

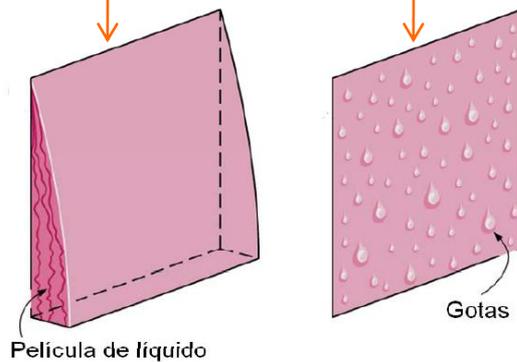
# **TRANSMISSÃO DE CALOR II**

**Prof. Eduardo C. M. Loureiro, DSc.**

# CONDENSAÇÃO

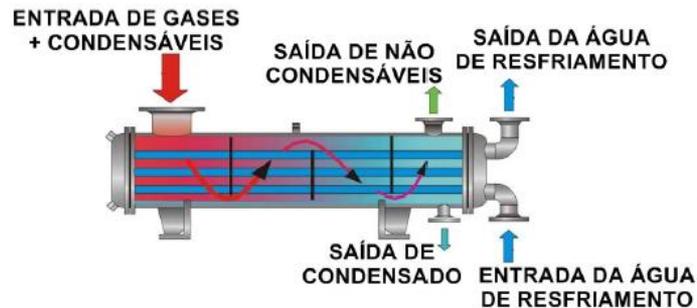
## MECANISMOS FÍSICOS

$$T_s < T_{sat}$$



A condensação ocorre quando a temperatura de um vapor é reduzida a valores inferiores ao de sua temperatura de saturação.

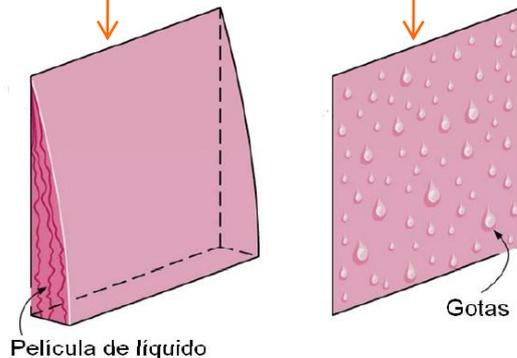
Em equipamentos industriais o processo resulta do contato entre o vapor e uma superfície fria. A energia latente do vapor é liberada, calor é transferido para a superfície e o condensado é formado.



# CONDENSAÇÃO

## MECANISMOS FÍSICOS

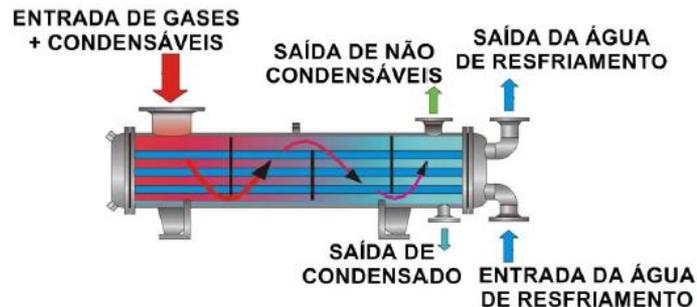
$$T_s < T_{sat}$$



A condensação pode ocorrer de duas formas dependendo da condição da superfície.

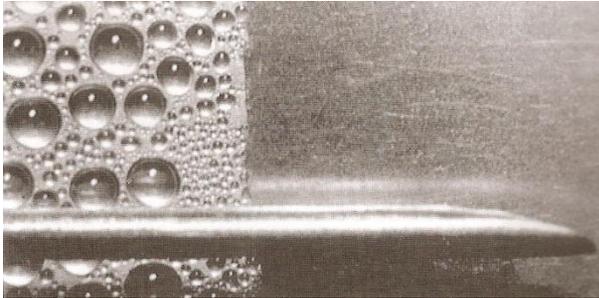
A forma dominante é a **condensação em filme**, onde uma película de líquido cobre toda a superfície de condensação e, sob a ação da gravidade, esco continuamente deixando a superfície. Geralmente se apresenta em superfícies limpas e isentas de contaminação.

Se a superfície for revestida com uma substância que induza a uma baixa molhabilidade, é possível ocorrer a **condensação em gotas**.



# CONDENSAÇÃO

## MECANISMOS FÍSICOS



As gotas se formam em irregularidades na superfície e podem crescer e coalescer através da condensação continuada.

Normalmente, mais de 90% da superfície é coberta pelas gotas que variam de poucos micrômetros até gotas visíveis a olho nu. As gotas deixam a superfície devido à ação da gravidade.

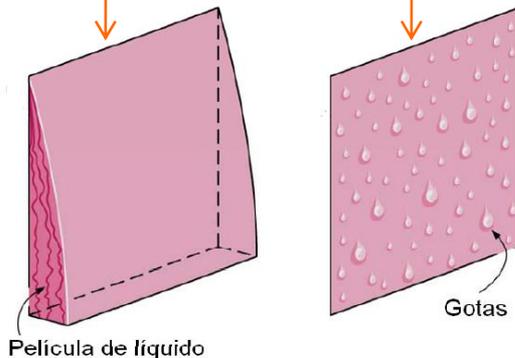
Na figura ao lado, uma fina camada de *oleato cúprico* foi aplicada no lado esquerdo da superfície para promover a condensação em gotas. Vê-se uma sonda de termopar com 1mm de diâmetro para dar idéia das dimensões apresentadas.



# CONDENSAÇÃO

## MECANISMOS FÍSICOS

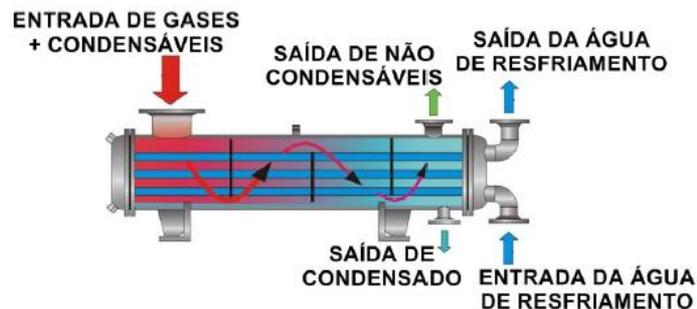
$$T_s < T_{sat}$$



Esteja em filme ou em gotas, o condensado representa uma resistência à transferência de calor entre a superfície e o vapor.

Como essa resistência aumenta com a espessura do condensado, e esta aumenta na direção vertical para baixo, usam-se superfícies verticais com pequena altura ou cilindros horizontais, no caso de condensação em filme.

A maioria dos condensadores possui matrizes de tubos horizontais, no interior dos quais escoa um refrigerante líquido, e no lado externo passa o vapor a ser condensado.



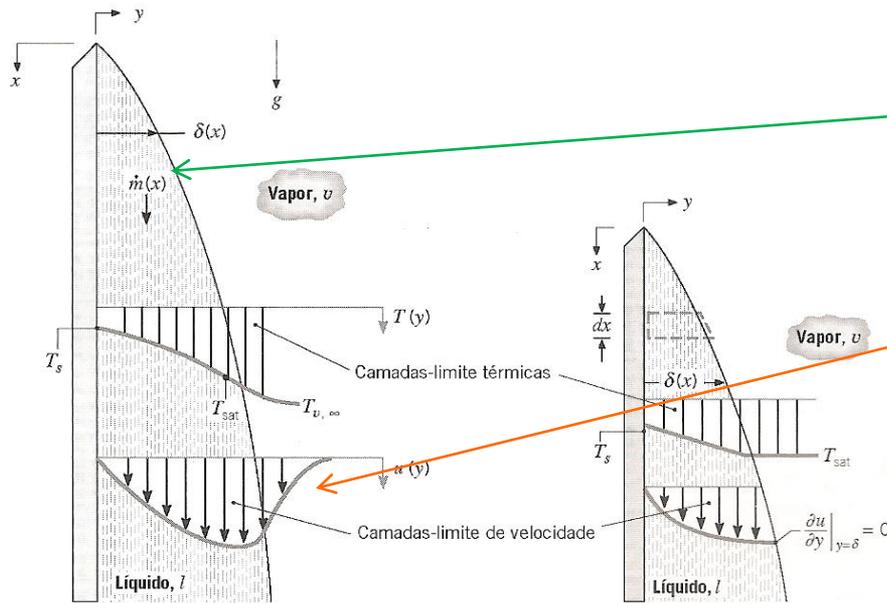
# CONDENSAÇÃO

## CONDENSAÇÃO EM FILME LAMINAR SOBRE UMA PLACA VERTICAL

O filme inicia sua formação no topo da placa e escoa na direção descendente.

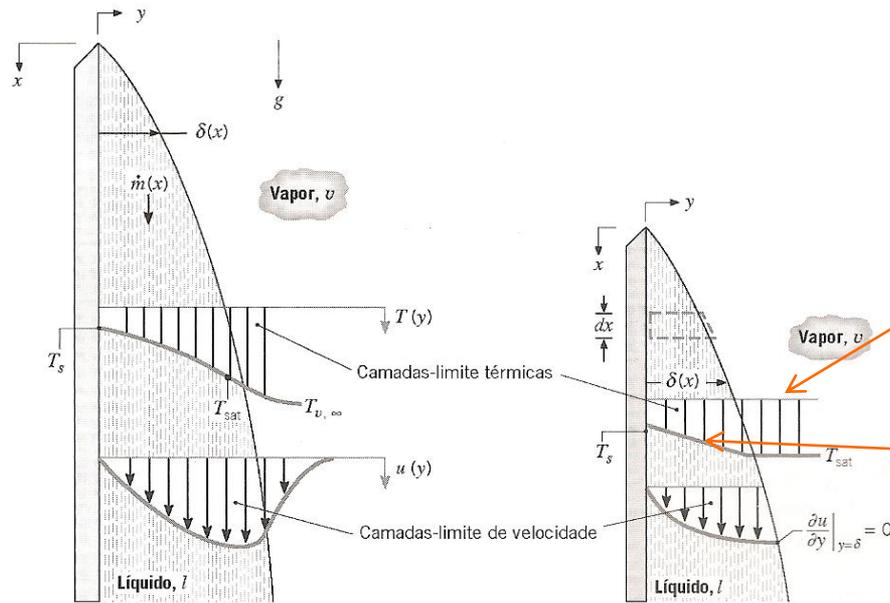
A espessura do filme,  $\delta(x)$ , e a **vazão mássica de condensado** aumentam com o aumento de  $x$ , em função da condensação contínua na interface líquido-vapor, que se encontra a  $T_{sat}$ .

A tensão de cisalhamento na interface líquido-vapor contribui para um gradiente de velocidades no vapor, bem como no filme.



# CONDENSAÇÃO

## CONDENSAÇÃO EM FILME LAMINAR SOBRE UMA PLACA VERTICAL



Uma análise feita por Nusselt reduziu a complexidade associada à condensação em filme, assumindo que:

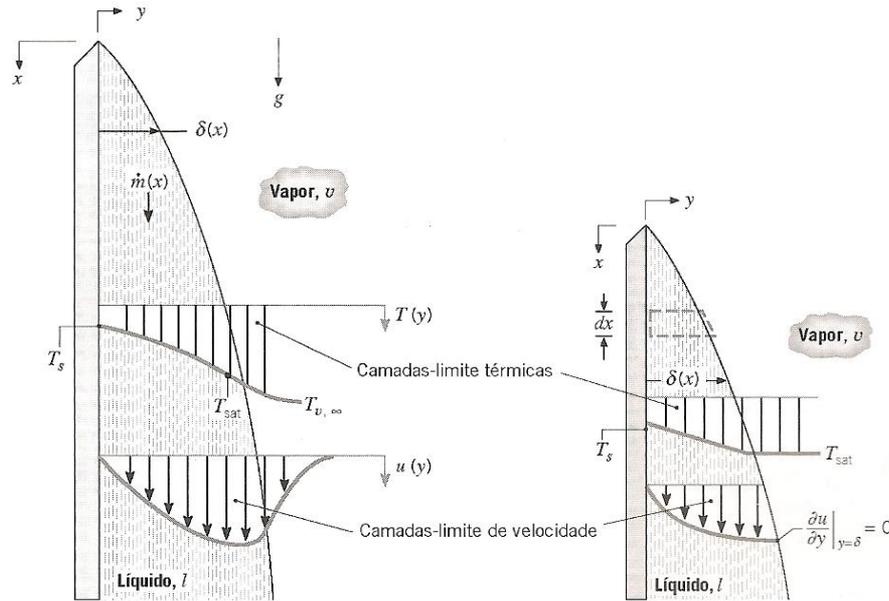
1. Escoamento laminar e permanente;
2. Considera-se o gás um vapor puro, a uma temperatura uniforme  $T_{sat}$ . Com a ausência de gradiente de temperatura no vapor a transferência de calor para a interface líquido vapor ocorre apenas por condensação nesta interface.
3. A transferência de calor através do filme ocorre apenas por condução, situação na qual a distribuição de temperaturas no interior do filme é linear.

Considerando estas suposições e a partir de uma análise sobre a equação do momento em um elemento de fluido no filme, chega-se a equações úteis no cálculo da condensação em película laminar.



# CONDENSAÇÃO

## CONDENSAÇÃO EM FILME LAMINAR SOBRE UMA PLACA VERTICAL



A vazão mássica de condensado por unidade de largura:

$$\Gamma(x) = \frac{\dot{m}(x)}{b} = \frac{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)\delta^3}{3\mu_l}$$

Em uma porção da interface líquido-vapor com largura unitária e comprimento  $dx$ , a taxa de transferência de calor para o interior do filme,  $dq$ , deve ser igual à taxa de energia liberada devido à condensação na interface.

$$dq = h_{fg} d\dot{m}$$

Como a distribuição de temperaturas no líquido é linear, pode-se usar a Lei de Fourier para o fluxo térmico na superfície:

$$q_s'' = \frac{k_l(T_{sat} - T_s)}{\delta}$$

O valor de  $\delta(x)$  é calculado pela equação:

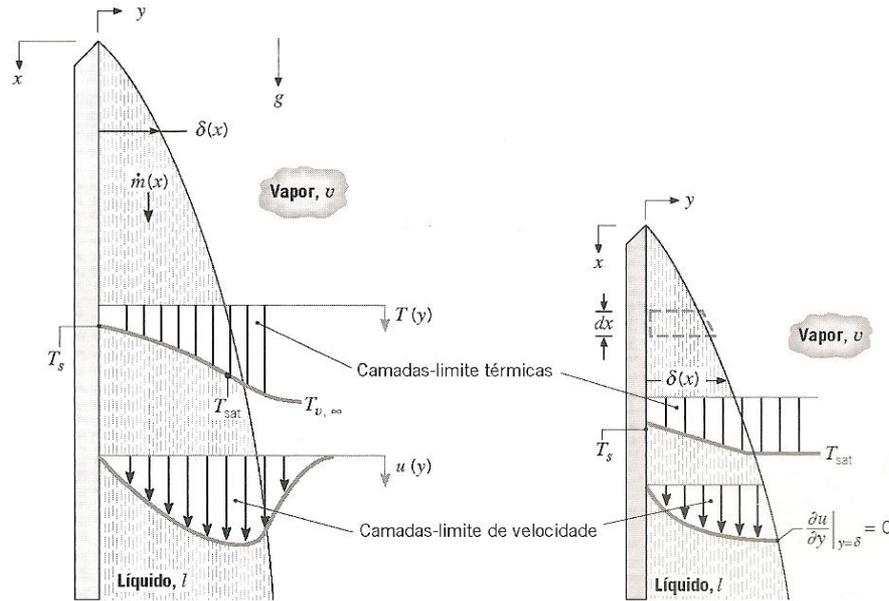
$$\delta(x) = \left[ \frac{4k_l\mu_l(T_{sat} - T_s)x}{g\rho_l(\rho_l - \rho_v)h'_{fg}} \right]^{1/4}$$

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,68c_{p,l}(T_{sat} - T_s)$$

$$h'_{fg} = h_{fg}(1 + 0,68Ja)$$

# CONDENSAÇÃO

## CONDENSAÇÃO EM FILME LAMINAR SOBRE UMA PLACA VERTICAL



O coeficiente convectivo médio para toda extensão da placa é:

$$\bar{h}_L = 0,943 \left[ \frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l^3 h'_{fg}}{\mu_l (T_{sat} - T_s) L} \right]^{1/4}$$

E o número de Nusselt possui a forma:

$$\bar{N}u_L = \frac{h_L L}{k_l} = 0,943 \left[ \frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) h'_{fg} L^3}{\mu_l k_l (T_{sat} - T_s)} \right]^{1/4}$$

As propriedades do líquido devem ser avaliadas na temperatura de filme e  $\rho_v$  e  $h'_{fg}$  devem ser estimados a  $T_{sat}$ .

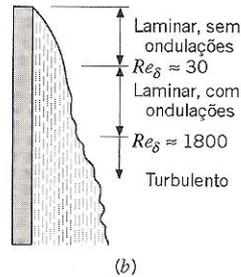
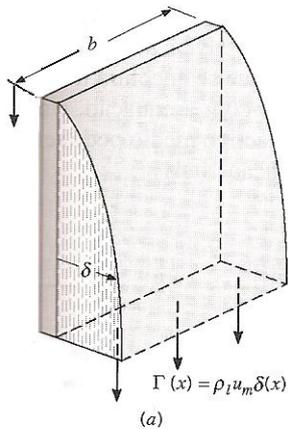
$$q = \bar{h}_L A (T_{sat} - T_s)$$

A taxa de condensação total:

$$\dot{m} = \frac{q}{h'_{fg}} = \frac{\bar{h}_L (T_{sat} - T_s)}{h'_{fg}}$$

# CONDENSAÇÃO

## CONDENSAÇÃO EM FILME TURBULENTO



$$Re_{\delta} = 3,78 \left[ \frac{k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} \right]^{3/4} \quad Re_{\delta} \leq 30$$

$$Re_{\delta} = \left[ \frac{3,7 k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} + 4,8 \right]^{0,82} \quad 30 \leq Re_{\delta} \leq 1800$$

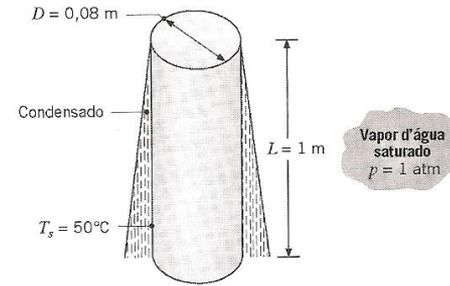
$$Re_{\delta} = \left[ \frac{0,069 k_l L (T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_{fg} (v_l^2 / g)^{1/3}} Pr_l^{0,5} - 151 Pr_l^{0,5} + 253 \right]^{4/3} \quad Re_{\delta} \geq 1800$$

Em um certo problema, as equações acima podem ser usadas para determinar três valores possíveis para o número de Reynolds. O valor correto é aquele que se encontrar na faixa de aplicação apresentada em conjunto com a equação. O coeficiente convectivo médio é então calculado a partir da equação abaixo:

$$\bar{h}_L = \frac{Re_{\delta} \mu_l h'_{fg}}{4L(T_{sat} - T_s)}$$

# CONDENSAÇÃO

## EXEMPLO:



A superfície externa de um tubo vertical, com 1 metro de comprimento e 80 mm de diâmetro externo, está exposta a vapor d'água saturado a pressão atmosférica e é mantida a 50°C pelo escoamento de água fria no interior do tubo. Qual é a taxa de transferência de calor para o refrigerante e qual é a taxa de condensação do vapor na superfície?

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada<sup>a</sup>

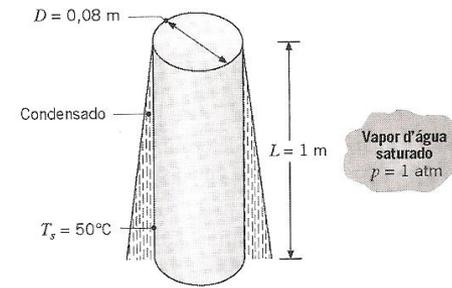
Temperatura, $T$ (K)	Pressão, $p$ (bar) <sup>b</sup>	Volume Específico (m <sup>3</sup> /kg)		Calor de Vaporização, $h_{fg}$ (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m <sup>2</sup> )		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_s \cdot 10^6$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (K <sup>-1</sup> )	Temperatura, $T$ (K)
		$v_e \cdot 10^3$	$v_g$		$c_{p,e}$	$c_{p,g}$	$\mu_e \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_e \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	$Pr_e$	$Pr_g$			
273,15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273,15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340
345	0,3372	1,024	4,683	2329	4,191	1,941	389	10,89	668	22,6	2,45	0,933	64,1	595,4	345
350	0,4163	1,027	3,846	2317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,2	350
355	0,5100	1,030	3,180	2304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,3	355
360	0,6209	1,034	2,645	2291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	697,9	360
365	0,7514	1,038	2,212	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9040	1,041	1,861	2265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,7	370
373,15	1,0133	1,044	1,679	2257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,1	373,15
375	1,0815	1,045	1,574	2252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761	375
380	1,2869	1,049	1,337	2239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788	380
385	1,5233	1,053	1,142	2225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814	385
390	1,794	1,058	0,980	2212	4,239	2,104	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013	55,6	841	390
400	2,455	1,067	0,731	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400

$$\rho_v = \frac{1}{v_v} = \frac{1}{1,679} = 0,5956 \text{ kg/m}^3$$

$$h_{fg} = 2257 \text{ kJ/kg}$$



# CONDENSAÇÃO



## EXEMPLO:

A superfície externa de um tubo vertical, com 1 metro de comprimento e 80 mm de diâmetro externo, está exposta a vapor d'água saturado a pressão atmosférica e é mantida a 50°C pelo escoamento de água fria no interior do tubo. Qual é a taxa de transferência de calor para o refrigerante e qual é a taxa de condensação do vapor na superfície?

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada<sup>a</sup>

Temperatura, $T$ (K)	Pressão, $p$ (bar) <sup>b</sup>	Volume Específico (m <sup>3</sup> /kg)		Calor de Vaporização, $h_{fg}$ (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m <sup>2</sup> )		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma_s \cdot 10^6$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta_s \cdot 10^6$ (K <sup>-1</sup> )	Temperatura, $T$ (K)
		$v_f \cdot 10^3$	$v_g$		$c_{p,v}$	$c_{p,s}$	$\mu_v \cdot 10^6$	$\mu_s \cdot 10^6$	$k_v \cdot 10^3$	$k_s \cdot 10^3$	$Pr_v$	$Pr_s$			
273.15	0,00611	1,000	206,3	2502	4,217	1,854	1750	8,02	569	18,2	12,99	0,815	75,5	-68,05	273.15
275	0,00697	1,000	181,7	2497	4,211	1,855	1652	8,09	574	18,3	12,22	0,817	75,3	-32,74	275
280	0,00990	1,000	130,4	2485	4,198	1,858	1422	8,29	582	18,6	10,26	0,825	74,8	46,04	280
285	0,01387	1,000	99,4	2473	4,189	1,861	1225	8,49	590	18,9	8,81	0,833	74,3	114,1	285
290	0,01917	1,001	69,7	2461	4,184	1,864	1080	8,69	598	19,3	7,56	0,841	73,7	174,0	290
295	0,02617	1,002	51,94	2449	4,181	1,868	959	8,89	606	19,5	6,62	0,849	72,7	227,5	295
300	0,03531	1,003	39,13	2438	4,179	1,872	855	9,09	613	19,6	5,83	0,857	71,7	276,1	300
305	0,04712	1,005	29,74	2426	4,178	1,877	769	9,29	620	20,1	5,20	0,865	70,9	320,6	305
310	0,06221	1,007	22,93	2414	4,178	1,882	695	9,49	628	20,4	4,62	0,873	70,0	361,9	310
315	0,08132	1,009	17,82	2402	4,179	1,888	631	9,69	634	20,7	4,16	0,883	69,2	400,4	315
320	0,1053	1,011	13,98	2390	4,180	1,895	577	9,89	640	21,0	3,77	0,894	68,3	436,7	320
325	0,1351	1,013	11,06	2378	4,182	1,903	528	10,09	645	21,3	3,42	0,901	67,5	471,2	325
330	0,1719	1,016	8,82	2366	4,184	1,911	489	10,29	650	21,7	3,15	0,908	66,6	504,0	330
335	0,2167	1,018	7,09	2354	4,186	1,920	453	10,49	656	22,0	2,88	0,916	65,8	535,5	335
340	0,2713	1,021	5,74	2342	4,188	1,930	420	10,69	660	22,3	2,66	0,925	64,9	566,0	340
345	0,3372	1,024	4,683	2329	4,191	1,941	389	10,89	668	22,6	2,45	0,933	64,1	595,4	345
350	0,4163	1,027	3,846	2317	4,195	1,954	365	11,09	668	23,0	2,29	0,942	63,2	624,2	350
355	0,5100	1,030	3,180	2304	4,199	1,968	343	11,29	671	23,3	2,14	0,951	62,3	652,3	355
360	0,6209	1,034	2,645	2291	4,203	1,983	324	11,49	674	23,7	2,02	0,960	61,4	697,9	360
365	0,7514	1,038	2,212	2278	4,209	1,999	306	11,69	677	24,1	1,91	0,969	60,5	707,1	365
370	0,9040	1,041	1,861	2265	4,214	2,017	289	11,89	679	24,5	1,80	0,978	59,5	728,7	370
373.15	1,0133	1,044	1,679	2257	4,217	2,029	279	12,02	680	24,8	1,76	0,984	58,9	750,1	373.15
375	1,0815	1,045	1,574	2252	4,220	2,036	274	12,09	681	24,9	1,70	0,987	58,6	761	375
380	1,2869	1,049	1,337	2239	4,226	2,057	260	12,29	683	25,4	1,61	0,999	57,6	788	380
385	1,5233	1,053	1,142	2225	4,232	2,080	248	12,49	685	25,8	1,53	1,004	56,6	814	385
390	1,794	1,058	0,980	2212	4,239	2,104	237	12,69	686	26,3	1,47	1,013	55,6	841	390
400	2,455	1,067	0,731	2183	4,256	2,158	217	13,05	688	27,2	1,34	1,033	53,6	896	400

Dados do líquido saturado na temperatura de filme:

$$T_f = \frac{T_{sat} + T_s}{2} = \frac{100 + 50}{2} = 75^\circ C = 348K$$

Interpolando os dados entre 345 e 350 K:

$$\rho_l = 975 \frac{kg}{m^3}$$

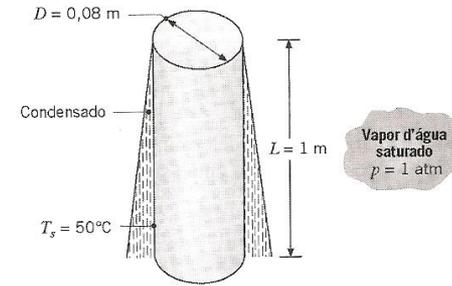
$$\mu_l = 375 \times 10^{-6} \frac{Ns}{m^2}$$

$$c_{p,l} = 4193 \frac{J}{kgK} \quad k_l = 0,668 \frac{W}{mK}$$

$$v_l = \frac{\mu_l}{\rho_l} = 385 \times 10^{-9} \frac{m^2}{s}$$

# CONDENSAÇÃO

## EXEMPLO:



A superfície externa de um tubo vertical, com 1 metro de comprimento e 80 mm de diâmetro externo, está exposta a vapor d'água saturado a pressão atmosférica e é mantida a  $50^\circ\text{C}$  pelo escoamento de água fria no interior do tubo. Qual é a taxa de transferência de calor para o refrigerante e qual é a taxa de condensação do vapor na superfície?

Calculando o número de Jacob:

$$Ja = \frac{c_{p,l}(T_{sat} - T_s)}{h_{fg}} = \frac{4193(100 - 50)}{2257 \times 10^3} = 0,0929 \quad \longrightarrow \quad h'_s = h_{fg}(1 + 0,68Ja) = 2257 \times 10^3(1 + 0,68 \times 0,0929) = 2400 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

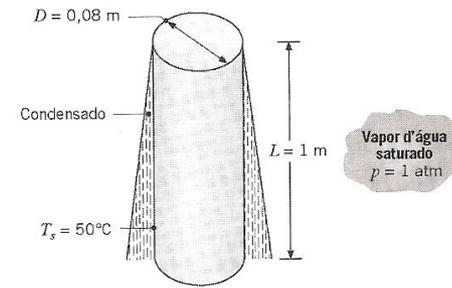
Resolvendo as três equações anteriores para o número de Reynolds, em particular a equação a seguir:

$$Re_\delta = \left[ \frac{3,7k_l L(T_{sat} - T_s)}{\mu_l h'_s (v_l^2/g)^{1/3}} + 4,8 \right]^{0,82} \quad 30 \leq Re_\delta \leq 1800$$

$$Re_\delta = \left[ \frac{3,7 \times 0,668 \times 1(100 - 50)}{375 \times 10^{-6} \times 2,4 \times 10^6 \left( \frac{(395 \times 10^{-9})^2}{9,8} \right)^{1/3}} + 4,8 \right]^{0,82} = 1177$$

OK!

# CONDENSAÇÃO



## EXEMPLO:

A superfície externa de um tubo vertical, com 1 metro de comprimento e 80 mm de diâmetro externo, está exposta a vapor d'água saturado a pressão atmosférica e é mantida a  $50^\circ\text{C}$  pelo escoamento de água fria no interior do tubo. Qual é a taxa de transferência de calor para o refrigerante e qual é a taxa de condensação do vapor na superfície?

$$\text{Re}_\delta = 1177 \quad \longrightarrow \quad \bar{h}_L = \frac{\text{Re}_\delta \mu_l h'_{fg}}{4L(T_{sat} - T_s)} \quad \longrightarrow \quad \bar{h}_L = \frac{1177 \times 375 \times 10^{-6} \times 2,4 \times 10^6}{4 \times 1(100 - 50)} = 5300 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

$$q = \bar{h}_L A (T_{sat} - T_s) = 5300 \times \pi \times 0,08 \times 1 \times (100 - 50) = 66,6 \text{ kW}$$

$$\dot{m} = \frac{q}{h'_{fg}} = \frac{66,6 \times 10^3}{2,4 \times 10^6} = 0,0276 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$