

PERMEABILITÀ AL VAPORE

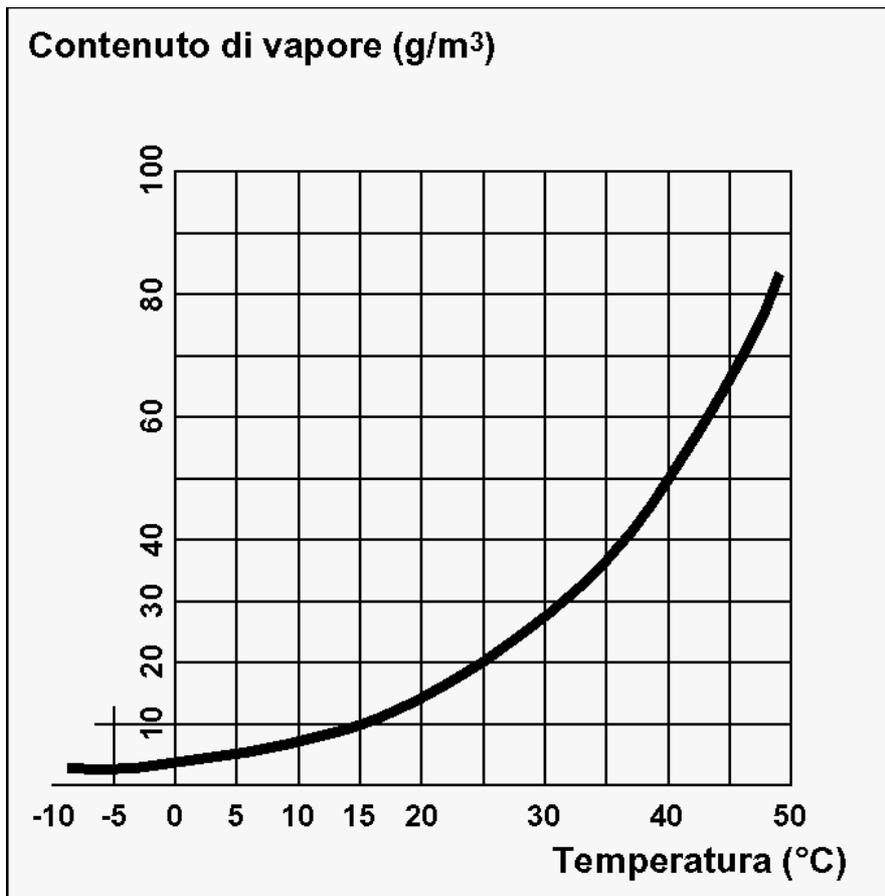
TERMODINAMICA DELL'ARIA UMIDA

L'aria può contenere in sospensione una certa quantità di vapore acqueo. Tale quantità dipende dalla temperatura e dalla pressione. A pressione costante, aumentando la temperatura dell'aria, aumenta la quantità di vapore che in essa può essere contenuta.

Per ogni temperatura esiste, dunque, un limite massimo e l'aria che si trova a contenere umidità al limite massimo si dice "satura". Una volta che questo limite viene raggiunto, ogni incremento di umidità fornito all'aria non può essere recepito e si ha una precipitazione del vapore sotto forma di condensa.

La (fig.60) mette in relazione il contenuto di vapore (grammi/m³) con la temperatura dell'aria (°C) in condizioni di saturazione. Come si può notare, più bassa è la temperatura minore è la quantità di vapore che può contenere l'aria.

Figura 60: variazione delle condizioni di saturazione in funzione della temperatura



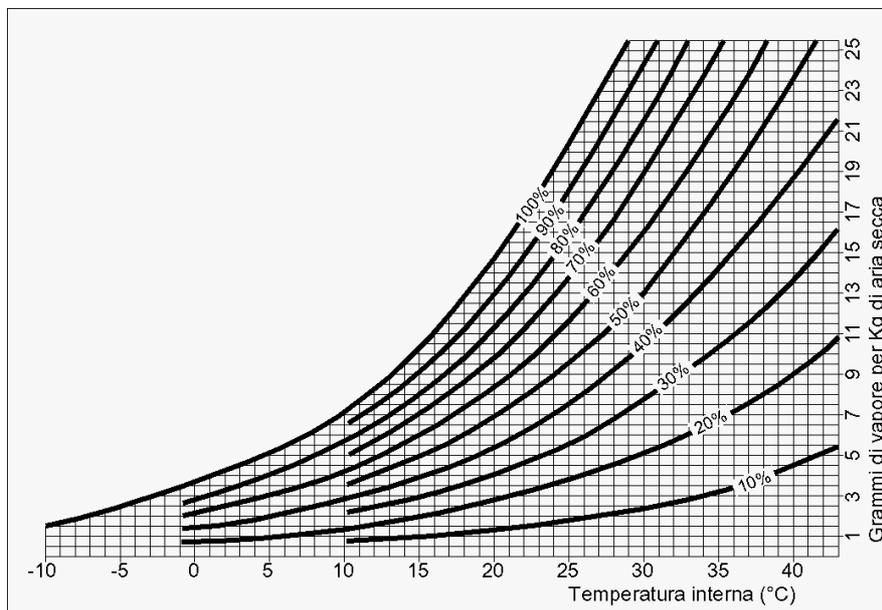
In un ambiente in condizioni normali l'aria non è saturata ma contiene un certo peso di vapore (p_r) inferiore al peso (p_s) che conterrebbe in condizione di saturazione.

Questa condizione di umidità dell'aria viene detta UMIDITÀ RELATIVA (U_r) e viene espressa in percentuale rispetto a quella assoluta. Dire, quindi, che a una certa temperatura T l'aria contiene l'80% di umidità relativa significa che essa contiene l'80% della quantità massima di vapore acqueo che può essere contenuto a quella temperatura.

Se in un ambiente, che ha una certa umidità relativa, si fa diminuire la temperatura l'umidità relativa man mano aumenta fino a raggiungere il valore di saturazione (100%). In questo momento si vedrà apparire l'acqua sulla parete. La temperatura alla quale si ha l'inizio della formazione di acqua si chiama "TEMPERATURA DI CONDENZA" o "TEMPERATURA DI RUGIADA"

La "TEMPERATURA DI CONDENZA" può essere ricavata da un diagramma di MOLLIER conoscendo la temperatura interna dell'aria e la percentuale di umidità (UMIDITÀ RELATIVA) in essa contenuta (fig. 61).

Figura 61: diagramma di Mollier



Tutto quanto detto innanzi presuppone la pressione costante. Si possono rifare tutte le considerazioni precedenti mantenendo costante la temperatura e facendo variare la pressione. La pressione a cui si trova il vapore contenuto nell'aria, a una data temperatura, si chiama **PRESSIONE PARZIALE** (p_r). Quando a una data temperatura si è in condizioni di saturazione la pressione del vapore viene detta **PRESSIONE DI SATURAZIONE** (p_s).

Il rapporto $\frac{p_r}{p_s} = U_r$ (in %) rappresenta l'Umidità relativa.

La tabella 3 riporta i valori delle pressioni di saturazione del vapore acqueo P_s (kPa) in funzione della temperatura.

Tabella 62: pressione di saturazione del vapor d'acqua P_s (kPa) in funzione della temperatura

°C	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
24,0	2,991	3,009	3,028	3,046	3,065	3,083	3,102	3,121	3,140	3,159
23,0	2,814	2,831	2,849	2,866	2,884	2,901	2,919	2,937	2,955	2,973
22,0	2,646	2,663	2,679	2,696	2,712	2,729	2,746	2,763	2,780	2,797
20,0	2,338	2,352	2,367	2,382	2,397	2,412	2,427	2,442	2,457	2,472
19,0	2,196	2,209	2,223	2,237	2,251	2,266	2,280	2,294	2,309	2,423
18,0	2,061	2,074	2,087	2,104	2,114	2,127	2,141	2,154	2,168	2,182
17,0	1,934	1,947	1,959	1,972	1,984	1,997	2,010	2,022	2,350	2,048
16,0	1,814	1,826	1,838	1,850	1,861	1,873	1,885	1,898	1,910	1,922
15,0	1,701	1,712	1,723	1,734	1,746	1,757	1,768	1,780	1,791	1,803
14,0	1,594	1,605	1,615	1,626	1,636	1,647	1,658	1,668	1,679	1,690
13,0	1,493	1,503	1,513	1,523	1,533	1,543	1,553	1,563	1,574	1,584
12,0	1,398	1,408	1,417	1,426	1,436	1,445	1,455	1,464	1,474	1,484
11,0	1,309	1,317	1,326	1,335	1,344	1,353	1,362	1,371	1,380	1,389
10,0	1,224	1,232	1,241	1,249	1,257	1,266	1,274	1,283	1,291	1,300
9,0	1,145	1,152	1,160	1,168	1,176	1,184	1,192	1,200	1,208	1,216
8,0	1,070	1,077	1,084	1,092	1,099	1,107	1,114	1,220	1,129	1,720
7,0	0,999	1,006	0,013	1,020	1,027	1,034	1,041	1,048	1,055	1,062
6,0	0,933	0,939	0,946	0,952	0,959	0,965	0,972	0,979	0,986	0,992
5,0	0,871	0,877	0,883	0,889	0,895	0,901	0,907	0,914	0,920	0,926
4,0	0,812	0,818	0,823	0,829	0,835	0,841	0,847	0,853	0,858	0,864
3,0	0,757	0,762	0,768	0,773	0,779	0,784	0,790	0,795	0,801	0,806
2,0	0,705	0,71	0,715	0,720	0,726	0,731	0,736	0,741	0,746	0,752
1,0	0,657	0,662	0,666	0,671	0,676	0,681	0,686	0,690	0,695	0,700
0,0	0,611	0,616	0,620	0,621	0,629	0,634	0,638	0,643	0,647	0,652
-1,0	0,563	0,568	0,572	0,577	0,582	0,587	0,592	0,596	0,601	0,606
-2,0	0,518	0,522	0,527	0,531	0,535	0,540	0,544	0,549	0,554	0,558
-3,0	0,476	0,480	0,484	0,488	0,492	0,497	0,501	0,505	0,509	0,514
-4,0	0,438	0,441	0,445	0,449	0,453	0,457	0,460	0,464	0,468	0,472
-5,0	0,402	0,405	0,409	0,412	0,416	0,419	0,423	0,427	0,430	0,434
-6,0	0,369	0,172	0,375	0,378	0,382	0,385	0,388	0,392	0,395	0,398
-7,0	0,338	0,141	0,344	0,347	0,350	0,353	0,356	0,359	0,363	0,388
-8,0	0,310	0,313	0,316	0,318	0,321	0,324	0,327	0,330	0,332	0,315
-9,0	0,284	0,286	0,289	0,292	0,294	0,297	0,299	0,302	0,305	0,307
-10,0	0,260	0,262	0,265	0,267	0,269	0,272	0,274	0,277	0,279	0,281

LA CONDENSAZIONE DEL VAPORE NELLE COSTRUZIONI

Due cause consentono il verificarsi di fenomeni di condensa sulle pareti degli edifici:

- 1) raggiungimento di elevati valori di umidità relativa dell'aria interna che creano, in prossimità dei muri, il verificarsi delle condizioni di rugiada;
- 2) crearsi, all'interno della parete, delle condizioni di temperatura e pressioni tali da raggiungere le condizioni di rugiada.

Questi fenomeni di condensazione comportano danni che possono compromettere sia la vivibilità degli ambienti da esse delimitati sia le caratteristiche prestazionali delle stesse. In particolare il fenomeno della condensa provoca la riduzione del grado di isolamento della parete a causa dalla umidità in essa contenuta. Per studiare il fenomeno della condensa vengono usati due parametri:

- COEFFICIENTE DI CONDUCIBILITÀ' DEL VAPORE O PERMEABILITÀ' (δ) misura la quantità di vapore (in Kg) che attraversa lo spessore di 1 metro di un certo materiale su una superficie di 1 m² e per una differenza unitaria di pressione di vapore.
- COEFFICIENTE DI RESISTENZA AL PASSAGGIO DEL VAPORE (μ) indica quanto la resistenza al passaggio del vapore di un certo materiale è superiore a quella dell'aria a parità di spessore e di temperatura.

Il coefficiente μ rappresenta una caratteristica dei materiali da costruzione e come tale va determinato mediante prove sperimentali di laboratorio.

Per l'aria, naturalmente, si ha $\mu = 1$.

La tabella 63 indica il valore di permeabilità per i laterizi e i calcestruzzi confrontandoli con la densità e la permeabilità dei materiali stessi.

Il valore di μ , e conseguentemente della densità δ è legato alla densità dei materiali. Per i laterizi la presenza di camere d'aria rende problematica la determinazione di μ . Se la dimensione (nel senso del flusso del vapore) non supera i cm 3, si può considerare il vuoto come occupato dallo stesso laterizio. Per valori superiori bisogna valutare separatamente il materiale e l'aria.

Tabella 63: Confronto fra i valori δ e μ di murature (compresi i giunti)

Materiale	Foratura (%)	Massa volumica ρ (kg/m ³)	Resistenza μ –	Permeabilità δ (kg/msPa) • 10 ⁻¹²
Muratura in elementi pieni di laterizio	10	1600	8	23,44
Muratura in elementi semipieni di laterizio	45	1000	6	31,25
Muratura in elementi in elementi forati di laterizio	65	600	5	37,25
Setti in c. a.	–	2400	100	1,88
Blocchi cavi (cls di argilla espansa)	–	700	7	26,79

Tabella 64: Valori del coefficiente di resistenza al passaggio del vapore μ per alcuni materiali da costruzione.

Materiale	Densità Kg/m³	Coefficiente di resistenza al passaggio del vapore
Intonaco di		
– Malta di calce e cemento	–	15
– Malta di cemento	–	19
– Malta di gesso e calce	–	11,5
– Gesso (rasatura)	–	6,2
Calcestruzzo		
– Pesante	–	80 ÷ 100
– Di pomice o scorie o lapillo	400 ÷ 800	7
– Cellulare	–	7
– Di argilla espansa (blocchi cavi)	–	7 ÷ 10
Cemento amianto compresso	–	50
Cartone e gesso	–	6
Murature in:		
– Klinker	2050	384 ÷ 469
– Mattoni pieni o forati	1360	6 ÷ 6,8
	1530 ÷ 1860	9,3 ÷ 10
Fibre vegetali o minerali	–	1,2
Materiali schiumosi:		
Polistirolo	10	10 ÷ 50
	20	40 ÷ 100
	40	80 ÷ 210
Poliuretano	–	50 ÷ 100
Cartonfeltro bitumato.	500 g/m ²	3640 ÷ 18280
Foglio di cloruro di polivinile.	25 g/m ²	50.000
Spalmatura di bitume.	-	80.000
Cartonfeltro bitumato ricoperto	1500 ÷ 2000 g/m ²	80.000
Foglio di polietilene	–	100.000
Foglio di alluminio	≥ 125 g/m ²	praticamente infinito

IL PROCEDIMENTO DI GLASER

Il vapore acqueo presente in un ambiente (tab. 65) tende a muovere da una zona in cui la pressione di vapore è più elevata ad un'altra in cui tale pressione è meno elevata.

Tabella 65: Produzione medie di vapore all'interno di una abitazione

Singole sorgenti di produzione di vapore (produzione media oraria in kg/h)	Vapore prodotto (kg/h)
Persona a riposo	0,040
Persona in attività moderata	0,055
Cucina (fornello elettrico senza scarico all'esterno)	0,700
Cucina (fornello a gas senza scarico all'esterno)	1,000
Stufa a gas (senza scarico all'esterno)	0,130 per kW
Sorgenti in abitazioni (produzione media giornaliera espressa in kg/h)	Vapore prodotto (kg/h)
5 persone a riposo (per 8 ore)	0,066
2 persone (attività moderata per 16 ore)	0,71
Cucina	0,117
Lavaggio stoviglie	0,042
Lavaggio panni	0,187
Asciugamento indumenti	0,208
Igiene personale	0,021
Totale	0,712

Un diaframma (parete o solaio), che divide due ambienti a diversa temperatura e pressione, viene così attraversato da questo flusso (che di solito va dall'interno all'esterno) e passando attraverso i vari strati incontra una "resistenza" che è direttamente proporzionale allo spessore del muro e alle caratteristiche di impermeabilità del materiale e quindi al valore di " μ ".

Per un corretto dimensionamento del diaframma dal punto di vista igrometrico è necessario allora conoscere:

- Temperatura all'interno di ogni singolo strato.
- Pressione parziale all'interno di ogni strato.
- Pressione di saturazione alle varie temperature.
- Caratteristiche termiche dei materiali.

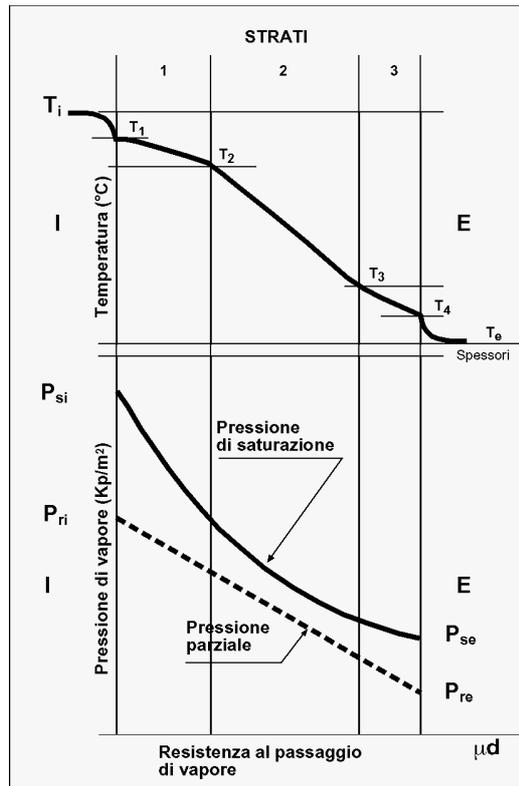
Una volta noti questi parametri è possibile verificare la possibilità di formazione di condensa confrontando la curva delle pressioni parziali con la curva delle pressioni di saturazione all'interno dei vari strati del muro. Possono verificarsi tre casi:

- A) le due curve non si incontrano;
- B) le due curve sono tangenti in un punto;
- C) le due curve si incontrano in più punti distinti.

La costruzione del diagramma di Glaser avviene come segue (fig.66).

Si determinano i valori delle temperature in ogni strato e si costruisce il relativo diagramma. Si determina un diagramma delle pressioni di saturazione (operando per punti) facendo uso della tabella. Si determina il diagramma delle pressioni parziali. Si possono quindi confrontare i due diagrammi di pressione.

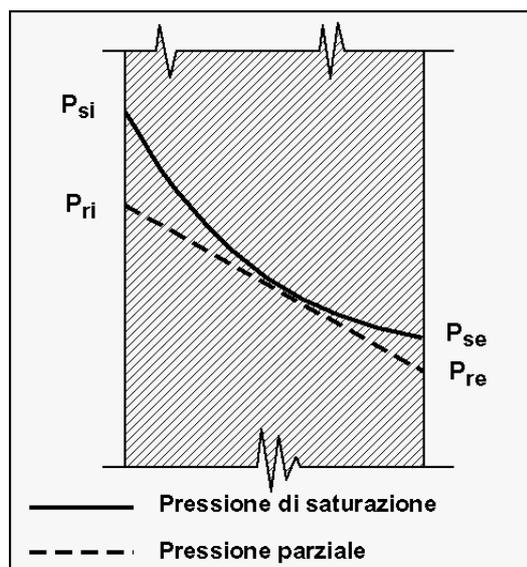
Figura 66: costruzione del diagramma di Glaser



Nel caso A (fig. 66) non vi sono pericoli di condensa nel muro.

Nel caso B (fig. 67) all'interno del muro si sono verificate le condizioni limite in un punto: una piccola diminuzione della temperatura o pressione può causare la condensa del vapore acqueo.

Figura 67

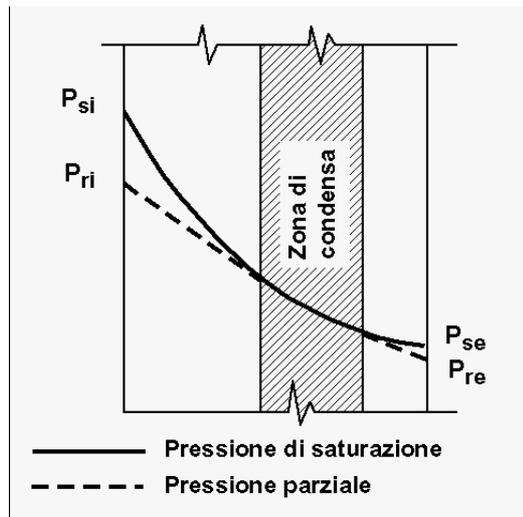


Caso B: le curve sono tangenti in un punto

Nel caso C (fig. 68) le curve tenderebbero a intersecarsi. Questo, però non può accadere perché non è possibile che la pressione parziale di vapore superi quella di saturazione. Si tracciano, allora, le tangenti alla curva delle pressioni di saturazione del punto di inizio al punto finale della zona di ipotetica intersezione.

Il tratto compreso tra la prima e l'ultima tangente è quella in cui si ha la formazione della condensa.

Figura 68



Caso C: le curve si toccano lungo un segmento

Per consentire la verifica su base annua con il metodo di GLASER sono state elaborate delle tabelle a umidità relativa all'aria esterna per una serie di località italiane.

Tabella 69 UDINE				Tabella 70 BOLOGNA			
	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	
Gennaio	2,8	76,5	572	1,2	92,0	613	
Febbraio	4,0	76,7	624	3,6	88,6	701	
Marzo	8,0	66,2	711	8,0	75,5	810	
Aprile	11,6	57,7	788	12,8	70,8	1047	
Maggio	16,8	69,2	1325	17,6	67,5	1359	
Giugno	19,6	72,6	1656	21,6	69,2	1787	
Luglio	22,0	69,3	1832	24,4	60,9	1860	
Agosto	21,9	75,7	1990	23,6	64,2	1870	
Settembre	19,2	72,3	1610	19,6	66,7	1522	
Ottobre	14,8	65,7	1107	13,6	76,0	1193	
Novembre	9,2	76,6	893	7,2	89,5	910	
Dicembre	3,2	68,5	527	2,4	91,4	864	

Tabella 71 PISA				Tabella 72 ANCONA			
	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	
Gennaio	6,4	69,1	685	5,6	88,3	801	
Febbraio	7,2	76,9	781	7,0	80,7	807	
Marzo	9,2	65,8	766	8,8	84,8	958	
Aprile	12,8	57,8	855	12,4	84,3	1211	
Maggio	16,0	73,3	1334	16,8	67,5	1290	
Giugno	19,6	56,8	1296	20,4	75,8	1818	
Luglio	23,2	55,6	1498	23,6	66,5	1942	
Agosto	22,4	58,9	1596	23,6	71,7	2094	
Settembre	19,2	63,0	1403	20,8	81,7	2009	
Ottobre	15,2	77,5	1340	16,0	83,6	1518	
Novembre	11,6	74,5	1018	10,4	89,3	1123	
Dicembre	3,6	77,3	803	7,6	79,6	829	

Tabella 73 ROMA				Tabella 74 NAPOLI			
	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	
Gennaio	7,6	78,3	816	8,4	73,7	811	
Febbraio	8,0	73,3	785	9,2	71,2	826	
Marzo	10,0	67,5	827	10,8	68,1	880	
Aprile	13,2	69,0	1045	13,6	70,8	1101	
Maggio	17,2	70,3	1379	17,2	67,7	1328	
Giugno	21,2	68,9	1737	21,2	70,5	1778	
Luglio	24,4	58,4	1802	23,6	60,4	1764	
Agosto	24,0	65,5	1958	23,6	67,1	1959	
Settembre	20,8	69,8	1716	20,8	70,5	1733	
Ottobre	16,0	73,5	1334	16,0	77,5	1407	
Novembre	12,4	78,6	1130	13,2	73,3	1110	
Dicembre	8,4	80,9	899	10,0	74,3	910	
Tabella 75 TORINO				Tabella 76 GENOVA			
	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	
Gennaio	-0,2	83,7	504	7,6	65,4	683	
Febbraio	1,6	82,5	566	9,2	73,4	855	
Marzo	7,2	53,2	541	11,6	62,9	860	
Aprile	11,0	55,5	729	14,0	62,8	1004	
Maggio	15,5	64,9	1143	17,6	70,1	1417	
Giugno	19,2	72,0	1603	20,8	64,7	1586	
Luglio	22,0	67,2	1777	23,6	71,3	2076	
Agosto	20,4	78,0	1870	23,5	68,3	1979	
Settembre	17,2	71,0	1395	21,6	76,1	1965	
Ottobre	11,6	80,6	1102	17,2	68,1	1338	
Novembre	5,6	87,8	799	11,6	63,9	874	
Dicembre	1,6	82,8	568	7,6	78,6	821	

		Tabella 77 MILANO			Tabella 78 BOLZANO		
		T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)
Gennaio		0,8	98,1	565	-0,8	59,5	343
Febbraio		2,8	83,1	621	2,0	62,1	438
Marzo		8,8	80,1	908	7,6	54,0	616
Aprile		12,8	75,9	1122	12,0	59,5	835
Maggio		16,8	67,8	1298	16,0	54,9	1180
Giugno		20,0	70,0	1778	19,2	69,3	1543
Luglio		22,8	60,8	1687	20,8	66,4	1632
Agosto		22,0	74,7	1976	19,6	72,6	1643
Settembre		18,8	87,3	1869	17,2	67,4	1324
Ottobre		12,8	93,7	1368	10,0	78,5	964
Novembre		7,2	90,2	917	4,4	79,2	683
Dicembre		2,0	90,2	637	0,0	62,0	379
		Tabella 79 VERONA			Tabella 80 TRIESTE		
		T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)
Gennaio		1,2	83,3	555	4,4	66,1	553
Febbraio		2,8	69,4	519	5,2	74,0	655
Marzo		7,2	76,9	781	9,2	69,6	810
Aprile		12,0	65,2	915	14,4	57,7	923
Maggio		16,0	67,0	1283	18,8	59,2	1286
Giugno		20,4	73,1	1709	21,8	66,3	1712
Luglio		23,2	69,8	1985	24,0	57,6	1720
Agosto		22,0	69,0	1825	23,2	57,7	1640
Settembre		18,4	73,4	1555	20,4	72,7	1744
Ottobre		13,2	73,0	1180	15,2	79,4	1373
Novembre		8,4	84,0	926	11,6	81,4	1113
Dicembre		2,4	90,0	654	6,4	68,6	660

Tabella 81 BRINDISI				Tabella 82 CATANIA			
	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)	
Gennaio	9,2	83,3	967	10,0	67,9	832	
Febbraio	10,0	64,9	795	10,4	73,0	918	
Marzo	11,6	70,4	960	12,0	69,1	967	
Aprile	14,0	69,3	1105	14,0	65,8	1116	
Maggio	18,0	70,7	1458	16,0	70,1	1446	
Giugno	22,0	58,6	1554	22,0	67,1	1779	
Luglio	24,8	73,4	2306	25,2	59,0	1891	
Agosto	24,8	68,8	2162	25,6	65,8	2139	
Settembre	22,0	80,0	2117	23,2	66,5	1895	
Ottobre	18,0	69,8	1440	18,4	68,0	1436	
Novembre	14,4	75,4	1235	15,2	68,6	1182	
Dicembre	11,2	80,4	1067	11,6	66,7	909	

Tabella 83 CAGLIARI			
	T_e (°C)	U_{r_e} (%)	P_{ve} (Pa)
Gennaio	9,2	81,6	947
Febbraio	9,2	74,4	864
Marzo	12,0	66,0	923
Aprile	13,8	70,3	1107
Maggio	17,6	65,7	1337
Giugno	21,2	64,9	1637
Luglio	23,6	66,1	1931
Agosto	24,0	65,9	1972
Settembre	22,0	68,1	1804
Ottobre	18,0	68,1	1404
Novembre	14,4	73,5	1203
Dicembre	11,6	81,2	1107