



POLITECNICO
MILANO 1863

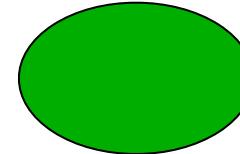
Sistemi Bifase

Prof. Ing. Alberto Salioni

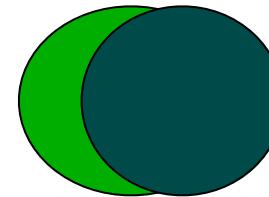
Sistema Eterogeneo

Sistema

Omogeneo
(un solo stato di aggregazione)

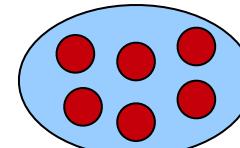


Eterogeneo

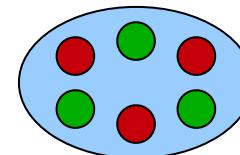


Sistema

Monocomponente
(una sola sostanza)



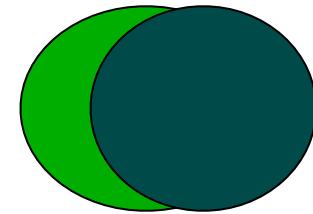
Multicomponente



Stato o fase?

Sistema Eterogeneo

Grandezze estensive del sistema eterogeneo
costituito da due stati (o fasi) α e β



$$m = m_\alpha + m_\beta$$

$$E = E_\alpha + E_\beta$$

$$e = \frac{m_\alpha}{m} e_\alpha + \frac{m_\beta}{m} e_\beta$$

Le grandezze
estensive specifiche
risultano dalla media
pesata sulle masse dei
valori delle grandezze
estensive specifiche
delle singole fasi

Sistema Eterogeneo

Grandezze estensive del sistema eterogeneo costituito
da due stati (o fasi) α e β

$$m = m_\alpha + m_\beta$$

$$x_\alpha = \frac{m_\alpha}{m} \qquad x_\beta = \frac{m_\beta}{m}$$

Frazione
massica

$$x = x_\alpha e_\alpha + x_\beta e_\beta \qquad x_\alpha + x_\beta = 1$$

$$e = (1 - x_\beta) e_\alpha + x_\beta e_\beta$$

Regola di Gibbs

$$V = C + 2 - F$$

V = n° di variabili INTENSIVE atte a descrivere il sistema

C = n° di componenti

F = n° di fasi

(Per il sistema monocomponente bifase V=1)

Pressione e temperatura non sono variabili indipendenti durante una transizione di fase.

Transizione di fase = passaggio da uno stato di aggregazione a un altro

$$dh = \delta q + v dP$$

La transizione di fase avviene a P costante, quindi: V=C+ 2-F

$$dh = \delta q$$

Sistema eterogeneo monocomponenete

Stati monofasi

Solido
Liquido
Aeriforme (Gas)

Stati Bifasi

Coesistenza di solido e liquido
Coesistenza di solido e aeriforme (vapore)
Coesistenza di liquido e aeriforme (vapore)

Stati Tripli

Coesistenza di solido, liquido e
aeriforme (vapore)

Sistema eterogeneo monocomponenete

LIQUIDO SOTTORAFFREDDATO

Liquido *NON* in procinto di evaporare

LIQUIDO SATURO

Liquido in procinto di evaporare

MISCELA SATURA LIQUIDO-VAPORE

VAPORE SATURO

vapore in condizioni di incipiente condensazione

VAPORE SURRISCALDATO

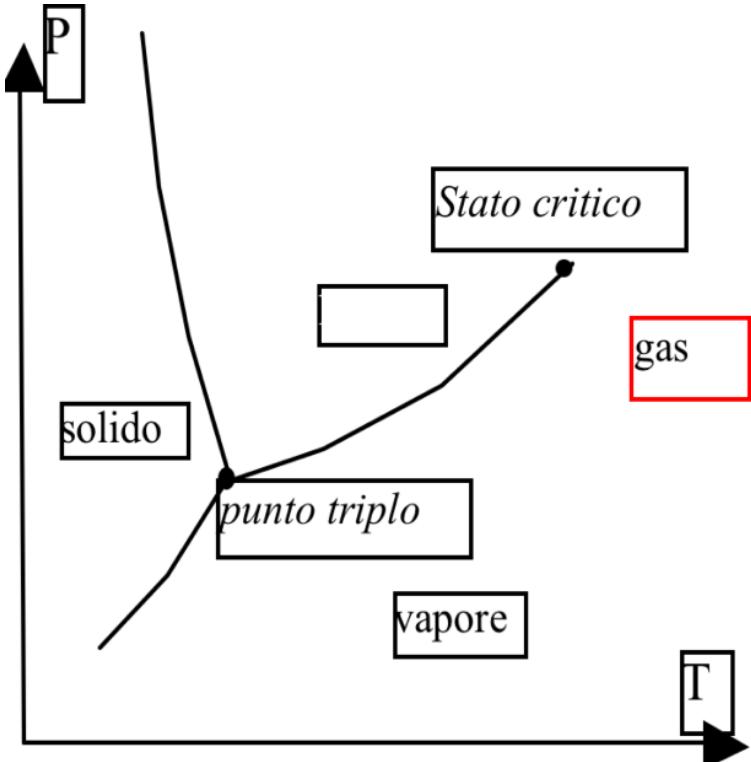
Vapore *NON* in procinto di condensare

TEMPERATURA DI SATURAZIONE

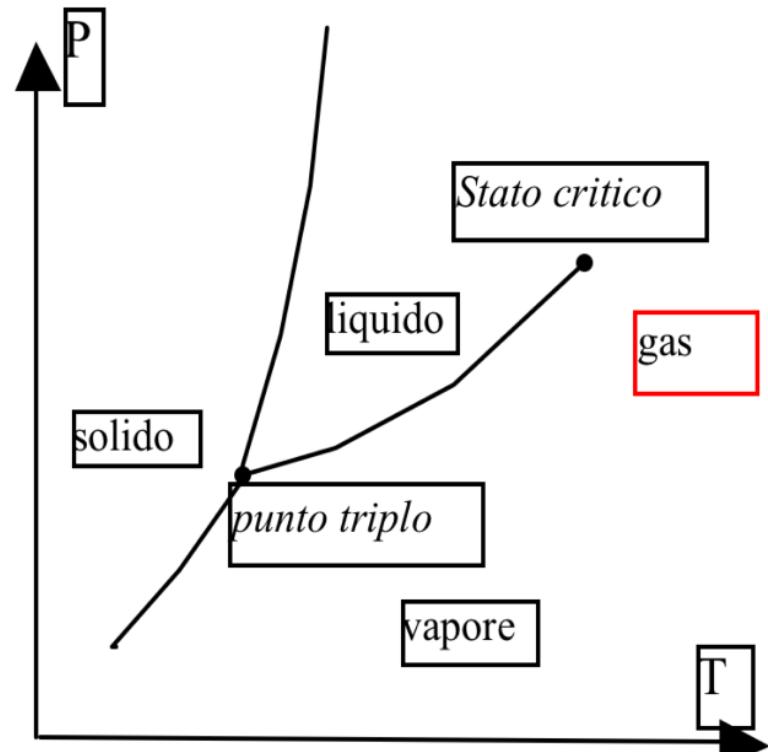
Temperatura alla quale una sostanza pura comincia ad evaporare, fissata la pressione

Diagramma PT

Sostanza monocomponente



Sostanze che solidificando
aumentano il volume



Sostanze che solidificando
diminuiscono il volume

Diagramma PT

Sostanza monocomponente

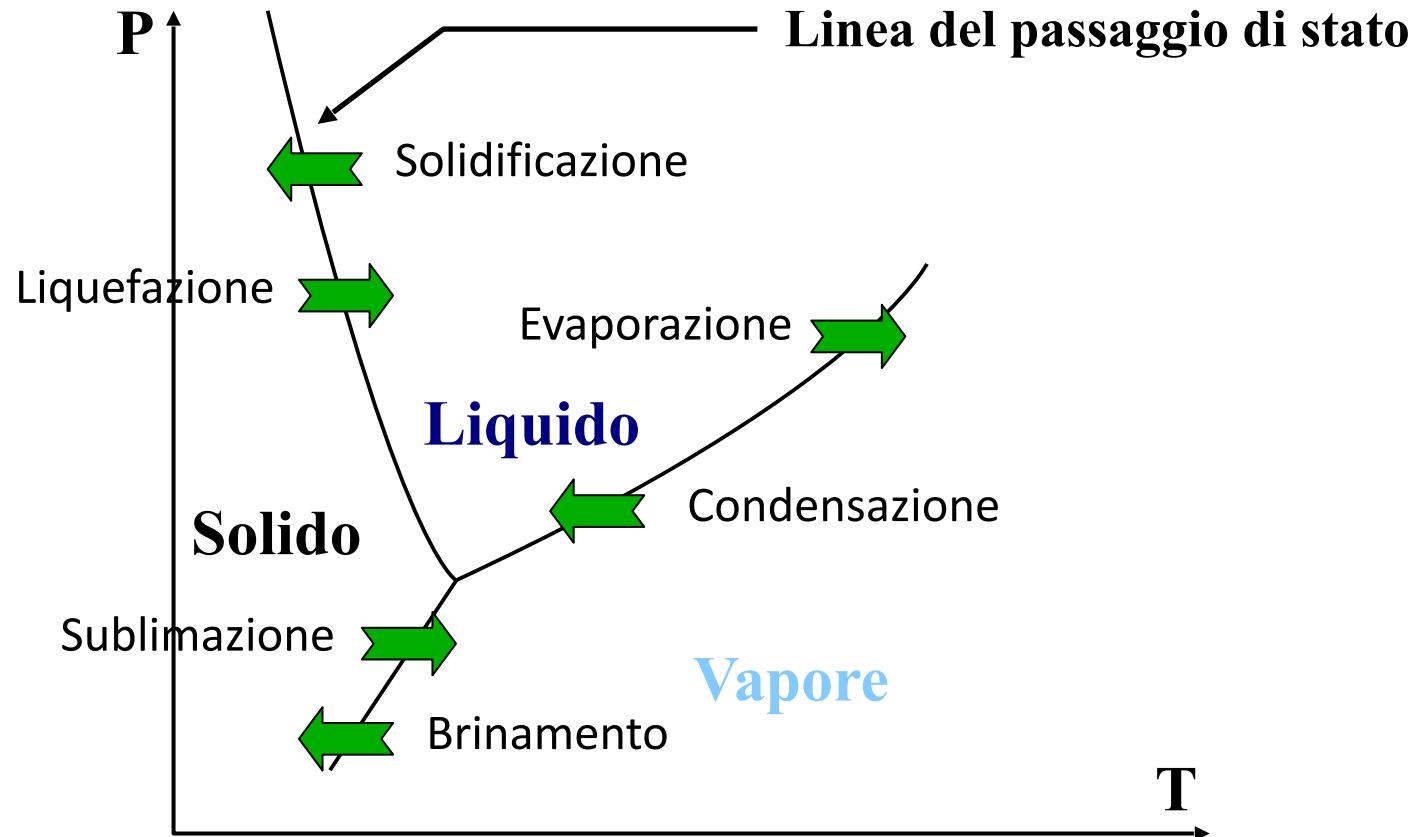


Diagramma PV

Sostanza monocomponente

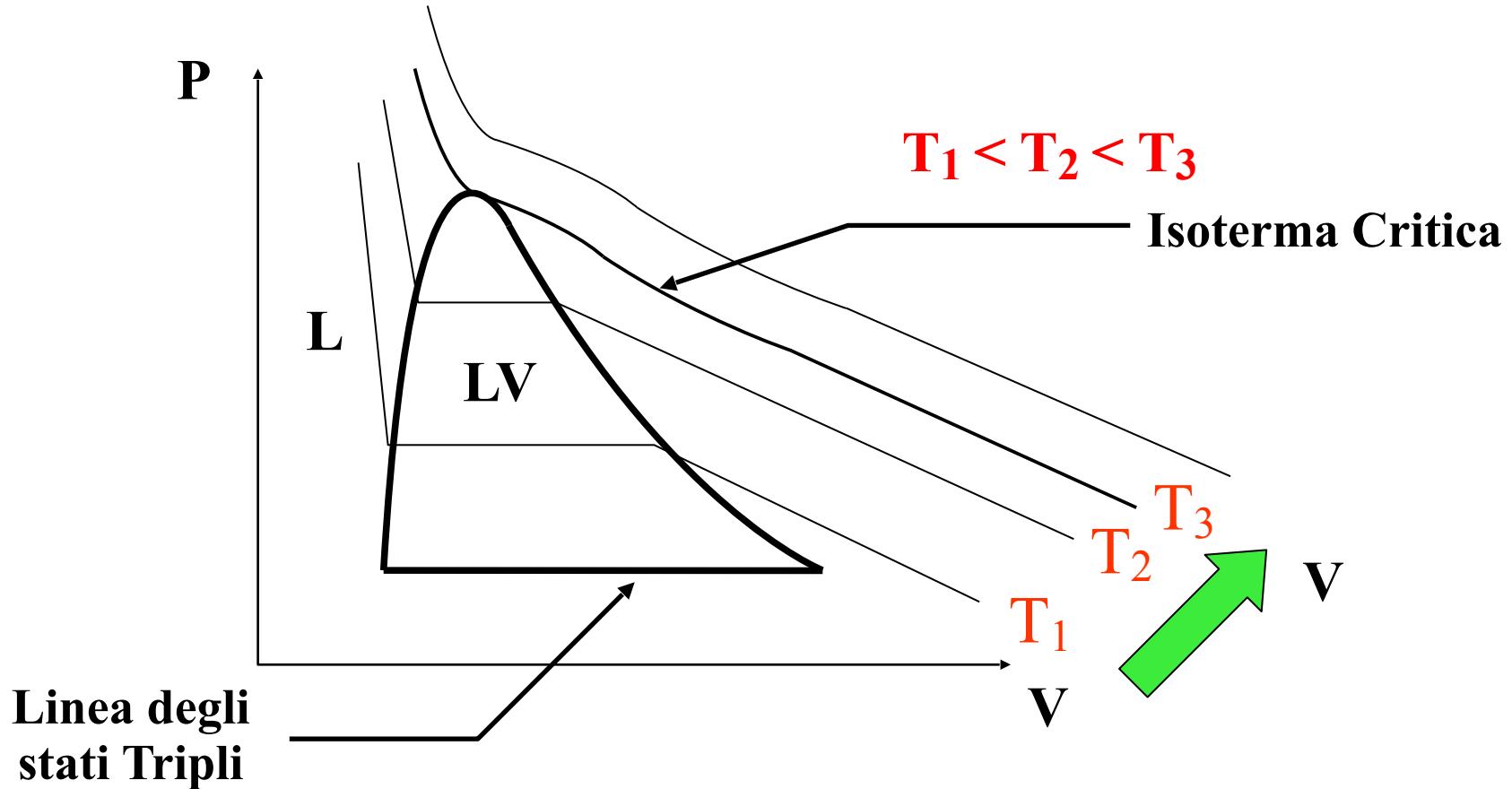


Diagramma Tv

Sostanza monocomponente

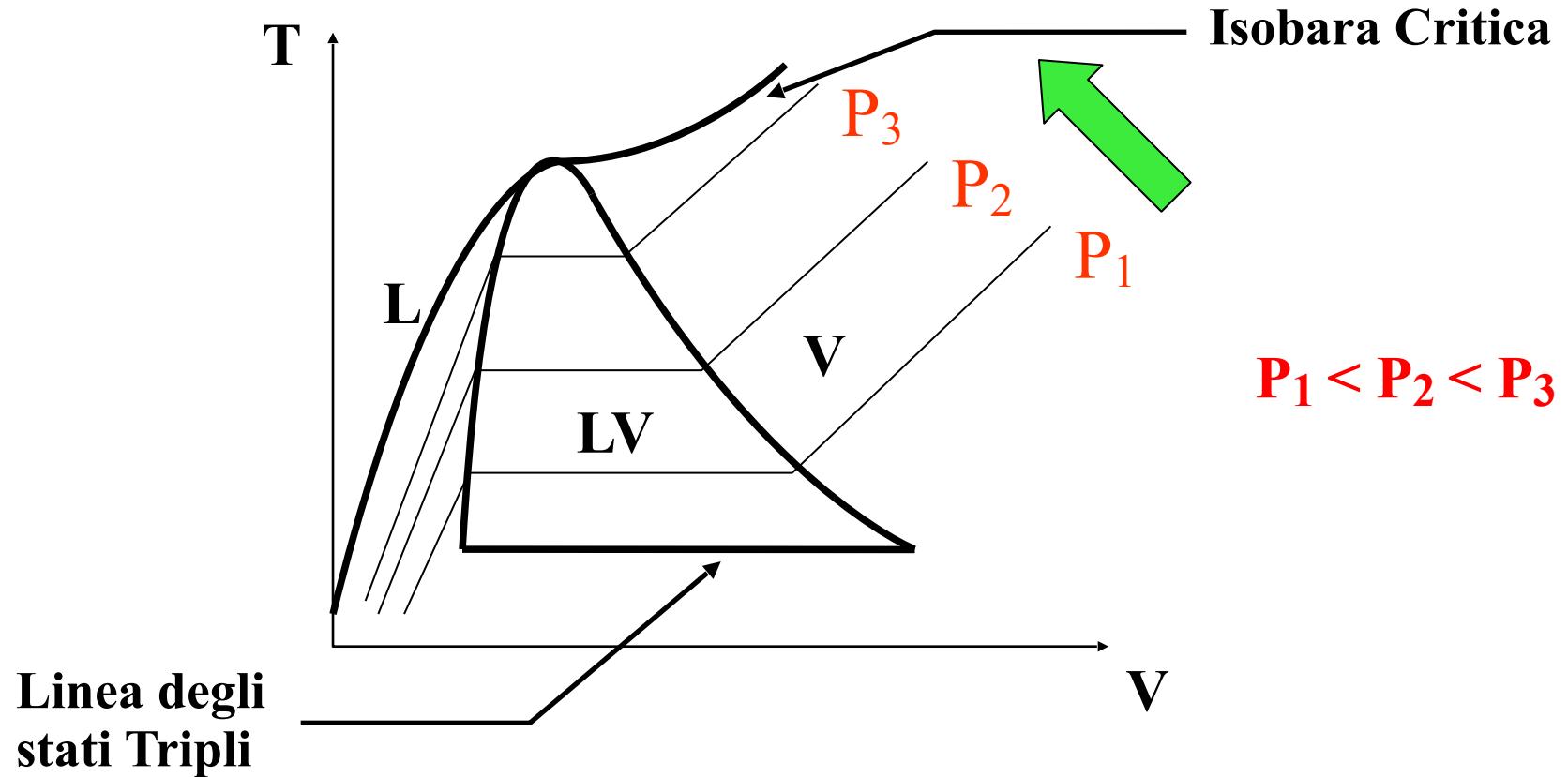


Diagramma PVT

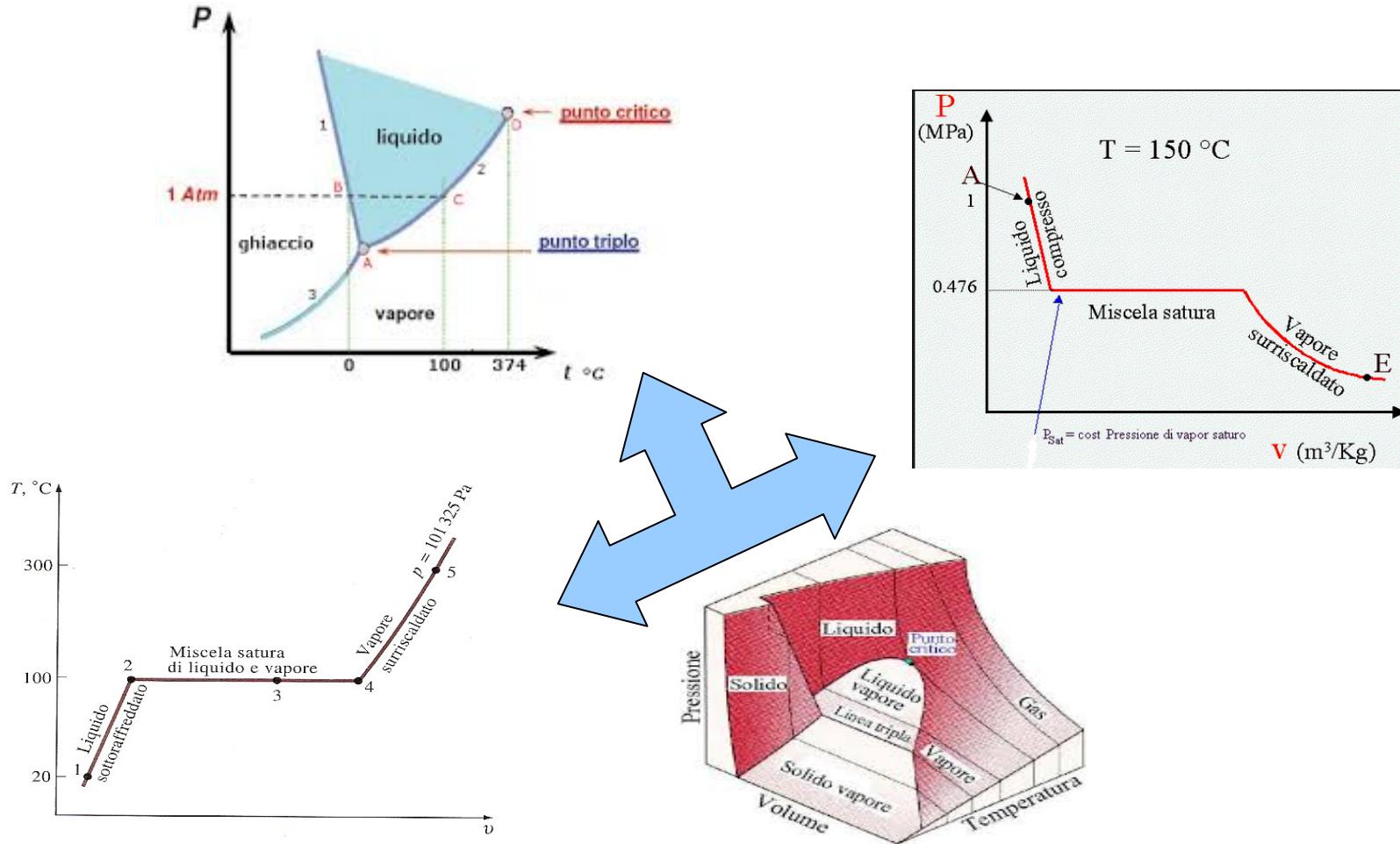


Diagramma PVT

Sostanza monocomponente che solidificando aumenta il volume come l'Acqua

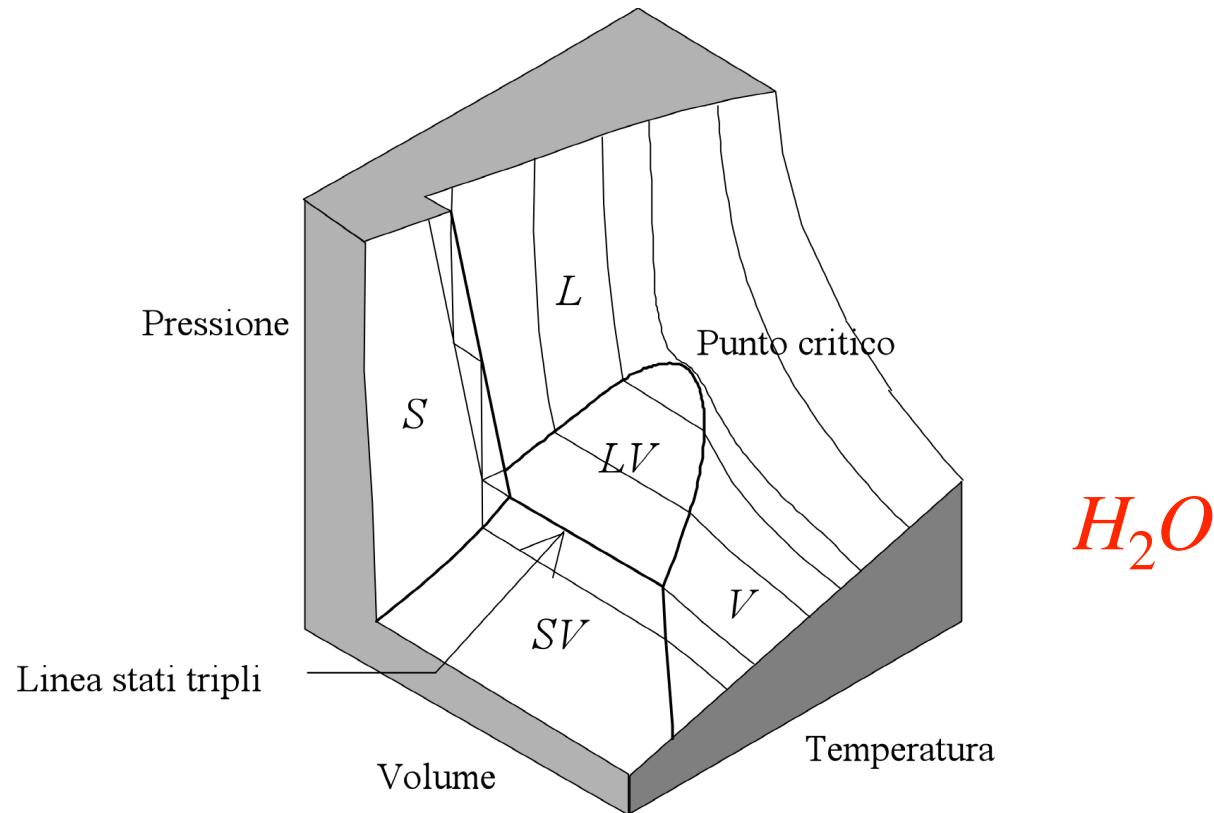
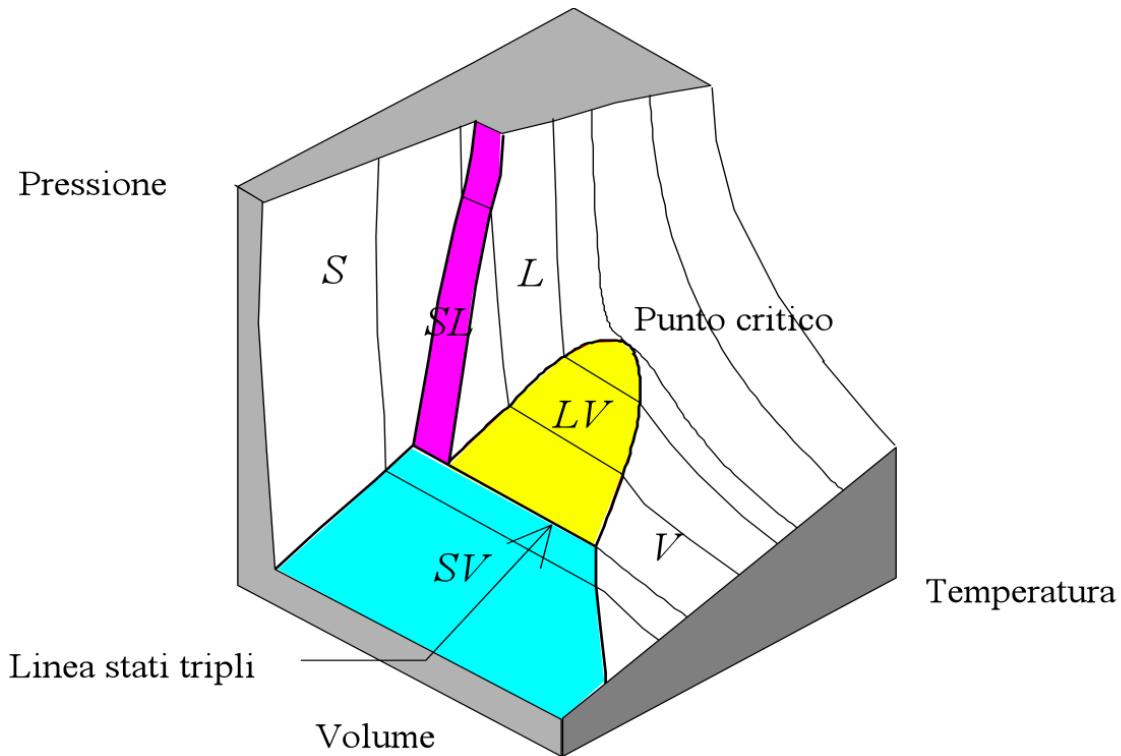


Diagramma PVT

Sostanza monocomponente



L'equazione di stato
è geometricamente
rappresentata in
uno spazio
tridimensionale di
coordinate P, v, T da
una superficie detta
superficie di stato

Diagramma PVT

Sostanza monocomponente

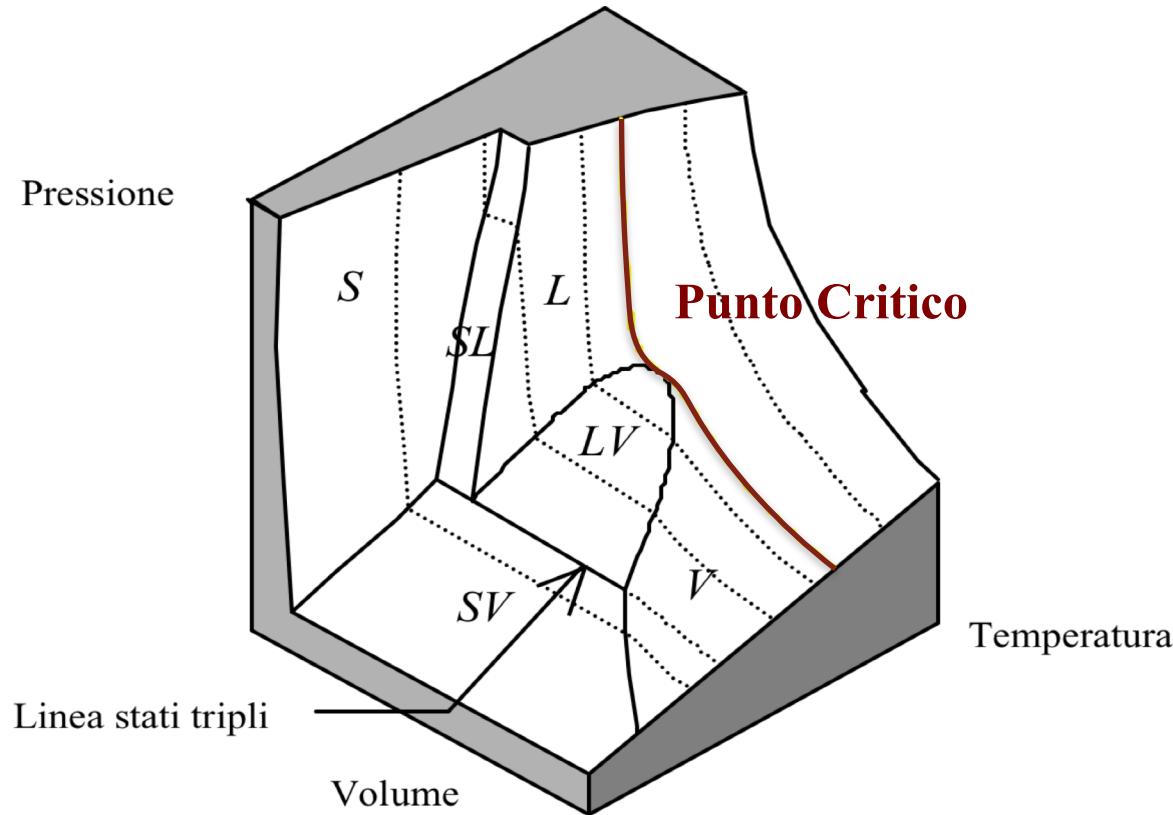
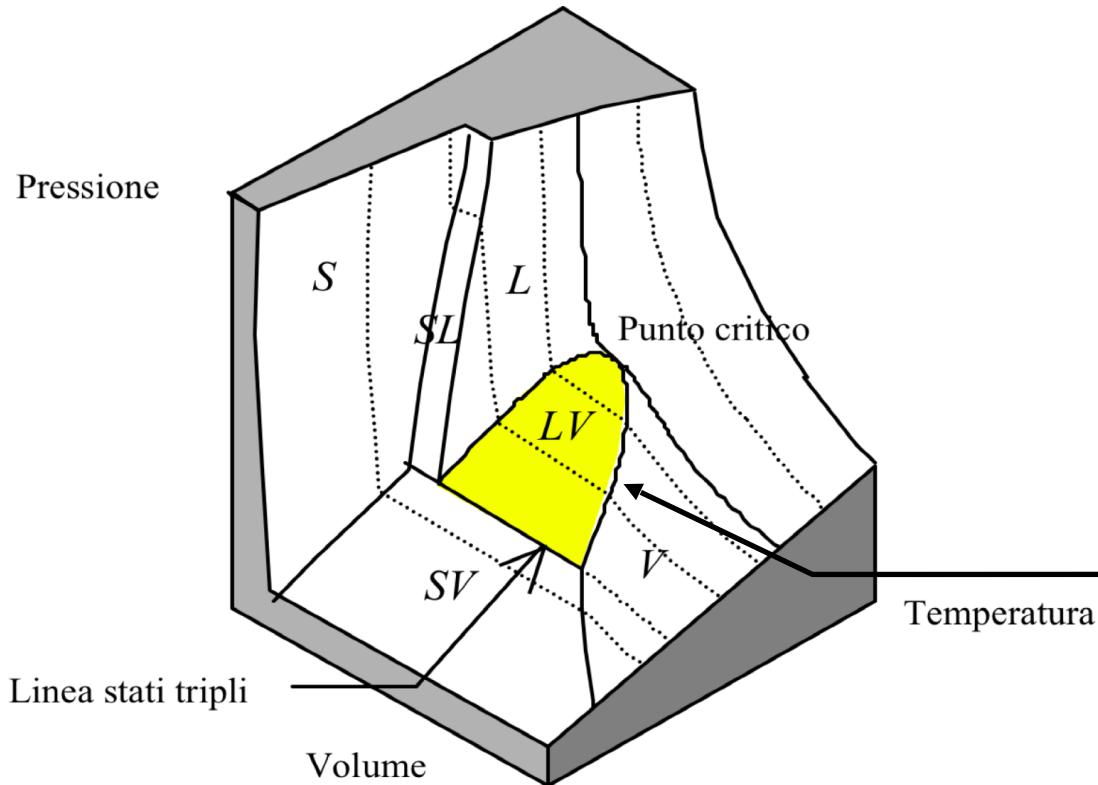


Diagramma PVT

Sostanza monocomponente



Curva di saturazione:

Rappresentazione della curva

$$T_{sat} = f(P_{sat})$$

Curva Limite

Diagramma Ts

Sostanza monocomponente

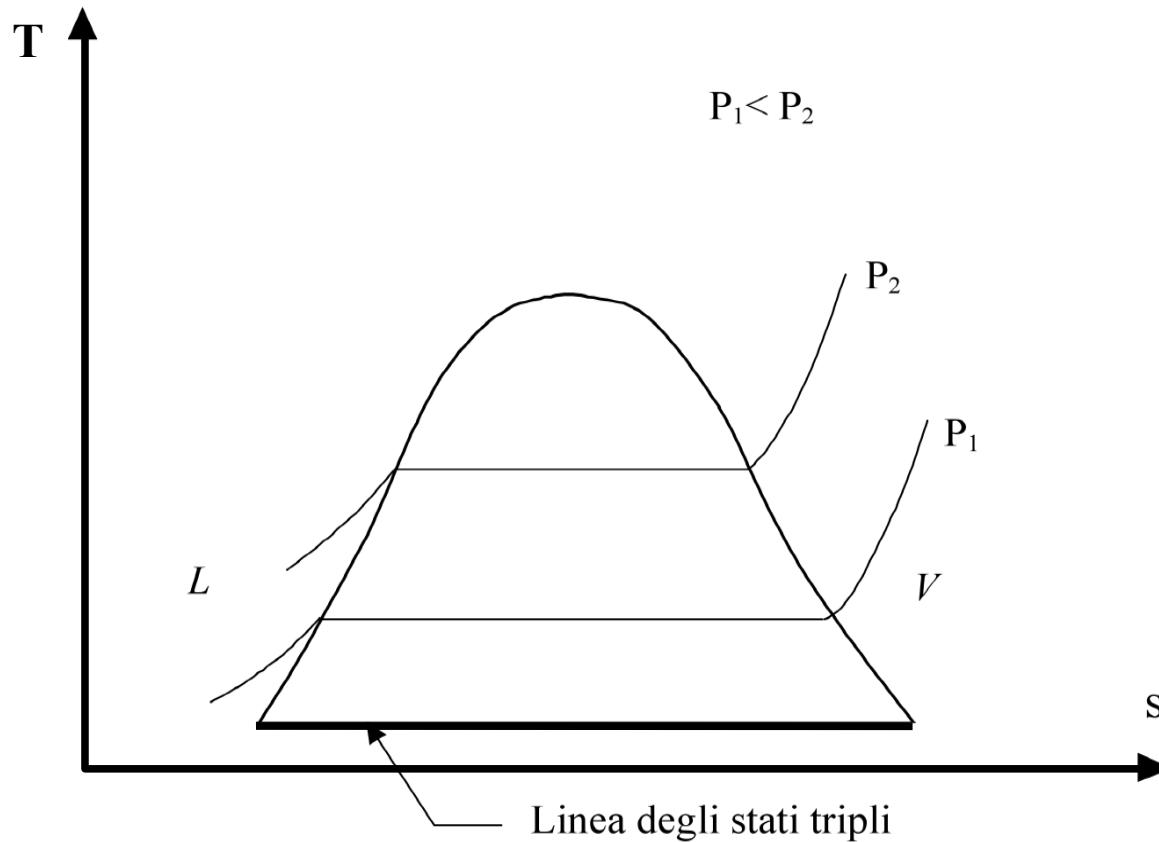


Diagramma hs

Sostanza monocomponente

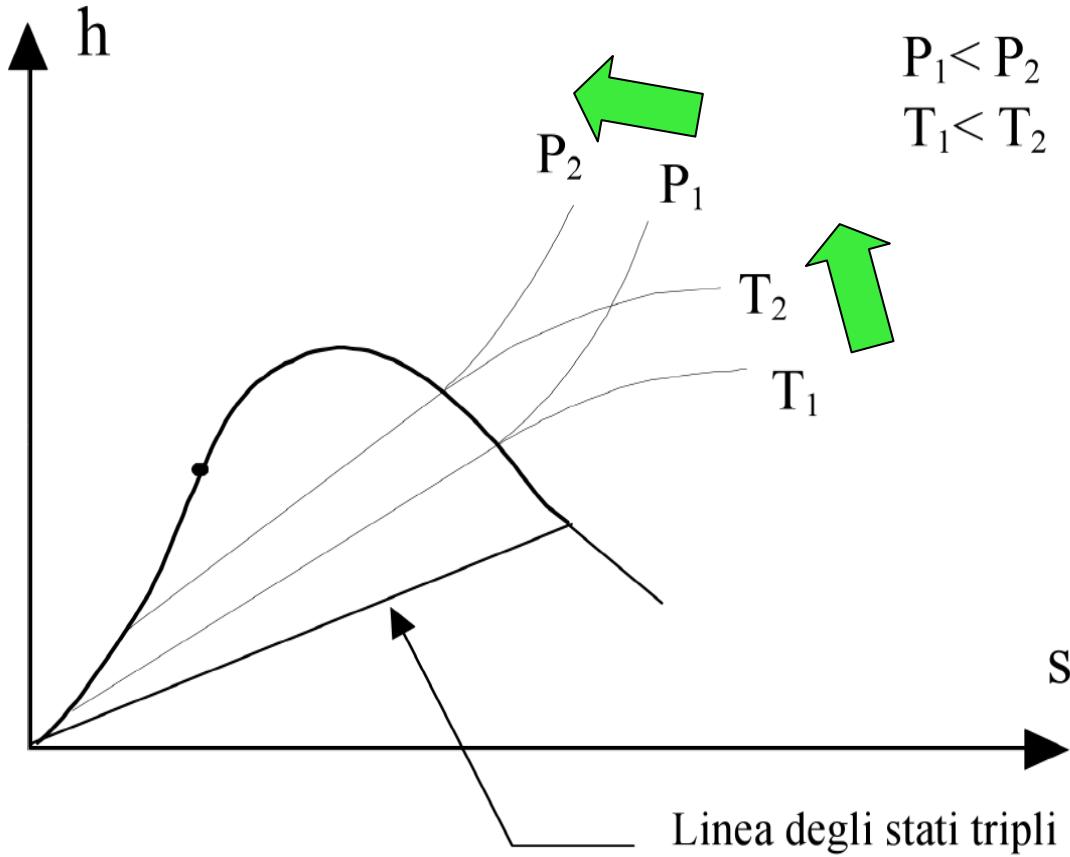
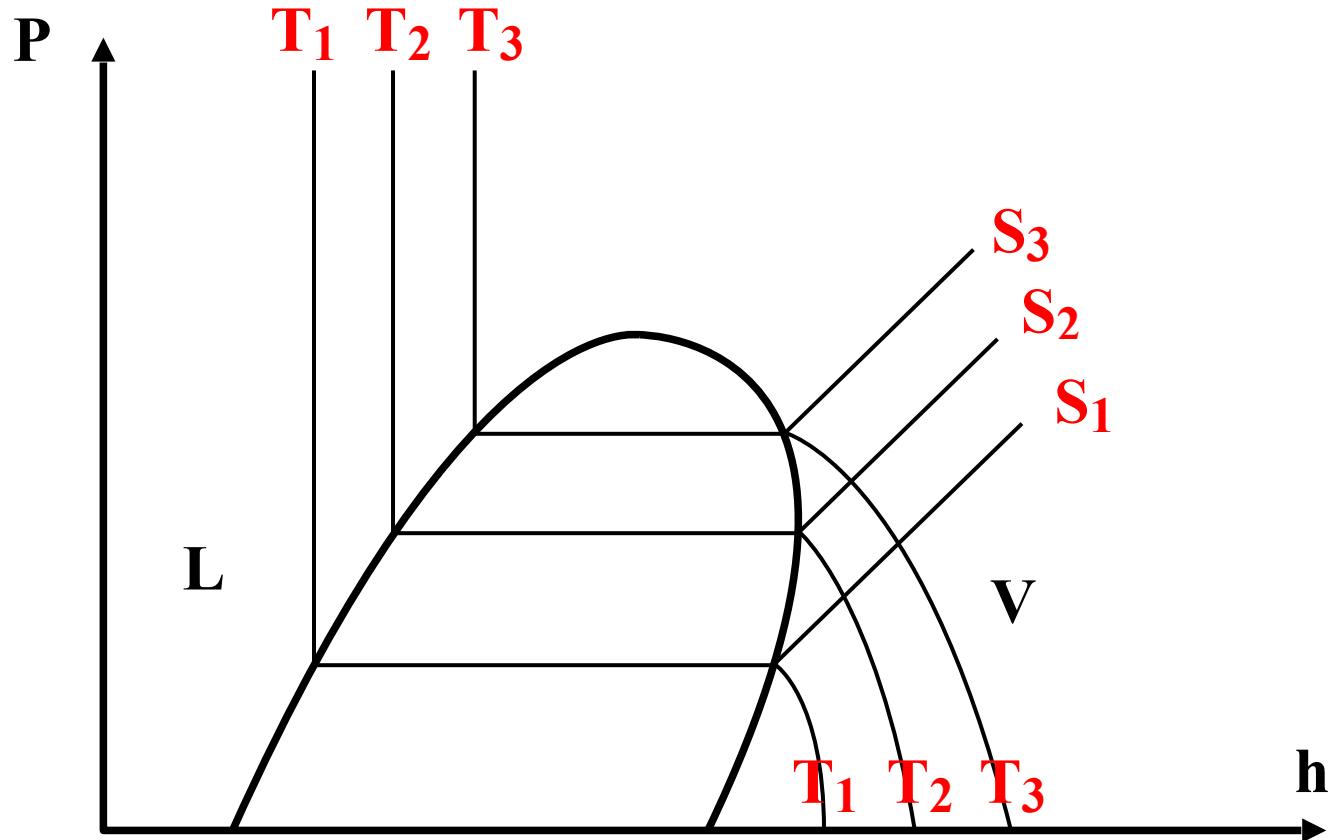


Diagramma Ph

Sostanza monocomponente



Entalpia (calore) di transizione di fase

$$h_{solido} < h_{liquido} < h_{vapore}$$

entalpia di liquefazione

$$h_{liquido} - h_{solido} > 0$$

entalpia di solidificazione

$$h_{solido} - h_{liquido} < 0$$

entalpia di evaporazione

$$h_{vapore} - h_{liquido} > 0$$

entalpia di condensazione

$$h_{liquido} - h_{vapore} < 0$$

entalpia di sublimazione

$$h_{vapore} - h_{solido} > 0$$

entalpia di brinamento

$$h_{solido} - h_{vapore} < 0$$

Proprietà termodinamiche dei sistemi trifase

Titolo di vapore

$$x_v = \frac{m_v}{m}$$

Titolo di liquido

$$x_l = \frac{m_l}{m}$$

Titolo di solido

$$x_s = \frac{m_s}{m}$$

$$x_v + x_l + x_s = 1$$

Proprietà termodinamiche dei sistemi trifase

$$v = (1 - x_l - x_v) v_s + x_l v_l + x_v v_v$$

$$u = (1 - x_l - x_v) u_s + x_l u_l + x_v u_v$$

$$s = (1 - x_l - x_v) s_s + x_l s_l + x_v s_v$$

$$h = (1 - x_l - x_v) h_s + x_l h_l + x_v h_v$$

Proprietà termodinamiche dei sistemi bifase

Liquido - Vapore

Titolo di vapore

$$x = x_v = \frac{m_v}{m}$$

Titolo di liquido

$$x_l = \frac{m_l}{m}$$

$$x_v + x_l = 1$$

Proprietà termodinamiche dei sistemi bifase

$$\nu = (1 - x) \nu_l + x \nu_v = \nu_l + x \nu_{lv}$$

$$u = (1 - x) u_l + x u_v = u_l + x u_{lv}$$

$$s = (1 - x) s_l + x s_v = s_l + x s_{lv}$$

$$h = (1 - x) h_l + x h_v = h_l + x h_{lv}$$

Vapore come gas ideale

Diagramma acqua:

Errore in % tra v e v_{id} e zona con
errore < 1 %

Entro i 10 kPa sempre, anche fino a
100 kPa.

Sopra 1 MPa e tra 200°C e 400°C mai.
Fino e oltre il 100 %.

*Aria a basse pressioni sì (es: HVAC),
alta pressione no (es: centrali
termoelettriche)*

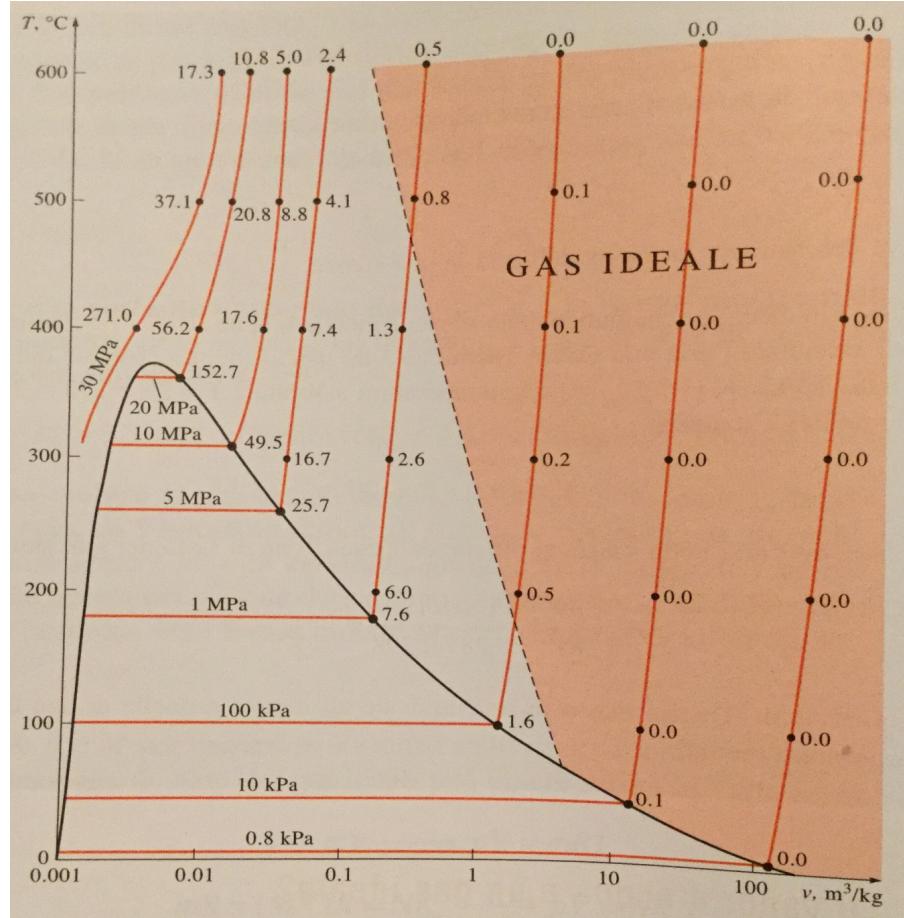


Fig 4.49 – Y. Cengel, Termodinamica e trasmissione del calore

Tabella di saturazione dell'acqua

Tabella A.4
Acqua satura: tabella in temperatura

Temp. <i>T</i> °C	Press. sat. <i>p_m</i> kPa	Volume specifico m ³ /kg		Energia Interna kJ/kg			Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/(kg · K)		
		Liquido sat. <i>u_l</i>	Vapore sat. <i>u_v</i>	Liquido sat. <i>u_l</i>	Evap. <i>u_{lv}</i>	Vapore sat. <i>u_v</i>	Liquido sat. <i>h_l</i>	Evap. <i>h_{lv}</i>	Vapore sat. <i>h_v</i>	Liquido sat. <i>s_l</i>	Evap. <i>s_{lv}</i>	Vapore sat. <i>s_v</i>
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.0	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.4	0.000	9.1562	9.1562
5	0.8721	0.001000	147.12	20.97	2361.3	2382.3	20.98	2489.6	2510.6	0.0761	8.9496	9.0257
10	1.2276	0.001000	106.38	42.00	2347.2	2389.2	42.01	2477.7	2519.8	0.1510	8.7498	8.9008
15	1.7051	0.001001	77.93	62.99	2333.1	2396.1	62.99	2465.9	2528.9	0.2245	8.5569	8.7814
20	2.339	0.001002	57.79	83.95	2319.0	2402.9	83.96	2454.1	2538.1	0.2966	8.3706	8.6672
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	0.3674	8.1905	8.5580
30	4.246	0.001004	32.89	125.78	2290.8	2416.6	125.79	2430.5	2556.3	0.4369	8.0164	8.4533
35	5.628	0.001006	25.22	146.67	2276.7	2423.4	146.68	2418.6	2565.3	0.5053	7.8478	8.3531
40	7.384	0.001008	19.52	167.56	2262.6	2430.1	167.57	2406.7	2574.3	0.5725	7.6845	8.2570
45	9.593	0.001010	15.26	188.44	2248.4	2436.8	188.45	2394.8	2583.2	0.6387	7.5261	8.1648
50	12.349	0.001012	12.03	209.32	2234.2	2443.5	209.33	2382.7	2592.1	0.7038	7.3725	8.0763
55	15.758	0.001015	9.568	230.21	2219.9	2450.1	230.23	2370.7	2600.9	0.7679	7.2234	7.9913
60	19.940	0.001017	7.671	251.11	2205.5	2456.6	251.13	2358.5	2609.6	0.8312	7.0784	7.9096
65	25.03	0.001020	6.197	272.02	2191.1	2463.1	272.06	2346.2	2618.3	0.8935	6.9375	7.8310
70	31.19	0.001023	5.042	292.95	2176.6	2469.6	292.98	2333.8	2626.8	0.9549	6.8004	7.7553
75	38.58	0.001026	4.131	313.90	2162.0	2475.9	313.93	2321.4	2635.3	1.0155	6.6669	7.6824
80	47.39	0.001029	3.407	334.86	2147.4	2482.2	334.91	2308.8	2643.7	1.0753	6.5369	7.6122
85	57.83	0.001033	2.828	355.84	2132.6	2488.4	355.90	2296.0	2651.9	1.1343	6.4102	7.5445
90	70.14	0.001036	2.361	376.85	2117.7	2494.5	376.92	2283.2	2660.1	1.1925	6.2866	7.4791
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	1.2500	6.1659	7.4159
Press. sat. MPa												
100	0.10133	0.001044	1.6729	418.94	2087.6	2506.5	419.04	2257.0	2676.1	1.3069	6.0480	7.3549
105	0.12082	0.001048	1.4194	440.02	2072.3	2512.4	440.15	2243.7	2683.8	1.3630	5.9328	7.2958
110	0.14327	0.001052	1.2102	461.14	2057.0	2518.1	461.30	2230.2	2691.5	1.4185	5.8202	7.2387
115	0.16906	0.001056	1.0366	482.30	2041.4	2523.7	482.48	2216.5	2699.0	1.4734	5.7100	7.1833
120	0.19853	0.001060	0.8919	503.50	2025.8	2529.3	503.71	2202.6	2706.3	1.5276	5.6020	7.1296

Tabella del vapore surriscaldato dell'acqua

TABELLA A.8 Acqua surriscaldata (*Continua*)

<i>T</i> °C	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K	<i>v</i> m ³ /kg	<i>u</i> kJ/kg	<i>h</i> kJ/kg	<i>s</i> kJ/kg·K
<i>p</i> = 9.0 MPa (303.35 °C)					<i>p</i> = 10.0 MPa (311.00 °C)					<i>p</i> = 12.5 MPa (327.81 °C)		
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596				
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819

Interpolazioni dei dati tabulati

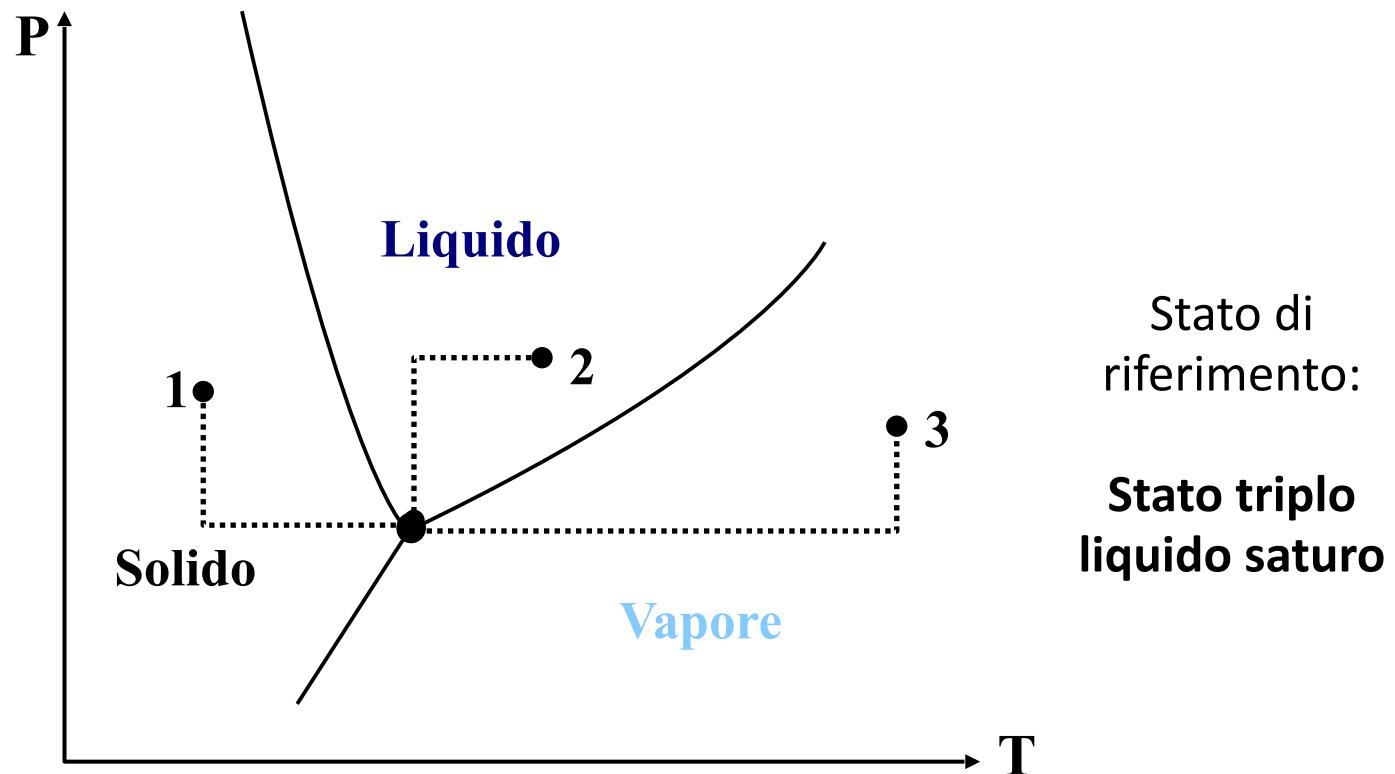
Interpolazione lineare

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{T - T_1}{T_2 - T_1}$$

$$\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} = \frac{P - P_1}{P_2 - P_1}$$

Entalpia ed Entropia specifica

Espressioni approssimate per il calcolo di
Entalpia ed Entropia Specifica



Entalpia ed Entropia specifica

**Espressioni approssimate per il calcolo di
Entalpia ed Entropia Specifica per l'Acqua**

stato Solido (1)

$$h = h_0 + h_{lst} + c_s (T - T_0) + v (P - P_0)$$

$$s = s_0 + s_{lst} + c_s \ln \frac{T}{T_0} = s_0 + \frac{h_{lst}}{T_0} + c_s \ln \frac{T}{T_0}$$

stato liquido (2)

$$h = h_0 + c_l (T - T_0) + v (P - P_0)$$

$$s = s_0 + c_l \ln \frac{T}{T_0}$$

*stato di
riferimento:
stato triplo
liquido saturo*

Proprietà termodinamiche dell'acqua

Stato triplo

$$T_t = 273,16K$$

$$P_t = 611,2Pa$$

Stato critico

$$T_{cr} = 647,29K$$

$$P_{cr} = 220,9Pa$$

- calore specifico del ghiaccio

$$c_s = 2093 \frac{J}{kg \cdot K}$$

- calore specifico del liquido

$$c_l = 4186 \frac{J}{kg \cdot K}$$

- calore specifico medio a
pressione costante del vapore

$$c_{Pv} = 2009 \frac{J}{kg \cdot K}$$

- entalpia di solidificazione allo
stato triplo

$$h_{lst} = - 333 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

- entalpia di evaporazione allo
stato triplo

$$h_{lvt} = 2501,6 \frac{kJ}{kg \cdot K}$$

Note per lo studente

Note per lo studente

Note per lo studente

Note per lo studente