O MEIO AMBIENTE ACÚSTICO

Original: 17 - 02 – 2002 **Homero Sette Silva** Revisão: 21 - 01 – 2013

Introdução

As sensações sonoras, que geralmente experimentamos, são oriundas de ondas que, depois de produzidas por uma fonte (caixa acústica, por exemplo), propagaram-se pelo ar até atingir o nosso sistema auditivo.

Assim, entre a fonte sonora e o receptor auditivo, existe uma massa de ar, servindo como meio de propagação, que tem suas características modificadas por fatores tais como temperatura, pressão atmosférica e umidade, que influenciam no resultado final do processo de transmissão e recepção da informação sonora.

Por esta razão, vamos procurar analisar, com maior detalhe, o comportamento do ar dentro dos limites de temperatura, umidade e pressão atmosférica onde, normalmente, acontecem os fenômenos acústicos ligados à musica e voz.

O Ar

A atmosfera que nos envolve é constituída por uma mistura gasosa (e não um composto químico) denominada ar, cuja composição aproximada está mostrada no Quadro 1.

Quadro 1 - Composição do ar seco e sua massa molecular M, bem como a de seus componentes

COMPONENTES	FORMULA	VOLUME PERCENTUAL	MASSA
Nitrogenio	N_2	78,084	28,01348
Oxigenio	O_2	20,946	31,9988
Argonio	Ar	0,934	39,948
Dióxido de Carbono	CO_2	0,032 (média)	44,0098
Neonio	Ne	0,0018	20,1797
Metano	CH_4	0,0002	16,04276
Criptonio	Kr	0,000114	83,8
Helio	He	0,000524	4,002602
Hidrogenio	H_2	0,00005	2,01588
Oxido de Nitrogênio	N_2O	0,00005	44,01288
Ozonio	O_3	0,000007	47,9982
Xenonio	Xe	0,0000087	131,29
Outros	-	0,0012463	-
T O T A L		100 %	28,96666

CONCEITOS

Massa Molecular - Representada por M_o para o ar seco, e M para o ar úmido, corresponde ao cociente entre a massa da molécula em questão e 1/16 avos da massa do Oxigênio.

Calor Específico - Nos líquidos e sólidos o calor específico é medido sob pressão atmosférica constante e, como seus coeficientes de dilatação são pequenos, pode-se desprezar o trabalho realizado contra a pressão atmosférica.

Já no caso dos gases, que apresentam elevados valores de coeficiente de dilatação, deve-se levar em conta o trabalho realizado pelo gás, na expansão, e duas são as situações de maior importância: a determinação do calor específico de um gás à pressão constante (Cp) e a volume constante (Cv).

Os valores de Cp e Cv representam a quantidade de calor necessária para elevar de 1 °C uma massa correspondente a 1 Kg de gás.

O cociente Cp/Cv é representado por γ .

Mol - 1 mol de uma substância corresponde a uma quantidade de massa que, expressa em gramas, é numericamente igual à sua massa molecular. Assim, como a massa molecular do ar seco vale 28,97 , um mol de ar corresponderá a 28,97 gramas. Assim, 289,7 gramas corresponderão a 10 moles de ar.

À 0 °C de temperatura (273,15 K) e uma atmosfera de pressão (101.324,6 N/m^2), um mol de qualquer gás ocupa sempre um volume igual a 22,4137 litros.

Gás Perfeito - É aquele que segue as leis de Charles e de Boyle:
$P \cdot V/T = n \cdot R$ onde P é a pressão do gás, V o seu volume, T a temperatura absoluta (°Kelvin), n o número de moles contidos no volume V e R a constante universal dos gases, em Joule/Kmol·K.

Quando se subentende que o volume V contem apenas um mol, a equação reduz-se a $P \cdot V/T = R$.

Os gases relacionados, apresentam uma concentração relativamente constante, com exceção do CO_2, cujo conteúdo pode variar de 0,01 a 0,1%, em termos de volume, o mesmo acontecendo com o Ozônio (0 a 0,01%), o Dióxido de Enxofre (0 a 0,0001%), o Dióxido de Nitrogênio (0 a 0,000002%) e o vapor d'água (H_2O) que não estará presente no ar seco (0%) e contribuirá com 7% do volume no caso de 100% de umidade relativa, a uma temperatura de 40°C e pressão de 1 atmosfera (760 mm de mercúrio).

A massa molecular M_o, do ar seco, foi determinada através dos valores fornecidos no Quadro 1, da seguinte forma: $M_o = 0{,}78084 \cdot 28{,}01348 \ + \ 0{,}20946 \cdot 31{,}9988 \ + \ 0{,}00934 \cdot 39{,}948 \ + \ \ldots = 28{,}96666$.

Analisando a composição acima, não podemos deixar de observar que quase todo o carbono existente nas estruturas moleculares dos seres vivos, animais ou vegetais, é eficazmente obtido através da foto síntese, a partir dos 0,034%, em volume, de CO_2.

Em contrapartida, dos 78% de Nitrogênio do ar, apenas uma parcela ínfima consegue ser capturada pelos vegetais, conforme o atestam os gastos colossais com adubação nitrogenada, pois o nitrogenio é um dos principais fatores limitantes, na maioria das culturas agrícolas.

Velocidade do Som

A velocidade de propagação de uma onda sonora longitudinal em determinado meio é dada por (1.1), onde B é o módulo de elasticidade volumétrica do meio, que relaciona a variação relativa de volume com a variação de pressão, conforme (1.2).

$$C = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \tag{1.1}$$

$$B = -\Delta p \cdot \frac{\Delta V}{V} \tag{1.2}$$

Caso o meio seja um gás (ou um líquido), o módulo de elasticidade B será substituído pelo módulo volumétrico, que é dado pelo cociente entre os calores específicos do gás, respectivamente à pressão constante e a volume constante, representado por γ, multiplicado pela pressão a que está submetido o gás, conforme em (1.3), que mostra claramente que a velocidade do som diminui quando a densidade aumenta.

$$C = \sqrt{\frac{\gamma\ P}{\rho}} \tag{1.3}$$

Como densidade é igual à massa/volume, considerando-se o volume V, ocupado por um mol do gás, teremos:

$$\rho = \frac{M}{V} \tag{1.4}$$

$$C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot P \cdot V}{M}} \tag{1.5}$$

Pela equação dos gases perfeitos, o volume V, ocupado por um mol M de gás, relaciona-se com a pressão P, e a temperatura absoluta T (em K), através da equação (1.6), a partir da qual podemos obter (1.7).

$$P \cdot V = R \cdot T \tag{1.6}$$

onde R é a constante dos gases e vale 8.314,32 Joule/Kg·Kmol·K

$$C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R}{M} \cdot T} \quad = \quad \sqrt{\frac{\gamma \cdot R}{M} \cdot \left(273{,}15 \ + \ T_{(^\circ C)}\right)} \tag{1.7}$$

Considerando-se o ar um gás perfeito, poderemos utilizar a equação (1.7) para determinar a velocidade do som, desde que conheçamos γ, ou seja, a razão entre os calores específicos Cp/Cv. Esta equação mostra que a velocidade de propagação do som aumenta com a temperatura.

Teoricamente, o valor de γ para gases monoatômicos (constituídos por uma molécula), calculado através dos graus de liberdade da molécula, é dado pelo cociente 5/3, ou seja, 1,667. Para os gases diatômicos (duas moléculas) este valor é igual a 7/5, que vale 1,4 e, para os poliatômicos, 8/6 = 1,333.

Como o ar tem 99% do seu volume ocupado por gases diatômicos (N_2 e O_2), devemos esperar que seu valor de γ esteja muito próximo de 1,4.

Considerando que 99,996% deste volume corresponde aos conteúdos de Nitrogênio, Oxigênio, Argônio e Dióxido de carbono, a partir dos valores de γ, acima mencionados, obteremos $\gamma_o = 1{,}402$, para o ar seco, conforme abaixo, estando os valores envolvidos resumidos no Quadro 2 .

$$\gamma_o = \frac{7}{5}(0{,}78084 + 0{,}20946) + \frac{5}{3}\ 0{,}00934 + \frac{8}{6}\ 0{,}00032 = 1{,}402 \tag{1.8}$$

Quadro 2 - Determinação de γ para o ar seco

GAS	VOLUME %	$\gamma_o = Cp/Cv$
N_2	78,084	7/5 = 1,400
O_2	20,946	7/5 = 1,400
A	0,934	5/3 = 1,667
CO_2	0,032	8/6 = 1,333
Ar	99,996 %	1,402

Utilizando a equação (1.7), e exprimindo a temperatura T em °C, obteremos as expressões (1.14) e (1.15) para a velocidade de propagação do som, no ar seco, denominada C_o, a uma determinada temperatura T, em graus Celsius, onde podemos ver que a mesma não depende da pressão atmosférica, sendo influenciada, apenas, pela temperatura.

$$C_o = \sqrt{\frac{\gamma_o \cdot R}{M_o} \cdot T} = \sqrt{\frac{\gamma_o \cdot R}{M_o} \cdot \left(273{,}15 + T_{(°C)}\right)} \tag{1.9}$$

$$C_o = \sqrt{\frac{273{,}15 \cdot \gamma_o \cdot R}{M_o} \cdot \left(1 + \frac{T_{(°C)}}{273{,}15}\right)} \tag{1.10}$$

$$C_o = \sqrt{\frac{273{,}15 \cdot \gamma_o \cdot R}{M_o}} \cdot \sqrt{1 + \frac{T_{(°C)}}{273{,}15}} \tag{1.11}$$

$$C_{(o,o)} = \sqrt{\frac{273{,}15 \cdot \gamma_o \cdot R}{M_o}} \tag{1.12}$$

$$C_{(o,o)} = \sqrt{\frac{1{,}402 \cdot 8.314{,}32 \cdot 273{,}15}{28{,}96666}} = 331{,}54 \quad m/s \tag{1.13}$$

Onde $C_{(o,o)}$ representa a velocidade do som, no ar seco a $0\ °C$.

$$C_o = C_{(o,o)} \cdot \sqrt{1 + \frac{T_{(°C)}}{273{,}15}} \tag{1.14}$$

$$C_o = 331{,}55 \cdot \sqrt{1 + \frac{T_{(°C)}}{273{,}15}} \tag{1.15}$$

Experimentalmente, a velocidade do som no ar seco, a 0 °C e uma atmosfera de pressão (760 mm Hg), foi determinada como sendo igual a 331,45 ± 0,05 m/s, para uma concentração de CO_2 de 0,03% .

Densidade do Ar Seco

A densidade do ar seco, ou seja, supondo a ausência de umidade, denominada ρ_o**,** pode ser expressa a partir da equação (1.3), conforme vemos em (1.16), onde fica clara a dependência, tanto da temperatura T, quanto da pressão atmosférica P.

$$\rho_o = \frac{\gamma_o \cdot P}{C_o^2} = \frac{M_o \cdot P}{R \cdot T} \tag{1.16}$$

$$\rho_o = \frac{M_o \cdot P}{R \cdot \left(273{,}15 + T_{(°C)}\right)} = \frac{M_o \cdot P}{273{,}15 \cdot R} \cdot \frac{1}{1 + \dfrac{T_{(°C)}}{273{,}15}} \tag{1.17}$$

A densidade do ar seco, a $0\ °C$, é dada por (1.18), Onde P é a pressão atmosférica em N/m^2, que corresponde ao Pascal :

$$\rho_{(o,o)} = \frac{M_o \cdot P}{273{,}15 \cdot R} = \frac{28{,}96666 \cdot P}{273{,}15 \cdot 8.314{,}32} = \frac{P}{78.402{,}43} \tag{1.18}$$

o que permite expressar a densidade do ar seco, a uma temperatura $T_{(°C)}$, conforme (1.19)

$$\rho_o = \frac{\rho_{(o,o)}}{1 + \frac{T_{(°C)}}{273,15}} \tag{1.19}$$

Pressão Atmosférica

Devido à massa de ar que nos circunda, estamos sujeitos à uma pressão, denominada pressão atmosférica que, ao nível do mar, a 15 °C, seria normalmente igual a 1 atmosfera, o que corresponde a uma coluna de mercúrio com 760 mm de altura, e equivale a 101.324,6 N/m^2 ou 1013,246 milibares (mb).

A pressão atmosférica ao nível do mar varia com a latitude, estando compreendida entre 1015 a 1025 mb, de 30 a 35° de latitude e nos pólos e de 985 a 1012 mb de 60 a 75° de latitude e nas proximidades do equador.

A menor pressão média (ao nível do mar), é de 985 mb, ocorrendo em altas latitudes do hemisfério Sul.

Alem disso, a pressão atmosférica sofre variações cíclicas, ocasionadas pela influência do Sol na atmosfera. Próximo ao equador terrestre são observados pontos de máxima pressão às 10 e às 22 horas (hora local), e mínimos às 4 e às 16 horas, com até 3 mb de variação.

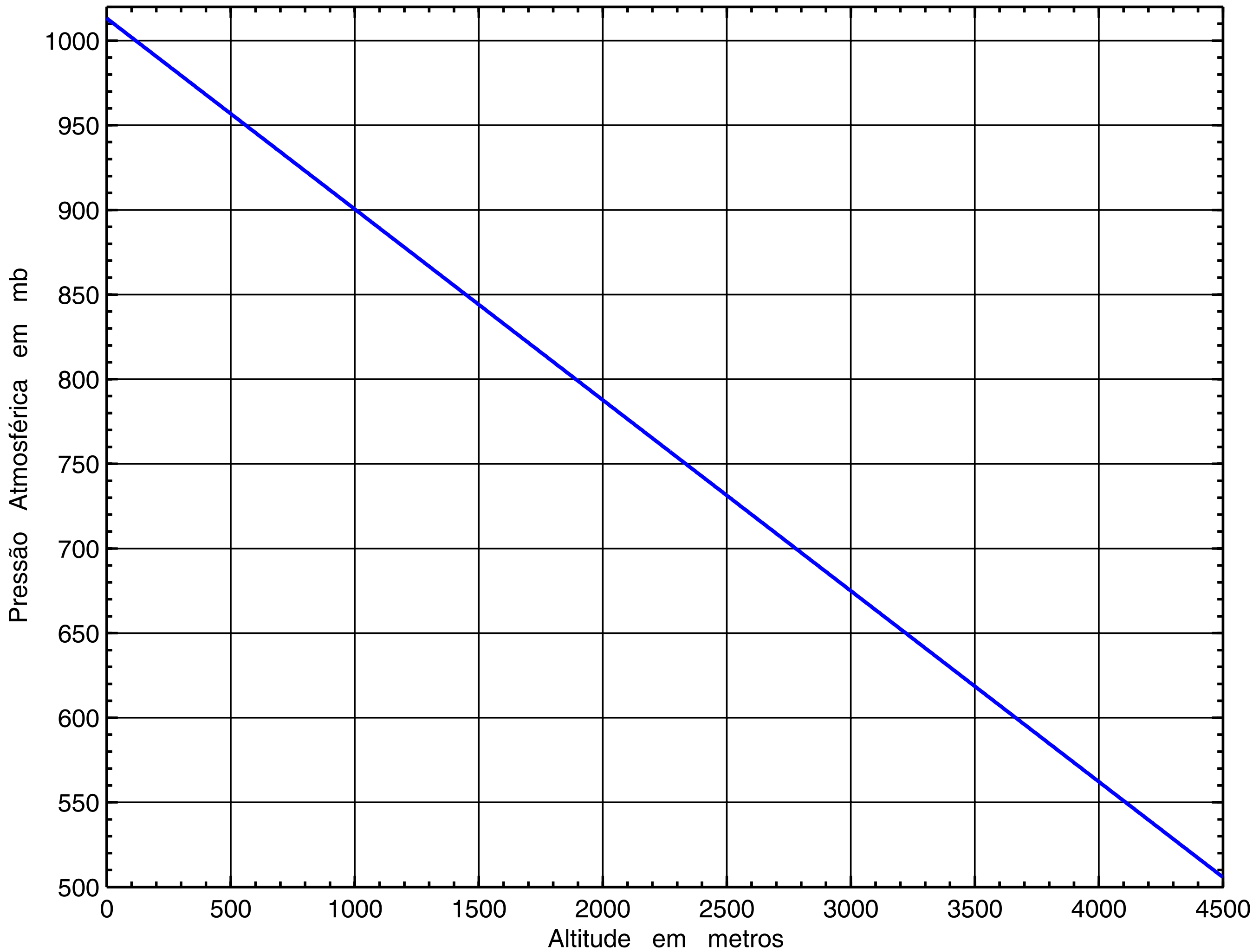

Fig. 1 – Variação da pressão atmosférica, em milibares, com a altitude, em metros na atmosfera padrão.

A altitude exerce uma acentuada influência sobre a pressão atmosférica que, aproximadamente, cai de 0,1128 mb a cada metro que se sobe. Assim, a 1000 m de altura, a pressão média é igual 900 mb. Esse comportamento está resumido na equação (1.20), relaciona a altura X, em metros, com a respectiva pressão P em milibares, com um erro inferior a 0,2% até 1500 m, para a chamada atmosfera padrão.

$$P_{(mb)} = 1013{,}25 - 0{,}11277 \cdot X_{(m)} \tag{1.20}$$

O valor da pressão atmosférica pode ser obtido através da leitura na escala de um barômetro, informação sempre disponível na torre de controle dos aeroportos, onde podemos solicitar o valor da pressão atmosférica ao nível da pista. A equação (1.20) está representada na Fig. 1 .

Uma outra possibilidade para a determinação da pressão atmosférica seria utilizar a relação existente entre esta grandeza e a temperatura de ebulição da água (que ferve a 100 °C a 760 mm Hg, ou seja, ao nível do mar). Quando a pressão diminui, o que ocorre em altitudes mais elevadas, a água ferve a uma temperatura menor, sendo este fenômeno retratado pelas equações (1.22) e (1.23), onde os valores dos coeficientes A e B foram obtidos empiricamente, a partir de valores tabelados, utilizando-se um programa de ajuste de curva, obtendo-se erros menores que 0,2%, na faixa de 90 a 100 °C.

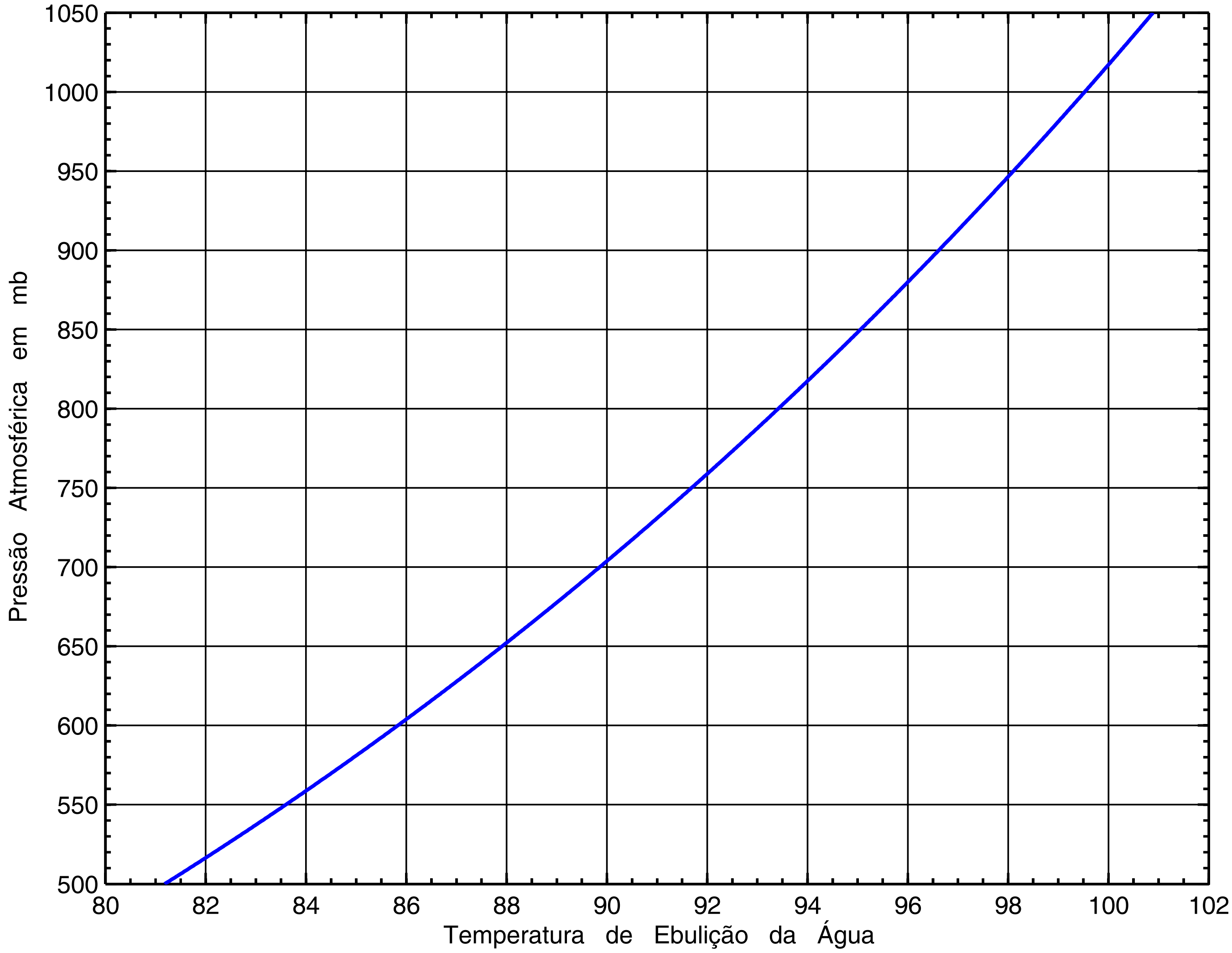

Fig. 2 – Pressão atmosférica, em milibares, em função da temperatura de ebulição da água.

$$T_{(K)} = \frac{1}{A - B \cdot Log_N(P)} \tag{1.21}$$

$$T_{(°C)} = -273{,}15 + \frac{1}{B - A\ Log_N(P)} \tag{1.22}$$

$$P_{(mb)} = Antilog_N\left[\frac{B - 1/(273{,}15 + T_{(°C)})}{A}\right] \tag{1.23}$$

Onde: $B = 4{,}0676849 \cdot 10^{-3}$ e $A = 2{,}004715 \cdot 10^{-4}$

Para exemplificar, suponhamos que o ponto de ebulição da água, medido com um termômetro digital, foi determinado como sendo igual a 92,5 °C. Aplicando a equação (1.23), obteremos a pressão atmosférica do local:

$$P_{(mb)} = Antilog_N\left[\frac{4{,}0677\ 10^{-3} - 1/(273{,}15 + 92{,}5)}{2{,}0047\ 10^{-4}}\right] = 771{,}7\ \ mb \tag{1.24}$$

A equação (1.23) está representada na Fig. 2 .

Umidade do Ar

A umidade relativa do ar é um parâmetro importante para o nosso bem estar físico. Valores abaixo de 40% tendem a ressecar as mucosas, provocando incômodos respiratórios, enquanto valores elevados tendem a acentuar o desconforto causado pela temperatura alta, uma vez que a evaporação da transpiração fica prejudicada.

O aspecto de maior importância, no momento, consiste na influência que a água, sob a forma de vapor, exerce sobre a densidade do ar e, por conseguinte, na velocidade de propagação do som.

Antes de tudo, seria conveniente ressaltar que a umidade relativa do ar, H, é o cociente entre a quantidade de água existente no ar, em determinada condição de temperatura e pressão, pelo máximo que poderia existir naquelas condições.

Desse modo, um índice de 80% para a umidade relativa do ar não significaria que 80% do volume do ar estava sendo ocupado pela água na forma de vapor. Indica, isto sim, que o ar conteria 80% do máximo que poderia comportar em vapor d'água, naquelas condições.

A umidade relativa do ar é dada pelo cociente entre a pressão de vapor da água, p_v naquela temperatura, e a pressão de saturação do vapor, p_s . O mesmo resultado pode ser obtido através do cociente densidade do vapor/densidade do vapor saturado ou volume do vapor saturado/volume do vapor, conforme em (1.25).

A umidade relativa do ar, em termos percentuais, será obtida multiplicando por 100 o valor da umidade relativa, H.

$$H = d_v/d_s = v_s/v_v = p_v/p_s \tag{1.25}$$

$$H_{\%} = 100 \cdot H \qquad (1.26)$$

Entendemos por pressão de saturação do vapor d'água (p_s), aquela em que o número de moléculas que abandonam a superfície líquida, passando para a forma de vapor (evaporação) é igual ao daquelas que retornam ao líquido (condensação). A uma temperatura maior, as moléculas possuem maior energia cinética, o que facilita a evaporação, fazendo com que a pressão do ponto de equilíbrio (saturação) aumente.

A ebulição, que é uma evaporação não mais apenas na superfície, mas em todo o volume do líquido, acontece quando a pressão no líquido é igual a do vapor de saturação.

Quando o ambiente não dispõe de toda a água necessária para saturar o ar, o vapor d'água existente estará exercendo uma pressão menor que a de saturação, sendo a isto que denominamos pressão de vapor p_v.

A pressão do vapor p_v pode ser determinada abaixando-se progressivamente a temperatura de uma amostra do ar, encerrado em um tubo de ensaio (através da evaporação de éter, por exemplo) até torná-lo saturado, (o que seria indicado pela condensação), quando então deveríamos ler, de imediato, a temperatura da amostra de ar. De posse do valor da temperatura em que a amostra de ar tornou-se saturada de vapor d'água (ponto de orvalho ou temperatura do ponto de orvalho Td, dew, em inglês), basta entrar em uma tabela para determinarmos o valor da pressão de vapor p_v.

$$Td_{(°C)} = -273{,}15 + \frac{1}{E - D \cdot Log_N(p_v)} \qquad (1.27)$$

$$p_v = Antilog_N \left[\frac{E - \dfrac{1}{273{,}15 + Td_{(°C)}}}{D} \right] \qquad (1.28)$$

Para p_v em mm Hg D = 0,0001890835 ; E = 0,003952335

Para p_v em milibares D = 0,0001890835 ; E = 0,0040067146

As equações (1.27) e (1.28) substituem as tabelas, normalmente usadas, e na faixa de 10 a 40 °C apresentam erros inferiores a 0,1%.

As equações (1.29) e (1.30) relacionam, respectivamente, a temperatura da amostra, $T_{(°C)}$, com a pressão de saturação, p_s, e esta com $T_{(°C)}$.

$$T_{(°C)} = -273{,}15 + \frac{1}{E - D \cdot Log_N(p_s)} \qquad (1.29)$$

$$p_s = Antilog_N \left[\frac{E - \dfrac{1}{273{,}15 + T_{(°C)}}}{D} \right] \qquad (1.30)$$

Exemplo:

A temperatura de uma amostra de ar é igual a 20 °C tendo sido o ponto de orvalho localizado em 10 °C. Determinar a umidade relativa do ar.

1) Determinar a pressão de vapor utilizando (1.28)

$$p_v = \text{Antilog}_N\{[0{,}0040067 - 1/(273{,}15 + 10)]/0{,}0001891\}$$
$$p_v = \text{Antilog}_N\{[0{,}0004750]/0{,}0001891\}$$
$$p_v = \text{Antilog}_N\{2{,}512211\} = 12{,}33 \text{ mb}$$

2) Determinar a pressão de saturação p_s , a 20 °C, utilizando (1.30) .

$$p_s = \text{Anti}\log_N \left\{\left[0{,}0040067 - 1/\left(273{,}15 + 20\right)\right]/0{,}0001891\right\}$$
$$p_s = \text{Antilog}_N\{3{,}149358\} = 23{,}32 \text{ mb}$$

3) Aplicar as equações (1.25) e (1.26) para determinar a umidade relativa do ar na amostra.

$$H_{\%} = 100 \cdot p_v/p_s = 100 \cdot 12{,}33/23{,}32 = 52{,}87 \ \%$$

A umidade relativa do ar pode ser determinada diretamente pela equação (1.31), obtida a partir do desenvolvimento da equação de Clausius-Clapeyron, bastando que se conheçam a temperatura do ponto de orvalho T_d e a da amostra T, ambas em $°C$.

$$H = \text{Antilog}_{10} \left[\frac{\dfrac{1}{273{,}15 + T_{(°C)}} - \dfrac{1}{273{,}15 + Td_{(°C)}}}{0{,}000425} \right] \qquad (1.31)$$

Exemplo:

Calcular a umidade relativa da amostra de ar, do exemplo anterior, utilizando a equação (1.31).

$$H = \text{Antilog}_{10}\{[1/(273{,}15 + 20) - 1/(273{,}15 + 10)]/0{,}000425\}$$
$$H = \text{Antilog}_{10}\{[-0{,}00012047]/0{,}000425\} = \text{Antilog}_{10}\{-0{,}283468\} = 0{,}5206$$
$$H_{\%} = 100 \cdot H = 100 \cdot 0{,}5206 = 52{,}06 \ \%$$

Outra maneira de se determinar a umidade relativa do ar consiste em relacioná-la, através de tabelas, construídas a partir de equações empíricas, com a diferença entre o valor da temperatura ambiente, medida normalmente, e o mesmo valor, obtido com o bulbo do termômetro envolto em uma gaze umedecida.

A temperatura do bulbo molhado será função da evaporação, que depende da umidade do ar e da temperatura ambiente. Como a pressão atmosférica também influi, há a necessidade de conhecê-la, para maior precisão.

Densidade do Ar Úmido

O vapor de água em suspensão no ar pode ser considerado como um gás perfeito (ao menos aproximadamente, desde que não haja condensação da umidade) de modo que o ar úmido será entendido como o resultado da soma de duas componentes: a do vapor d'água e a do ar seco.

Como o vapor d'água tem a mesma fórmula química da água, H_2O, sua massa molecular $\mathrm{Ma_o}$ será dada por 2·1,008 + 16 = 18,016 . Desenvolvendo (1.4) para o vapor d'água, obteremos em (1.32) a expressão da sua densidade, sendo p_a a pressão do vapor.

$$\rho_a = \frac{\mathrm{Ma}}{\mathrm{V}} \tag{1.32}$$

$$\text{como } \mathrm{V} = \mathrm{n} \cdot \mathrm{R} \cdot \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{p_a}} \text{, sendo n o numero de moles, vem :} \tag{1.33}$$

$$\rho_a = \frac{\mathrm{Ma}}{\mathrm{n} \cdot \mathrm{R}} \cdot \frac{\mathrm{p_a}}{\mathrm{T}} = \frac{\mathrm{Ma_o}}{\mathrm{R}} \cdot \frac{\mathrm{p_a}}{\mathrm{T}} \tag{1.34}$$

A densidade do ar, ρ, levando em conta a presença da umidade, será a soma das densidades do ar seco e do vapor d'água, conforme (1.35).

$$\rho = \rho_{ar} + \rho_a \tag{1.35}$$

Para uma pressão atmosférica P, e uma pressão de vapor d'água p_a, a pressão da componente de ar seco será dada pela diferença entre elas, uma vez que a pressão atmosférica será igual ao somatório das pressões internas no gás.

$$\mathrm{P} = \mathrm{Par} + \mathrm{p_a} \tag{1.36}$$

$$\mathrm{Par} = \mathrm{P} - \mathrm{p_a} \tag{1.37}$$

Então, a densidade da componente de ar seco será dada por (1.38), que combinada com (1.32) e (1.35) levará à equação da densidade do ar, ρ, em (1.39), considerando a presença da umidade.

Chamando de ρ_o a densidade que teria o ar, na ausência da umidade (ar seco, ar com umidade 0), na temperatura T e pressão atmosférica P, obteremos (1.42), análoga a (1.16), que levará a (1.43).

$$\rho_{ar} = \frac{\mathrm{Mar}}{\mathrm{n} \cdot \mathrm{R}} \cdot \frac{(\mathrm{P} - \mathrm{p_a})}{\mathrm{T}} = \frac{\mathrm{M_o}}{\mathrm{R}} \cdot \frac{(\mathrm{P} - \mathrm{p_a})}{\mathrm{T}} \tag{1.38}$$

$$\rho = \rho_a + \rho_{ar} = \frac{\mathrm{Ma_o}}{\mathrm{R}} \cdot \frac{\mathrm{p_a}}{\mathrm{T}} + \frac{\mathrm{M_o}}{\mathrm{R}} \cdot \frac{\mathrm{P} - \mathrm{p_a}}{\mathrm{T}} \tag{1.39}$$

$$\rho = \frac{M_o \cdot P}{R \cdot T} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{Ma_o}{M_o}\right) \cdot \frac{p_a}{P}\right] \tag{1.40}$$

Como $P \cdot V = R \cdot T$, vem:

$$\rho = \frac{M_o \cdot P}{P \cdot V} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{Ma_o}{M_o}\right) \cdot \frac{p_a}{P}\right] = \frac{M_o}{V} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{Ma_o}{M_o}\right) \cdot \frac{p_a}{P}\right] \tag{1.41}$$

$$\rho_o = \frac{M_o}{V} \tag{1.42}$$

$$\rho = \rho_o \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{Ma_o}{M_o}\right) \cdot \frac{p_a}{P}\right] \tag{1.43}$$

Sendo ρ_o dado por (1.19).

Como Ma_o/M_o e p_a/P são sempre quantidades menores que 1, através da equação (1.43) podemos inferir que a presença da umidade diminui a densidade do ar. Isto acontece porque a massa molecular da água é menor que a do ar.

Utilizando (1.25) e (1.26) poderemos expressar p_a em função da umidade relativa do ar e da pressão de saturação do vapor, p_s, o que vai levar à equação da densidade do ar em função da umidade relativa, em (1.45).

Substituindo Ma_o/M_o pelo cociente (18,016/28,96666 = 0,621956), temos a equação procurada, em (1.46). O valor da pressão de saturação p_s será obtido em (1.28), fazendo-se $p_v = p_s$.

$$p_a = 0{,}01 \cdot H_{\%} \cdot p_s \tag{1.44}$$

$$\rho = \rho_o \cdot \left[1 - 0{,}01 \cdot \left(1 - \frac{Ma_o}{M_o}\right) \cdot H_{\%} \cdot \frac{p_s}{P}\right] \tag{1.45}$$

$$\rho = \rho_o \cdot \left[1 - 0{,}0037804 \cdot H_{\%} \cdot \frac{p_s}{P}\right] \tag{1.46}$$

A variação percentual da densidade do ar, relativa à densidade do ar seco, nas mesmas condições de temperatura e pressão, é dada por (1.47), facilmente obtida a partir de (1.46).

$$100 \cdot \frac{\rho - \rho_o}{\rho_o} = -0{,}378 \cdot H_{\%} \cdot \frac{p_s}{P} \tag{1.47}$$

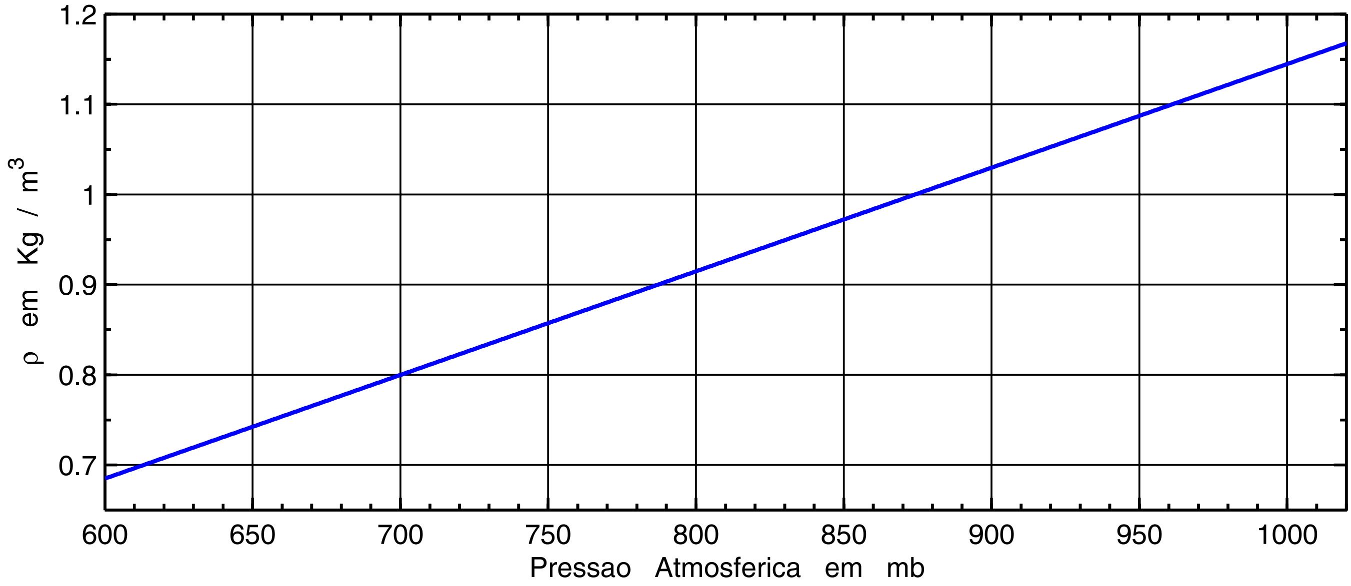

Fig. 3 – Densidade do ar, em função da pressão atmosférica. T = 30 °C e U = 50 %.

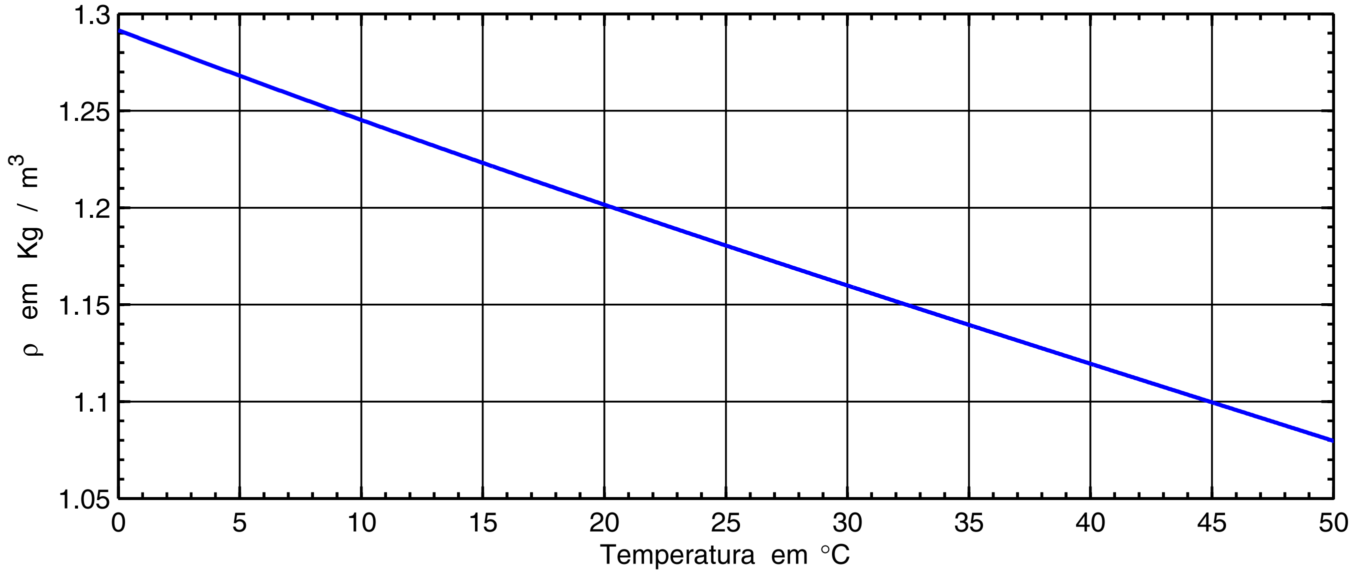

Fig. 4 – Densidade do ar, em função da temperatura. P = 1013 mb e U = 50 %.

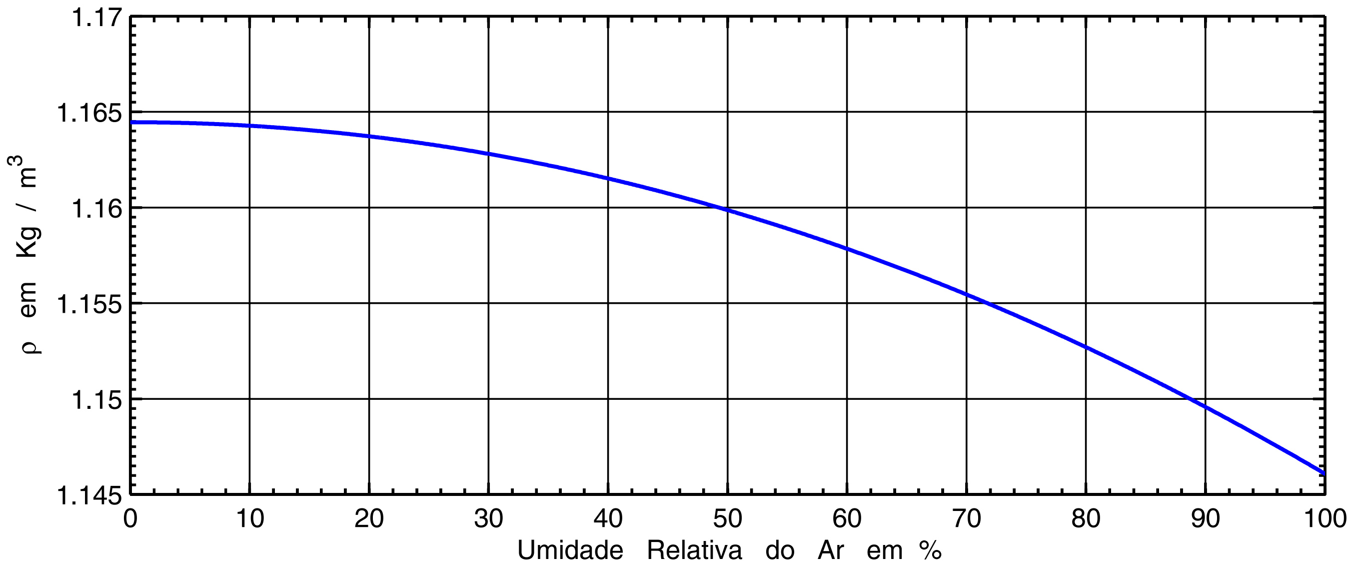

Fig. 5 – Densidade do ar, em função da umidade relativa do ar. T = 30 °C e P = 1013 mb.

Exemplo:

Determinar a variação da densidade do ar, a 40 °C, 1 atmosfera e 50% de umidade relativa do ar.

1) Determinar p_s utilizando (1.30)
$p_s = \mathrm{Antilog}_N\{[0{,}0040067 - 1/(273{,}15 + 40)]/0{,}0001891\} = 73{,}78 \text{ mb}$
2) Determinar a variação procurada utilizando (1.47), sabendo que 1 atmosfera equivale a 1013,246 milibares.
$100 \cdot (\rho - \rho_o)/\rho_o = - 0{,}378 \cdot 50 \cdot 73{,}78/1013{,}246 = - 1{,}376\ \%$
O exemplo mostrou que a densidade do ar ficou reduzida em 1,4%, aproximadamente.

Velocidade do som no Ar Úmido

A umidade do ar modifica a velocidade do som, em virtude da alteração que provoca no cociente γ/M da equação (1.7).

Para calcular o valor de M, vamos definir um fator h, que representa a fração correspondente às moléculas de água, no ar úmido. Desse modo, a massa molecular do ar seria dada por (36), onde h = 0 significaria ar seco.

$$M = M_o - (M_o - 18{,}016) \cdot h = M_o - 10{,}95 \cdot h \tag{1.48}$$

$$M = 28{,}96666 - 10{,}95 \cdot h \tag{1.49}$$

Já a razão entre os calores específicos do ar, γ, em presença da umidade, é dada por (1.50), obtida admitindo-se que a molécula da água, com 6 graus de liberdade, fará com que o valor médio dos graus de liberdade do ar úmido aumente de 5 (ar seco) para 5 + h .

$$\gamma = \frac{7 + h}{5 + h} \tag{1.50}$$

$$h = 0{,}01 \cdot H_{\%} \cdot \frac{p_v}{P} \tag{1.51}$$

Onde: p_v é pressão de vapor na temperatura do ar, dada por (1.28)sendo P a pressão atmosférica.

Representando por $C_{(0,0)}$ a velocidade do som no ar seco, a 0 °C, e por C a velocidade do som no ar, a uma temperatura T , em °C e umidade qualquer, vem:

$$C = C_{(0,0)} \cdot \sqrt{\frac{\gamma}{\gamma_o} \cdot \frac{Mo}{M} \cdot \left(1 + \frac{T_{(°C)}}{273{,}15}\right)} \tag{1.52}$$

Onde: $\gamma_o = 1{,}402$ e $M_o = 28{,}96666$

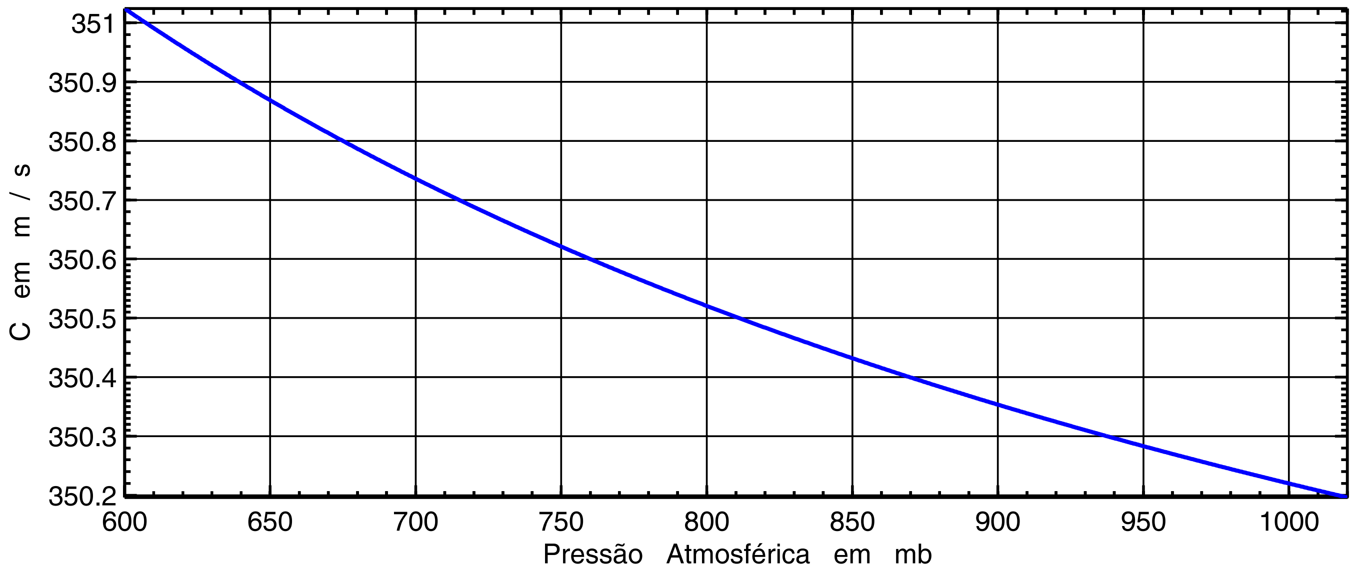

Fig. 6 – Velocidade do som no ar, em função da pressão atmosférica. T = 30 °C e U = 50 %.

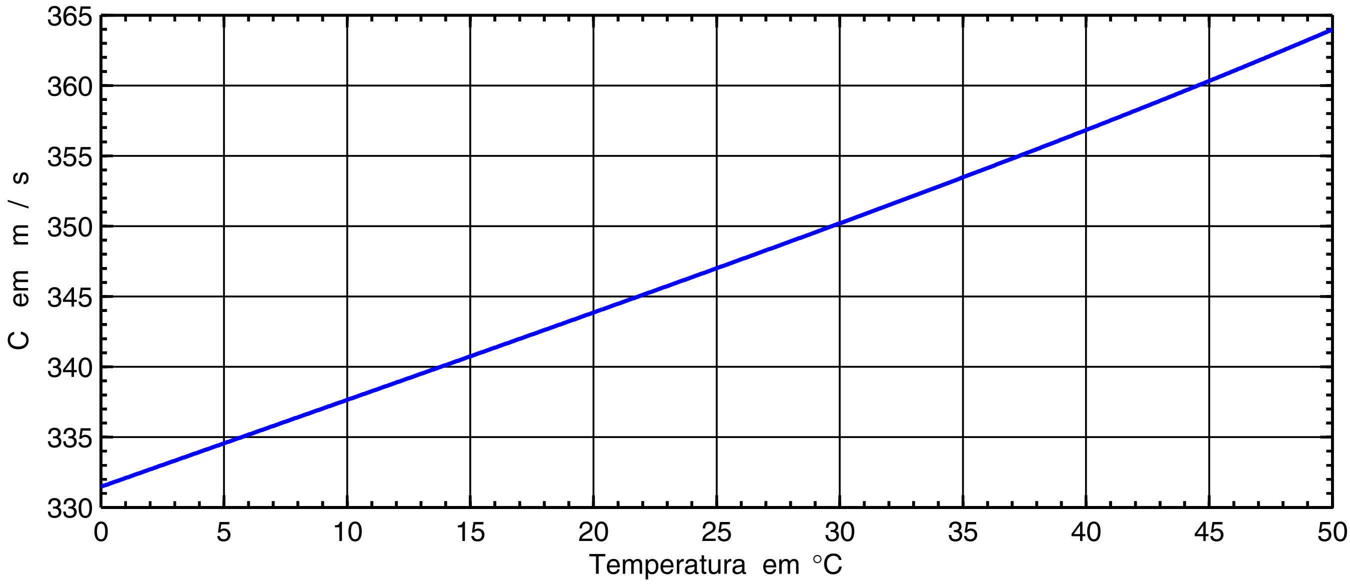

Fig. 7 – Velocidade do som no ar, em função da temperatura. P = 1013 mb e U = 50 %.

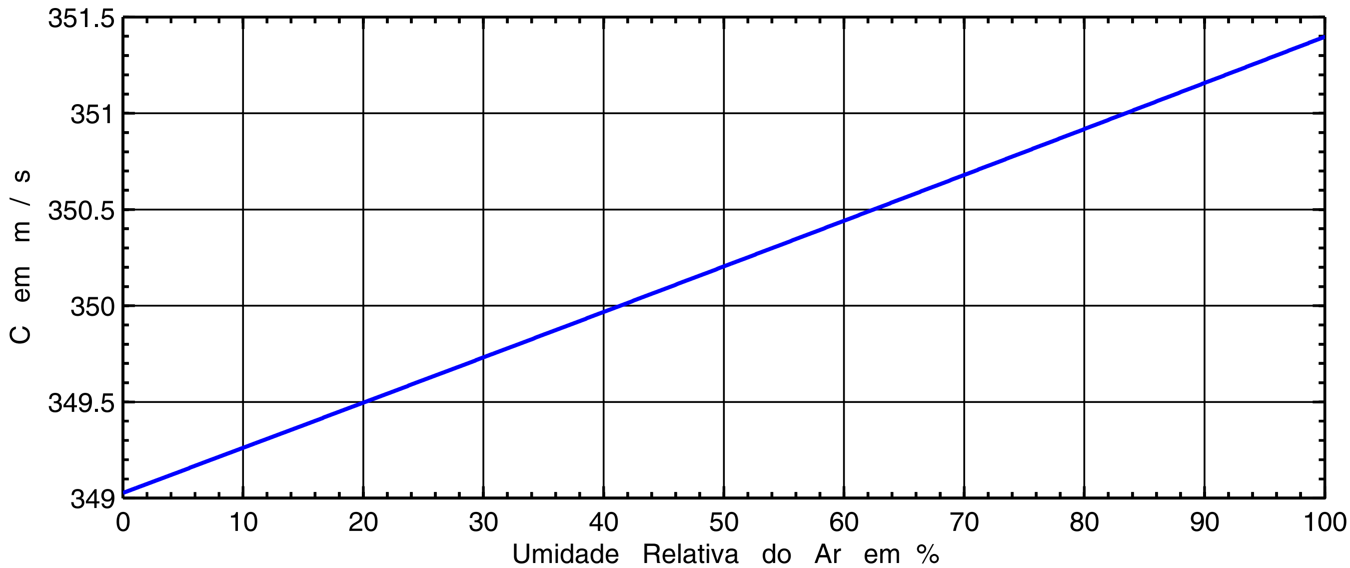

Fig. 8 – Velocidade do som no ar, em função da umidade relativa do ar. T = 30 °C e P = 1013 mb.

Exemplo:

Determine a velocidade de propagação do som no ar, a uma temperatura de 40 °C, 50 % de umidade relativa e 1 atmosfera.

1) Determinar p usando a equação (1.28)

$$p = \text{Antilog}_N\{[0{,}0040067 - 1/(273{,}15 + 40)]/0{,}0001891\} = 73{,}78 \text{ mb}$$

2) Determinar h usando (1.51)

$h = 0{,}01 \cdot 50 \cdot 73{,}78/1013{,}246 = 0{,}03641$

3) Determinar M usando (1.49)

$M = 28{,}966 - 10{,}95 \cdot 0{,}03641 = 28{,}568$

4) Determinar γ, usando (1.50)

$\gamma = (7 + 0{,}03641)/(5 + 0{,}03641) = 1{,}3971$

5) Calcular C usando (1.52)

sabendo que $C_{(0,0)} = 331{,}45$ m/s

$$C = 331{,}45 \cdot \sqrt{1{,}3971 \cdot 28{,}96666 \cdot (1 + 40/273{,}15)/1{,}402 \cdot 28{,}568}$$

$$C = 331{,}45 \cdot \sqrt{1{,}15839} = 331{,}45 \cdot 1{,}07629 = 356{,}7347 \text{ m/s}$$

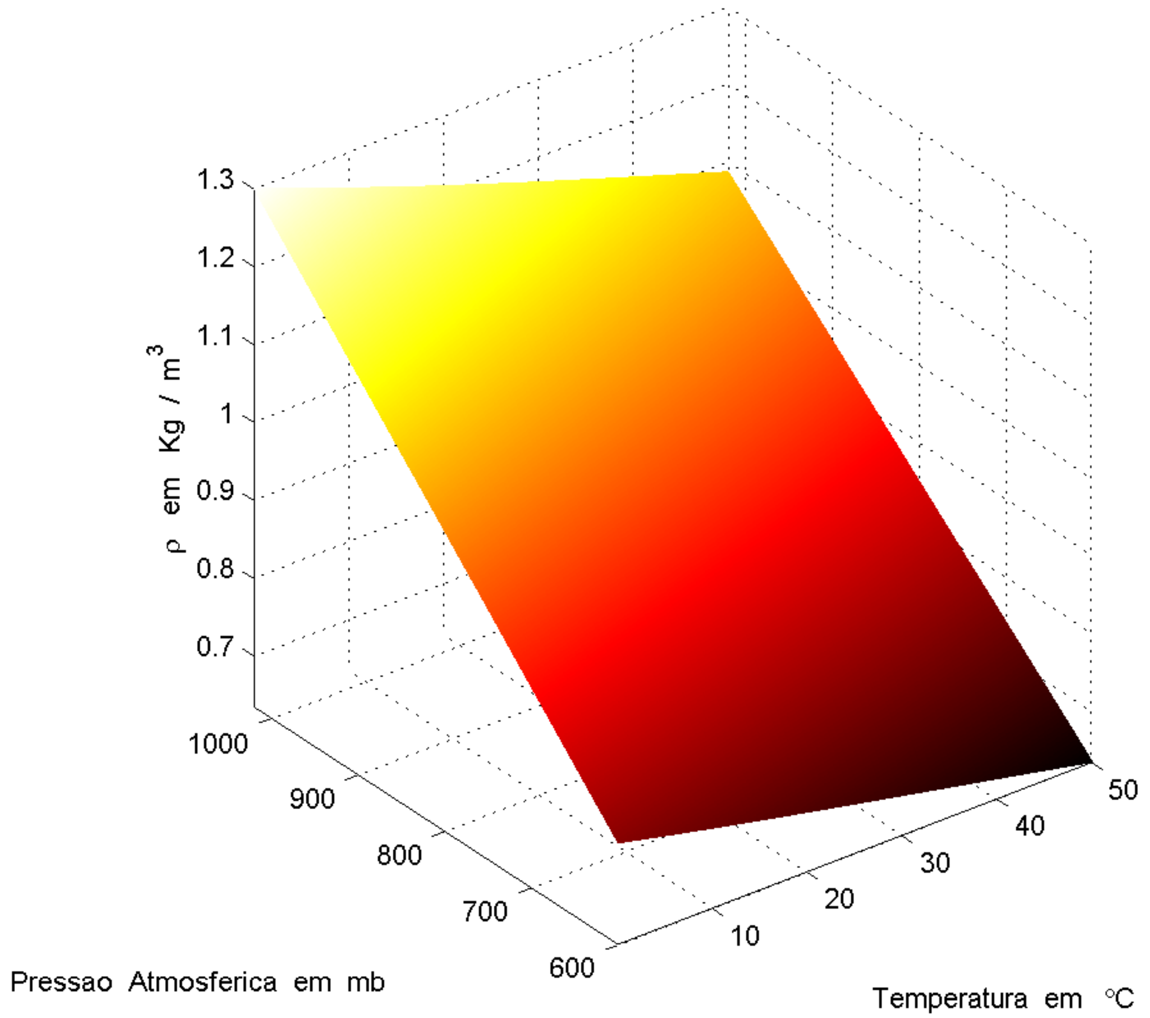

Fig. 9 – Densidade do ar, em função da pressão e da temperatura. U = 50 % .

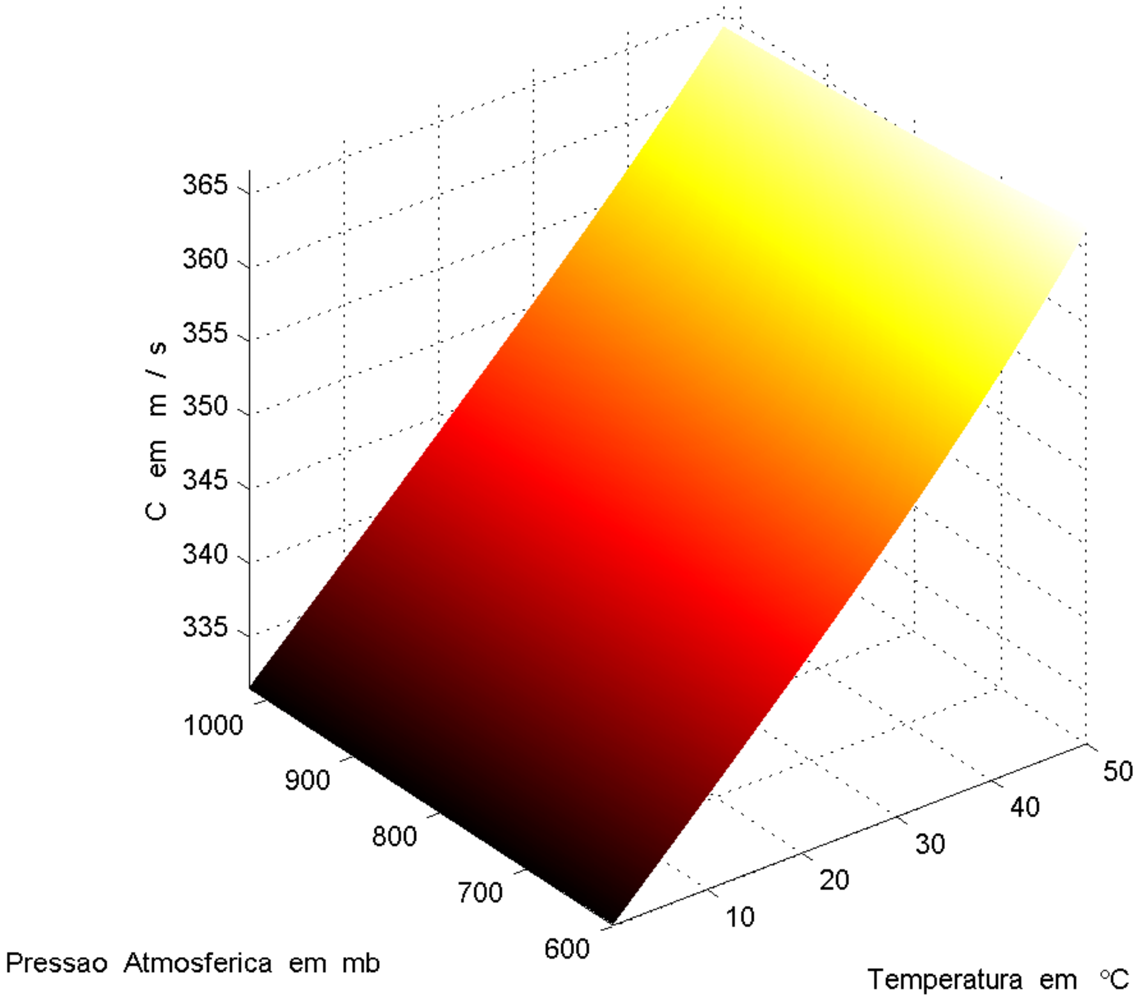

Fig. 10 – Velocidade do som no ar, em função da temperatura e da pressão. U = 50 %.

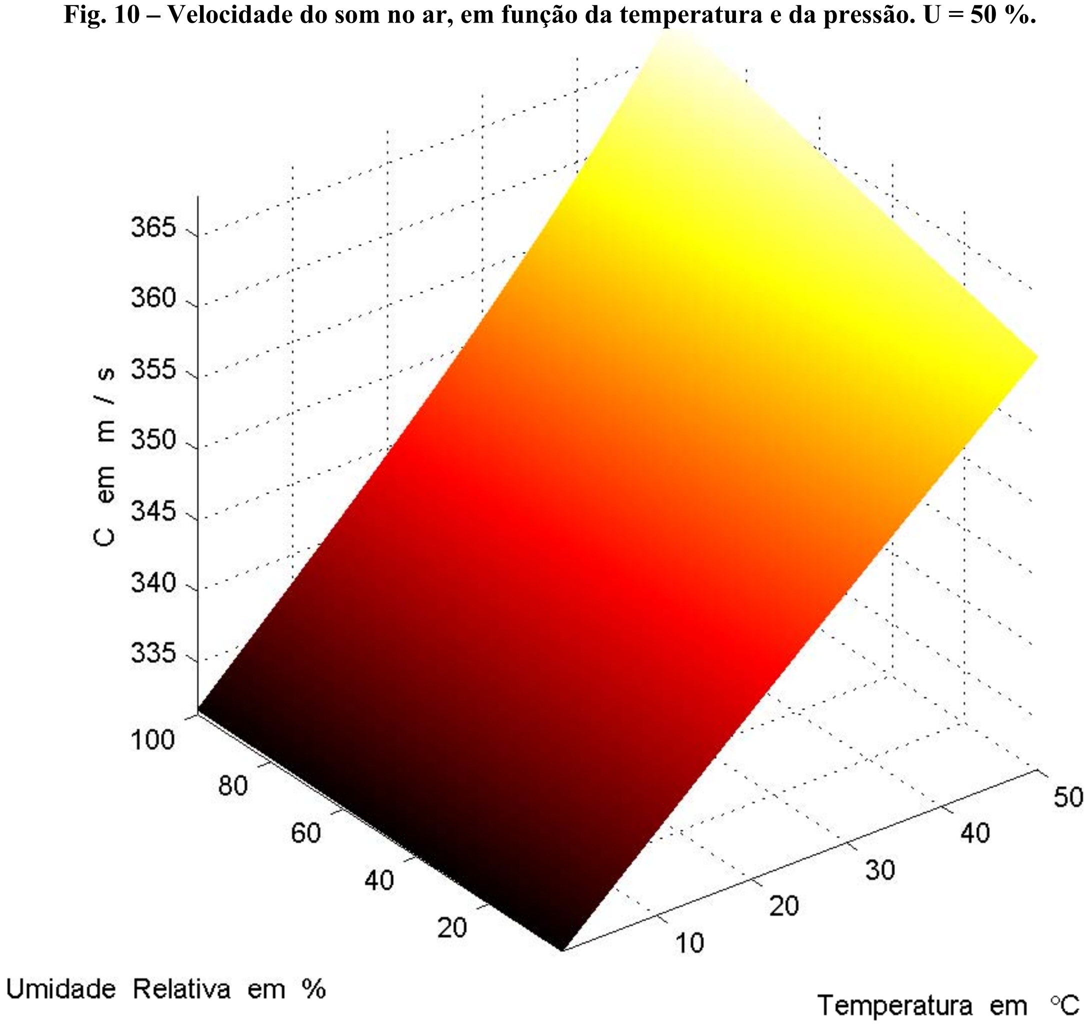

Fig. 11 – Velocidade do som no ar, em função da umidade e da temperatura. P = 1013 mb.

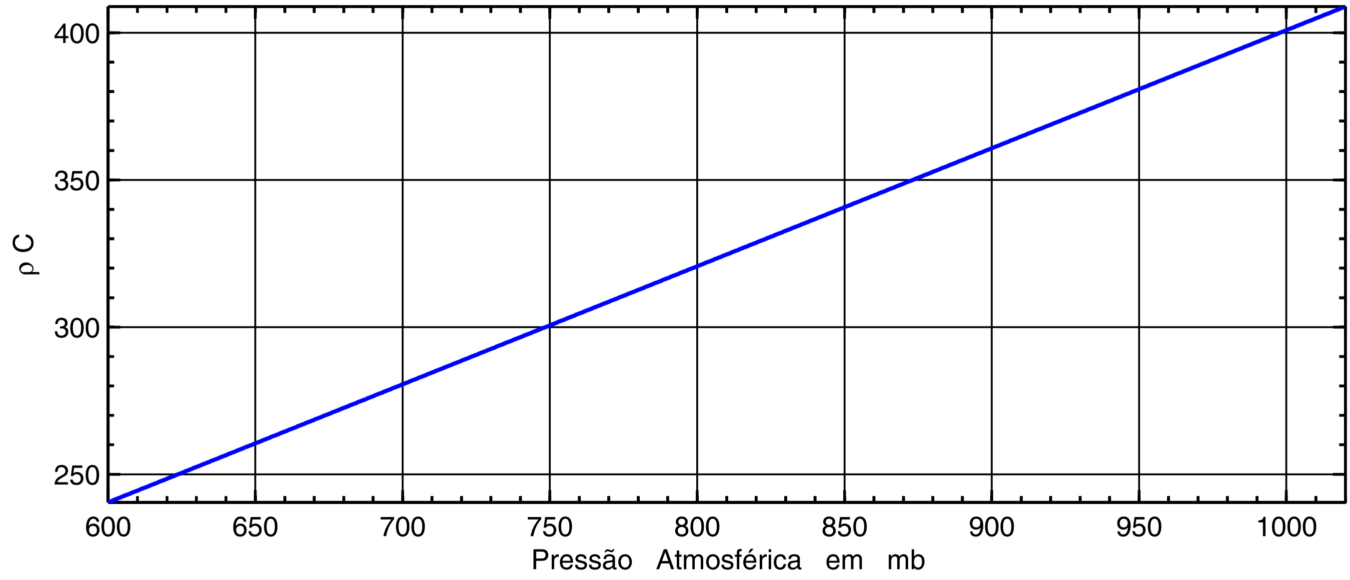

Fig. 12 – Impedância Caracteristica do ar, em função da pressão atmosférica. T = 30 °C e U = 50 %.

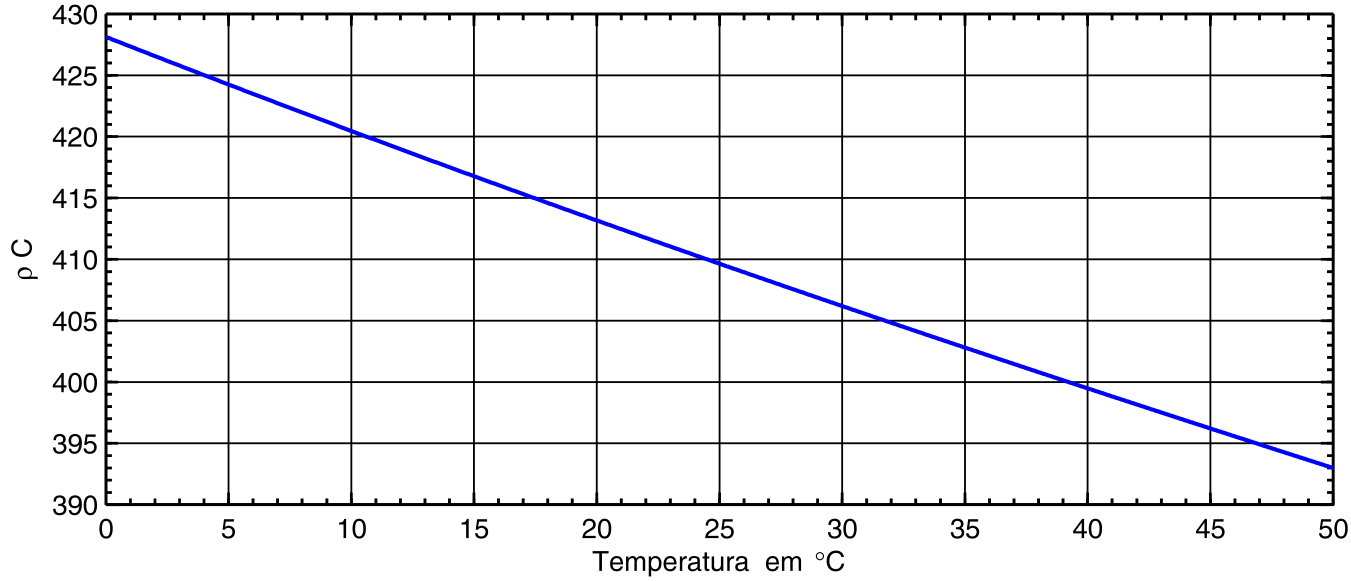

Fig. 13 – Impedância Caracteristica do ar, em função da temperatura. P = 1013 mb e U = 50 %.

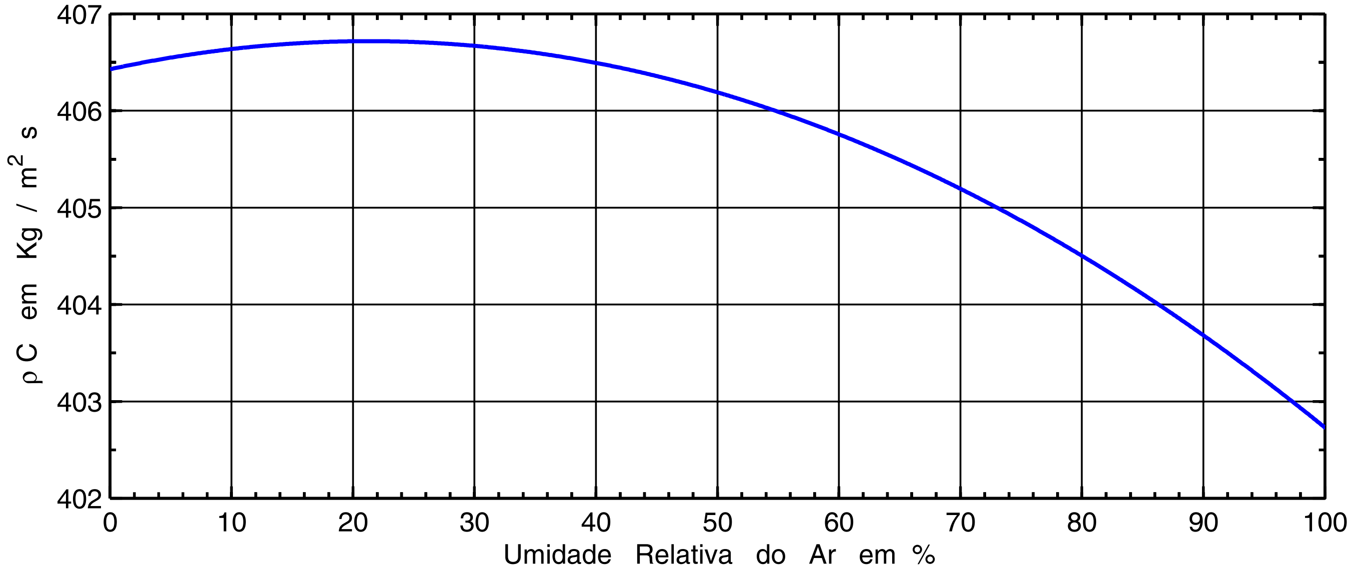

Fig. 14 – Impedância Caracteristica do ar, em função da umidade relativa. T = 30 °C e P = 1013 mb.

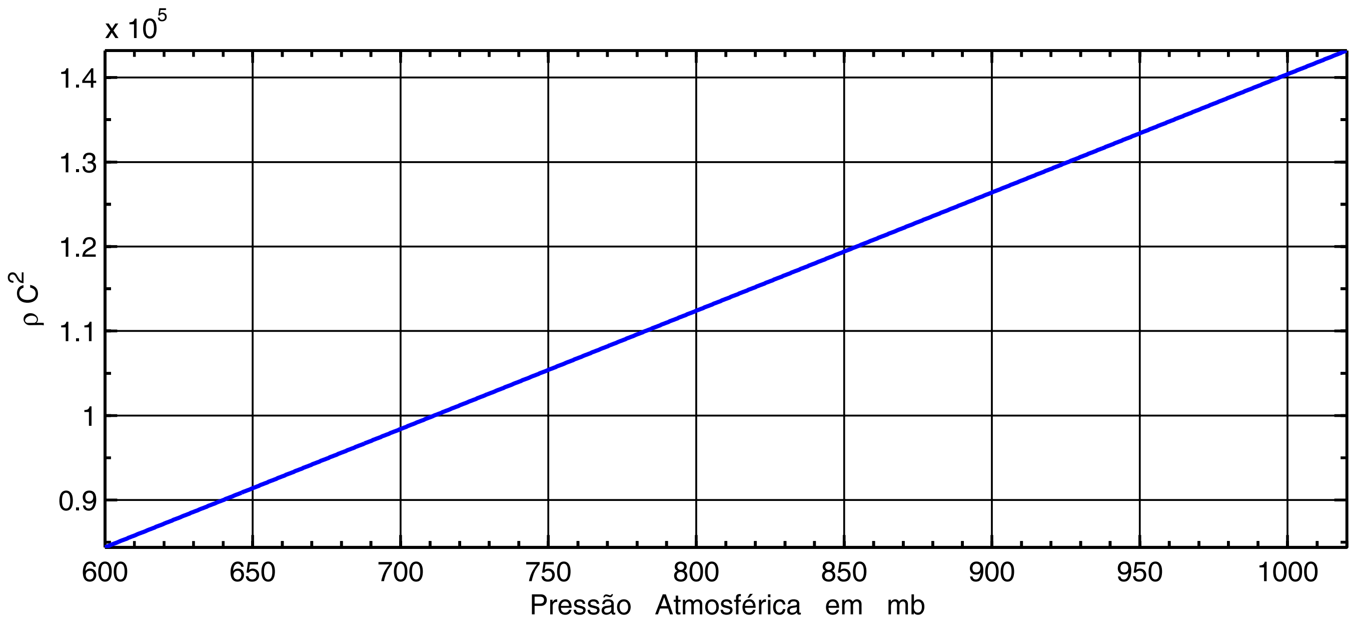

Fig. 15 – $\rho \cdot C^2$ **, em função da pressão atmosférica. T = 30** °C **e U = 50 %.**

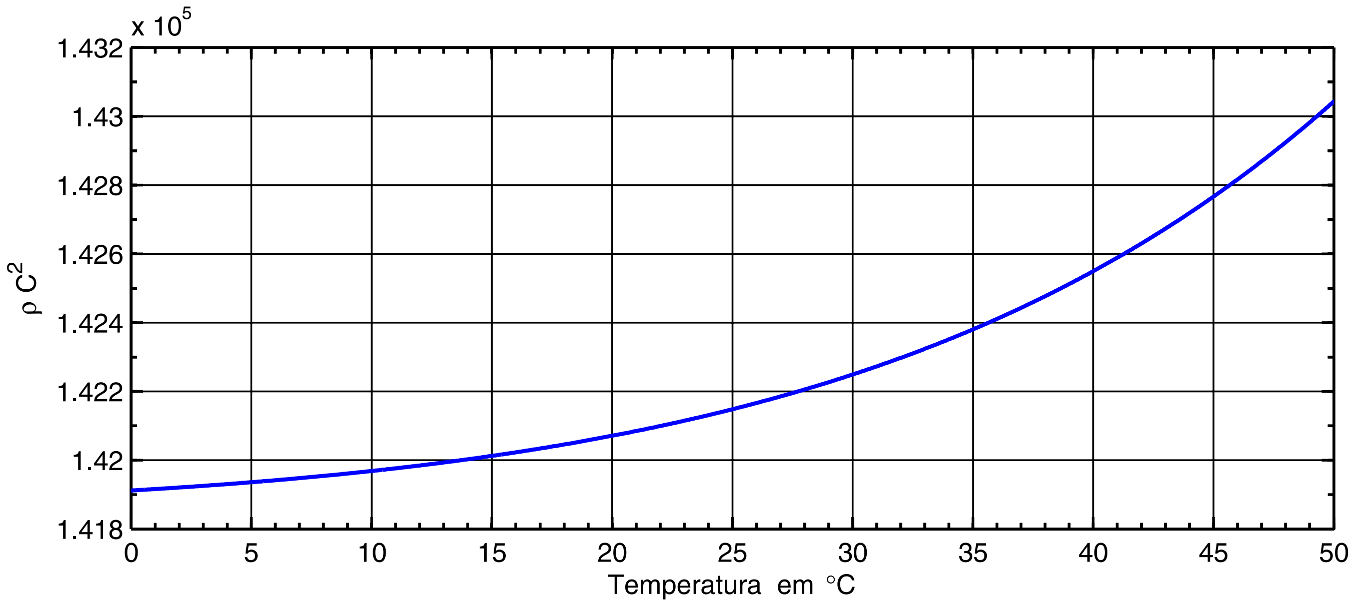

Fig. 16 – $\rho \cdot C^2$ **, em função da temperatura. P = 1013** mb **e U = 50 %.**

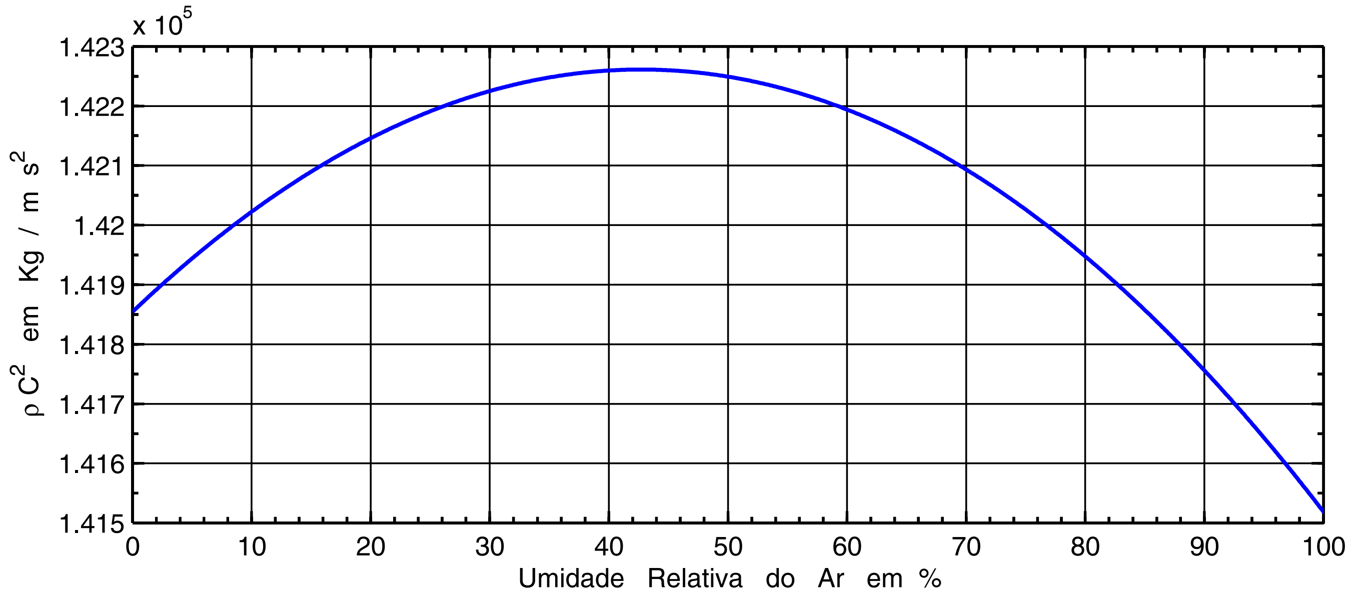

Fig. 17 – $\rho \cdot C^2$ **, em função da umidade relativa. T = 30 °C e P = 1013 mb.**

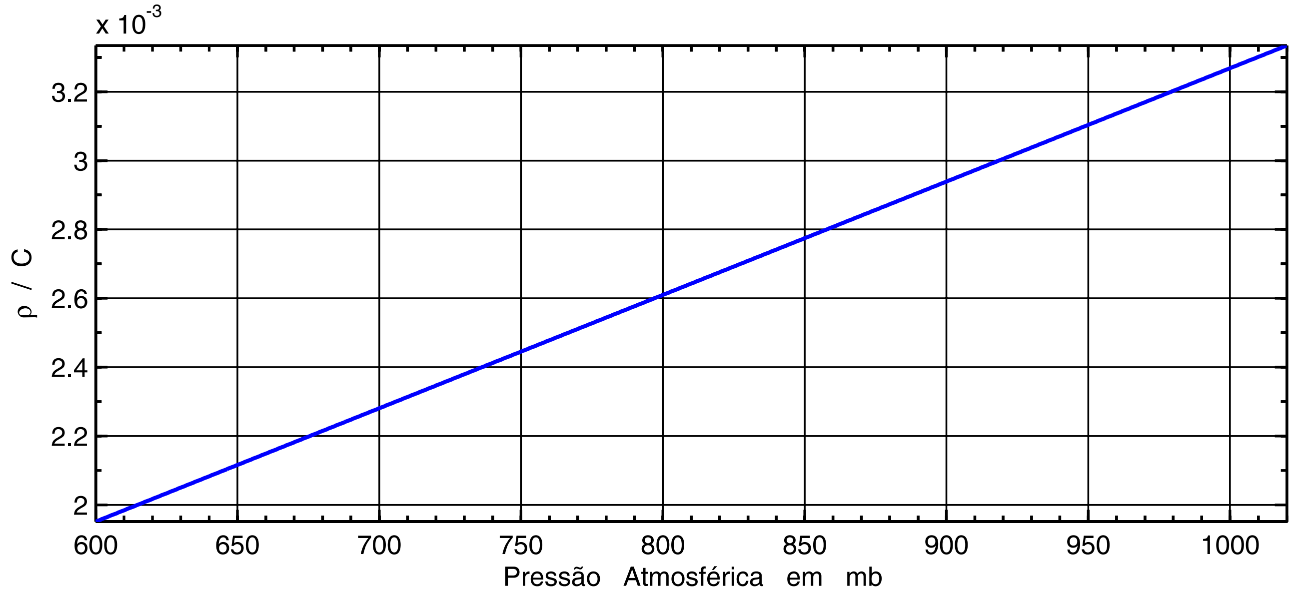

Fig. 18 – ρ / C, em função da pressão atmosférica. T = 30 °C e U = 50 %.

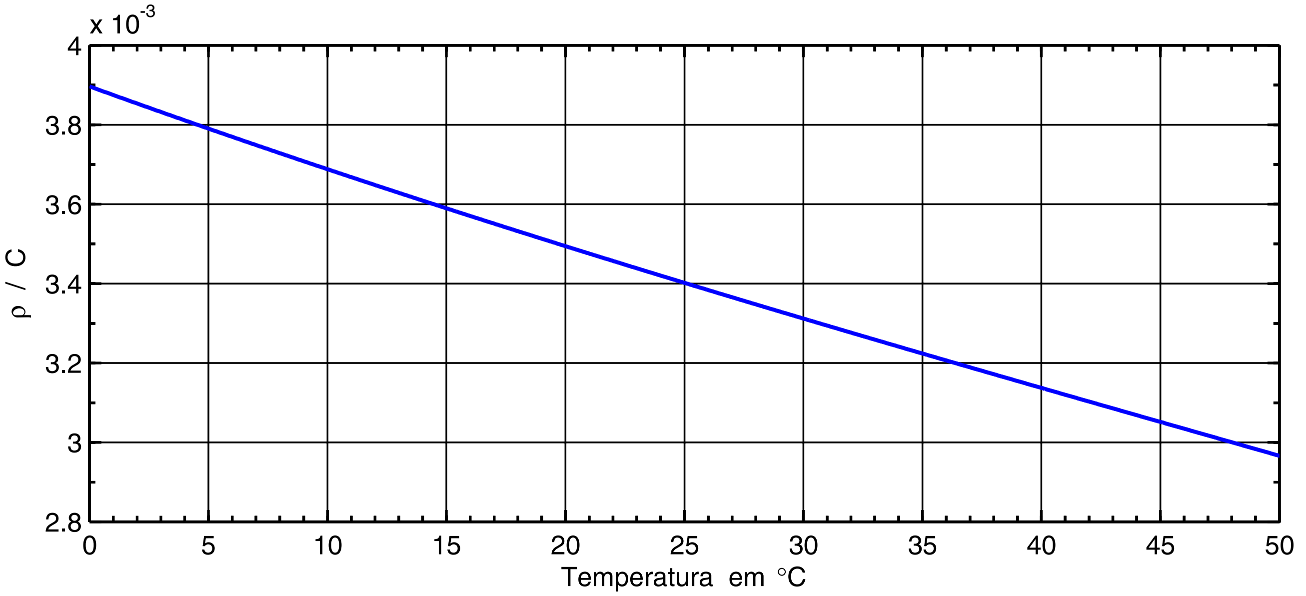

Fig. 19 – ρ / C, em função da temperatura. P = 1013 mb e U = 50 %.

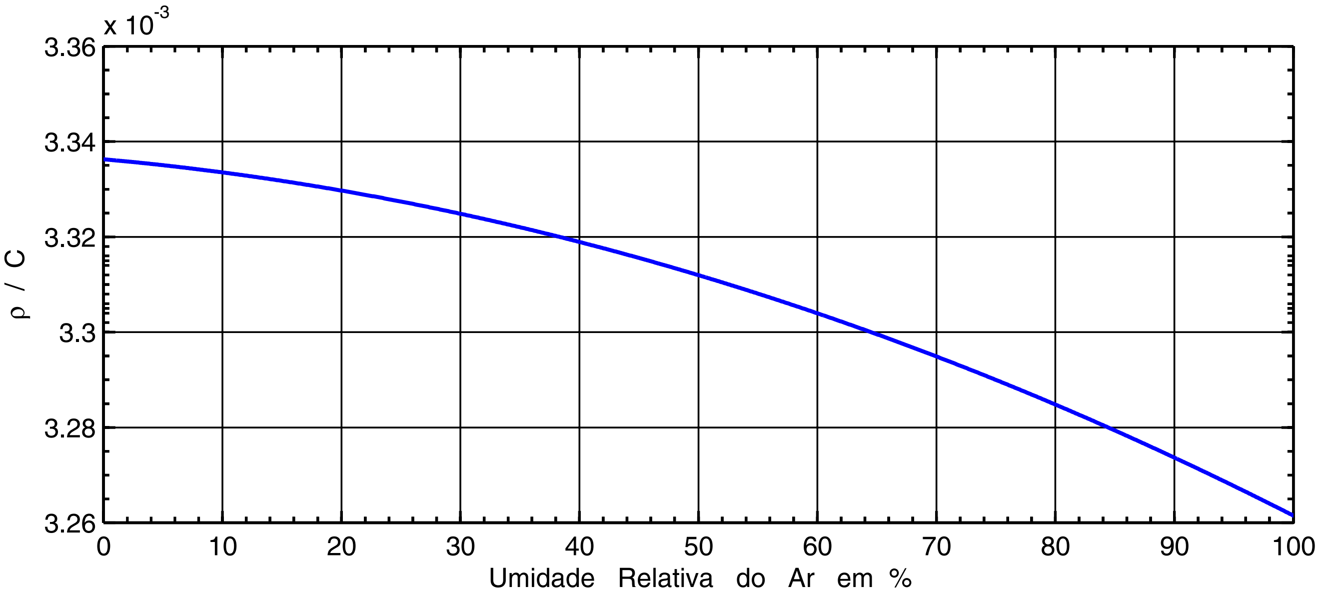

Fig. 20 – ρ / C, em função da umidade relativa. T = 30 °C e P = 1013 mb.

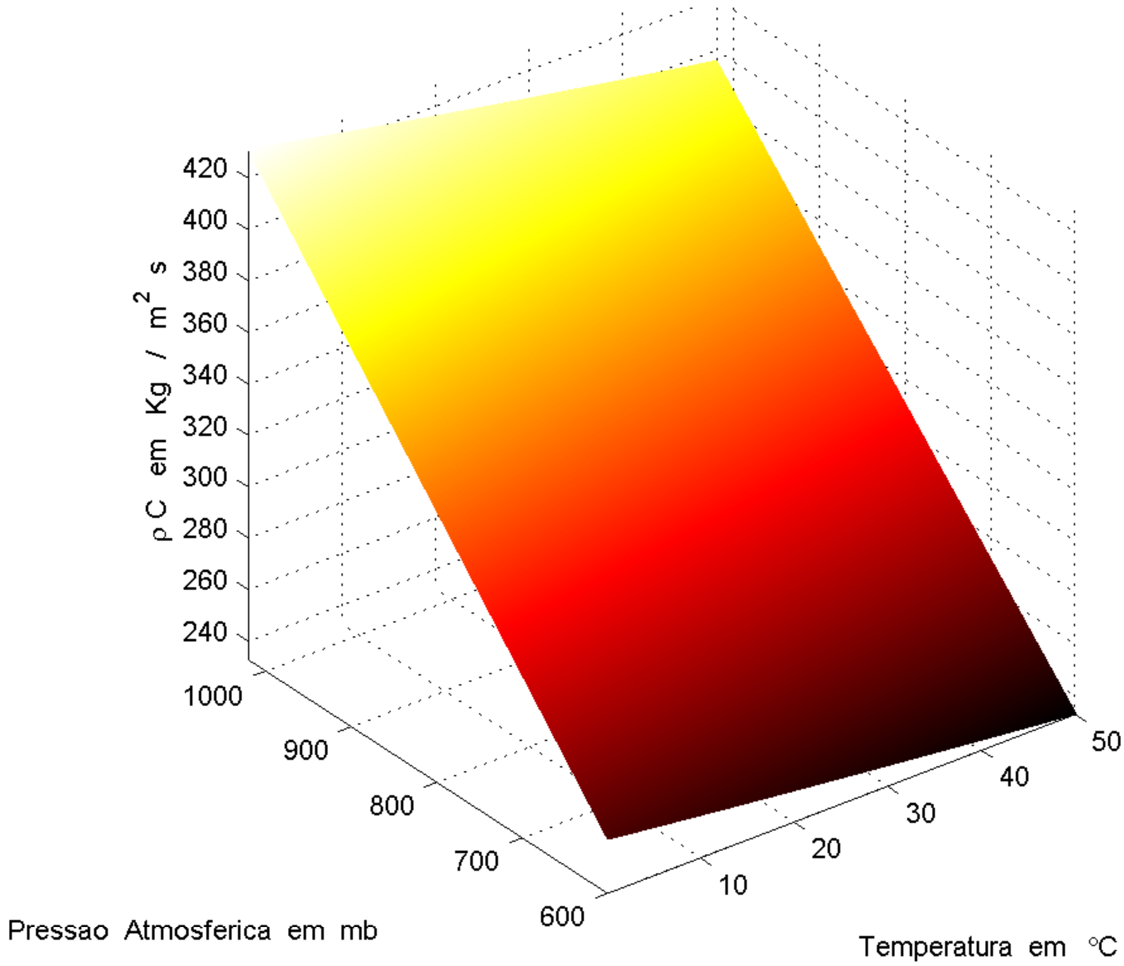

Fig. 21 – Impedância Característica, em função da pressão atmosférica e da temperatura. U = 50 %

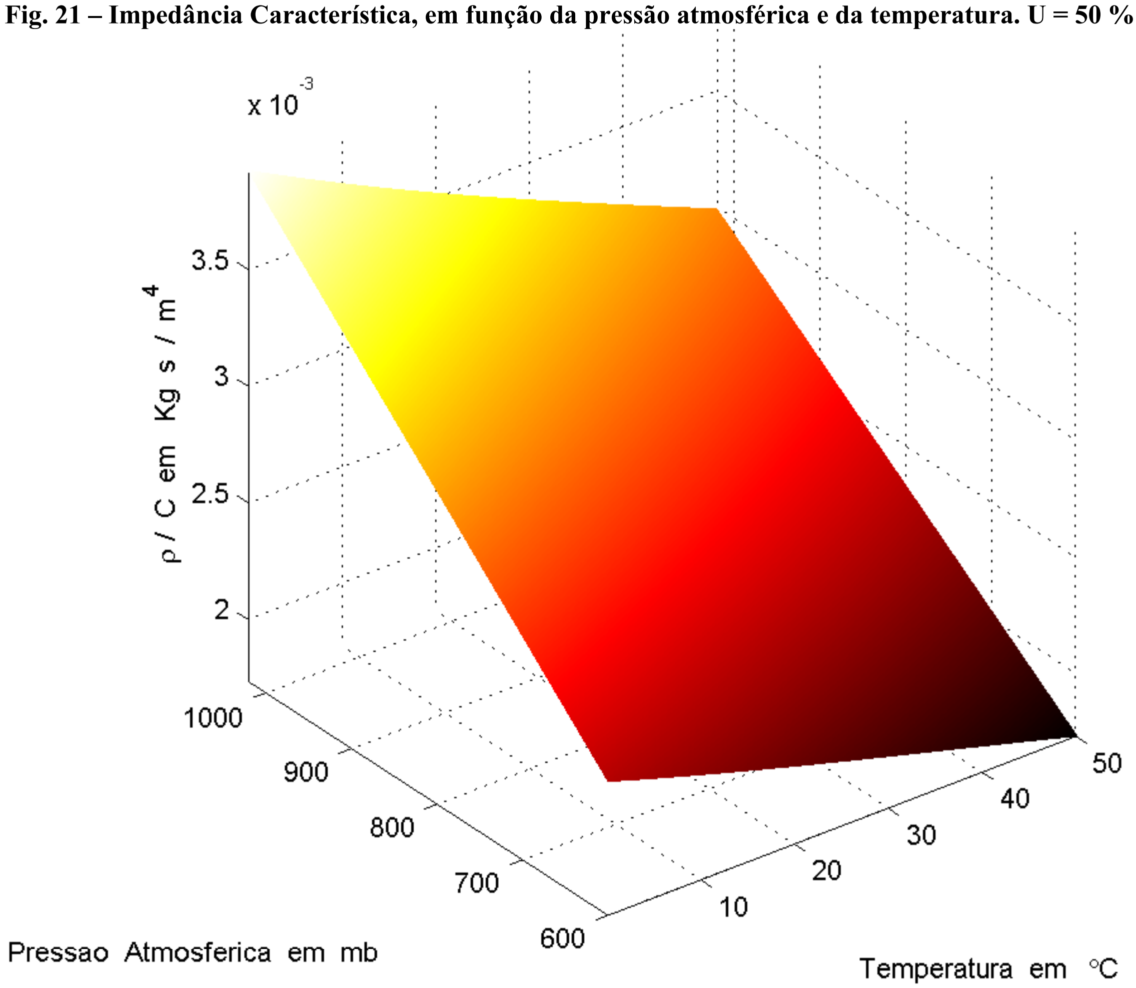

Fig. 22 – ρ / C, em função da pressão atmosférica e da temperatura. U = 50 %.

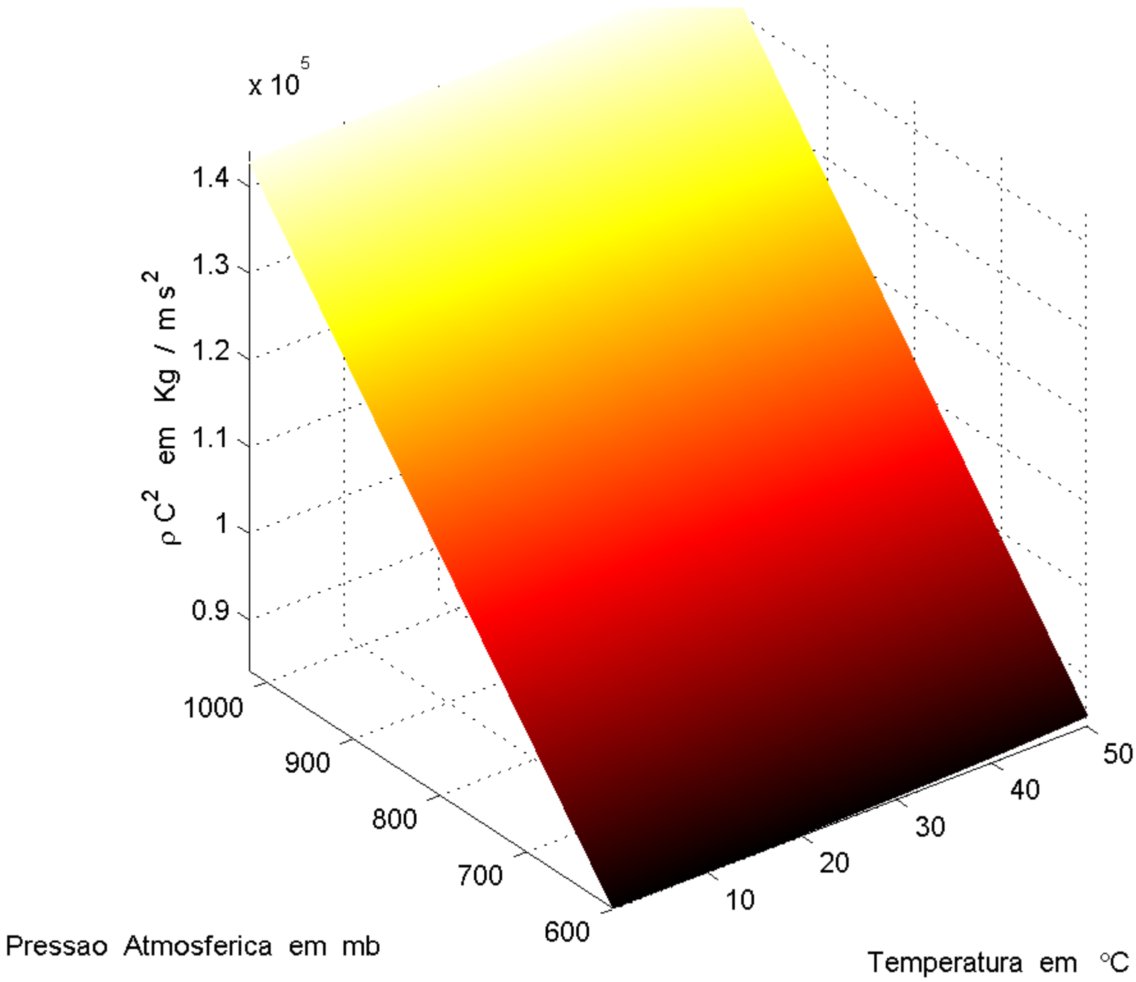

Fig. 23 – $\rho \cdot C^2$, em função da pressão atmosférica e da temperatura. U = 50 %

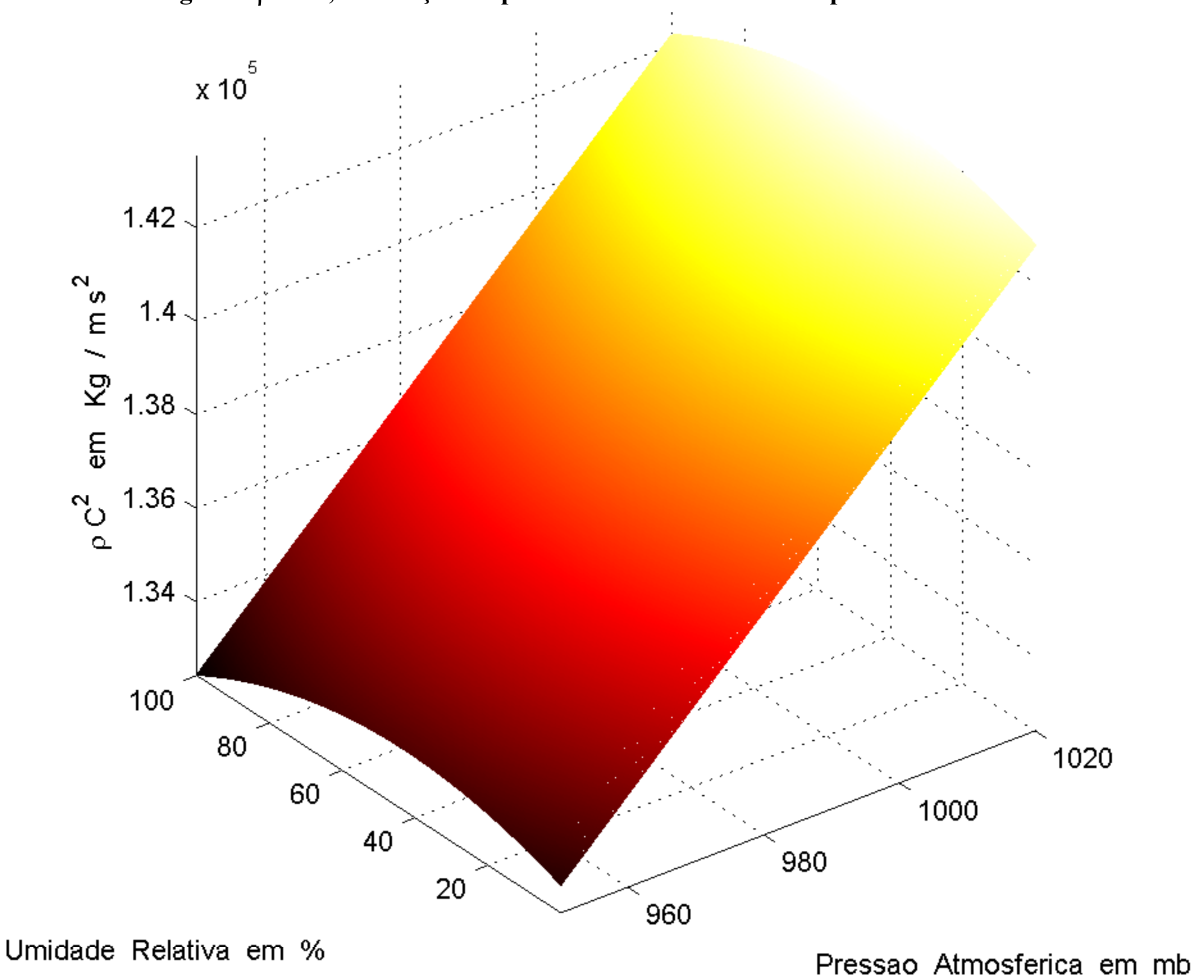

Fig. 24 – $\rho \cdot C^2$, em função da pressão atmosférica e da umidade. T = 30 °C

Bibliografia

Environmental Effects on the Speed of Sound
Dennis A. Bohn
Apresentado na 83ª Convenção da AES em Outubro de 1987 em N.Y.
Publicado no JAES Vol 36 Nº 4, em Abril de 1988
Disponível em http://rane.com/pdf/eespeed.pdf