

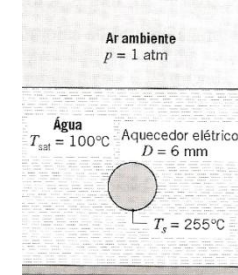
TRANSMISSÃO DE CALOR II

Prof. Eduardo Loureiro, DSc.

EBULIÇÃO

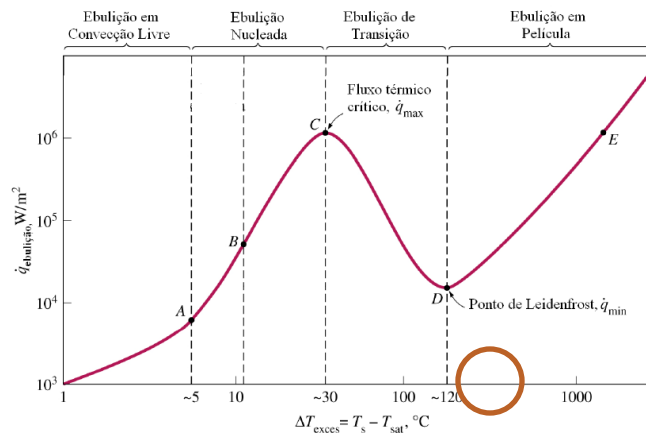
EXEMPLO

Um elemento aquecedor com revestimento metálico, com 6 mm de diâmetro e emissividade $\varepsilon = 1$, encontra-se imerso em posição horizontal em um banho de água. A temperatura da superfície do metal é de 255°C sob condições de ebulição em regime estacionário. Estime a dissipação de potência por unidade de comprimento do aquecedor.



Cálculo do excesso de temperatura: $\Delta T_e = T_s - T_{sat} = 255 - 100 = 155^\circ C$

De acordo com a curva de ebulição, acontece ebulição em filme em piscina quando a transferência de calor é por convecção e radiação.



$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}}$$

$$q'_s = q''_s \pi D = \bar{h} \pi D \Delta T_e$$

$$\bar{h}^{4/3} = \bar{h}_{conv}^{4/3} + \bar{h}_{rad} \bar{h}^{1/3}$$

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}_{conv} D}{k_v} = C \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\nu_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4}$$

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,8 c_{p,v} (T_s - T_{sat})$$

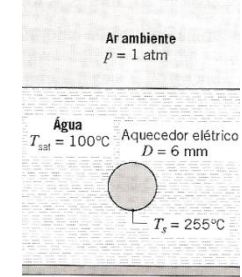
$$T_f = \frac{T_s + T_{sat}}{2}$$



EBULIÇÃO

EXEMPLO

Um elemento aquecedor com revestimento metálico, com 6 mm de diâmetro e emissividade $\varepsilon = 1$, encontra-se imerso em posição horizontal em um banho de água. A temperatura da superfície do metal é de 255°C sob condições de ebulição em regime estacionário. Estime a dissipação de potência por unidade de comprimento do aquecedor.



$$\rho_l = \frac{1}{v_e} = \frac{1}{1,044 \times 10^{-3}} = 957,9 \text{ kg/m}^3$$

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

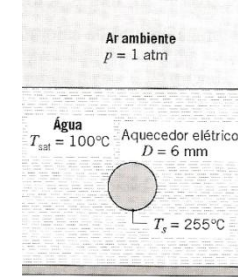
TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada^a

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m ²)		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 ⁻¹)	Temperatura, T (K)
		$v_e \cdot 10^3$	v_g		$c_{p,ve}$	$c_{p,sg}$	$\mu_e \cdot 10^6$	$\mu_g \cdot 10^6$	$k_e \cdot 10^3$	$k_g \cdot 10^3$	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

EBULIÇÃO

EXEMPLO

Um elemento aquecedor com revestimento metálico, com 6 mm de diâmetro e emissividade $\varepsilon = 1$, encontra-se imerso em posição horizontal em um banho de água. A temperatura da superfície do metal é de 255°C sob condições de ebulição em regime estacionário. Estime a dissipação de potência por unidade de comprimento do aquecedor.



$$\rho_g = 0,4902 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$k_v = 29,9 \times 10^{-3} \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$c_{p,v} = 1,980 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}$$

$$\nu = 31,11 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

TABELA A.4 Continuação

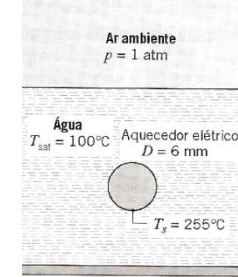
T (K)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/(kg · K))	$\mu \cdot 10^7$ (N · s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/(m · K))	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	Pr
Vapor d' Água							
380	0.5863	2,060	127,1	21,68	24,6	20,4	1,06
400	0.5542	2,014	134,4	24,25	26,1	23,4	1,04
450	0.4902	1,980	152,5	31,11	29,9	30,8	1,01
500	0.4405	1,985	170,4	38,68	33,9	38,8	0,998
550	0.4005	1,997	188,4	47,04	37,9	47,4	0,993
600	0,3652	2,026	206,7	56,60	42,2	57,0	0,993
650	0,3380	2,056	224,7	66,48	46,4	66,8	0,996
700	0,3140	2,085	242,6	77,26	50,5	77,1	1,00
750	0,2931	2,119	260,4	88,84	54,9	88,4	1,00
800	0,2739	2,152	278,6	101,7	59,2	100	1,01
850	0,2579	2,186	296,9	115,1	63,7	113	1,02

$$T_f = \frac{T_s + T_{sat}}{2} = \frac{255 + 100}{2} + 273,15 = 450,65 \text{ K}$$

EBULIÇÃO

EXEMPLO

Um elemento aquecedor com revestimento metálico, com 6 mm de diâmetro e emissividade $\varepsilon = 1$, encontra-se imerso em posição horizontal em um banho de água. A temperatura da superfície do metal é de 255°C sob condições de ebulição em regime estacionário. Estime a dissipação de potência por unidade de comprimento do aquecedor.



$$h'_{fg} = h_{fg} + 0,8c_{p,v}(T_s - T_{sat}) = 2257 \times 10^3 + 0,8 \times 1980 \times 155 = 2502 \times 10^3$$

$$\bar{Nu}_D = \frac{\bar{h}_{conv} D}{k_v} = C \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v) h'_{fg} D^3}{\nu_v k_v (T_s - T_{sat})} \right]^{1/4}$$

$$\bar{h}_{conv} = 0,62 \left[\frac{9,81(957,9 - 0,4902) \times 2502 \times 10^3 \times 0,006^3}{31,11 \times 10^{-6} \times 0,0299 \times 155} \right]^{1/4} \times \frac{0,0299}{0,006} = 238 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

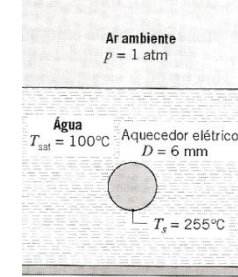
$$\bar{h}_{rad} = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sat}^4)}{T_s - T_{sat}} = \frac{5,67 \times 10^{-8} (528^4 - 373^4)}{528 - 373} = 21,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$



EBULIÇÃO

EXEMPLO

Um elemento aquecedor com revestimento metálico, com 6 mm de diâmetro e emissividade $\varepsilon = 1$, encontra-se imerso em posição horizontal em um banho de água. A temperatura da superfície do metal é de 255°C sob condições de ebulição em regime estacionário. Estime a dissipação de potência por unidade de comprimento do aquecedor.



$$\bar{h}^{4/3} = \bar{h}_{\text{conv}}^{4/3} + \bar{h}_{\text{rad}} \bar{h}^{1/3}$$

$$\bar{h}^{4/3} = 238^{4/3} + 21,3 \bar{h}^{1/3}$$

Resolvendo no Excel:

$$\bar{h} = 254,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}}$$

Finalmente:

$$q'_s = q''_s \pi D = \bar{h} \pi D \Delta T_e = 254,1 \times \pi \times 0,006 \times 155 = 742 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

EBULIÇÃO

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA

Na ebulição com convecção forçada, além do movimento causado pelo surgimento de bolhas na superfície aquecida, o escoamento é devido a uma movimentação dirigida (ou global) do fluido proporcionada por um agente (uma bomba, p. ex.).

As condições dependem fortemente da geometria:

1. Escoamento externos sobre placas ou cilindros aquecidos;
2. Escoamento interno (em dutos). Comumente denominado *escoamento bifásico*, caracterizado por mudanças rápidas do estado líquido para vapor no sentido do escoamento.



EBULIÇÃO



EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA EM ESCOAMENTO EXTERNO

Para um líquido com velocidade V em escoamento cruzado sobre um cilindro com diâmetro D , foram desenvolvidas as seguintes expressões para escoamentos com baixas e altas velocidades (as propriedades são estimadas na temperatura de saturação):

Baixas velocidades:

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{1}{\pi} \left[1 + \left(\frac{4}{We_D} \right)^{1/3} \right]$$

O número de Weber é a razão entre as forças de inércia e as forças de tensão superficial:

$$We_D = \frac{\rho_v V^2 D}{\sigma}$$

Altas velocidades:

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{(\rho_l / \rho_v)^{3/4}}{169\pi} + \frac{(\rho_l / \rho_v)^{1/2}}{19,2\pi We_D^{1/3}}$$

As regiões de alta e baixa velocidade são determinadas em função do valor do parâmetro de fluxo térmico:

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} < \left[\left(\frac{0,275}{\pi} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1 \right]$$

ALTA VELOCIDADE

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} > \left[\left(\frac{0,275}{\pi} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1 \right]$$

BAIXA VELOCIDADE



EBULIÇÃO



EXEMPLO

Água saturada a 1 atm, e a uma velocidade de 2 m/s, escoa sobre um elemento de aquecimento cilíndrico com 5 mm de diâmetro. Qual é a taxa máxima de aquecimento por unidade de comprimento do cilindro?

TABELA A.6 Propriedades termofísicas da água saturada^a

Temperatura, T (K)	Pressão, p (bar) ^b	Volume Específico (m ³ /kg)		Calor de Vaporização, h_{fg} (kJ/kg)	Calor Específico (kJ/(kg · K))		Viscosidade, (N · s/m ²)		Condutividade Térmica (W/(m · K))		Número de Prandtl		Tensão Superficial, $\sigma \cdot 10^6$ (N/m)	Coeficiente de Expansão, $\beta \cdot 10^6$ (K ⁻¹)	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

$$\rho_l = \frac{1}{v_e} = \frac{1}{1,044 \times 10^{-3}} = 957,9 \text{ kg/m}^3$$

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

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

$$\sigma = 58,9 \times 10^{-3} \text{ N/m}$$



EBULIÇÃO



EXEMPLO

Água saturada a 1 atm, e a uma velocidade de 2 m/s, escoia sobre um elemento de aquecimento cilíndrico com 5 mm de diâmetro. Qual é a taxa máxima de aquecimento por unidade de comprimento do cilindro?

Supondo tratar-se de região de alta velocidade:

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} = \frac{(\rho_l / \rho_v)^{3/4}}{169\pi} + \frac{(\rho_l / \rho_v)^{1/2}}{19,2\pi We_D^{1/3}} \quad We_D = \frac{\rho_v V^2 D}{\sigma}$$

$$q''_{\max} = \frac{0,5955 \times 2257 \times 10^3 \times 2}{\pi} \left[\frac{1}{169} \left(\frac{957,9}{0,5955} \right)^{3/4} + \frac{1}{19,2} \left(\frac{957,9}{0,5955} \right)^{1/2} \left(\frac{58,9 \times 10^{-3}}{0,5955 \times 2^2 \times 0,005} \right)^{1/3} \right] = 4,331 \frac{MW}{m^2}$$

Testando se a hipótese de região de alta velocidade é verdadeira:

$$\frac{q''_{\max}}{\rho_v h_{fg} V} < \left[\left(\frac{0,275}{\pi} \right) \left(\frac{\rho_l}{\rho_v} \right)^{1/2} + 1 \right] \Rightarrow \frac{4,331 \times 10^6}{0,5955 \times 2257 \times 10^3 \times 2} < \frac{0,275}{\pi} \left(\frac{957,9}{0,5955} \right)^{1/2} + 1 \Rightarrow 1,61 < 4,51$$

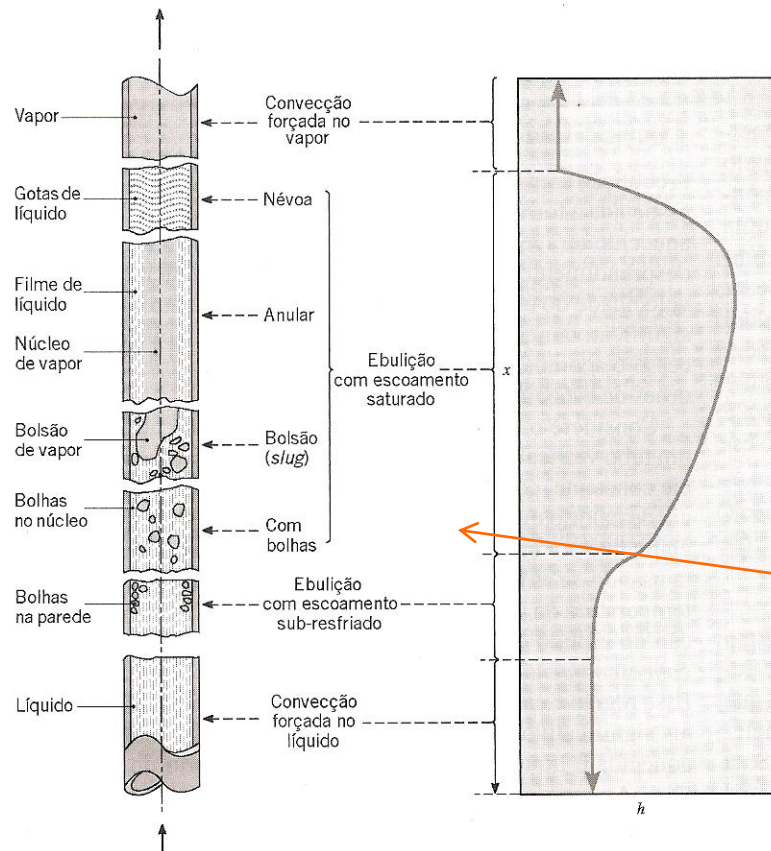
Hipótese confirmada. Então, a máxima taxa de calor por unidade de comprimento é:

$$q'_{\max} = q''_{\max} \times \pi D = 4,331 \times 10^6 \times \pi \times 0,005 = 68 \frac{kW}{m}$$



EBULIÇÃO

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO BIFÁSICO



A ebulição com convecção forçada em escoamento interno está associada à formação de bolhas na superfície interna de um tubo aquecido através do qual um líquido escoava.

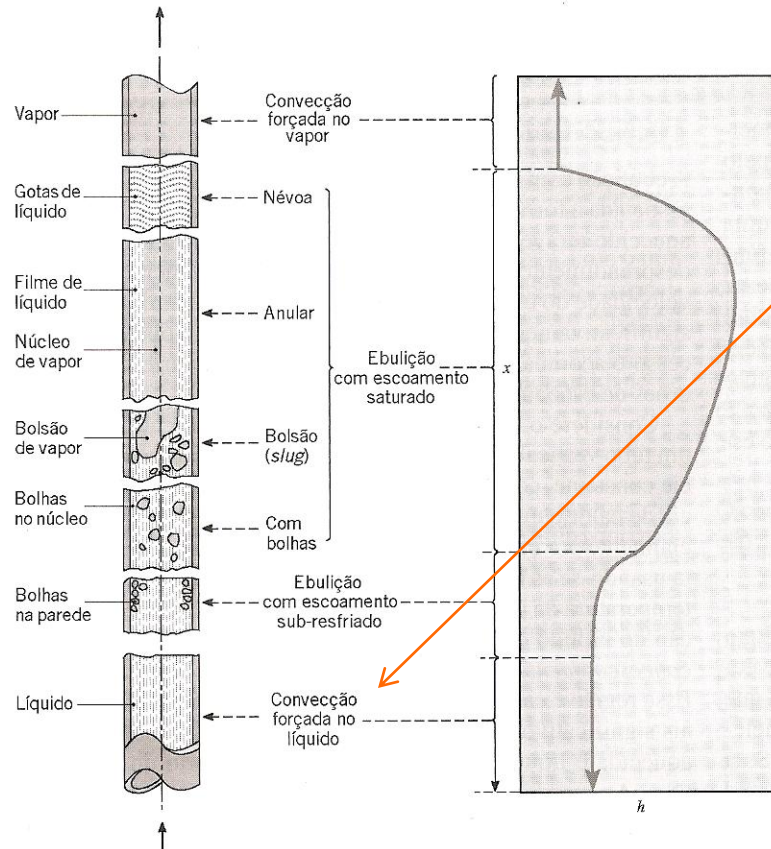
O crescimento e desprendimento das bolhas são fortemente influenciados pela velocidade do escoamento e os efeitos fluidodinâmicos diferem muito dos presentes na ebulição em piscina.

O processo é acompanhado pela existência de uma variedade de padrões de escoamento bifásico.



EBULIÇÃO

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO BIFÁSICO

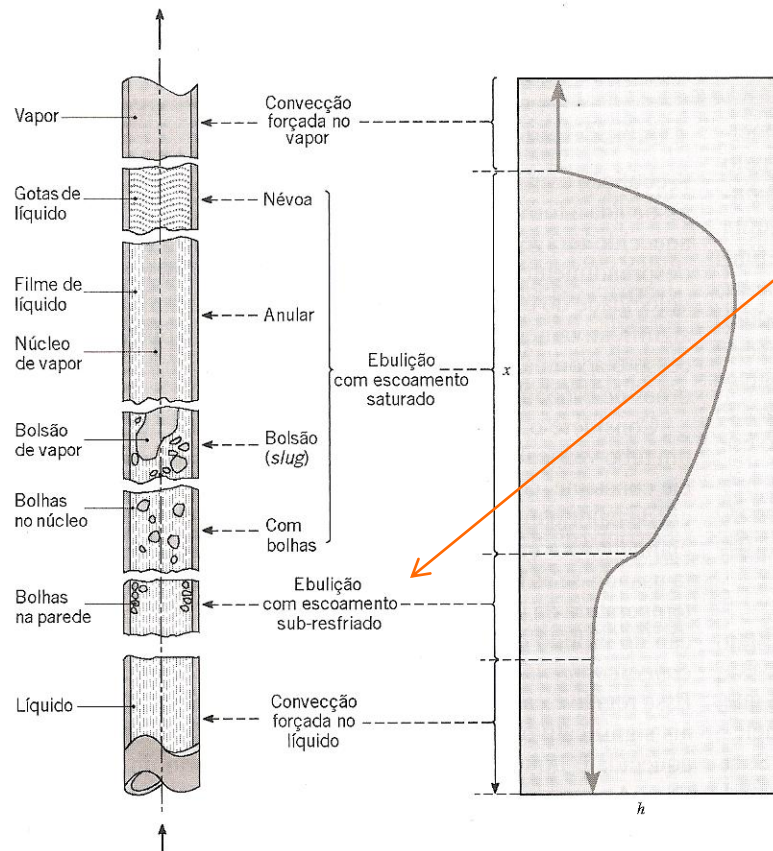


A transferência de calor para o líquido sub-resfriado que entra no tubo é inicialmente por *convecção forçada monofásica*.



EBULIÇÃO

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO BIFÁSICO



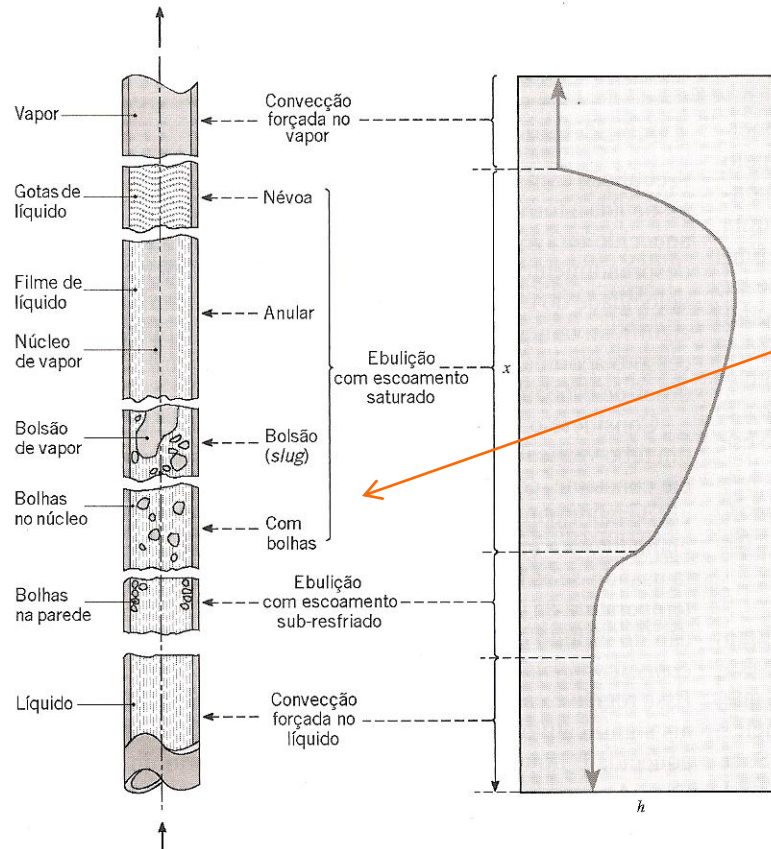
Mais além no tubo, a temperatura na parede se torna superior à temperatura de saturação do líquido e a vaporização inicia-se na região de *ebulição com escoamento sub-resfriado*.

Essa região é caracterizada pela presença de gradientes de temperatura radiais significativos, com bolhas se formando adjacentes à parede aquecida e líquido sub-resfriado escoando perto do centro do tubo.



EBULIÇÃO

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO BIFÁSICO



A espessura da região das bolhas aumenta ao longo do tubo até que o núcleo do líquido atinge a temperatura de saturação do fluido. Então as bolhas podem estar presentes em qualquer posição radial e a *fração máxima de vapor no fluido média no tempo*, \bar{X} , é maior do que zero em qualquer posição radial. Isso marca o início da região *de ebulição com escoamento saturado*.

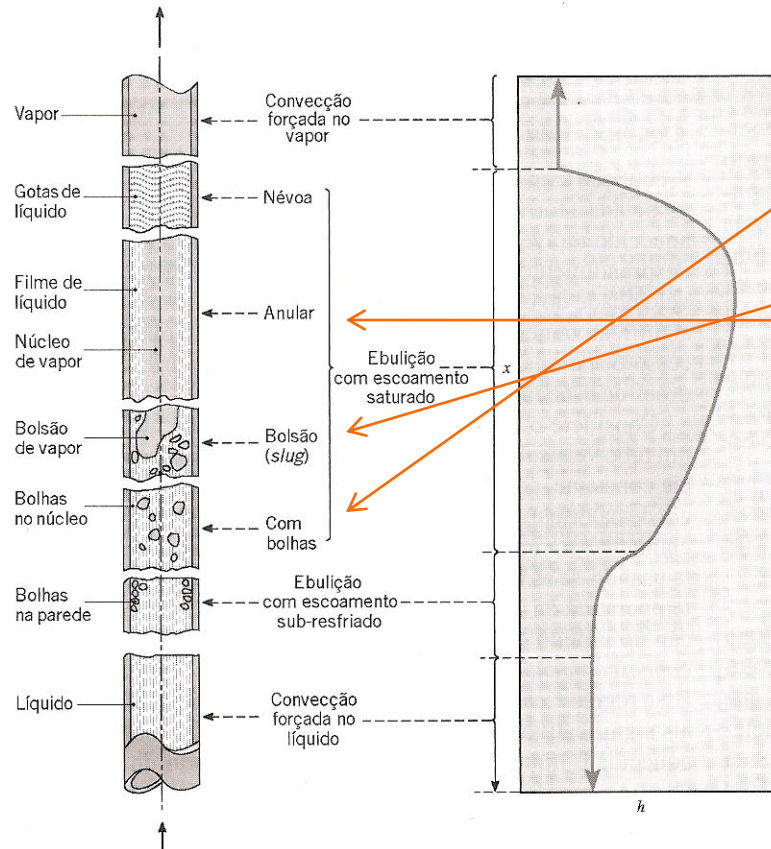
No interior desta região, a fração mássica de vapor média, frequentemente chamada de *qualidade* do fluido bifásico é definida por:

$$\bar{X} = \frac{\int_{A_c} \rho u(r, x) X dA_c}{\dot{m}}$$

Devido à grande diferença de massas específicas entre as fases de vapor e de líquido, a velocidade média do fluido, u , aumenta significativamente.

EBULIÇÃO

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO BIFÁSICO



O primeiro estágio da região de ebulição com escoamento saturado corresponde ao *regime de escoamento com bolhas*.

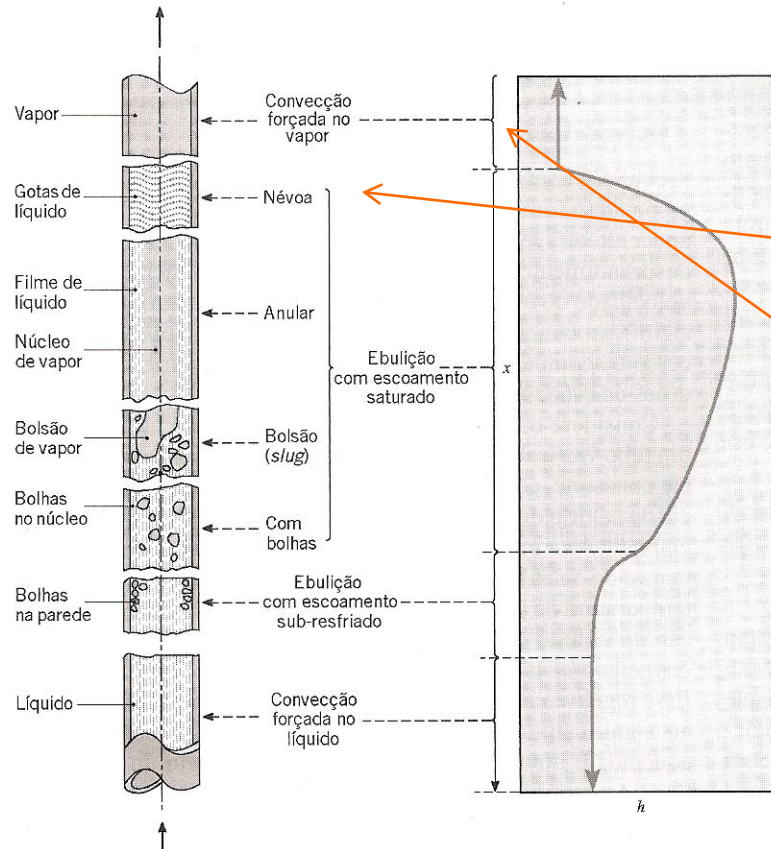
Na medida em que \bar{X} aumenta, bolsas individuais coalescem formando bolsões de vapor. Esse regime de *escoamento em bolsões* é seguido pelo regime de *escoamento anular* no qual o líquido forma um filme na parede do tubo.

Esse filme se move ao longo da superfície interna do tubo, enquanto o vapor se move com uma velocidade maior através do núcleo do tubo.



EBULIÇÃO

EBULIÇÃO COM CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO BIFÁSICO



Na sequência, pontos secos aparecem na superfície interna do tubo e crescem em tamanho no interior de um regime de transição. Finalmente a superfície inteira do tubo está completamente seca e todo o líquido remanescente está na forma de gotas que viajam a alta velocidade no núcleo central do tubo no *regime de névoa*.

Depois das gotas serem totalmente vaporizadas, o fluido é constituído de vapor superaquecido em uma segunda região de convecção forçada monofásica.

O aumento da fração mássica de vapor em conjunto com a significativa diferença das massas específicas das fases líquida e vapor, aumentam a velocidade média do fluido por várias ordens de grandeza entre a primeira e a segunda regiões de convecção forçada monofásica.

