

Escoamentos Multifásicos

(FEN03711)

Gustavo Rabello Anjos

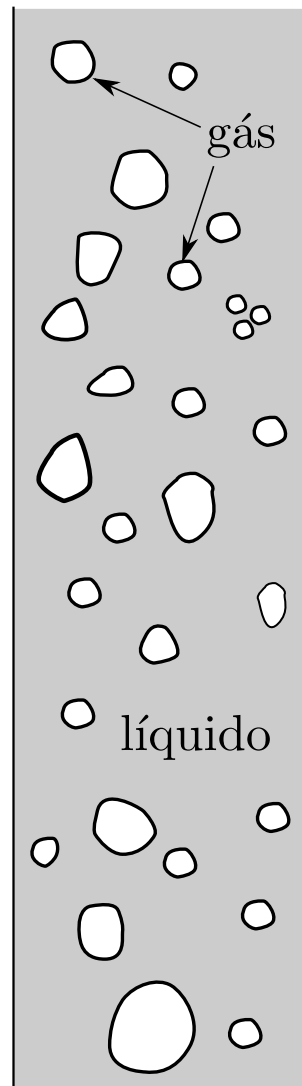
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
gustavo.anjos@uerj.br

1o. período, 2015

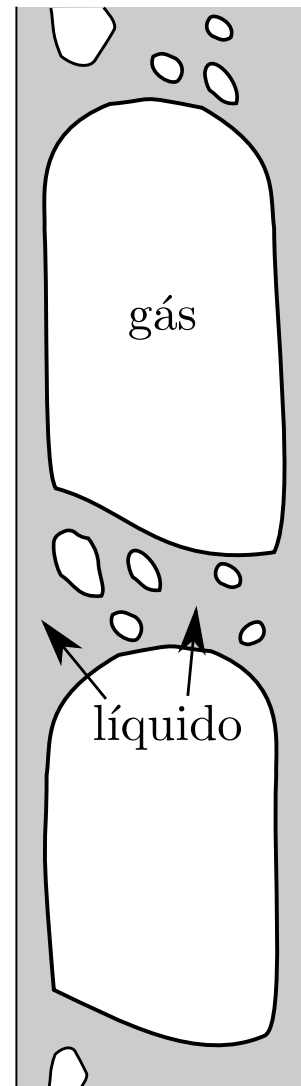
Tópicos da aula

- escoamentos bifásicos verticais
- escoamentos bifásicos horizontais
- Mapas de padrão de escoamentos
- Apresentação de vídeos sobre escoamentos bifásicos
- Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos (título de vapor, vazão mássica, velocidade média, fração de vazios)

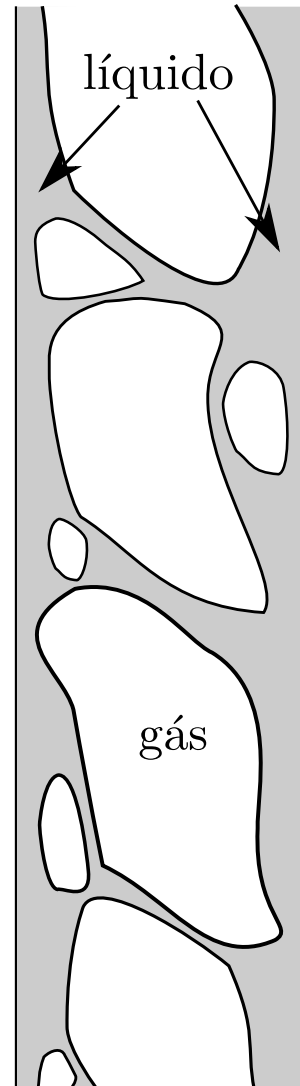
Escoamentos verticais I



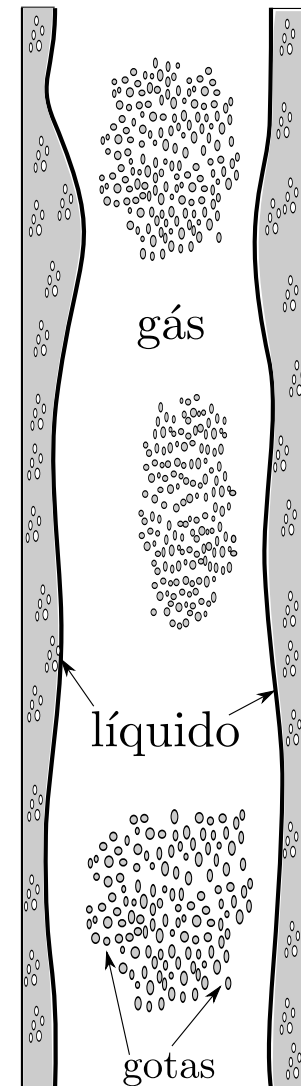
(a) bolhas



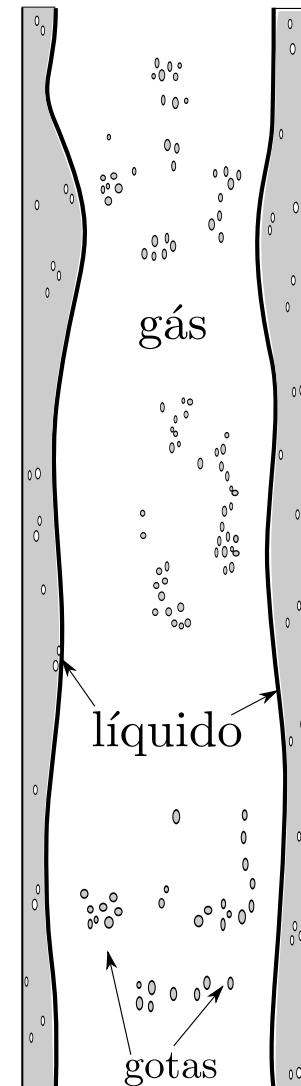
(b) golfada



(c) batido

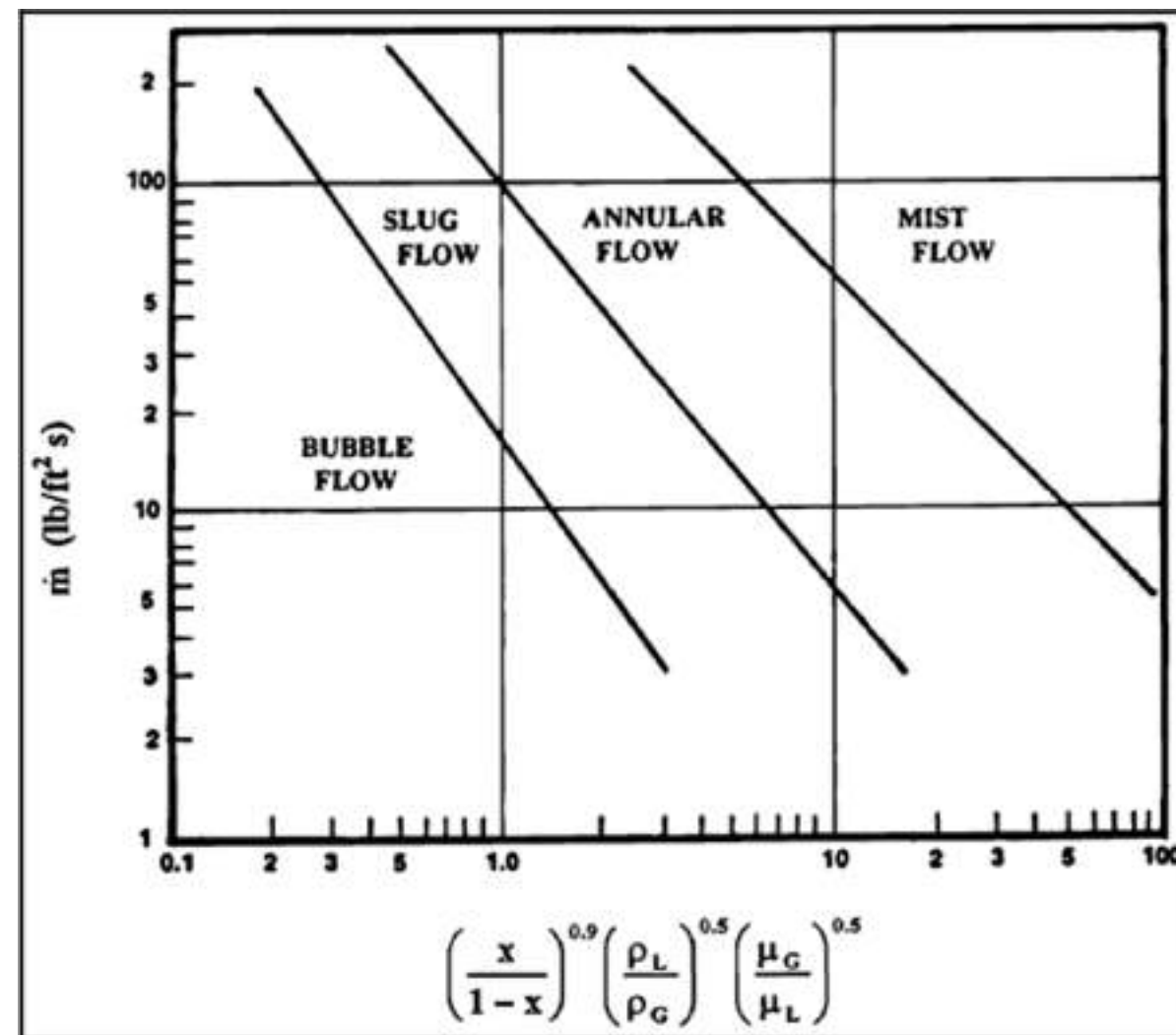


(d) pouco anular



(e) anular

Escoamentos verticais II



Mapa de padrão de escoamento em tubos verticais em função da vazão mássica, título de vapor, densidade e viscosidade das fases líquidas e gasosas (Fair, 1960).

Escoamentos verticais III

- (a) bolhas (bubbly): no escoamento em bolhas, o gás ou a fase vapor está distribuída na fase contínua líquida como um aglomerado de bolhas. Em uma situação extrema, estas bolhas podem apresentar formato esférico e de pequeno diâmetro ou apresentar formato de corpo alongado com a uma das extremidades arredondadas. Neste último estado, mesmo não apresentando tamanhos comparáveis ao diâmetro do tubo, o padrão das bolhas pode trazer alguma semelhança ao escoamento em golfadas.
- (b) golfadas (slug): neste tipo de escoamento, as bolhas apresentam aproximadamente o mesmo diâmetro do tubo, com isso os efeitos de parede são mais evidentes. O nariz da bolha tem um formato característico arredondado devido à pressão e ao escoamento, enquanto que as laterais são separadas por um filme líquido que vai suavemente diminuindo até chegar à parte de trás da bolha. O termo golfadas representa o líquido que separa sucessivas bolhas de gás ou vapor. Dependendo do escoamento, pequenas bolhas podem ou não estar presentes entre as bolhas principais.
- (c) batido (churn): a interface de largas bolhas de gás ou vapor se quebra, formando o escoamento do tipo golfadas em uma distribuição caótica. Nele, a fase líquida é empurrada em direção às paredes do canal. Este escoamento também é conhecido como semi-anular ou golfada-anular, devido ao carácter transitório deste padrão.

Escoamentos verticais IV

- (d) pouco anular (wispy annular): o filme líquido apresenta grande espessura nas paredes do tubo com uma considerável quantidade de líquido arrastada para dentro do núcleo de gás ou vapor. Em um padrão geral, muitas bolhas são encontradas no filme líquido próximo às paredes do tubo, enquanto que grandes gotas são arrastadas dentro do núcleo de gás ou vapor. Este padrão de escoamento é encontrado em grandes vazões mássicas e, devido à grande quantidade de bolhas no filme líquido, este escoamento pode ser confundido com o escoamento em bolhas.
- (e) anular (annular): um filme líquido é formado próximo às paredes do tubo devido ao aparecimento de um núcleo contínuo de gás ou vapor no meio do tubo. O aparecimento de ondas pode ser notado na superfície do filme. Devido a sucessiva quebra destas ondas, pode haver a formação de gotas no núcleo de gás ou vapor. Diferentemente do escoamento do tipo pouco anular, as gotas estão separadas ao invés de aglomeradas.

Escoamentos verticais - V

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_4_1.mpg](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_4_1.mpg)

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_4_2.mpg](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_4_2.mpg)

- bolhas dispersas: escoamento ar-água com fração de vazios de 5.1% em temperatura ambiente. Este vídeo mostra um escoamento de bolhas dentro de um tubo de vidro vertical com diâmetro interno $D=30\text{mm}$. O escoamento se encontra com velocidade superficial da fase gasosa $V_{sg}=0.021\text{m/s}$ e velocidade superficial da fase líquida $V_{sl}=0.21\text{m/s}$. O escoamento mostra diversas bolhas dispersas que não começaram a se aglomerar. A fração de vazios foi medida através de uma sonda microsensível na linha de centro do canal (tubo).
- bolhas: escoamento ar-água com fração de vazios de 10.3% em temperatura ambiente. Este vídeo mostra um escoamento de bolhas dentro de um tubo de vidro vertical com diâmetro interno $D=30\text{mm}$. O escoamento se encontra com velocidade superficial da fase gasosa $V_{sg}=0.029\text{m/s}$ e velocidade superficial da fase líquida $V_{sl}=0.21\text{m/s}$. O escoamento mostra o início da formação de conjuntos de bolhas (clusters). A fração de vazios foi medida através de uma sonda microsensível na linha de centro do canal (tubo).

Escoamentos verticais - VI

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_4_5.mpg](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_4_5.mpg)

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_4_6.avi](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_4_6.avi)

- golfadas: escoamento ar-água com fração de vazios de 17.0% em temperatura ambiente. Este vídeo mostra um exemplo de escoamento em golfadas com diversas bolhas dispersas na fase líquida dentro de um tubo de vidro vertical com diâmetro interno $D=30\text{mm}$. O escoamento se encontra com velocidade superficial da fase gasosa $V_{sg}=0.058\text{m/s}$ e velocidade superficial da fase líquida $V_{sl}=0.21\text{m/s}$. O vídeo mostra golfadas de gás bem formadas nestas condições de escoamento. A fração de vazios foi medida através de uma sonda microsensível na linha de centro do canal (tubo).
- Coalescência de 2 bolhas do tipo Taylor em tubo vertical. Este vídeo mostra uma visão lateral tomada em um tubo vertical com escoamento em golfadas (o tubo não está visível no vídeo). Os testes foram feitos para o estudo da influência da distância de separação de 2 bolhas consecutivas sob a influência da bolha de arrasto (2a. bolha). A alta velocidade da bolha de arrasto e sua colisão com a bolha de cima é mostrada com a deformação do nariz da bolha de arrasto antes da colisão, tudo causado pela recirculação localizada na região líquida entre as bolhas.

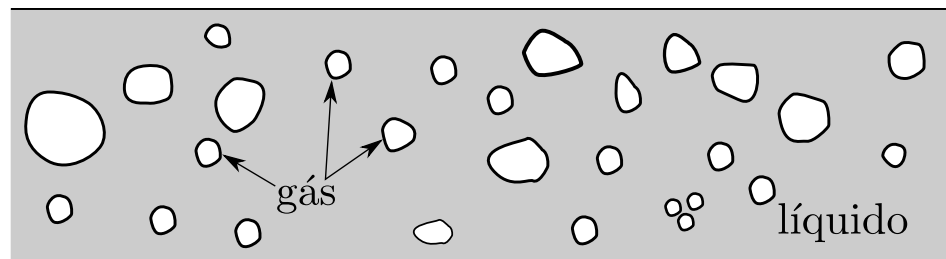
Escoamentos verticais - VII

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_4_8.avi](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_4_8.avi)

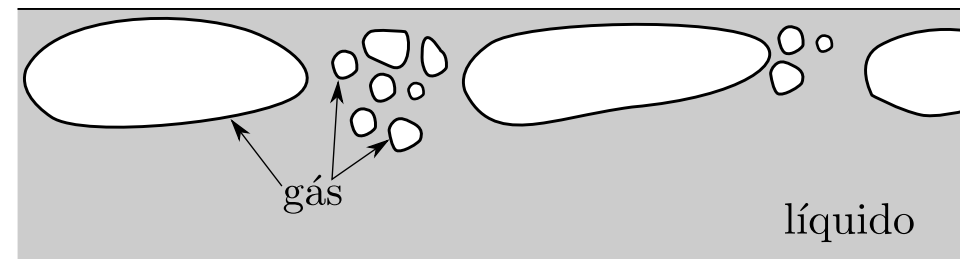
[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_4_9.avi](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_4_9.avi)

- anular: este vídeo mostra uma visão axial de um escoamento anular em tubo vertical. Os testes foram realizados com escoamento ascendente (de baixo para cima) de ar-água com a câmera montada na parte de cima do experimento, virada para baixo, e um feixe de laser apontado para o experimento. Um largo arrasto de líquido é visivelmente identificado na parte central do tubo, onde se encontra a fase gasosa.
- golfada: este vídeo mostra uma visão lateral de um escoamento do tipo golfadas em tubo vertical com um traçador fotocromático entrando através das paredes do tubo para indicação da direção do escoamento. Nota-se a mudança de direção do escoamento próximo à parede devido a passagem da bolha do tipo Taylor. Além disso, é clara a observação do alto grau de mistura na fase líquida entre as bolhas.

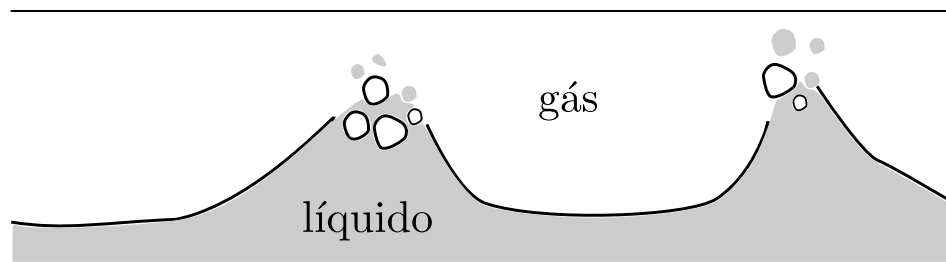
Escoamentos horizontais I



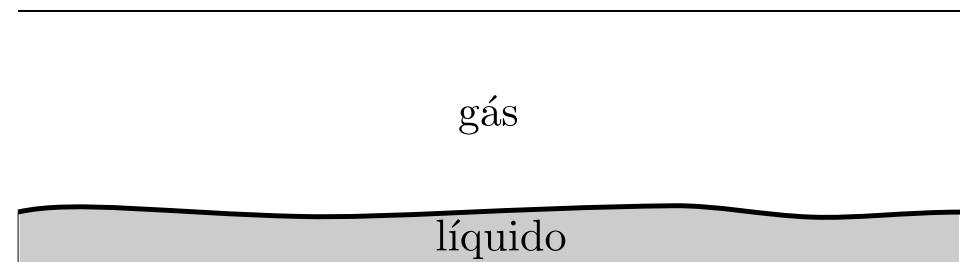
(a) bolhas dispersas



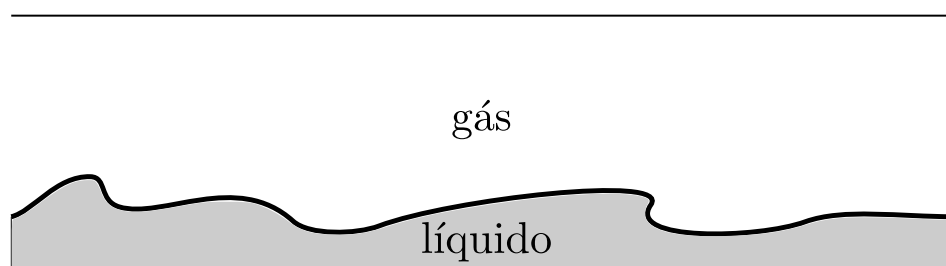
(b) bolhas



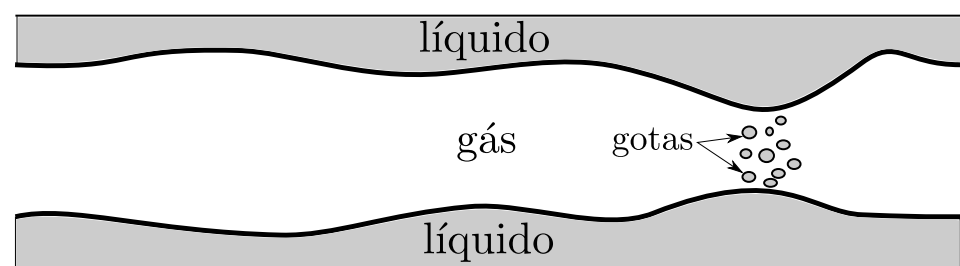
(c) golfadas



(d) estratificado

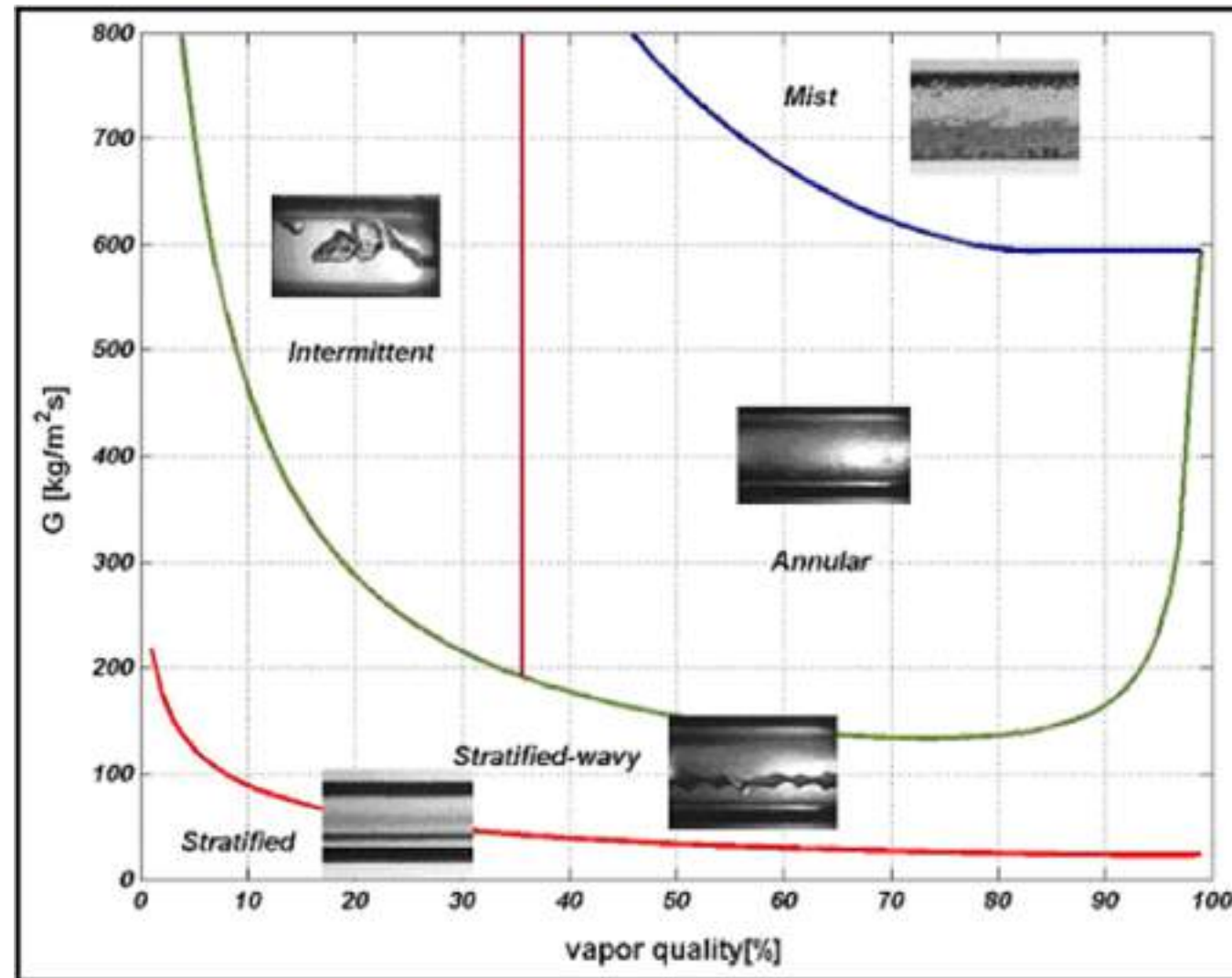


(e) estratificado ondulado



(f) anular

Escoamentos horizontais II



Mapa de padrão de escoamento para R-22 à temperatura de saturação de 5C, mostrando as zonas de transição entre regimes de escoamentos bifásicos. G é a velocidade mássica do fluido e 'vapor quality' é o título de vapor para um diâmetro interno $d=13.82\text{mm}$

Escoamentos horizontais III

- (a) Bolhas dispersas (bubbly flow): este escoamento é similar ao apresentado anteriormente para escoamento vertical, com a diferença que as bolhas de gás ou vapor tendem a se movimentar na metade superior do tubo. Fato justificado pela menor densidade da bolha comparada ao líquido. Em uma velocidade moderada de ambas as fases presente no escoamento, a distribuição de bolhas é uniforme ao longo do tubo, enquanto que para velocidades mais elevadas o padrão de escoamento se assemelha ao pouco anular.
- (b) Bolhas (bubbly flow): escoamento similar ao do tipo golfadas em tubos verticais. Como no caso de bolhas dispersas, as bolhas de gás ou vapor tendem a atravessar o tubo na metade superior, devido ao campo gravitacional.
- (c) Estratificado (stratified): escoamento separado por uma interface suave, onde geralmente é encontrado em baixas velocidades das fases líquida e gasosa.

Escoamentos horizontais IV

- (d) estratificado ondulado (stratified-wavy): as ondas são formadas quando a velocidade na fase gasosa é aumentada. Estas ondas se movimentam na direção do escoamento.
- (e) golfada (slug): com o aumento da velocidade da fase de vapor, a amplitude das ondas também aumenta, se aproximando da parede do tubo. A parte superior do tubo atrás da onda é molhada por um filme líquido que é drenado para o meio da fase líquido.
- (f) anular (annular): a vazão da fase gasosa é tão alta que é capaz de sustentar a fase líquida próxima à parede do tubo, originando um núcleo de gás ou vapor. Em sua seção transversal, o líquido pode não ser contínuo ao redor de toda a circunferência, porém será mais espesso na base do tubo.

Escoamentos horizontais - V

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_2_1.mpg](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_2_1.mpg)

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_2_2.mpg](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_2_2.mpg)

- bolhas: este vídeo mostra o escoamento de bolhas isoladas dentro de um tubo de vidro com diâmetro interno $D=14\text{mm}$. Este escoamento está a velocidade mássica moderada e com baixo título de vapor (vapor quality). O fluido de trabalho é amônia a 5 graus Celsius.
- Estratificado: este vídeo mostra um escoamento do tipo estratificado-ondulado (líquido embaixo e vapor em cima) dentro de um tubo de vidro com diâmetro interno $D=14\text{mm}$. O fluido de trabalho é amônia a 5 graus Celsius, título de vapor 0.20 e velocidade mássica $G=26\text{kg/m}^2\text{s}$.

Escoamentos horizontais - VI

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_2_3.mpg](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_2_3.mpg)

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_2_4.mpg](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_2_4.mpg)

- Golfada: este vídeo mostra um escoamento do tipo golfadas com baixo título de vapor dentro de um tubo de vidro horizontal com diâmetro interno $D=14\text{mm}$. O fluido de trabalho utilizado é amônia a 5 graus Celsius, título de vapor 0.06 e velocidade mássica $180\text{kg/m}^2\text{s}$.
- Anular: este vídeo mostra um escoamento anular (líquido em um filme anular no perímetro do tubo e vapor no centro do tubo) com alto título de vapor dentro de um tubo de vidro com diâmetro interno $D=14\text{mm}$. O fluido de trabalho é amônia a 5 graus Celsius, título de vapor 0.80 e velocidade mássica $G=122\text{kg/m}^2\text{s}$.

Escoamentos horizontais - VII

[http://www.wlv.com/
products2/databook/
db3/data/videos/
db3vid1_2_14.wmv](http://www.wlv.com/products2/databook/db3/data/videos/db3vid1_2_14.wmv)

- Padrões de escoamento em tubo horizontal como função do número de Reynolds superficial do gás. Este teste foi realizado para um fixo valor do número de Reynolds superficial da fase líquida $Re_{sl} = 5000$ e com uma faixa de Reynolds superficial da fase gasosa $1500 < Re_{sg} < 47600$. A interpretação de Reynolds superficial se dá quando uma fase particular escoar em um tubo sem a presença da outra fase. Note a ampla transição de faixas entre diferentes padrões de escoamento. Inicialmente o escoamento se apresenta em forma de golfadas ($1500 < Re_{sl} < 6000$), quando $Re_{sl} > 6000$ o escoamento apresenta sua fase transitória de golfadas para ondulado e com $Re_{sl} > 16000$ o escoamento se torna ondulado anular. Finalmente, quando $Re_{sl} > 32000$ o escoamento se apresenta em sua forma completamente anular.

Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos I

- Título de vapor: é definido pela razão da vazão mássica de vapor (\dot{M}_G) dividida pela vazão mássica total ($\dot{M}_G + \dot{M}_L$):

$$x = \frac{\dot{M}_G}{\dot{M}_G + \dot{M}_L}$$

Quando o escoamento é adiabático, ou seja não há transferência de calor, se torna necessário a medida de vazão mássica para cada fase, com isso o título de vapor é determinada para todo o tubo. Se o tubo é aquecido e fluxos de massa são notados no sistema, o título de vapor aumentará na direção do escoamento. No entanto, para o caso de resfriamento do tubo e, conseqüentemente, a condensação do vapor, o título de vapor diminuirá na direção do escoamento.

Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos II

Em escoamentos multifásicos existem um grande número de velocidades que podem ser definidas experimentalmente. Ainda, como os fluidos estão em fases distintas, diferentes velocidades podem ser encontradas, sugerindo também o uso de velocidade relativa como base para caracterização da velocidade do escoamento. A seguir são definidas algumas importantes velocidades encontradas na literatura.

- Velocidade média verdadeira: é a velocidade em que cada fase se movimenta no escoamento.
- Velocidade superficial: também conhecida como fluxo volumétrico, é definida como a razão do fluxo de velocidade da fase considerada pela área transversal total do escoamento multifásico.
- Velocidade de deriva: razão da velocidade verdadeira média pela velocidade superficial total.

Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos III

- Fluxo de massa: é definido como a vazão mássica total (\dot{M}) dividida pela área transversal do escoamento:

$$G = \frac{\dot{M}}{A}$$

onde a expressão acima representa a relação entre a velocidade média do escoamento multiplicada pela densidade média. A unidade usual de fluxo de massa é [kg/m²s].

Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos IV

Fração de vazios (ϵ) é um dos parâmetros mais importantes para caracterização de escoamentos multifásicos. Este também é de grande importância para a determinação de outros parâmetros, tais como viscosidade e densidade em escoamentos multifásicos, obtenção de velocidade média relativa e, também, como ferramenta fundamental em modelos de previsão de transição de padrões de escoamentos.

A fração de vazios local ϵ_{local} é tipicamente medida em um ponto ou pequeno volume quando feita experimentalmente. É definida com $\epsilon_{local} = 0$ quando líquido está presente ou $\epsilon_{local} = 1$ quando vapor está presente. Tipicamente é realizada uma média temporal local para determinação da fração de vapor, sendo definida pela seguinte expressão:

$$\epsilon_{local}(r, t) = \frac{1}{t} \int_t P_k(r, t) dt$$

onde $P_k(r, t)$ é uma função indicadora da presença de vapor no ponto em função do tempo t .

Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos IV

A fração de vazios cordal (ϵ_{cordal}) é tipicamente medida através de um feixe radioativo brilhante que atravessa o tubo onde o escoamento multifásico está localizado. Através da absorção de luz deste feixe no outro lado do tubo, é possível medir o comprimento da fase gasosa. A vazão de vazios cordal é então determinada por:

$$\epsilon_{cordal} = \frac{L_G}{L_G + L_L}$$

onde L_G é o comprimento de linha ocupado pela fase gasosa e L_L pela fase líquida.

Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos V

A fração de vazios transversal ϵ_{trans} , é medida a partir de meios óticos ou através de medidas indiretas, tal como a capacitância elétrica de uma fase líquida condutora. Esta fração é definida como:

$$\epsilon_{trans} = \frac{A_G}{A_G + A_L}$$

onde A_G é a área ocupada pela fase gasosa e A_L pela fase líquida.

Definição de parâmetros em escoamentos bifásicos VI

A fração de vazios volumétrica ϵ_{vol} é medida geralmente através de mecanismos de armadilha para os fluidos, onde por um instante breve a amostra fica armazenada, possibilitando a medida da quantidade de gás e líquido diretamente. Esta fração é então definida como:

$$\epsilon_{vol} = \frac{V_G}{V_G + V_L}$$

onde V_G é o volume ocupado pela fase gasosa e V_L pela fase líquida.