

MISCELE DI ARIA E VAPORE D'ACQUA:

Analizziamo ora le proprietà delle miscele di aria e acqua.

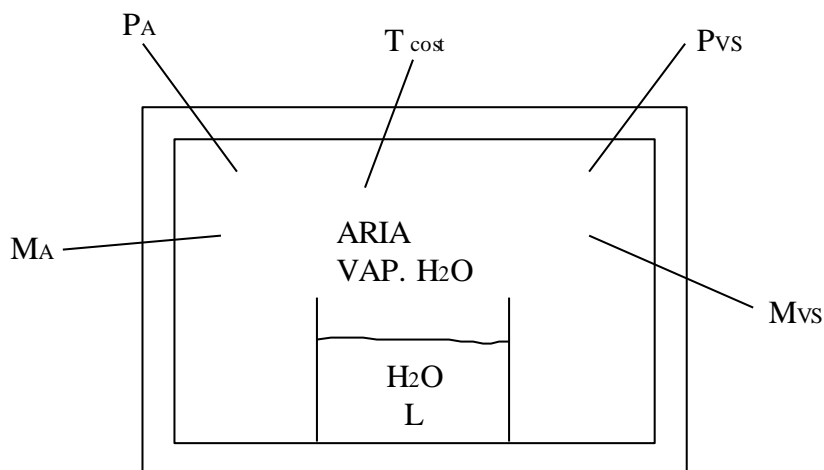
Consideriamo l'aria come un solo componente, perché la composizione dell'aria è assunta costante. In essa è presente anche una certa quantità di vapore d'acqua. L'acqua infatti può essere in parte liquida ed in parte sotto forma di vapore.

La fase gassosa della miscela è considerata una miscela di due gas ideali: aria e vapore acqueo; infatti il vapore presenta una pressione parziale molto piccola, così che è lecito trascurare il comportamento da vapore surriscaldato. La composizione della fase gassosa può variare, per effetto di evaporazione o condensazione di acqua. Quindi la massa di aria secca è considerata costante (perché l'aria non si crea né si distrugge a parte casi rari: ad esempio reazioni chimiche) mentre la massa di vapore cambia facilmente. Questo fatto spiega perché le grandezze specifiche non vengono riferite all'unità di massa della miscela, ma all'unità di massa dell'aria secca (si mantiene questa condizione anche per compatibilità con il passato e per comodità).

Tutte le applicazioni si basano sull'assunto che sia l'aria che il vapore non si influenzino reciprocamente. Questa ipotesi è quella espressa da Dalton. Essa si può considerare esatta nelle emissioni di gas perfetti.

Saturazione dell'aria:

Consideriamo il seguente esperimento: in presenza di aria inizialmente secca, poniamo su una bilancia un recipiente contenente acqua mantenendo pressione P e temperatura T costanti.



Dopo un certo periodo di tempo il livello di acqua nel contenitore sarà calato, cioè una certa massa di acqua allo stato liquido (L) sarà evaporata. Il livello di acqua nel contenitore continuerà a calare sempre più lentamente fino a rimanere costante. Perciò la bilancia misurerà una diminuzione della massa di acqua nel recipiente.

Questa esperienza mostra che se si mettono a contatto aria e acqua allo stato liquido, a

temperatura e pressione costanti, l'acqua evapora fino a che la pressione parziale del vapore saturo eguaglia la pressione di saturazione dell'acqua alla temperatura T alla quale si opera.

In altri termini la presenza d'acqua non influisce sulla quantità di acqua che evapora, ma soltanto sulla velocità del processo.

Quando l'acqua non evapora più si parla dunque di saturazione. Definiamo anche una pressione di saturazione, P_{vs} . Si osserva infatti che a ogni valore della temperatura ne corrisponde uno della pressione, come si può notare nella seguente tabella.

Temperatura dell'aria T	Pressione di vapore dell'aria satura P_s		Titolo di saturazione X
	mmHg	KPa	
-25	0,47	0,06	0,38
-20	0,756	0,102	0,63
-19	0,848	0,113	0,7
-18	0,938	0,125	0,77
-17	1,028	0,137	0,85
-16	1,125	0,150	0,93
-15	1,238	0,165	1,01
-14	1,358	0,181	1,11
-13	1,485	0,198	1,22
-12	1,628	0,217	1,34
-11	1,778	0,237	1,46
-10	1,943	0,259	1,6
-9	2,123	0,283	1,75
-8	2,318	0,309	1,91
-7	2,520	0,336	2,08
-6	2,753	0,367	2,27
-5	3,01	0,400	2,49
-4	3,270	0,436	2,69
-3	3,563	0,475	2,94
-2	3,870	0,516	3,19
-1	4,208	0,561	3,47
0	4,568	0,609	3,78
1	4,920	0,656	4,07
2	5,280	0,704	4,37
3	5,678	0,757	4,7
4	6,083	0,811	5,03
5	6,526	0,870	5,4
6	6,991	0,932	5,79
7	7,493	0,999	6,21
8	8,026	1,070	6,65
9	8,596	1,146	7,13
10	9,188	1,225	7,63
11	9,818	1,309	8,15

Temperatura dell'aria T	Pressione di vapore dell'aria satura P _s		Titolo di saturazione X
°C	mmHg	kPa	g _v /kg _a
12	10,493	1,399	8,75
13	11,206	1,595	9,35
14	11,963	1,595	9,97
15	12,759	1,701	10,6
16	13,599	1,813	11,4
17	14,491	1,932	12,2
18	15,444	2,059	12,9
19	16,441	2,192	13,8
20	17,484	2,331	14,7
21	18,602	2,480	15,6
22	19,779	2,637	16,6
23	21,017	2,802	17,7
24	22,300	2,977	18,8
25	23,702	3,160	20
26	25,150	3,353	21,4
27	26,672	3,556	22,6
28	28,285	3,771	24
29	29,965	3,995	25,6
30	31,784	4,232	27,2
31	33,618	4,482	28,8
32	35,575	4,746	30,6
33	37,638	5,018	32,5
34	39,806	5,307	34,4
35	42,078	5,610	36,6
36	44,449	5,926	38,8
37	46,954	6,260	41,1
38	49,572	6,609	43,5
39	51,317	6,975	46
40	55,198	7,358	48,8
41	58,197	7,759	51,7
42	61,355	8,180	54,8
43	64,640	8,618	58
44	68,098	9,079	61,3
45	71,706	9,560	65
46	75,464	10,061	68,9
47	79,409	10,587	72,8
48	83,504	11,133	77
49	87,810	11,707	81,5

Temperatura dell'aria T	Pressione di vapore dell'aria satura P _s		Titolo di saturazione X
°C	mmHg	KPa	g _v /K g _a
50	92,288	12,304	86,2
55	117,715	15,094	114
60	149,037	19,870	152
65	187,050	24,938	204
70	233,134	31,082	276
75	288,398	38,450	382
80	354,239	47,228	545
85	432,553	57,669	828
90	524,525	69,931	1400
95	625,618	83,409	3120
100	759,812	101,300	-

Questa tabella elenca alcuni parametri termodinamici della miscela termodinamica per

$$\phi = 1 \text{ e } P = 1,013 \text{ bar}$$

$$= p_v / p_{sat}$$

La quantità di acqua che evapora non dipende dalla quantità d'aria, ma è sempre la stessa.

Normalmente nelle abitazioni non è presente tutta la quantità di vapore che può possibilmente essere contenuta, ma in minor quantità. In altri termini:

$$M_v < M_{vs}$$

Dove M_v rappresenta la massa di vapore presente nell'ambiente e M_{vs} rappresenta la massa del vapore di saturazione.

L'umidità relativa e il grado igrometrico:

Dalle precedenti considerazioni possiamo ricavare le seguenti formule:

$$UR = M_v / M_{vs} = P_v / P_s$$

Dove UR è definita umidità relativa ed è uguale sia al rapporto tra la massa di vapore presente nell'ambiente e la massa di vapore di saturazione che al rapporto tra la pressione del vapore presente nell'ambiente e la pressione del vapore di saturazione.

La proporzionalità tra le masse e tra le pressioni, e quindi l'esattezza di questa formula, è assicurata dalla legge di Dalton.

Nel linguaggio corrente queste due frazioni sono chiamate in modo diverso:

$$M_v / M_{vs} = \text{UMIDITÀ RELATIVA}$$

che viene calcolata in percentuale: ad esempio $UR = 40\%$

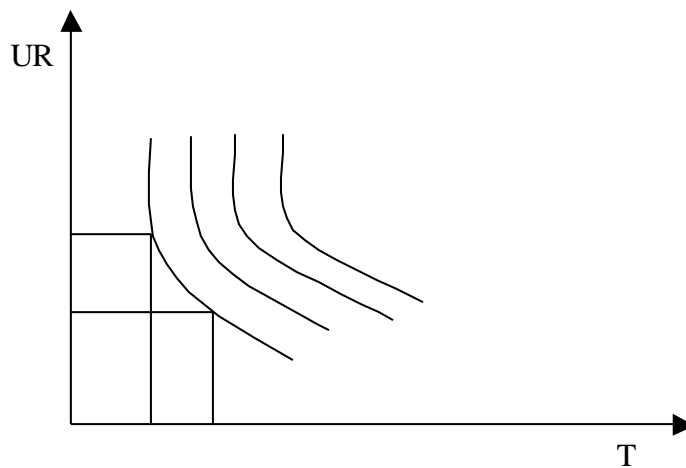
$$P_v / P_{vs} = \phi$$

dove φ è chiamato GRADO IGROMETRICO e ad esempio è indicato così: $\varphi = 0,40$, numero compreso tra 0 e 1.

In realtà questi due termini indicano la stessa cosa, cioè mi danno la misura immediata di quanto l'aria sia effettivamente prossima alla saturazione.

Il confort termoigrometrico:

Come obiettivi per la qualità ambientale di un ambiente dobbiamo considerare anche obiettivi termoigrometrici. Dobbiamo cioè decidere determinati valori di temperatura e di umidità relativa. Decideremo quindi una T_p e una UR_p , dove T_p è la temperatura di progetto e UR_p è l'umidità relativa di progetto. Queste due grandezze sono interdipendenti. Esistono linee dette di isoconfort che associano temperature e umidità relative differenti. Questo perché si può avere la stessa condizione di confort con umidità relative più basse e temperature più alte o umidità relative più alte e temperature più basse. A seconda della temperatura e dell'umidità relativa i locali sono destinati a un uso diverso.



Due parametri che influiscono la scelta sono:

- 1) MET: unità metabolica. 1 met è il metabolismo normale di una persona seduta a leggere, cioè il metabolismo di base. È perciò l'unità metabolica base (corrisponde a 200 W).
- 2) CLO: è l'unità standard. 1 clo è la resistenza termica tipica di una persona vestita "normalmente" (pantaloni, giacca, cravatta, camicia con manica lunga). È stata sviluppata come scienza per avere il confort sul posto di lavoro, perché si è dimostrato che se è garantito cresce il rendimento degli impiegati.

Salvo in alcuni casi se si dà un lieve disconfort si crea un miglioramento di rendimento (Ad esempio un camionista se è in un ambiente più fresco resta più sveglio. Questa è però un'eccezione alla regola).

Gli architetti, da progettisti, devono dare il maggior confort possibile.

Le linee di confort rappresentate nel grafico rimangono inscritte in un intervallo.

Il titolo X:

La definizione di umidità relativa correla molto bene con la nostra sensazione, ma male con il calcolo tecnico. Dal punto di vista tecnico si adopera una grandezza per quantificare l'umidità dell'aria. Essa è il titolo X, definito così:

$$X = M_V / M_A \quad (\text{kgv/kga})$$

dove M_V è la massa di vapore presente nell'aria e M_A è la massa di aria secca. Se non c'è aria secca X è $+\infty$.

X indica quanto vapore c'è nella miscela. Questa grandezza non va confusa con il titolo di vapore saturo. Questo titolo X è il rapporto tra pesi di sostanze chimiche diverse, non si tratta di un numero puro. Quindi non va confuso con il titolo di vapore saturo che invece è un numero puro. Inoltre questo titolo X non è confinato ad essere minore di 1, mentre ricordiamo che per il titolo di vapore saturo vale $X_{\text{vapore saturo}} < 1$.

Relazione tra il titolo X e il grado igrometrico ϕ :

Il vapore d'acqua qui non è saturo, ma talmente surriscaldato da poter essere considerato un gas perfetto.

$$X = M_V / M_A$$

Per le ipotesi precedentemente fatte, è lecito considerare aria e vapore acqueo come due gas ideali. Quindi possiamo scrivere l'equazione di stato dei gas perfetti separatamente prima per l'aria e poi per il vapore acqueo:

$$P_A V = M_A R_A T \quad \text{per l'aria}$$

$$P_V V = M_V R_V T \quad \text{per il vapore d'acqua}$$

$$M_V = (P_V V) / (R_V T) \quad \text{e} \quad M_A = (P_A V) / (R_A T)$$

Quindi:

$$M_A / M_V = (P_V / P_A) (R_A / R_V)$$

perché V e T sono le stesse e si elidono.

$$R = R_0 / \mu$$

dove μ è la massa molare del gas. Quindi:

$$R_A / R_V = (R_0 / 29) (18 / R_0) = 0,622$$

perché la massa molare dell'aria è 29 e la massa molare del vapore d'acqua è 18.

Lezione del 06/12/01 – ora: 14:30-16:30

Quindi:

$$X = 0,622 (P_V / P_A)$$

Il titolo è legato a un rapporto di pressioni e non più di masse. Questa relazione ci permette di calcolare il titolo a partire dalle pressioni parziali di vapore e di aria secca.

Dalla definizione di grado igrometrico si ricava:

$$P_V = \varphi P_{VS}$$

Sapendo che

$$P_V + P_A = P_{TOT}$$

dove P_{TOT} di solito è chiamata la pressione atmosferica, ricaviamo:

$$P_A = P_{TOT} - P_V$$

e quindi:

$$X = 0,622 (\varphi P_{VS}) / (P_{TOT} - \varphi P_{VS})$$

Questa formula consente di passare dal titolo al grado igrometrico e viceversa. Questa è un'equazione algebrica di I grado, dove:

$$X P_{TOT} - X \varphi P_{VS} = 0,622 \varphi P_{VS}$$

$$\varphi P_{VS} (0,622 + X) = X P_{TOT}$$

e perciò :

$$\varphi = (X P_{TOT}) / P_{VS} (0,622 + X)$$

Questa equazione consente di ricavare il grado igrometrico conoscendo il titolo.

Per calcolare il grado igrometrico φ devo conoscere la pressione di saturazione P_{VS} che dipende dalla temperatura. Essa la trovo sulle tabelle.

Gli aspetti energetici:

Le miscele di aria e vapore contengono energia. Posso perciò calcolare l'entalpia, cioè l'energia intrappolata in una certa quantità di miscela.

La massa di vapore di acqua può cambiare a seconda della quantità di vapore che condensa o evapora: non è perciò utile riferirsi all'unità di massa della miscela. Bisogna riferirsi all'unità di massa di aria secca, come facciamo anche per il titolo. Così anche per calcolare l'entalpia specifica ci riferiamo alla quantità di massa di aria secca presente nella miscela.

Possiamo perciò definire l'entalpia specifica come segue:

$$J = H / M_A$$

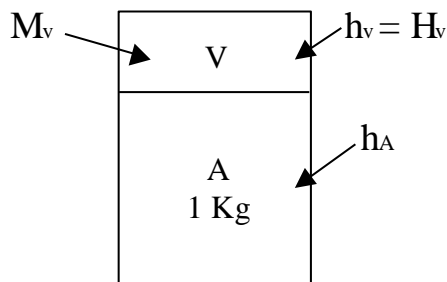
dove H è l'entalpia totale e M_A è la massa di aria secca. Il vantaggio è che M_A non varia. Si ha perciò:

$$J = h_A + h_V (M_V / M_A)$$

cioè:

$$J = H / M_A = h_A + X h_V$$

dove h_A è l'entalpia dell'aria secca, h_V è l'entalpia del vapore e X è il titolo.

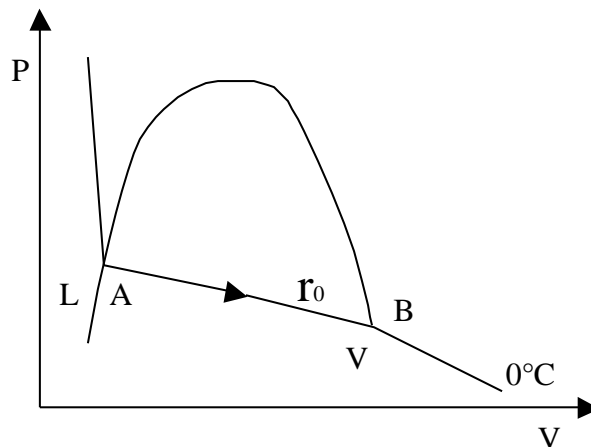


$$h_A = c_p t$$

dove t è una temperatura espressa in gradi centigradi e il calore specifico dell'aria è:

$$c_{pA} = 1 \text{ kJ / kg}$$

Questo dipende dal fatto che poniamo $h = 0$ per $t = 0$.



Lezione del 06/12/01 – ora: 14:30-16:30

r_0 è il calore latente di vaporizzazione a 0°C .

Possiamo perciò scrivere:

$$J = c_{PA} t + X (r_0 + c_{PV} t)$$

Sapendo che:

1) l'entalpia del liquido nel punto A è uguale a 0;

2) il calore specifico dell'aria è:

$$c_{PA} = 1 \text{ kJ / kgK}$$

3) $r_0 = 2500 \text{ kJ / kg}$

dove r_0 , calore latente di vaporizzazione dell'acqua a 0°C , può essere ricavato dalle tabelle delle proprietà termodinamiche dell'acqua e del vapore saturo e corrisponde alla variazione di entalpia tra A e B;

4) il calore specifico del vapore acqueo può essere assunto circa costante per temperature basse come quella ambientale:

$$c_{PV} \cong 1,9 \text{ kJ / kg}$$

Si ottiene:

$$J = t + X (2500 + 1,9 t)$$

che risulta essere il bilancio dell'energia del sistema.

Il diagramma psicrometrico:

Sul diagramma psicrometrico è possibile individuare gli stati di equilibrio delle miscele di aria e vapore d'acqua (che possono interessare anche il dimensionamento di condizionatori e impianti per il trattamento dell'aria).

Su tale diagramma, come si può osservare a pagina 25, sono indicati tre assi:

- 1) asse **X**, verticale, posto sul margine destro, sul quale si possono leggere i valori del titolo della miscela in g_v / Kg_a ;
- 2) asse **T**, orizzontale, sul quale si possono leggere le temperature di bulbo asciutto espresse in $^\circ\text{C}$;
- 3) asse **J**, posto diagonalmente sul margine sinistro, sul quale si possono leggere i valori dell'entalpia specifica in $\text{Kcal} / Kg_{\text{aria secca}}$.

Sul diagramma sono tracciate diverse curve; vediamo quali sono:

- rette verticali: sono rette a temperatura costante;
- rette orizzontali: sono rette a titolo costante;
- rette perpendicolari all'asse J: sono rette a entalpia specifica costante;
- la curva che delimita superiormente il diagramma è detta curva di saturazione e rappresenta punti aventi **grado idrometrico pari a 1** ($\varphi = 1$) e quindi stati di equilibrio di miscela satura. Al di sopra di questa curva non esistono stati fisici reali. Le curve dello stesso tipo tracciate sul diagramma sono curve a grado igrometrico costante (il valore del grado igrometrico φ è indicato a fianco, in questo caso è indicato il valore in percentuale dell'umidità relativa);
- le altre rette inclinate indicano, come indicato nel diagramma a pagina 25, due cose diverse:
 - a) Le prime sono rette a volume specifico costante. Il valore del volume v è indicato a fianco della retta in m^3 / Kg ;
 - b) Le altre sono rette di raffreddamento adiabatico, aventi J debolmente crescente all'aumentare di X. Sulle linee di raffreddamento adiabatico sono scritti i valori di temperatura corrispondenti all'intersezione di queste rette con la curva di saturazione. Tali valori sono detti "temperatura di bulbo umido", perché ciascuno di essi coincide con il valore di temperatura, in °C, segnato da un termometro con il bulbo avvolto in una garza bagnata, lambito da una corrente di aria umida che si trova in uno stato qualsiasi della curva di raffreddamento adiabatico in esame.

Sappiamo che tre proprietà intensive individuano lo stato fisico della miscela, ma su questo diagramma un punto ha solo due coordinate. Questo deriva dal fatto che la pressione totale è fissata a circa 1 bar (nel diagramma a pag. 25 è di 760 mmHg) e quindi è fissata la terza proprietà intensiva. La pressione considerata è di circa 1 bar per il fatto che solitamente la miscela d'aria e vapore d'acqua studiata è a pressione atmosferica. Se la pressione della miscela cambia, però, questo diagramma non va più bene.

