (a)

Agora resta calcular qual o volume do ar a uma pressão relativa de 6 bar:

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2 \text{ onde } V_2 = p_1/p_2 \cdot V_1 = 1,013/ 1,013 + 6 \text{ bar} \cdot 10 \text{ m}^3 = 1,44 \text{ m}^3.$$

Pela tabela, 1 m³ de ar a **25°C**, pode conter até 23,76 g/m³ • 1,44 m³ = **34,2 g** (b).

A condensação será igual à quantidade total de água no ar, menos o volume que o ar comprimido pode reter, assim nas fases (a) e (b) ao comprimir o ar, **84,9 g – 34,5 g = 50,6 g** de água que se condensa e se separa do ar comprimido pela redução do volume após a compressão.

Observar que esta água deve ser eliminada antes que ela chegue ao sistema, para evitar atingir os equipamentos pneumáticos. Resfriadores, secadores, filtros e principalmente tubulações corretamente calculadas e instaladas reduzem substancialmente os efeitos nocivos que o condensado causa aos equipamentos pneumáticos.

Segue em **Fundamentos da Pneumática II**