

TERMODINÁMICA

Ejercicio del Tema 3

Nombre _____ Grupos A – B - C - D – F - G

No está permitido el empleo de calculadoras programables ni la consulta de libros, apuntes o formularios. Los teléfonos móviles y relojes “smartwatch” deberán permanecer apagados y fuera del alcance del alumno.

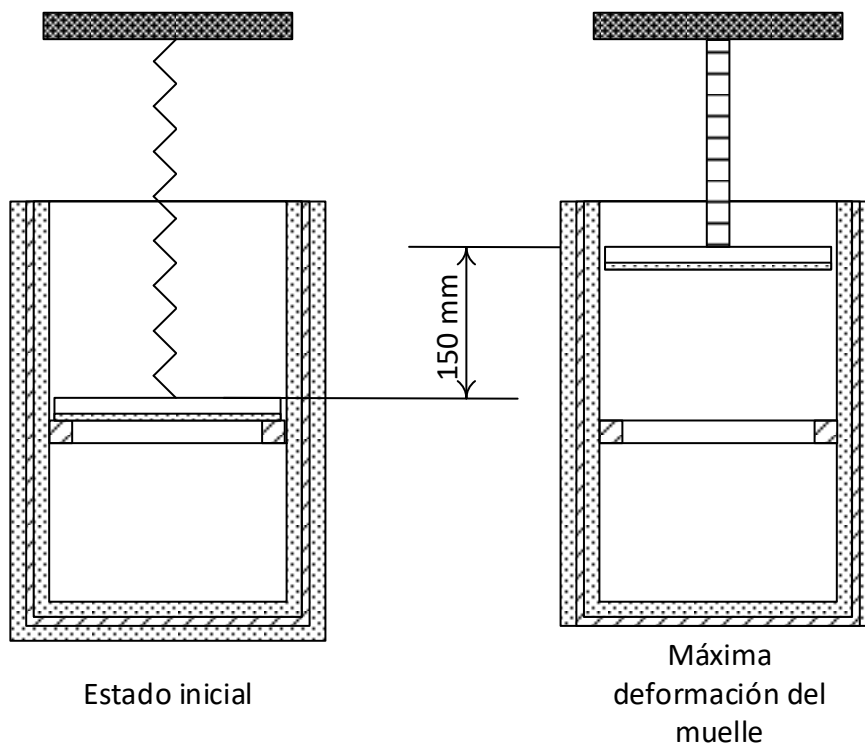
Una masa de 3 kg de un gas ideal ($R = 287 \text{ J/kg-K}$) está contenido en un recipiente cilindro pistón en posición vertical como el mostrado en la figura. Las paredes del cilindro y la superficie inferior del pistón son adiabáticas. El diámetro interior del cilindro es 500 mm. En el instante inicial, de equilibrio, el pistón descansa sobre un anillo fijo, de volumen despreciable, estando el gas a una temperatura de 50°C ocupando $4,5 \text{ m}^3$. El pistón tiene una masa de 500 kg y sobre él actúa la presión atmosférica (95 kPa) y un muelle de rigidez 100 kN/m que en el instante inicial carece de deformación. Dicho muelle sólo puede comprimirse 150 mm, pasando a ser un sólido rígido cuando alcanza esa deformación.

Se retira el aislamiento de la base del cilindro y, lentamente, se añade calor, llevándose a cabo tres procesos supuestos cuasiestáticos:

- 1-2: calentamiento del gas hasta que el pistón comienza a flotar
- 2-3: calentamiento del gas hasta que el muelle alcanza su deformación máxima
- 3-4: calentamiento del gas aportando a éste la misma cantidad de calor que en el proceso 2-3

Se pide:

- a) Presión inicial del gas
- b) Calores aportados en cada proceso
- c) Presión y temperatura final del gas
- d) Representación del proceso completo en un diagrama P-v



T [°C]	u [kJ/kg]	h [kJ/kg]
40	28,70	118,5
50	35,89	128,6
60	43,08	138,7
280	204,5	363,2
290	212,0	373,6
300	219,6	384,1
310	227,2	394,5
320	234,8	405,0
330	242,4	415,5
340	250,1	426,1
350	257,8	436,6
360	265,5	447,2
370	273,2	457,8
380	281,0	468,4
390	288,7	479,0
400	296,5	489,7

T [°C]	u [kJ/kg]	h [kJ/kg]
700	541,4	820,7
710	549,9	832,0
720	558,4	843,4
730	566,9	854,8
740	575,5	866,3
750	584,1	877,7
760	592,7	889,2
770	601,3	900,6
780	609,9	912,1
1100	894,2	1288
1110	903,3	1300
1120	912,4	1312
1130	921,6	1324
1140	930,7	1336
1150	939,9	1348
1160	949,0	1360

$$m = 3 \text{ kg} \quad M_p = 500 \text{ kg} \quad P_0 = 95 \text{ kPa}$$

$$K = 100 \text{ kN/m} \quad d_1 = 0 \quad d_{\text{máx}} = 150 \text{ mm}$$

$$\text{gas ideal} \quad R = 0,287 \text{ kJ/kg-K}$$

$$D = 500 \text{ mm}$$

$$\left[\begin{array}{l} T_1 = 50^\circ\text{C} \\ V_1 = 4,5 \text{ m}^3 \\ \text{apoyado} \end{array} \right] \xrightarrow[\text{lento}]{d_{12}} \left[\begin{array}{l} P_2 = P_0 + M_p g / A_p \\ V_2 = V_1 \\ \text{comienzo a flotar} \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} V_4 = V_3 \\ Q_{34} = Q_{23} \end{array} \right] \xrightarrow[\text{lento}]{Q_{34}} \left[\begin{array}{l} P_3 = P_2 + \underbrace{K \left(\frac{V_{\text{máx}} - V_2}{A_p^2} \right)}_{\frac{K \cdot d_{\text{máx}}}{A_p}} \\ V_3 = V_2 + A_p d_{\text{máx}} \end{array} \right]$$

$$\boxed{P_1 = \frac{3 \times 0,287 \times (50 + 273)}{4,5} = \underline{\underline{61,8 \text{ kPa}}}}$$

$$P_2 = 95 + \frac{500 \times 9,8 \cdot 10^{-3}}{\frac{\pi \cdot 0,5^2}{4}} = 119,96 \text{ kPa}$$

$$T_2 = \frac{119,96 \times 4,5}{0,287 \cdot 3} = 626,95 \text{ K} = 353,95^\circ\text{C}$$

$$\underline{\underline{Q_{12} = 3 (260,84 - 35,89) = \underline{\underline{674,85 \text{ kJ}}}}}$$

$$\checkmark \quad v_3 = 4,5 + \frac{\pi 0,5^2}{4} \times 0,15 = 4,5295 \text{ m}^3$$

$$P_3 = 119,96 + \frac{100 \times 0,15}{\frac{\pi 0,5^2}{4}} = 196,35 \text{ kPa}$$

$$T_3 = \frac{196,35 \times 4,5295}{0,287 \times 3} = 1032,96 \text{ K} = 759,96^\circ\text{C}$$

$$W_{23} = \left(\frac{196,35 + 119,96}{2} \right) \underbrace{\frac{\pi 0,5^2}{4} 0,15}_{v_3 - v_2} = 4,658 \text{ kJ}$$

$$\underline{Q_{23}} = 4,658 + 3(592,67 - 260,84) = \underline{1000,15 \text{ kJ}}$$

$$\underline{Q_{34}} = Q_{23} = \underline{1000,15 \text{ kJ}} = 3(u_4 - 592,67)$$

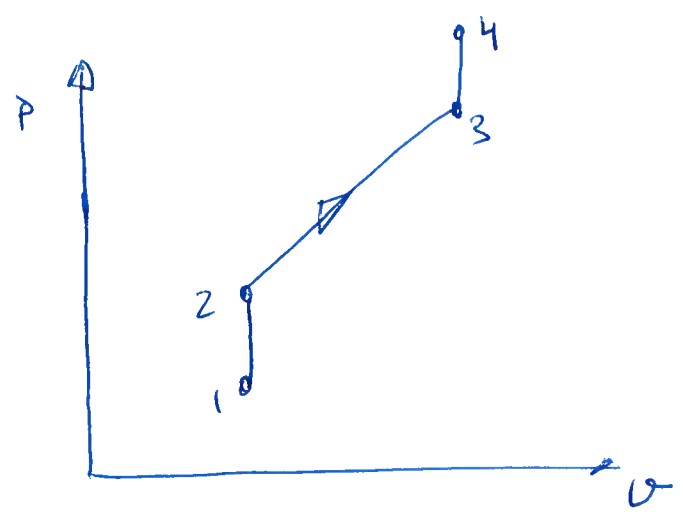
$$\downarrow$$

$$u_4 = 926,05 \text{ kJ/kg}$$

$$\downarrow$$

$$\boxed{T_4 = 1134,89^\circ\text{C}}$$

$$\boxed{P_4} = \frac{3 \times 0,287 \times (1134,89 + 273)}{4,5295} = \underline{\underline{267,62 \text{ kPa}}}$$



TERMODINÁMICA

Ejercicio del Tema 3

Nombre _____ Grupo E

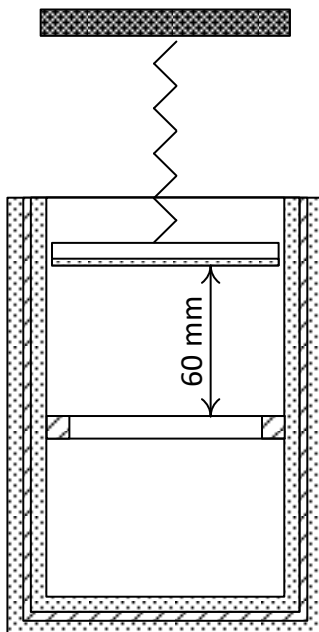
No está permitido el empleo de calculadoras programables ni la consulta de libros, apuntes o formularios. Los teléfonos móviles y relojes “smartwatch” deberán permanecer apagados y fuera del alcance del alumno.

Un cilindro en posición vertical con su superficie lateral y su base aisladas térmicamente dispone de un pistón de 500 kg de masa y 170,6 mm de diámetro que puede deslizarse sin rozamiento. La base inferior del pistón también está aislada térmicamente. Sobre el pistón actúa un muelle y la presión ambiente, que es de 95 kPa. En el interior del cilindro hay 5 g de agua (sustancia pura, ver tablas). Como se ve en la figura, 60 mm por debajo del pistón hay un anillo de volumen despreciable que limita el movimiento del pistón.

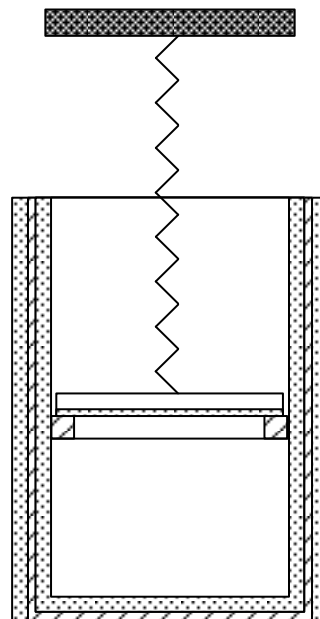
En el instante inicial, de equilibrio, el muelle está estirado 50 mm con respecto a su longitud natural y el agua está a 2 bar y 500 °C. Se suprime el aislante térmico de la base del cilindro y lentamente se va retirando calor hasta que el pistón alcanza el anillo (estado 2). Posteriormente, se sigue retirando calor lentamente hasta que la presión del fluido alcanza 40 kPa.

Determinar:

- Rigidez del muelle
- Temperatura del agua en el estado 2
- Calor retirado del agua en cada proceso
- Diagrama p-v del proceso completo sobre la campana bifásica



Estado inicial



Proceso 2-3

Tabla de vapor húmedo (líquido-vapor)

p [bar]	T [°C]	v_f [m ³ /kg]	v_g [m ³ /kg]	u_f [kJ/kg]	u_g [kJ/kg]	h_f [kJ/kg]	h_g [kJ/kg]
0,1	45,81	0,00101028	14,6700	191,79	2437,2	191,80	2583,9
0,2	60,06	0,00101716	7,64810	251,40	2456,0	251,42	2608,9
0,3	69,09	0,00102224	5,22866	289,24	2467,7	289,27	2624,6
0,4	75,86	0,00102638	3,99325	317,58	2476,3	317,62	2636,1
0,5	81,32	0,00102993	3,24030	340,49	2483,2	340,54	2645,2
0,6	85,93	0,00103307	2,73198	359,85	2489,0	359,91	2652,9
0,7	89,93	0,00103591	2,36504	376,68	2493,9	376,75	2659,4
0,8	93,49	0,00103850	2,08732	391,63	2498,2	391,71	2665,2
0,9	96,69	0,00104091	1,86957	405,11	2502,1	405,20	2670,3
1	99,61	0,00104316	1,69413	417,40	2505,6	417,51	2675,0
1,1	102,3	0,00104527	1,54965	428,73	2508,7	428,84	2679,2
1,2	104,8	0,00104727	1,42853	439,24	2511,7	439,36	2683,1
1,3	107,1	0,00104917	1,32549	449,05	2514,4	449,19	2686,7
1,4	109,3	0,00105099	1,23672	458,27	2516,9	458,42	2690,0
1,5	111,3	0,00105273	1,15942	466,97	2519,2	467,13	2693,1
1,6	113,3	0,00105440	1,09149	475,21	2521,4	475,38	2696,1
1,7	115,1	0,00105600	1,03130	483,04	2523,5	483,22	2698,8
1,8	116,9	0,00105756	0,977587	490,51	2525,5	490,70	2701,4
1,9	118,6	0,00105906	0,929349	497,65	2527,3	497,85	2703,9
2	120,2	0,00106052	0,885782	504,49	2529,1	504,71	2706,3

Tabla de vapor sobrecalentado

0,5 bar (T _{sat} = 81,33 °C)			
T [°C]	v [m ³ /kg]	u [kJ/kg]	h [kJ/kg]
sat	3.24030	2483,9	2645,9
150	3,88973	2585,7	2780,2
200	4,35616	2660,0	2877,8
250	4,82061	2735,1	2976,1
300	5,28405	2811,6	3075,8
350	5,74690	2889,4	3176,8
400	6,20940	2968,9	3279,3
450	6,67166	3049,9	3383,5
500	7,13376	3132,6	3489,3
550	7,59574	3217,0	3596,8

2 bar (T _{sat} = 120,2 °C)			
T [°C]	v [m ³ /kg]	u [kJ/kg]	h [kJ/kg]
sat	0.88578	2529,5	2706,7
150	0,95986	2577,1	2769,1
200	1,08048	2654,6	2870,7
250	1,19889	2731,4	2971,2
300	1,31623	2808,8	3072,1
350	1,43297	2887,3	3173,9
400	1,54933	2967,1	3277,0
450	1,66546	3048,5	3381,6
500	1,78142	3131,4	3487,7
550	1,89726	3215,9	3595,4

$$m_p = 500 \text{ kg}$$

$$m = 0,005 \text{ kg}$$

$$D = 170,6 \text{ mm}$$

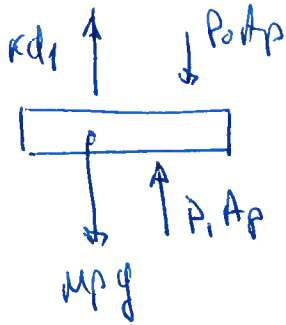
$$P_1 = 2 \text{ bar}$$

$$T_1 = 500^\circ\text{C}$$

$$P_0 = 95 \text{ kPa}$$

$$d_1 = +50 \text{ mm}$$

$$d_2 = 205 + 0,06 = 0,11 \text{ m}$$



$$P_1 = 200 \text{ kPa} = 95 + \frac{500 \times 9,8 \times 10^{-3}}{\frac{\pi 0,1706^2}{4}} - \frac{k \frac{0,05}{4}}{\frac{\pi 0,1706^2}{4}}$$

$$\rightarrow \boxed{k = 49,997 \approx 50 \text{ kN/m}}$$

$$v_2 = v_1 - 0,06 \times \frac{\pi 0,1706^2}{4} \times \frac{1}{0,005} = 1,50712 \text{ m}^3/\text{kg}$$

\rightarrow el estado 2 es vapor húmedo

$$P_2 = P_1 - \frac{k(d_2 - d_1)}{A_p} = 200 - \frac{50 \times 0,06}{\frac{\pi 0,1706^2}{4}} = 68,76 \text{ kPa}$$

$$v_f(0,6876 \text{ bar}) = 0,0010356 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g(\quad) = 2,4138 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$1,50712 = 0,0010356 + x_2(2,4138 - 0,0010356)$$

$$\rightarrow x_2 = 0,6242$$

$$\boxed{T_2 = T_{\text{sat}}(0,6876 \text{ bar}) = 29,4^\circ\text{C}}$$

En el estado 1 se tiene $500^\circ\text{C} > T_{\text{sat}} (2 \text{ bar})$,
 luego es vapor sobrecalentado:

$$v_1 = 1.78142 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$u_1 = 3131.4 \text{ kJ/kg}$$

$$W_{12} = \underbrace{\left(\frac{68.76 + 200}{2} \right)}_{\text{compresión}} \cdot 0.06 \times \frac{\pi (0.106)^2}{4} = -0.1843 \text{ kJ}$$

$$\boxed{Q_{12} = 0.005 (1697.08 - 3131.4) - 0.1843 = -7.3559 \text{ kJ}}$$

$$u_f (0.6876 \text{ bar}) = 374.59 \text{ kJ/kg}$$

$$u_g (\quad) = 2493.29 \text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = 374.59 + 0.6242 (2493.29 - 374.59) = 1697.08 \text{ kJ/kg}$$

$$P_3 = 0.4 \text{ bar}$$

$$v_3 = v_2 = 1.50712 \text{ m}^3/\text{kg} \quad \left. \vphantom{v_3 = v_2} \right\} \rightarrow \text{v. húmedo}$$

$$1.50712 = 0.00102638 + x_3 (3.99325 - 0.00102638)$$

$$\rightarrow x_3 = 0.3773$$

$$u_3 = 317.58 + 0.3773 (2476.3 - 317.58) = 1131.97 \text{ kJ}$$

$$\boxed{Q_{23} = 0.005 (1131.97 - 1697.08) = -2.826 \text{ kJ}}$$

