

9

Referências bibliográficas

- [1] SHOHAM, Ovadia, ***Mechanistic Modeling Of Gas-Liquid Two-Phase Flow In Pipes***, U. Of Tulsa, 2006.
- [2] STUCKENBRUCK, Sidney, **Escoamento em Dutos**, CCE – Curso de Engenharia de Dutos - PUC-Rio, 2009.
- [3] STUCKENBRUCK, Sidney, **Escoamento Multifásico**, CCE – Curso de Mestrado Engenharia de Petróleo e Gás, PUC-Rio, 2010.
- [4] AZEVEDO, Luis Fernando, **Mecânica dos Fluidos I**, Apostila curso Mecânica dos Fluidos MEC2344, Mestrado Puc-Rio, 2010.
- [5] WYLEN, Van, **Fundamentos da Termodinâmica**, Edgard Blucher, 1998.
- [6] RIBEIRO, Elaine, **Direito do Petróleo, Gás e Energia**, Elsevier, 2010.
- [7] THOMAS, José Eduardo, et al, **Fundamentos da Engenharia do Petróleo**, Interciência, 2001.
- [8] CAETANO, Elisio, **Produção com Bombas Multifásicas**, Apostila curso pós graduação UFRJ, 2010.
- [9] ALVES, Eduardo Rodrigues, **Sistemas De Bombeamento Multifásico: Bombas Volumétricas Multifásicas De Duplo Parafuso**, dissertação de mestrado UFRJ, 2008.
- [10] SOUSA, Emilio, HAYASHY, Lucila, **Sistemas De Bombeamento Submarino: Situação Atual Na Petrobras E Principais Desafios**, dissertação de Pós Graduação, UFB, 2006.
- [11] CAMARGO, R.M.Y, Alves, IBERÊ, et al, ***Advances in Artificial Lift and Boosting Systems for Subsea Completion***, Offshore Technology Conference, OTC 8475, 1997.
- [12] OLIVERIA, Marcius, **Análise da Aplicação de um Sistema de Bombeamento Multifásico Submarino na Produção de Petróleo**, dissertação de Mestrado PUC-Rio, 2003.
- [13] ALBAUGH, Kurt, et al, ***Worldwide Survey of Subsea Processing: Separation, Compression and Pump System***, Offshore Magazine, 2009.
- [14] EUPHEMIO, Mario, et al, ***Subsea Processing and Boosting – Building Blocks for Scenarios***, Offshore Technology Conference, OTC 20186, 2009.
- [15] CAETANO, Elisio, et al, ***Field Experience with Multiphase Boosting System at Campos Basin, Brazil***, Offshore Technology Conference, OTC 17475, 2005.

- [16] Gruehagen, HENNING, ***Subsea Separation and Boosting-An Overview of Ongoing Projects***, Society of Petroleum Engineers, SPE 123159, 2009.
- [17] B. E. DAVIS, et al, ***Deep Multiphase Boosting Made Possible***, Offshore Technology Conference, OTC 20146, 2009.
- [18] COSTA, David, et al, ***Investigation of a Subsea Separation Station Operating Envelope Using Subsurface-to Topsides Integrated Dynamic Simulations***, Offshore Technology Conference, OTC 18709, 2007.
- [19] EUPHEMIO, Mario, et. al., ***Subsea Oil/Water Separation of Heavy Oil: Overview of the Main Challenges for the Marlim Fields-Campos Basin***, Offshore Technology Conference, OTC 18914, 2007.
- [20] NORDVIK, Birgitte, et. al., ***Ormen Lange-Challenges in Offshore Project Execution***, Offshore Technology Conference, OTC 18963, 2007.
- [21] A.F HARUN, ***Bring the 1st BP Operated Subsea to Shore Gas Field into Production: Flow Assurance Lessons Learned***, Society of Petroleum Engineers, SPE 123534, 2009.
- [22] SCHLUMBERGER Limited, ***Steady-State Multiphase Flow Simulation***, 2010.
- [23] ALVES, Iberê, ***Apostila Engenharia de Produção***, Curso Engenharia de Petróleo, PUC-Rio, CCE, 2005.
- [24] Esposito, ROGÉRIO, ***Notas de aula***, Curso de Mestrado Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2010.
- [25] SPINELLI, Geraldo, ***Notas de aula***, Curso de Mestrado Engenharia Mecânica, PUC-Rio, 2010.

Apêndice A

Escoamento Monofásico

A.1

Teorema de transporte de Reynolds

De acordo com AZEVEDO (2010) e STUCKENBRUCK (2010) o teorema de transporte de Reynolds é a relação entre a taxa de variação de qualquer propriedade extensiva, N , de um sistema e as variações dessa propriedade associadas com um volume de controle.

O teorema do transporte de Reynolds estabelece a correspondência entre uma propriedade de uma porção fixa de massa na referência material e a equivalente na referência de campo.

Na referência material o ponto de referência é uma partícula que segue o seu próprio movimento na corrente do fluido. Na referência de campo, um ponto fixo no espaço, no interior da corrente do fluido passa a ser a referência fixa.

Entende-se como propriedade extensiva como uma propriedade que depende diretamente da massa do sistema, como por exemplo, energia interna e volume. Já o volume de controle (VC) é uma abstração matemática dada por um volume no espaço, pelo qual o fluido escoar. A superfície que envolve o volume de controle é denominada superfície de controle (SC).

Este teorema é importante, pois é o teorema fundamental utilizado na formulação das leis básicas da dinâmica dos fluidos, que são a equação da conservação de massa (ou equação da continuidade), as equações de conservação de quantidade de movimento e a equação de conservação de energia.

O teorema pode ser então definido da seguinte forma:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V(t)} F \cdot dV = \int_{V(t)} \frac{\partial F}{\partial t} \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \vec{v} \cdot F \cdot dS, \quad (\text{A-1})$$

onde,

$V(t)$ = volume material, ou seja, volume que contém sempre as mesmas partículas de fluido.

$S(t)$ = superfície material limitando $V(t)$.

F = qualquer propriedade extensiva (propriedade/volume).

$\hat{\eta}$ = vetor normal a superfície S .

$\vec{v}$ = vetor velocidade.

$\hat{\eta} \cdot \vec{v} \cdot dS$ = volume varrido por dS no tempo t.

$\frac{D}{Dt} \int_{V(t)} F \cdot dV$ = taxa e variação de F seguindo o movimento.

$\int_{V(t)} \frac{\partial F}{\partial t} \cdot dV$ = taxa de variação de F no volume devido à variação de F no tempo.

$\int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \vec{v} \cdot F \cdot dS$ = variação líquida de F devido à variação de F na superfície S(t).

A.2 Conservação de massa

Substituindo na equação do teorema de transporte de Reynolds, a propriedade F, pela densidade de um fluido a taxa de variação de massa torna-se:

$$\frac{D}{Dt} \int_{V(t)} \rho \cdot dV = \int_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS \quad (\text{A-2})$$

Pela conservação de massa, não existe taxa de variação de massa no tempo, logo:

$$0 = \int_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \vec{v} \cdot \rho \cdot dS \quad (\text{A-3})$$

Assim para um número finito de entradas e saídas da superfície de controle tem-se:

$$\int_{V(t)} \frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot dV + \sum_{saída} \rho \cdot v \cdot A - \sum_{entrada} \rho \cdot v \cdot A = 0 \quad (\text{A-4})$$

Para o regime de escoamento permanente:

$$\sum_{saída} \rho \cdot v \cdot A = \sum_{entrada} \rho \cdot v \cdot A \quad (\text{A-5})$$

No escoamento monofásico a equação de continuidade é suficiente para calcular a velocidade de escoamento da seguinte forma:

$$w = \rho \cdot v \cdot A_{total} \quad (\text{A-6})$$

e

$$v = \frac{W}{\rho \cdot A_{total}} \quad (A-7)$$

Substituindo na equação acima:

$$\sum_{saída} W = \sum_{entrada} W \quad (A-8)$$

Uma vez que a velocidade é conhecida, o processo de transporte pode ser calculado através das equações de conservação de quantidade de movimento e conservação de energia.

A.3

Conservação quantidade de movimento

Substituindo a quantidade de movimento ($\rho \cdot v$) no teorema de transporte de Reynolds, tem-se então pela segunda lei de Newton e pelo teorema de transporte de Reynolds:

$$\sum Força = m \cdot \frac{dv}{dt} = \int_{V(t)} \frac{\partial v \rho}{\partial t} \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{n} \cdot v \rho \cdot \vec{v} \cdot dS \quad (A-9)$$

onde,

$\sum Força$ = somatório de todas as forças externas atuando sobre o sistema ocupando o volume de controle no instante t .

Assim sendo pode-se concluir que,

$$\sum Força = \int_{V(t)} \frac{\partial}{\partial t} (v \rho) \cdot dV + \sum_{saída} \dot{m} \cdot v - \sum_{entrada} \dot{m} \cdot v \quad (A-10)$$

Ou seja, o somatório das forças atuando sobre um volume de controle fixo é igual à taxa de variação da quantidade de movimento dentro do volume de controle, mais a soma do fluxo líquido de quantidade de movimento (saindo-entrando).

A.4

Conservação de energia

A primeira lei da termodinâmica estabelece que durante qualquer ciclo percorrido por um sistema, a integral cíclica do calor é proporcional a integral cíclica do trabalho.

Aplicando a primeira lei para um sistema que passa por uma mudança de estado percebe-se que a diferença entre o calor e o trabalho não depende do caminho que se percorre, depende apenas da condição inicial e final, portanto essa diferença é uma propriedade do sistema e é definida como energia. Logo, pode-se concluir que:

$$\delta Q - \delta W = dE \quad (\text{A-11})$$

Ou, considerando um processo passando do estado 1 ao estado 2

$${}_1Q_2 = E_2 - E_1 + {}_1W_2 \quad (\text{A-12})$$

Onde:

${}_1Q_2$ = calor transferido para o sistema durante o processo do estado 1 ao estado 2.

${}_1W_2$ = trabalho realizado pelo sistema durante o processo

E = valor inicial (1) e final (2) da energia do sistema.

A energia do sistema pode ser de vários tipos, mas considerando apenas a energia interna a energia cinética e a energia potencial tem-se, por unidade de massa:

$$e = u + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z \quad (\text{A-13})$$

O trabalho realizado pelo sistema também pode ser dividido em 3 componentes, o trabalho de eixo (trabalho realizado por uma máquina atravessando a superfície de controle), o trabalho devido às forças cisalhantes também na superfície de controle e o trabalho realizado pelas forças de pressão. Assim sendo:

$$W = W_{\text{eixo}} + W_{\text{cisalhante}} + \int_{SC} P \cdot v \cdot dS \quad (\text{A-14})$$

Aplicando o teorema de transporte de Reynolds considerando a energia como a propriedade do sistema, tem-se:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho e \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \rho e \cdot \vec{v} \cdot dS \quad (\text{A-15})$$

Incluindo as equações de trabalho e energia:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_{\text{eixo}}}{dt} - \frac{dW_{\text{cisalhante}}}{dt} - \frac{dW_{\text{pressão}}}{dt} = \frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho e \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \rho e \cdot \vec{v} \cdot dS \quad (\text{A-16})$$

ou,

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_{\text{eixo}}}{dt} - \frac{dW_{\text{cisalhante}}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \cdot \left(u + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z \right) \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \rho \cdot \left(e + \frac{P}{\rho} \right) \cdot \vec{v} \cdot dS \quad (\text{A-17})$$

Tendo a definição de entalpia como:

$$H = U + P \cdot V = U + \frac{P}{\rho} \quad (\text{A-18})$$

A equação final de energia assume:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_{\text{eixo}}}{dt} - \frac{dW_{\text{cisalhante}}}{dt} = \frac{d}{dt} \int_{V(t)} \rho \cdot \left(u + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z \right) \cdot dV + \int_{S(t)} \hat{\eta} \cdot \rho \cdot \left(h + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z \right) \cdot \vec{v} \cdot dS \quad (\text{A-19})$$

Para um volume de controle com finitas entradas e saídas em regime permanente, a equação da energia pode ser simplificada para:

$$\frac{dQ}{dt} - \frac{dW_{\text{eixo}}}{dt} - \frac{dW_{\text{cisalhante}}}{dt} = \sum_{\text{saída}} \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z \right) - \sum_{\text{entrada}} \left(u + \frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} \cdot v^2 + g \cdot z \right) \quad (\text{A-20})$$

As equações de conservação de massa, conservação de quantidade de movimento e conservação de energia demonstradas acima são utilizadas para a solução de problemas de queda de pressão durante um escoamento monofásico.

Apêndice B

Introdução ao escoamento multifásico

B.1

Introdução

Um reservatório produz normalmente óleo, gás natural e água, além de alguns resíduos como areia, por exemplo. A composição química do petróleo varia significativamente, dependendo da localização do reservatório, governando suas características de produção. Se predominarem as cadeias menores de carbono tem-se uma forma gasosa. Se predominarem as cadeias maiores e mais pesadas tem-se um óleo pesado. Na produção de petróleo pode-se ter uma mistura destes componentes, ou seja, neste caso tem-se uma mistura multifásica.

A pressão a qual um fluido está submetido em um reservatório é a manifestação mais sensível da energia do mesmo. O comportamento da pressão e da temperatura pode ser observado através de um diagrama de fases. Um diagrama de fases ilustra as condições de equilíbrio entre fases termodinamicamente distintas.

Dependendo do estado de pressão e temperatura do reservatório e sua composição química a apresentação do diagrama de fases possui uma forma diferente. Este comportamento é utilizado para definir os tipos de reservatórios possíveis, entre os quais citam-se:

- Reservatório de gás seco: o diagrama de fases se situa na maioria das vezes abaixo da temperatura ambiente e não há produção de líquido. Este modelo pode ser representado pela equação dos gases reais;
- Reservatório de gás condensado e retrogrado: apresenta apenas gás na condição de reservatório. A medida que a pressão no reservatório é reduzida pode aparecer líquido que pode não escoar, prejudicando a produção de gás, uma vez que reduzirá a permeabilidade relativa ao mesmo;
- Reservatório de óleo volátil: óleo leve de baixa viscosidade com elevado teor de gás dissolvido. Uma pequena redução da pressão implica em uma grande saída de gás de solução;
- Reservatório tipo *black oil*: largamente utilizado em simulações de produção de petróleo. Na modelagem *black oil* a composição é admitida constante para o óleo durante toda a sua vida produtiva. Este modelo

considera a existência de três componentes (óleo, gás e água). O gás pode estar livre ou solúvel na fase óleo. Óleo e água sempre estarão na fase líquida;

A Figura B.1 abaixo foi retirada de ESPOSITO (2010) e resume os diferentes diagramas de fase típicos de um reservatório de petróleo.



Figura B-1: Diagrama de fases típico de um hidrocarboneto

Um diagrama de fases típico *black oil* será utilizado neste estudo e está ilustrado separadamente na Figura B.2, retirada também de ESPOSITO (2010). Dentre as características principais deste modelo pode-se afirmar que:

- Abrange a maior parte dos óleos que apresentam baixa RGO (razão, em condições normais, entre o volume de gás produzido e o volume de óleo produzido) e baixa pressão de saturação (pressão que permanece constante durante uma mudança de fase).
- O fluido resultante vai se tornando mais pesado na medida em que o gás vai saindo de solução.

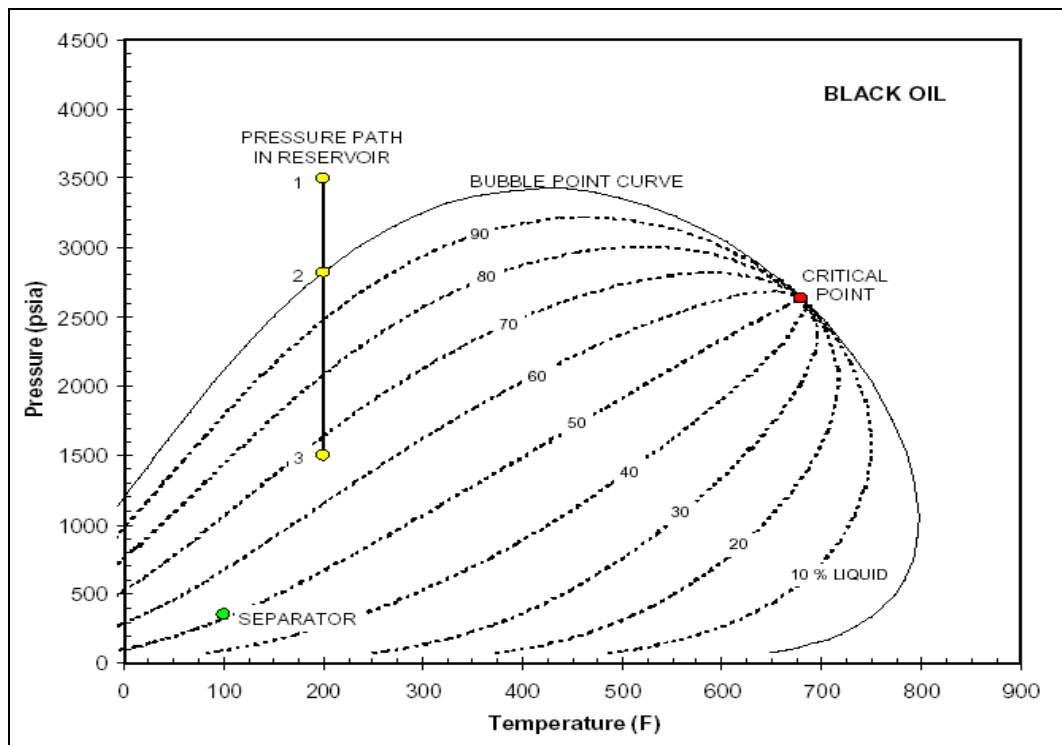


Figura B-2: Diagrama de fases para um modelo tipo *black oil*

O escoamento multifásico ocorre em praticamente todo tipo de reservatório, inclusive em reservatórios de gás onde pode haver condensação de hidrocarbonetos e aparecimento de água. Por isso seu estudo é importante e vem evoluindo ao longo dos anos. Este tipo de análise é de grande complexidade devido à diversidade de arranjos que as fases líquidas e gasosa podem apresentar. Estas características fazem com que a análise dos coeficientes de transferência de calor e de massa, perda de carga e outros parâmetros do escoamento, sejam de difícil compreensão. Para resolver tal situação podem ser utilizadas algumas correlações empíricas.

Uma correlação empírica é baseada na observação experimental mais do que em uma teoria. Uma relação empírica requer somente confirmação de dados, independentemente de base teórica. Historicamente, relações empíricas têm sido importantes como um primeiro passo fundamental na descoberta de relações teóricas “verdadeiras”. Na área de escoamento multifásico, algumas correlações foram descobertas a partir de testes de laboratório.

As correlações utilizadas para definir um escoamento multifásico podem ser encontradas em SHOHAM (2006) e STUCKENBRUCK (2010) e são definidas em três tipos descritos a seguir:

1. Correlação do tipo I:

Não consideram um padrão de escoamento e também não consideram o escorregamento entre as fases, pois considera gás e líquido escoando em uma mesma velocidade. A densidade da mistura é determinada em função da razão do gás no líquido total. Entende-se por fase, um sistema, ou parte de um sistema, composto por qualquer número de constituintes químicos em condição homogênea e com contorno bem definido. Uma fase pode possuir uma mistura de substâncias químicas. O padrão de escoamento é descrito como a distribuição espacial de diversas fases em uma tubulação. Já o escorregamento é a diferença de velocidade entre fases.

As correlações comumente encontradas na literatura que se encaixam neste tipo são referidas por Poetman & Carpenter, Baxendell & Thomas e Fancher & Brownl. A descrição destes modelos pode ser encontrada em SHOHAM (2006) e STUCKENBRUCK (2010).

2. Correlações do tipo II:

Caracterizam-se por não considerarem o padrão de escoamento, mas consideram o escorregamento entre as fases, gás e líquido possuem velocidades diferentes. As correlações relacionadas a este tipo na literatura são Hagedorn & Brown e Gray & Ashein. A descrição destes modelos pode ser encontradas em SHOHAM (2006) e STUCKENBRUCK (2010).

3. Correlação do tipo III:

Estas correlações consideram os diferentes padrões de escoamento e também consideram o escorregamento entre fases. Para cada padrão de escoamento apresenta-se um cálculo diferente para o atrito entre as fases em escoamento. A partir da determinação do padrão de fluxo para cada ponto são calculados todos os parâmetros relacionados com a densidade média dos fluidos e os fatores de atrito.

Para correta aplicação das correlações do tipo 3 é necessário o conhecimento dos padrões de escoamento existentes. Estes padrões ocorrem devido às diferentes velocidades entre fases durante escoamento, e possuem nomenclaturas diferentes para o escoamento vertical e horizontal. A Figura B.3 e a Figura B.4 ilustram estes padrões.

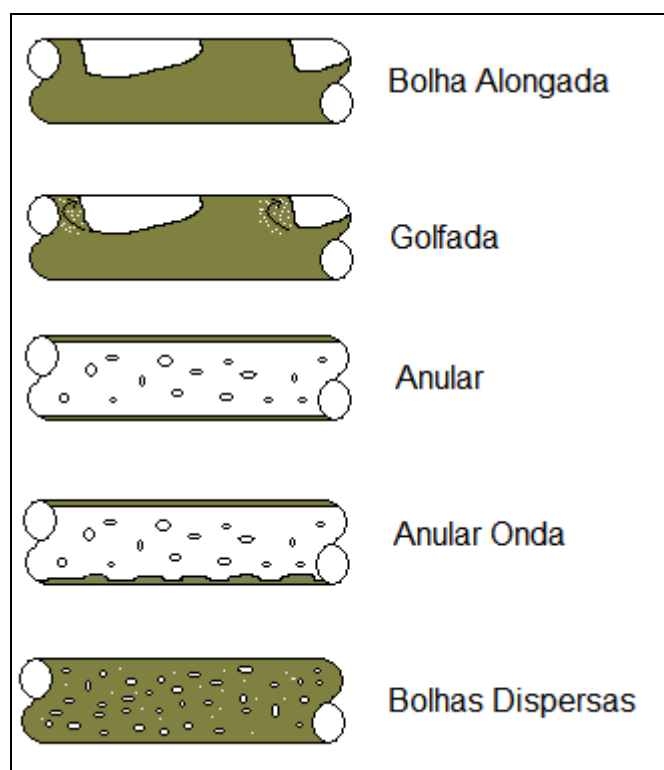


Figura B-3: Padrão de escoamento em um duto horizontal

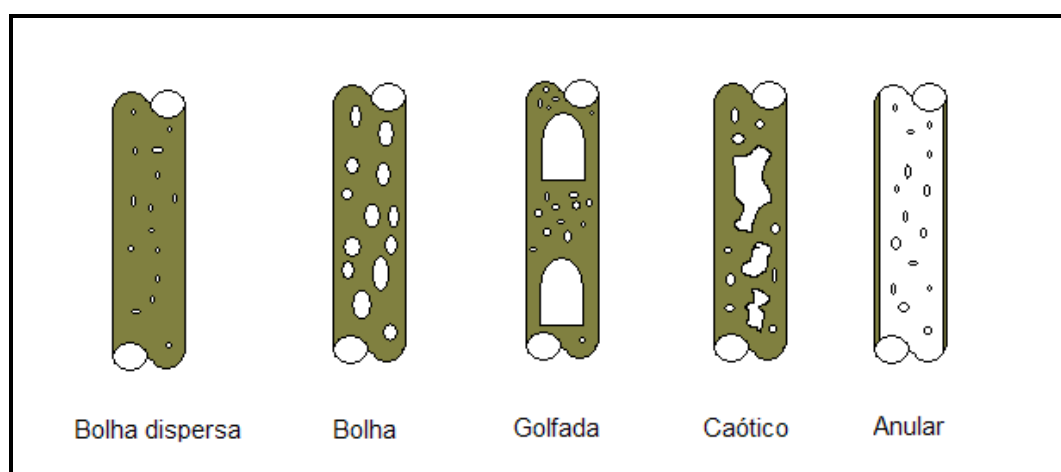


Figura B-4: Padrão de escoamento em um duto vertical

No escoamento horizontal tem-se os seguintes tipos de padrão de escoamento:

- fluxo estratificado: baixa vazão de gás e líquido;
- fluxo intermitente (bolha alongada): fluxo alternado de gás e líquido e separado por uma bolha alongada de gás e um *slug*;
- fluxo anular: alta velocidade de gás. O líquido escoar em uma fina camada na parede do duto. A interface entre líquido e gás proporciona uma alta tensão interfacial, e;
- fluxo de bolhas dispersas: alta velocidade de líquido. O fluxo de líquido é contínuo enquanto o fluxo de gás é disperso em pequenas bolhas dispersas. A alta velocidade do líquido carrega o gás gerando uma condição de não deslizamento entre as fases.

No regime vertical o padrão estratificado não existe, os padrões tornam-se mais simétricos e menos dependentes da gravidade. Tem-se então os seguintes tipos:

- fluxo tipo bolha: bolhas de gás dispersas movem-se para cima dentro de um regime de líquido constante. Normalmente aparecem em fluxo de líquido baixo, com pouca turbulência. É caracterizado por grande escorregamento entre fases e com alto *holdup*;
- fluxo tipo golfada: a fase de gás fica concentrada em grandes bolhas em formato de bala;
- fluxo caótico: caracterizado pelo movimento oscilatório da fase líquida. Parecida com a fase de golfada, porém com a separação de fases não claramente definida. Ocorre em altas velocidades de gás;
- fluxo anular: alta velocidade de gás no centro e filme de líquido nas extremidades, e;
- bolhas dispersas: ocorre em altas velocidades de líquido, com bolhas de gás dispersas. O líquido carrega o gás e não se observa deslizamento entre as fases.

Uma vez que o padrão de escoamento é identificado, uma modelagem específica pode ser aplicada e as características de escoamento podem ser identificadas. Para identificar os tipos de escoamento, Baker publicou o mapa de padrões em 1954 que é utilizado até hoje na indústria de petróleo. Outros modelos foram desenvolvidos ao longo do tempo, como os modelos de Taitel e

Dukler (1980). A descrição destes modelos pode ser encontrada em SHOHAM (2006) e STUCKENBRUCK (2010).

Antes de analisar o modelo multifásico deste estudo, será explicado como ocorre o processo de produção em um sistema submarino.

B.2

Produção submarina

Quando a pressão do reservatório é suficiente, os fluidos provenientes do mesmo alcançam livremente a superfície se deslocando através do diferencial de pressão. Nesta situação denomina-se o escoamento como elevação natural. Os poços que produzem desta forma são chamados de poços surgentes. Na elevação natural o escoamento do fluido é devido unicamente à energia do reservatório. Quando a pressão do reservatório é baixa, os fluidos não conseguem atingir a superfície. Neste caso é necessário um meio artificial que “ajude” este escoamento. Isso pode ocorrer mesmo em um poço surgente, em final de vida quando sua pressão já foi bastante reduzida e pode não ser suficiente para transportar o fluido nele contido até o ponto desejado. É neste cenário que se apresentam as opções de se utilizar uma bomba multifásica ou um separador que podem provocar um diferencial de pressão que permita essa produção. Os métodos de elevação artificial mais comuns na indústria de petróleo são:

- *Gas lift*: este método de elevação artificial utiliza a energia contida em gás comprimido, injetando continuamente na coluna de produção. O objetivo é gaseificar a coluna de fluido tornando a densidade do fluido mais leve e facilitando por consequência seu escoamento. Este método é mais simples que os demais;
- Bombeio centrífugo submerso (BCS): neste método a energia é transmitida ao fluido através de uma bomba centrífuga posicionada no fundo do poço, acionada por um motor elétrico acoplado à bomba. Mais robusto que o *gas lift*. Melhor aplicado para fluidos de alta viscosidade e para maiores vazões. Para altos percentuais de gás (RGO) o *gas lift* é melhor;
- Bombeio mecânico com hastes (BM): neste método o movimento rotativo de um motor elétrico ou de combustão interna é transformado em movimento alternativo por uma unidade de bombeio próxima a cabeça do poço. Uma coluna de hastes transmite o movimento alternativo para o fundo do poço, acionando uma bomba que eleva os fluidos produzidos

pelo reservatório para a superfície. Método de grande utilização mais apenas para poços rasos e verticais;

- Bombeio de cavidades progressivas (BCP): é uma bomba de deslocamento positivo que trabalha imersa em um poço de petróleo, constituída de rotor e estator. O rotor ao girar no interior do estator origina um movimento axial progressivo no sentido da sucção para a descarga, realizando o bombeio.

Dentre as alternativas mais recentes se encontram a bomba multifásica e o separador submarino, que são o objetivo de estudo deste trabalho. Estes meios permitirão um futuro de produção *subsea to shore*, onde a presença de uma plataforma se torna desnecessária.

A seleção do melhor método de produção dependerá de vários fatores, dentre eles a produção de areia, razão de gás no líquido, vazão, profundidade, viscosidade dos fluidos, mecanismo de produção do reservatório, distância do poço as estações de tratamento, custo operacional, segurança, entre outros. Neste trabalho será feita uma análise de sensibilidade de alguns destes parâmetros analisando o comportamento dos dois meios de produção submarinos citados aqui (bomba multifásica e separador).

O caminho de produção de um fluido pode ser definido em três etapas: o fluxo do fluido no reservatório (chamado de fluxo em meios porosos), o escoamento no poço (chamado de fluxo na coluna de produção) e o escoamento através da linha de produção. Neste trabalho será feita a análise apenas do escoamento na linha de produção.

O fluxo de reservatório é definido através da construção de uma curva chamada de IPR (*Inflow Performance Relationship*). Esta curva é desenhada através de testes de poço onde se mede a vazão e o diferencial de pressão entre o poço e o reservatório em alguns momentos distintos e se constrói a curva que irá definir a vazão de escoamento em função do diferencial de pressão do reservatório.

Para que o fluido chegue à superfície é necessário que a pressão no fundo do poço seja suficiente para vencer a coluna hidrostática da linha de produção, as perdas por atrito, as perdas nas restrições (válvulas e reguladores), as perdas na linha de produção e a pressão nos equipamentos na superfície. O gradiente de pressão dentro da coluna de produção é o resultado da soma do gradiente de pressão devido à elevação (gravidade), devido à atrito (varia de acordo com a rugosidade, diâmetro e vazão) e devido à aceleração (variação da velocidade no interior da tubulação).

Para o fluxo no reservatório quanto maior a vazão menor será a pressão dentro do reservatório. Para o escoamento na coluna de produção, quanto maior a pressão maior será a vazão de escoamento. Portanto existe um ponto onde a pressão de reservatório e a pressão da coluna de produção terão a mesma vazão. Este ponto define a vazão de produção.

A diferença de velocidade entre as fases presentes no escoamento e a geometria das fases influencia no gradiente de pressão. Por isso é importante a identificação do regime de fluxo como indicado anteriormente neste texto. No escoamento vertical é comum observar o padrão de fluxo tipo bolha próximo ao fundo do poço, onde se observa uma quantidade maior de líquido. A fase gasosa se apresenta em pequenas bolhas dispersas no meio do líquido. À medida que o fluxo vai evoluindo, as bolhas de gás que se locomovem mais rápido que o líquido vão se aglomerando e aumentando de tamanho. À medida que o fluxo vai evoluindo na coluna de produção o padrão de escoamento se altera.

B.3

Escoamento multifásico: definições

O escoamento multifásico ocorre não apenas na indústria de petróleo, mas também na indústria química, nuclear, espacial, e geotérmica. Na indústria de petróleo o escoamento multifásico ocorre durante a produção do fluido entre o poço e a plataforma e durante o transporte entre a plataforma e a base de recebimento em terra, ou simplesmente do poço à terra.

Primeiramente, para melhor compreensão do cálculo de um escoamento multifásico neste capítulo, as definições a seguir se fazem necessárias.

B.3.1

Vazão mássica (kg/s)

A vazão mássica é definida da seguinte forma:

w_L = vazão mássica de líquido

w_G = vazão mássica de gás

$w = w_L + w_G$ = vazão de massa total (B-1)

B.3.2

Vazão volumétrica (m³/s)

A vazão volumétrica é definida como:

q_L = vazão volumétrica de líquido

q_G = vazão de volumétrica de gás

$q = q_L + q_G$ = vazão volumétrica total (B-2)

B.3.3 Holdup líquido

Holdup (H_L) é a fração de volume ocupada pelo líquido na mistura multifásica. O equivalente para o gás é a fração de vazio de gás (α), que corresponde ao volume ocupado pelo gás em uma mistura multifásica. No escoamento monofásico H_L e α serão sempre 0 ou 1.

$$H_L = \frac{A_L}{A_{total}} \quad (B-3)$$

O *holdup* pode ou não considerar o atrito entre as fases em estudo. O *holdup* líquido onde não é considerado o atrito é chamado de *holdup* líquido sem escorregamento (λ_L) e é definido como a razão entre a vazão de líquido e a vazão total, ou seja:

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_G} \quad (B-4)$$

B.3.4 Velocidade superficial (m/s)

A velocidade superficial da fase é o fluxo volumétrico desta fase, ou seja, é o fluxo que esta fase teria caso estivesse ocupando todo o volume da mistura.

Portanto, as velocidades superficiais de líquido e de gás são dadas por:

$$v_{sL} = \frac{q_L}{A_{total}} \quad (B-5)$$

$$v_{sG} = \frac{q_G}{A_{total}} \quad (B-6)$$

onde A_{total} é a área total da seção transversal ao escoamento.

B.3.5 Velocidade da mistura (m/s)

A velocidade de mistura é a razão do fluxo volumétrico total por unidade de área, ou seja:

$$v_M = \frac{q_G + q_L}{A_{total}} = v_{sL} + v_{sG} \quad (B-7)$$

O *holdup* sem escorregamento também pode ser definido como a razão da velocidade superficial de líquido e a velocidade de mistura:

$$\lambda_L = \frac{q_L}{q_L + q_G} = \frac{v_{sL}}{v_{sL} + v_{sG}} \quad (\text{B-8})$$

B.3.6 Fluxo de massa (kg/m².s)

Os fluxos de massa são dados pelas seguintes equações:

$$\text{Fluxo de massa de líquido:} \quad G_L = \frac{w_L}{A_{total}} \quad (\text{B-9})$$

$$\text{Fluxo de massa de gás:} \quad G_G = \frac{w_G}{A_{total}} \quad (\text{B-10})$$

$$\text{Fluxo de massa total:} \quad G = \frac{w_L + w_G}{A_{total}} = G_L + G_G \quad (\text{B-11})$$

B.3.7 Velocidade real (m/s)

Visto que cada fase ocupa apenas uma fração de área transversal durante o escoamento, a velocidade superficial não pode ser considerada como a real velocidade de cada fase. A velocidade real é definida de acordo com a fração de área ocupada da seguinte forma:

$$\text{Velocidade do líquido:} \quad v_L = \frac{q_L}{A_{liquido}} = \frac{v_{sL}}{H_L} \quad (\text{B-12})$$

$$\text{Velocidade do gás:} \quad v_G = \frac{q_G}{A_{gás}} = \frac{v_{sG}}{1 - H_L} \quad (\text{B-13})$$

B.3.8 Velocidade relativa (m/s)

A velocidade relativa entre duas fases em um mesmo fluxo é conhecida como velocidade de escorregamento. Esta velocidade representa a diferença entre as velocidades de duas fases que estão em um mesmo escoamento.

$$v_{slip} = v_G - v_L \quad (\text{B-14})$$

B.3.9**Velocidade de deslizamento (m/s)**

A velocidade de deslizamento é a velocidade de uma fase relativa à velocidade da mistura.

$$\text{Velocidade de deslizamento do líquido: } v_{DL} = v_L - v_M \quad (\text{B-15})$$

$$\text{Velocidade de deslizamento do gás: } v_{DG} = v_G - v_M \quad (\text{B-16})$$

B.3.10**Concentração de massa**

A concentração de massa é a razão entre a massa da fase e a massa total em um dado volume.

$$\text{Concentração de líquido: } c_L = \frac{H_L \cdot \rho_L}{\rho_M} \quad (\text{B-17})$$

$$\text{Concentração de gás: } c_G = \frac{(1 - H_L) \cdot \rho_G}{\rho_M} \quad (\text{B-18})$$

B.3.11**Fração de massa**

A fração de massa é a razão entre a vazão mássica do gás e a vazão mássica total:

$$x = \frac{w_G}{w_G + w_L} \quad (\text{B-19})$$

B.3.12**Propriedade da mistura**

As propriedades da mistura são definidas como uma média das propriedades das fases ponderadas pelo *holdup*.

$$\text{Densidade: } \rho_M = \rho_L \cdot H_L + \rho_G \cdot (1 - H_L) \quad (\text{B-20})$$

$$\text{Viscosidade: } \mu_M = \mu_L \cdot H_L + \mu_G \cdot (1 - H_L) \quad (\text{B-21})$$

B.3.13 Propriedade do líquido

Da mesma forma que a mistura, a propriedade de um líquido também é uma média entre as propriedades da água e do óleo.

Esta média é ponderada pela fração de volume de água no volume total do líquido, ou seja:

$$\text{Densidade:} \quad \rho_L = \rho_{\text{água}} \cdot f_c + \rho_{\text{óleo}} \cdot (1 - f_c) \quad (\text{B-22})$$

$$\text{Viscosidade:} \quad \mu_L = \mu_{\text{água}} \cdot f_c + \mu_{\text{óleo}} \cdot (1 - f_c) \quad (\text{B-23})$$

$$\text{Onde:} \quad f_c = \frac{q_{\text{água}}}{q_{\text{água}} + q_{\text{óleo}}} \quad (\text{B-24})$$

B.3.14 Razão de solubilidade

A razão de solubilidade é a razão de volume de gás dissolvido no óleo a uma determinada pressão e temperatura local, porém medido na condição padrão, e o volume de óleo, também em condições padrão.

$$R_s = \frac{\text{Volume}_{\text{gasdis}P \& T} \big|_{\text{cond. padrão}}}{\text{Volume}_{\text{óleo}} \big|_{\text{cond. padrão}}} \quad (\text{B-25})$$

B.3.15 Fator volume de formação

O fator volume de formação do óleo é a razão do volume de óleo em uma determinada condição de pressão e temperatura e o volume do mesmo óleo na condição padrão. Levando em conta a saída do gás dissolvido do óleo à medida que a pressão diminui, e a compressibilidade, este valor é sempre maior que 1.

$$B_o = \frac{\text{Volume}_{\text{óleo}} \big|_{P \& T}}{\text{Volume}_{\text{óleo}} \big|_{\text{cond. padrão}}} \quad (\text{B-26})$$

Da mesma forma é definido o fator volume de formação de água e gás:

$$B_w = \frac{\text{Volume}_{\text{água}} \big|_{P \& T}}{\text{Volume}_{\text{água}} \big|_{\text{cond. padrão}}} \quad (\text{B-27})$$

$$B_G = \frac{Volume_{gás} \big|_{P \& T}}{Volume_{gás} \big|_{cond. padrão}} \quad (B-28)$$

B.3.16 RGO e RGL

A razão de gás no óleo (RGO) é a razão entre o volume total de gás produzido (gás livre mais o gás que estava dissolvido no óleo) em relação ao volume de óleo, ambos em condição padrão.

$$RGO = \frac{Volume_{gás} \big|_{cond. padrão}}{Volume_{óleo} \big|_{cond. padrão}} \quad (B-29)$$

Da mesma forma é definida a razão de gás no líquido (RGL):

$$RGL = \frac{Volume_{gás} \big|_{cond. padrão}}{Volume_{líquido} \big|_{cond. padrão}} \quad (B-30)$$

A Figura B-5 abaixo foi retirada de ALVES (2005) e ajuda a identificar os volumes descritos acima.

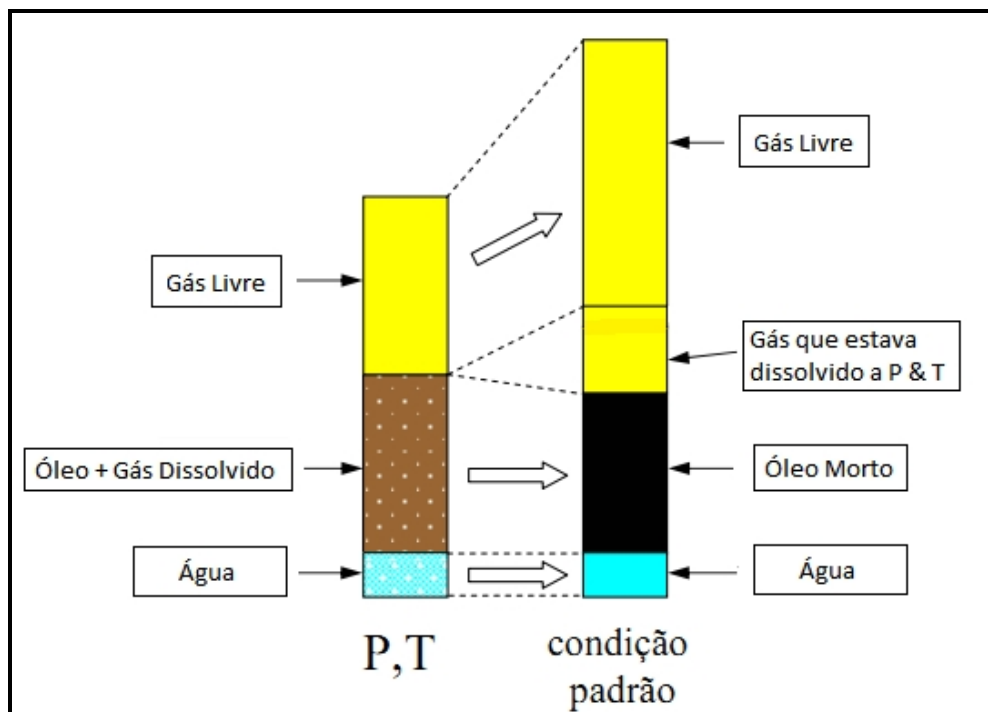


Figura B-5: Evolução dos volumes de gás, óleo e água em função da pressão e temperatura

Apêndice C

Escoamento multifásico: cálculo

C.1

Introdução

Para melhor entendimento do cálculo de um escoamento multifásico, o escoamento monofásico deve ser entendido. Para um escoamento monofásico a vazão de escoamento, as propriedades do fluido, o diâmetro da linha e a inclinação seriam suficientes para definir o cálculo de escoamento, mas em um regime multifásico informações adicionais são necessárias.

Após o entendimento do cálculo do escoamento monofásico, este anexo descreve o cálculo do escoamento multifásico. A solução exata de um escoamento multifásico também requer o uso das equações de conservação de massa, quantidade de movimento e energia com as condições de contorno corretas, porém a maioria dos casos reais não podem ser abordados desta maneira devido às incertezas envolvidas. O escoamento multifásico possui inúmeras variáveis por isso é difícil de correlacionar todas elas.

Uma forma de abordagem do escoamento multifásico seria um cálculo numérico por elementos finitos, porém as limitações computacionais junto com o tempo que utilizado para uma análise deste tipo levaram à análise experimental. A abordagem experimental é conduzida através de experimentos que desenvolvem correlações entre os fatores sendo analisados sem a necessidade de cálculo aprofundado. A modelagem é uma abordagem intermediária entre a experimental e a abordagem exata. Um modelo físico simplificado é construído para realizar o fenômeno esperado. Este modelo físico pode ser expresso matematicamente tornando uma ferramenta para prever novos casos se tornando uma ferramenta analítica. Medidas experimentais podem ser utilizadas para calibrar um modelo e refinar sua precisão.

C.2

Cálculo queda de pressão

Dado um duto com as condições conhecidas em um determinado ponto inicial chamado de ponto 1. As condições em determinado ponto final chamado de ponto 2 são determinadas da seguinte forma:

$$P_2 = P_1 - \left(\frac{dP}{dL} \right) \cdot dL = P_1 - (dP) \quad (C-1)$$

A figura abaixo ajuda a elucidar o escoamento descrito:

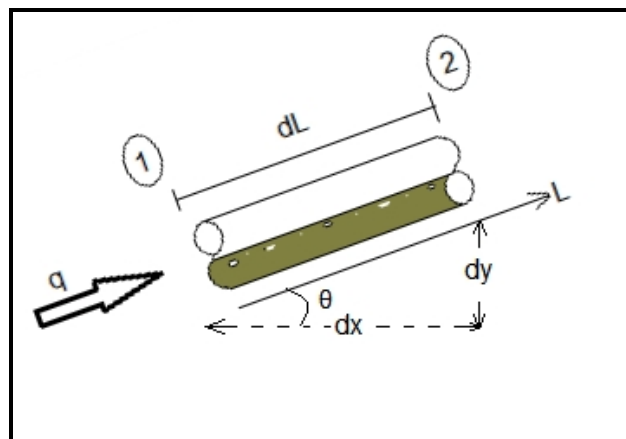


Figura C-1: Ilustração escoamento em dutos

O gradiente de pressão dP/dL representa a queda de pressão por unidade de comprimento do duto. O gradiente de pressão é composto do componente da gravidade, atrito e aceleração. A queda total de pressão é dada da seguinte forma:

$$\frac{dP}{dL} = \left(\frac{dP}{dL} \right)_{\text{atrito}} + \left(\frac{dP}{dL} \right)_{\text{gravidade}} + \left(\frac{dP}{dL} \right)_{\text{aceleração}} \quad (C-2)$$

Para o estudo monofásico estes três gradientes são conhecidos através da conservação de quantidade de movimento.

$$\frac{dP}{dL} = \frac{f \cdot \rho \cdot v^2}{2 \cdot \phi} + \rho \cdot g \cdot \sin(\theta) + \rho \cdot v \cdot \frac{dv}{dt} \quad (C-3)$$

f é o fator de atrito, e ϕ é o diâmetro interno do duto, v é a velocidade.

O fator de atrito é calculado através do número de Reynolds e depende da rugosidade do duto, onde:

$$N_{RE} = \frac{\rho \cdot v \cdot \phi}{\mu} \quad (C-4)$$

Com μ , sendo a viscosidade do fluido.

Várias correlações podem ser utilizadas para a determinação do fator de atrito, entre elas a correlação de Blasius para escoamento laminar, correlação de Colebrook e o gráfico de Moody, todas essas correlações podem ser encontradas em STUCKENBRUCK (2009 e 2010). Neste trabalho estamos utilizando a correlação de Swanee que pode ser utilizada tanto para fluxo laminar quanto turbulento. A equação de Swanee foi retirada de ALVES (2005), e é definida da seguinte forma:

$$f = \left[\left(\frac{64}{N_{RE}} \right)^8 + 9.5 \cdot \ln \left(\left(\frac{\varepsilon}{\phi} + \frac{5,74}{N_{RE}} \right) - \left(\frac{2.500}{N_{RE}} \right)^6 \right)^{-16} \right]^{-25} \quad (C-5)$$

Para o escoamento multifásico os parâmetros da equação descrita para a perda de carga devem ser conhecidos para as duas fases (líquido e gás). A velocidade de escoamento deve ser analisada separando o fluxo de líquido e gás da seguinte forma:

$$w_L = \rho_L \cdot v_L \cdot A_{líquido} \quad (C-6)$$

e,

$$w_G = \rho_G \cdot v_G \cdot A_{gás} \quad (C-7)$$

Considerando a área onde cada fase escoar, tem-se:

$$w_L = \rho_L \cdot v_L \cdot A_{total} \cdot H_L \quad (C-8)$$

e,

$$w_G = \rho_G \cdot v_G \cdot A_{total} \cdot (1 - H_L) \quad (C-9)$$

Estas equações têm três incógnitas e não podem ser resolvidas como feito no caso monofásico.

Uma maneira simplificada seria considerar que o gás e o líquido escoam em uma mesma velocidade, neste caso as equações acima passariam a ter duas incógnitas. Porém nos casos onde esta simplificação não possa ser aplicada, outras análises são necessárias.

Admitindo inicialmente que não há diferença de velocidade entre fase líquida e fase gasosa, neste caso não há escorregamento entre as fases e:

$$v_{slip} = v_G - v_L = 0 \quad (C-10)$$

logo,

$$v_G = v_L \quad (C-11)$$

logo,

$$\frac{q_G}{A_{gás}} = \frac{q_L}{A_{líquido}} \quad (C-12)$$

e,

$$\frac{v_{sG}}{1 - H_L} = \frac{v_{sL}}{H_L} \quad (C-13)$$

logo o *holdup* líquido torna-se igual ao *holdup* líquido sem escorregamento:

$$H_L = \frac{v_{sL}}{v_{sL} + v_{sG}} = \lambda_L \quad (C-14)$$

As condições de não escorregamento ocorrem, por exemplo, em fluxos homogêneos ou bolhas dispersas onde se tem alta vazão de líquido e baixa vazão de gás. Neste caso a alta velocidade do líquido carrega as bolhas de gás resultando em um escoamento sem atrito entre fases, ou seja, sem escorregamento.

No fluxo multifásico não-homogêneo, as correlações empíricas podem ser utilizadas para a determinação do *hold up* e de outros parâmetros. Para o cálculo empírico é necessário conhecer as propriedades do fluido tais como, Rs (razão de solubilidade), Bo (fator volume de formação do óleo), Bg (fator volume de formação do gás), densidade e viscosidade das duas fases e tensão superficial entre as fases.

Dadas as vazões de óleo e gás nas condições padrão, e conhecendo as propriedades do fluido na pressão e temperatura média da seção calculada, as velocidades superficiais de cada fase podem ser calculadas:

$$v_{sG} = \frac{q_G}{A_{total}} = \frac{(q_{G|cond.padrão} - q_{óleo|cond.padrão} \cdot R_s) \cdot B_G}{A_{total}} \quad (C-15)$$

e,

$$v_{sL} = \frac{q_L}{A_{total}} = \frac{q_{óleo} \cdot B_o}{A_{total}} \quad (C-16)$$

Após definir os parâmetros do escoamento através das correlações, o gradiente de pressão pode ser calculado. Considerando um fluxo incompressível, em condições isotérmicas, as condições de fluxo não variam muito, logo, a densidade em um ponto 2 pode ser considerada igual ao ponto 1, assim como sua velocidade. Assim sendo, o gradiente de pressão em um ponto 2 também será igual ao gradiente de pressão no ponto 1. Neste caso, onde o fluido é considerado incompressível e isotérmico, o gradiente de pressão pode ser considerado constante. Mas no caso multifásico existe uma fase gasosa compressível, que se expande ao longo do comprimento do duto. A transferência de massa ocorre entre as fases onde gás é liberado da fase líquida para a fase gasosa. Neste caso o gradiente de pressão não é constante e depende do valor de temperatura e pressão.

Assim sendo, o cálculo do gradiente de pressão neste caso deve ser feito numericamente dividindo o duto em vários n elementos de comprimento conhecido. Entre um elemento e outro, o gradiente de pressão é considerado constante nas condições médias de escoamento entre os dois pontos. Desta forma, a queda de pressão pode ser determinada como o somatório das perdas de carga de cada n elemento.

Se a temperatura ao longo do duto é conhecida, a distribuição de pressão é conhecida através da equação do gradiente de pressão. Se a temperatura não é conhecida, a equação de energia deve ser considerada. As correlações utilizadas neste trabalho estão descritas a seguir.

C3

Modelo computacional

O modelo computacional para o cálculo do gradiente de pressão consiste nos seguintes pontos:

- Ler os dados de entrada do escoamento (condições padrão de vazão, densidade, comprimento, diâmetro, ângulo de inclinação, temperatura ao longo do duto, e pressão em um ponto, entrada ou saída do sistema);
- Determinar o tamanho do incremento de n elementos que será considerado como condição média;
- Estimar um valor de pressão do elemento $n+1$;
- Calcular a pressão média deste incremento;
- Determinar as propriedades do fluido para esta condição média;
- Determinar o gradiente de pressão médio do incremento;
- Determinar a pressão de saída calculada a partir do gradiente de pressão estipulado;
- Comparar o valor estipulado anteriormente com o valor calculado de pressão;
- Repetir os passos até o cálculo se aproximar dentro de uma determinada tolerância com a estimativa inicial;
- Partir para o próximo incremento até chegar ao comprimento final do duto.

Os primeiros modelos para cálculo de escoamento multifásico não dependiam do padrão de escoamento. Entre esses modelos tem-se o modelo homogêneo, onde gás e líquido são considerados como uma mistura escoando em uma velocidade média e com propriedades médias do fluido sem escorregamento entre as fases. As propriedades da mistura neste modelo são determinadas através das propriedades do fluido monofásico. Outro modelo, com abordagem oposta ao modelo homogêneo, é o modelo separado, onde gás e líquido são considerados escoando em separado e cada fluido é analisado independente. Um terceiro modelo é o modelo de escorregamento que trata as duas fases como uma mistura similar à homogênea, porém, permite escorregamento entre as fases. Neste caso, o *holdup* líquido pode ser determinado.

Estes modelos são as bases dos modelos atuais. O modelo homogêneo será descrito a seguir para melhor entendimento dos modelos utilizados neste trabalho e descritos posteriormente.

Neste projeto serão considerados o modelo homogêneo, o modelo de Beggs & Brill e Hagedorn & Brown. Todos os modelos foram analisados a partir de SHOHAM (2006).

Modelo homogêneo

O modelo homogêneo é um modelo simplificado com as seguintes considerações:

- Regime permanente e fluxo uni dimensional;
- As duas fases estão misturadas e em equilíbrio;
- Não ocorre escorregamento;
- Ambas as fases são compressíveis;
- Área transversal do duto não precisa ser constante e pode variar ao longo do duto;
- Transferência de massa ocorre entre fases.

As definições do modelo homogêneo explicitadas a seguir foram retiradas de SHOHAM (2006).

Para o escoamento homogêneo as propriedades da mistura são definidas da seguinte forma.

$$\text{Velocidade da mistura: } v_M = \frac{q_L + q_G}{A_{total}} = v_{sL} + v_{sG} \quad (\text{C-17})$$

$$\text{Densidade da mistura: } \rho_M = \rho_{ns} = \rho_L \cdot \lambda_L + \rho_G \cdot (1 - \lambda_L) \quad (\text{C-18})$$

$$\text{Viscosidade da mistura: } \mu_M = \rho_{slip} = \mu_L \cdot H_L + \mu_G \cdot (1 - H_L) \quad (\text{C-19})$$

$$\text{Entalpia da mistura: } h_M = h_G \cdot \chi + h_L \cdot (1 - \chi) \quad (\text{C-20})$$

A viscosidade da mistura não possui uma definição precisa para o escoamento homogêneo, portanto, como aproximação, as propriedades da mistura no escoamento com escorregamento pode ser considerada.

Baseado nas considerações acima as equações de conservação de massa, momento e energia que definem o escoamento podem ser descritas de acordo com a formulação de fluido monofásico. Esta descrição será explicitada a seguir.

1. Conservação da massa:

De acordo com as considerações listadas acima a equação de conservação de massa (3-4) fica resumida a:

$$w = \rho_M \cdot v_M \cdot A_{total} \quad (C-21)$$

2. Conservação de quantidade de movimento:

De acordo com as considerações listadas acima a equação de conservação quantidade de movimento (3-10) fica resumida a:

$$w \cdot \frac{dv_M}{dL} = -A_{total} \cdot \frac{dP}{dL} - S_{total} \cdot \sigma_w - A_{total} \cdot \rho_M \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (C-22)$$

onde:

$\frac{dv_M}{dL}$ = variação da velocidade ao longo do comprimento do duto;

$\frac{dP}{dL}$ = variação de pressão ao longo do duto;

S_{total} = perímetro do duto;

σ_w = tensão superficial de cisalhamento.

Dividindo a equação acima pela área transversal, pode-se obter a perda de carga (gradiente de pressão), da seguinte forma:

$$-\frac{dP}{dL} = \frac{S_{total}}{A_{total}} \cdot \tau_w + \rho_M \cdot g \cdot \sin(\theta) + \frac{w}{A_{total}} \cdot \frac{dv_M}{dL} \quad (C-23)$$

Pode-se assim observar as 3 componentes da perda de carga, a componente devido ao atrito, a componente gravitacional e a componente devido a aceleração.

3. Conservação de energia:

A equação de energia definida na equação (A-C0) fica resumida a:

$$\frac{dQ}{dL} - \frac{dW_s}{dL} = w \cdot \frac{d}{dL} \left(h_M + \frac{v_M^2}{2} + g \cdot L \cdot \sin(\theta) \right) \quad (C-24)$$

onde,

$\frac{dQ}{dL}$ = transferência de calor por unidade de comprimento;

$\frac{dW_s}{dL}$ = trabalho do eixo por unidade de comprimento;

h_M = entalpia da mistura.

A partir das definições acima das propriedades da mistura, pode-se definir a gradiente de pressão de cada componente.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{fricção}} = \frac{S_{\text{total}}}{A_{\text{total}}} \cdot \tau_w = \frac{4 \cdot \tau_w}{\phi} \quad (\text{C-25})$$

Onde a tensão de cisalhamento entre as fases é definida como:

$$\tau_w = \frac{f}{2} \cdot \rho_{ns} \cdot v_M^2 \quad (\text{C-26})$$

O fator de atrito f depende do número de Reynolds, o qual, neste modelo depende da velocidade da mistura e das propriedades sem deslizamento da seguinte forma:

$$N_{RE_{ns}} = \frac{\rho_{ns} \cdot v_M \cdot \phi}{\mu_{ns}} \quad (\text{C-27})$$

O componente gravitacional da perda de carga para o modelo homogêneo considera também as propriedades sem deslizamento:

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{gravidade}} = \rho_M \cdot g \cdot \sin(\theta) = \rho_{ns} \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (\text{C-28})$$

O componente de aceleração é de difícil determinação e em muitos modelos é ignorada, devido a pouca influência no valor da perda de carga. Para este trabalho esta componente não será considerada no modelo simplificado elaborado ao final do trabalho. Porém será demonstrada aqui a sua formulação para entendimento.

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{aceleração}} = \frac{w}{A_{\text{total}}} \cdot \frac{dv_M}{dL} = \rho_{ns} \cdot v_M \cdot \frac{d}{dL} \left(\frac{w}{A_{\text{total}} \cdot \rho_{ns}} \right) \quad (\text{C-29})$$

Daí, pode-se obter o seguinte resultado:

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{aceleração}} = (\rho_{ns} \cdot v_M)^2 \cdot \left\{ (v_G - v_L) \cdot \frac{dx}{dL} + \frac{dP}{dL} \cdot \left[x \cdot \frac{dv_G}{dP} + (1-x) \cdot \frac{dv_L}{dP} \right] \right\} - \frac{(\rho_{ns} \cdot v_M)}{\rho_{ns}} \cdot \frac{1}{A_{\text{total}}} \cdot \frac{dA_{\text{total}}}{dL} \quad (\text{C-30})$$

Onde, para o modelo homogêneo, a fração de massa x , é igual a:

$$x = \frac{w_G}{w_G + w_L} = \frac{\rho_G \cdot (1 - \lambda_L)}{\rho_{ns}} \quad (\text{C-31})$$

Após este estudo detalhado do modelo homogêneo, pode-se partir para uma análise mais profunda sobre as correlações que serão utilizadas nos modelos deste texto. A correlação que será utilizada para o escoamento horizontal será a correlação de Beggs & Brill. Para o escoamento vertical será considerado a correlação de Hagedorn & Brown. Porém, no estudo de sensibilidade sem o uso de plataformas, apenas a correlação de Beggs & Brill será considerada. Ambas as correlações estão descritas a seguir e podem ser estudadas em SHOHAM (2006) e STUCKENBRUCK (2010).

Beggs & Brill

A correlação de Beggs & Brill (1973) é aplicável para uma vasta gama de ângulos de inclinação, mas não é recomendada para o escoamento vertical.

De acordo com SHOHAM (2006), os ensaios para dedução desta correlação foram realizados em um duto de 90ft (27.4m) de comprimento. O fluido utilizado neste teste foram ar e água. Todos os padrões de escoamento foram observados em uma gama de inclinações diferentes. A correlação foi então desenvolvida após 584 testes para uma variação de vazão de líquido de 0 a 1.000 bpd e vazão de gás de 0 a 300 M scf/d. O *holdup* foi medido com válvulas de fechamento rápido e encontrava-se na faixa de 0 a 0,870.

Nesta correlação o padrão de escoamento é identificado a partir do número de Froude e a partir do *holdup* líquido sem escorregamento.

O padrão de escoamento pode ser então observado de acordo com as seguintes relações, onde os parâmetros L são números adimensionais definidos para facilitar o entendimento.

$$N_{Fr}^2 = \frac{v_M^2}{g \cdot \phi} \quad (C-32)$$

$$L_1 = 316 \cdot \lambda_L^{0,302} \quad (C-33)$$

$$L_2 = 0,0009252 \cdot \lambda_L^{-2,4684} \quad (C-34)$$

$$L_3 = 0,10 \cdot \lambda_L^{-1,4516} \quad (C-35)$$

$$L_4 = 0,50 \cdot \lambda_L^{-6,738} \quad (C-36)$$

Tabela C-1- Parâmetros utilizados na correlação de Beggs & Brill para a definição padrão de escoamento

Padrão	Caso A		Caso B	
	λ_L	N_{Fr}^2	λ_L	N_{Fr}^2
Segregado	$< 0,01$	$< L_1$	$\geq 0,01$	$< L_2$
Transição	$\geq 0,01$	$\geq L_2$ $\leq L_3$	-	-
Intermitente	$\geq 0,01$ $< 0,4$	$\geq L_3$ $\leq L_1$	$\geq 0,4$	$\geq L_3$ $\leq L_4$
Distribuído	$< 0,4$	$\geq L_1$	$\geq 0,4$	$> L_4$

O padrão é determinado de acordo com a tabela acima, onde se o caso A ou B acima for atendido, tem-se o padrão de escoamento identificado.

O *holdup* líquido para a correlação de Beggs & Brill é definido em função do ângulo de inclinação da linha da seguinte forma:

$$H_L = H_{L0} \cdot \psi \quad (C-37)$$

H_{L0} é o *holdup* líquido que existiria em um duto horizontal sobre as mesmas condições de escoamento e ψ é o fator de conversão para o ângulo do duto. O *holdup* líquido para o duto horizontal e o fator de correção são calculados de acordo com a definição a seguir.

$$H_{L0} = \frac{a \cdot \lambda_L^b}{N_{Fr}^{2c}} \quad (C-38)$$

$$\psi = 1 + C \cdot [\sin(1,8 \cdot \theta) - 0,333 \cdot \sin^3(1,8 \cdot \theta)] \quad (C-39)$$

O fator C é igual a:

$$C = (1 - \lambda_L) \cdot \ln \left(d \cdot \lambda_L^e \cdot N_{LV}^{f'} \cdot N_{FR}^{2g} \right) \quad (C-40)$$

Os coeficientes descritos acima dependem do padrão de escoamento e podem ser retirados da tabela abaixo (aplicados para ângulos de inclinação positivos):

Tabela C-2- Coeficientes utilizados na correlação de Beggs & Brill para cálculo de *holdup*

Padrão / Fator	a	b	c	d	e	f	g
Segregado (estratificado e anular)	0,98	0,4846	0,0868	0,011	-3,768	3,539	-1,614
Intermitente (golfada, bolhas alongadas e caótico)	0,845	0,5351	0,0173	2,96	0,305	-0,4473	0,0978
Distribuído (bolhas dispersas)	1,065	0,5824	0,0609	Não há coeficiente, neste caso C=0 e $\psi=1$			

A exceção no cálculo do *holdup* se faz para o padrão de escoamento transição, neste caso tem-se:

$$H_{L\text{Transição}} = \frac{(L_3 - N_{FR}^2)}{(L_3 - L_2)} \times H_{L\text{Segregado}} + \left(1 - \frac{(L_3 - N_{FR}^2)}{(L_3 - L_2)}\right) \cdot H_{L\text{Intermitente}} \quad (\text{C-41})$$

A partir destas definições a perda de carga pode ser determinada através da perda por atrito, gravitacional e aceleração:

1. Perda de carga por atrito:

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{fricção}} = \frac{f_{TP} \cdot \rho_{ns} \cdot v_M^2}{2 \cdot \phi} \quad (\text{C-42})$$

Onde o fator de atrito para o escoamento de Beggs & Brill é igual a:

$$f_{TP} = (e^s) \cdot f, \quad (\text{C-43})$$

onde,

$$s = \ln(2,2 \cdot y - 1,2) \quad (\text{C-44})$$

para $1 < y < 1,2$, para os demais valores de y :

$$s = \frac{\ln\left(\frac{\lambda_L}{H_L^2}\right)}{-0,0523 + 3,182 \cdot \ln\left(\frac{\lambda_L}{H_L^2}\right) - 0,8725 \cdot \left[\ln\left(\frac{\lambda_L}{H_L^2}\right)\right]^2 + 0,01853 \cdot \left[\ln\left(\frac{\lambda_L}{H_L^2}\right)\right]^4} \quad (\text{C-45})$$

f é o fator de atrito definido pela equação (4-14) e calculado com as propriedades de não deslizamento da seguinte forma:

$$\text{Número de Reynolds: } N_{RE\ ns} = \frac{\rho_{ns} \cdot v_M \cdot \phi}{\mu_{ns}} \quad (C-46)$$

$$\text{Densidade da mistura: } \rho_{ns} = \rho_L \cdot \lambda_L + \rho_G \cdot (1 - \lambda_L) \quad (C-47)$$

$$\text{Viscosidade da mistura: } \mu_{ns} = \mu_L \cdot \lambda_L + \mu_G \cdot (1 - \lambda_L) \quad (C-48)$$

2. Perda de carga gravitacional:

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{gravidade}} = \rho_{slip} \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (C-49)$$

A densidade neste caso é considerada como a densidade considerando o deslizamento:

$$\rho_{slip} = \rho_L \cdot H_L + \rho_G \cdot (1 - H_L) \quad (C-50)$$

3. Perda de carga devido à aceleração:

$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{aceleração}} = \frac{\rho_{slip} \cdot v_{sL} \cdot v_M}{P} \cdot \left(\frac{dP}{dL} \right), \quad (C-51)$$

onde,

$$\left(\frac{dP}{dL} \right) = \frac{\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{fricção}} + \left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{gravidade}}}{1 - \frac{\rho_{slip} \cdot v_M \cdot v_{sL}}{P}} \quad (C-52)$$

Hagedorn & Brown

Segundo SHOHAM (2006) a correlação de Hagedorn & Brown (1965) foi desenvolvida baseada em dados experimentais de um poço com 1.500ft (457m). A correlação considera escorregamento entre as fases líquida e gasosa, mas não considera os diferentes padrões de escoamento.

Grupos adimensionais foram utilizados nesta correlação:

Número relacionado à velocidade do líquido:

$$N_{LV} = v_{sL} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{\sigma_L}} \quad (C-53)$$

Número relacionado à velocidade do gás:

$$N_{GV} = v_{sG} \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{\sigma_L}} \quad (C-54)$$

Número relacionado ao diâmetro do duto:

$$N_D = \phi \cdot \sqrt[4]{\frac{\rho_L}{\sigma_L}} \quad (C-55)$$

Número relacionado à viscosidade do líquido:

$$N_L = \mu_L \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\rho_L \cdot \sigma_L^3}} \quad (C-56)$$

O *holdup* líquido é determinado a partir de uma relação entre o *holdup* líquido horizontal, o ângulo do duto, a pressão e os números adimensionais.

Os gráficos a seguir foram retirados de SHOHAM (2006) e fazem parte da correlação de Hagedorn & Brown para a determinação do *holdup*.

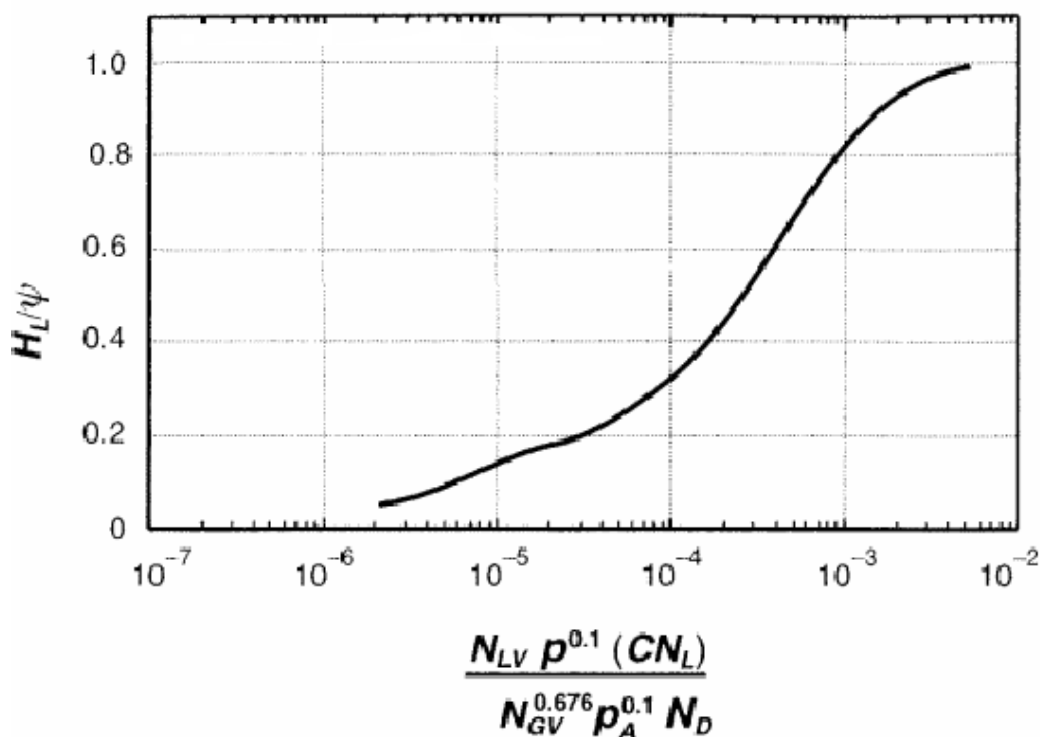


Figura C-2: Fator de correção do *holdup* líquido para a correlação de Hagedorn & Brown

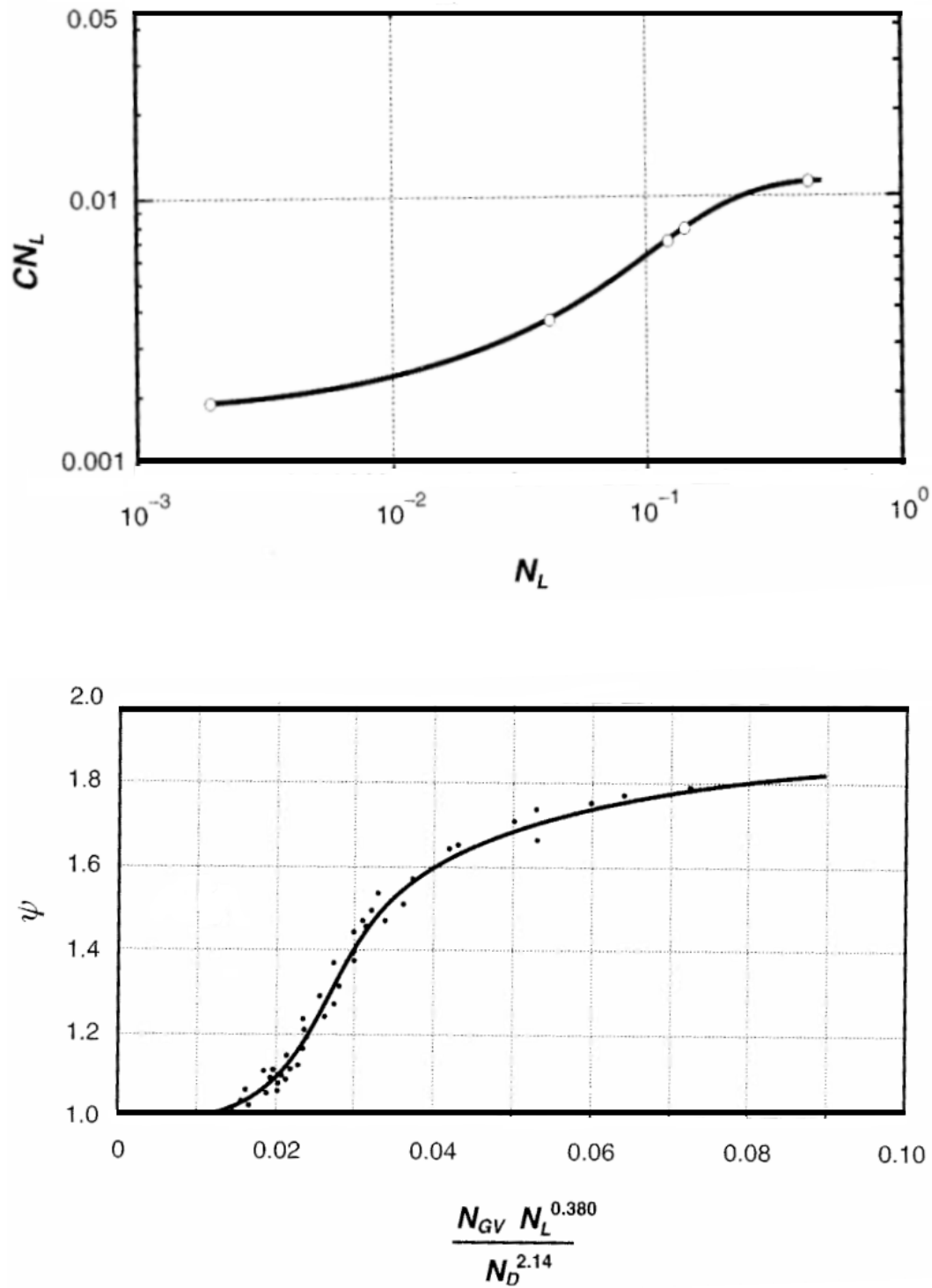


Figura C-3: Fator de correção do *holdup* líquido para correlação de Hagedorn & Brown

A partir da determinação do *holdup* líquido, tem-se a perda de carga da seguinte forma:

Perda por atrito:
$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{\text{fricção}} = \frac{f_{TP} \cdot \rho_{TP} \cdot v_M^2}{2 \cdot \phi} \quad (\text{C-57})$$

onde,

Densidade da mistura:
$$\rho_{TP} = \frac{\rho_{ns}^2}{\rho_{slip}} \quad (C-58)$$

Número de Reynolds:
$$N_{RE\ TP} = \frac{\rho_{ns} \cdot v_M \cdot \phi}{\mu_s} \quad (C-59)$$

Viscosidade da mistura:
$$\mu_{Slip} = \mu_L^{H_L} \times \mu_G^{(1-H_L)} \quad (C-60)$$

Perda gravitacional:
$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{gravidade} = \rho_{Slip} \cdot g \cdot \sin(\theta) \quad (C-61)$$

Perda por aceleração:
$$\left. \frac{dP}{dL} \right|_{aceleração} = \frac{\rho_{Slip}}{2} \cdot \frac{d(v_M^2)}{dP} \cdot \left(\frac{dP}{dL} \right), \quad (C-62)$$

onde,

$$\left(\frac{dP}{dL} \right) = \frac{\left. \frac{dP}{dL} \right|_{fricção} + \left. \frac{dP}{dL} \right|_{gravidade}}{1 - \frac{\rho_{Slip}}{2} \cdot \frac{d(v_M^2)}{dP}} \quad (C-63)$$

Ao longo dos anos algumas destas equações foram modificadas para aperfeiçoar a correlação de Hagedorn & Brown. Entre as modificações está a utilização da equação de Griffith & Wallis para representar a queda de pressão em fluxos do tipo bolha. Uma segunda modificação foi limitar o *holdup* líquido mínimo igual ao *holdup* sem deslizamento. Isso porque em fluxos ascendentes, o líquido não pode ter velocidade maior que o gás. Caso os números indiquem esta ocorrência, o valor de *holdup* deve ser substituído pelo *holdup* sem escorregamento para representar algo fisicamente possível. A terceira modificação foi a utilização do método de Duns and Ros quando em fluxos de transição e para o gradiente de aceleração da queda de pressão. Estas modificações podem ser observadas em STUCKENBRUCK (2010). Após a definição do método de cálculo do escoamento multifásico os equipamentos utilizados neste trabalho para a produção submarina serão estudados nos próximos capítulos.

Apêndice D

Modelo escoamento multifásico

Dados de entrada:

Característica do fluido:

Pressão estática inicial	$P := 90 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$	Overall heat transfer coefficient	$U1 := 0.5 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
Temperatura inicial	$T := 80^\circ\text{C}$	Densidade do gás std:	$d_g := 0.75$
Vazão de líquido	$q_L := 50 \frac{\text{m}^3}{\text{hr}}$	massa específica do ar:	$\rho_{\text{ar}} := 0.07611 \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$
Razão água líquido:	$\text{BSW} := 10\%$	Condutividade térmica do revestimento	$k_{\text{iso}} := 0.024 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$
Razão gás-Líquido	$\text{RGL} := 120 \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$	Espessura de revestimento:	$t_{\text{iso}} := 50.8\text{mm}$
API do óleo:	$\text{API} := 20$		

Característica da bomba:

Pressão diferencial da bomba:	$\Delta P_{\text{bomba}} := 30\text{bar}$
Localização da bomba:	$L_{\text{bomba}} := 1000\text{m}$

Característica do separador:

eficiência do separador:	$\Theta := 100\%$
eficiência da bomba:	$\Omega := 1$

Característica do duto:

Numero de seções:	$n := 4$
-------------------	----------

Seção	1	2	3	4
Diametro Externo duto liq. (in)	9	9	9	9
Diametro Externo duto gas. (in)	9	9	9	9
Espessura de Parede (in)	0.5	0.5	0.5	0.5
Massa específica do aço (kgf/m³)	7850	7850	7850	7850
Comprimento de duto (m)	500	500	500	500
Ângulo em relação horizontal	80	80	80	80
Temperatura água do mar	4	4	4	4
Correlação	Hagdorn & Brown	Hagdorn & Brown	Hagdorn & Brown	Hagdorn & Brown

Incremento de cálculo:	$\Delta L := 100\text{m}$
------------------------	---------------------------

Cálculo:

Seção:	$\text{sect} := \text{submatrix}(\text{Input}, 1, 1, 2, 1 + n)^T$	
Diametro Externo:	$\text{odl} := \text{submatrix}(\text{Input}, 2, 2, 2, 1 + n)^T \cdot \text{in}$	
	$\text{odg} := \text{submatrix}(\text{Input}, 3, 3, 2, 1 + n)^T \cdot \text{in}$	
Espessura de parede:	$t := \text{submatrix}(\text{Input}, 4, 4, 2, 1 + n)^T \cdot \text{in}$	
Densidade do aço:	$\rho_{\text{aço}} := \text{submatrix}(\text{Input}, 5, 5, 2, 1 + n)^T \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	
Comprimento Vertical:	$L_v := \text{submatrix}(\text{Input}, 6, 6, 2, 1 + n)^T \cdot \text{m}$	
Comprimento horizontal:	$\theta := \text{submatrix}(\text{Input}, 7, 7, 2, 1 + n)^T \cdot \text{deg}$	
Temperatura água do mar:	$T_w := \text{submatrix}(\text{Input}, 8, 8, 2, 1 + n)^T$	$T_w := (T_w + 273.15) \cdot \text{K}$
	$\text{correl} := \text{submatrix}(\text{Input}, 10, 10, 2, 1 + n)^T$	



Propriedade do duto:

$$\text{od} := \begin{cases} \text{odl} & \text{if correl} = \text{"Mono Liquido"} \\ \text{odg} & \text{if correl} = \text{"Mono Gas"} \\ \text{odl} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Area de seção transversal:

$$A_p(\text{od}, t) := \frac{\pi \cdot (\text{od} - 2 \cdot t)^2}{4}$$

Rugosidade:

$$\varepsilon := 0.005 \text{m}$$

Condutividade do aço:

$$k_{\text{aço}} := 43 \left(\frac{\text{W}}{\Delta^\circ \text{C}} \cdot \frac{1}{\text{m}} \right)$$

iedade do fluido:

Capacidade térmica [J/kg.K]

Óleo:

$$cp_o := 0.65 \left(\frac{\text{BTU}}{\Delta^\circ \text{F}} \cdot \frac{1}{\text{lbm}} \right)$$

Gás:

$$cp_g := 0.4 \left(\frac{\text{BTU}}{\Delta^\circ \text{F}} \cdot \frac{1}{\text{lbm}} \right)$$

Agua:	$\begin{pmatrix} 0 \\ 20 \\ 40 \\ 60 \\ 80 \\ 100 \\ 120 \\ 140 \\ 160 \\ 180 \\ 200 \\ 220 \\ 240 \\ 260 \\ 280.6 \\ 300 \end{pmatrix}$	$cp_w := \begin{pmatrix} 4.2178 \\ 4.1818 \\ 4.1784 \\ 4.1843 \\ 4.1964 \\ 4.2161 \\ 4.250 \\ 4.283 \\ 4.342 \\ 4.417 \\ 4.505 \\ 4.610 \\ 4.756 \\ 4.949 \\ 5.208 \\ 5.728 \end{pmatrix}$
-------	--	--

$$c_{pw}(tm) := \text{linterp}\left[T_{cpw}, c_{pw}, \left(\frac{tm}{K} - 273.15\right)\right] \cdot \left(\frac{10^3 \cdot J}{\Delta^\circ C} \cdot \frac{1}{kg}\right) \quad \mathbf{1 \ 2 \ 5}$$

massa específica da água

$$\rho_w := 62.4 \cdot \frac{\text{lbm}}{\text{ft}^3}$$

Condutividade termica da água:

$$k_w := \begin{pmatrix} 0.552 \\ 0.597 \\ 0.628 \\ 0.651 \\ 0.668 \\ 0.680 \\ 0.685 \\ 0.684 \\ 0.680 \\ 0.675 \\ 0.665 \\ 0.652 \\ 0.635 \\ 0.611 \\ 0.580 \\ 0.540 \end{pmatrix}$$

$$k_w(tm) := \text{linterp}\left(T_{cpw}, k_w, \frac{tm}{K} - 273.15\right) \cdot \frac{W}{m \cdot K}$$

Condutividade térmica do óleo:

$$k_o := 0.13 \cdot \frac{W}{m \cdot K}$$

Densidade do óleo Standard:

$$d_o := \frac{141.5}{API + 131.5}$$

Massa específica do gás nas condições padrão (1atm e 60F):

$$\rho_{gstd} := d_g \cdot \rho_{ar}$$

Massa específica do óleo nas condições padrão (1atm e 60F):

$$\rho_{ostd} := d_o \cdot \rho_w$$

Chute inicial para densidade do óleo:

$$\rho_{o1} := 500 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Pressão e temperatura absolutas e standards:

$$P_{abs} := 14.696 \text{ psi}$$

$$T_{abs} := 459.67^\circ F$$

$$P_{std} := 1 \text{ atm}$$

$$T_{std} := 60^\circ F$$

Calculo das Vazões:

Conversão RGL:

$$RGL := RGL \cdot \frac{\text{ft}^3}{\text{stb}}$$

Vazão de óleo standard:

$$q_o := q_L \cdot (1 - BSW)$$

Vazão de água standard:

$$q_a := q_L \cdot \text{BSW}$$

1 2 6

Vazão de gás total standard:

$$q_g := q_L \cdot \text{RGL}$$

Estimando pressão e temperatura no ponto seguinte:

Comprimento estimado:

$$\Delta L := 100\text{m}$$

Pressão final estimada:

$$P_2 := P - 0.1\text{MPa}$$

Temperatura final:

$$T_2(T_w, T, \rho_o, q_l, u) := T_w + (T - T_w) \cdot \exp\left(-\frac{u}{\rho_o \cdot q_l \cdot c_{p_o}} \cdot \Delta L\right)$$

Cálculo das propriedades médias:

Pressão média a partir da pressão estimada:

$$P_m(p, p_2) := \frac{p + p_2}{2}$$

Temperatura média:

$$T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u) := \frac{T + T_2(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{2}$$

Cálculo Propriedades do fluido:

Razão gás óleo:

$$\text{RGO} := \frac{q_g}{q_o}$$

Coeficiente de Solubilidade do óleo
(relação de Stading):

$$R_s(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) := \begin{cases} R \leftarrow \left[d_g \cdot \left[\frac{P_m(p, p_2) + P_{abs}}{18 \cdot \text{psi}} \cdot \frac{10^{(0.0125 \cdot \text{API})}}{0.00091 \cdot \left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)} \right]^{0.83} \right] \\ R \leftarrow R \quad \text{if } R < \text{RGO} \\ R \leftarrow \text{RGO} \quad \text{otherwise} \\ R \end{cases}$$

Coeficiente de Solubilidade da água (Correlação de Culberson & McKetta):

Fator de volume de formação do óleo:
(relação de Standing)

$$F_1(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) := R_s(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) \cdot \left(\frac{d_g}{d_o} \right)^{0.5} + 1.25 \cdot \left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)$$

Pressão de bolha:

$$P_b(T_w, T, \rho_o, q_l, u) := \left[\frac{\left(\frac{\text{RGO}}{d_g} \right)^{0.83}}{18 \cdot \frac{10^{(0.0125 \cdot \text{API})}}{0.00091 \cdot \left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)}} \right] \cdot \text{psi}$$

Compressibilidade do óleo:

$$C_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) := \frac{5 \cdot R_s(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) - 1433 + 17.2 \cdot \left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) - 1180 \cdot d_g + 12.61 \cdot \text{API}}{\frac{P_m(p, p_2) + P_{abs}}{\text{psi}}}$$

$$\text{Bob}(T_w, T, \rho_o, q_l, u) := 0.972 + 0.000147 \cdot \left[\text{RGO} \cdot \sqrt{\frac{d_g}{d_o}} + 1.25 \cdot \left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) \right]^{1.175}$$

$$\text{Bo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) := \begin{cases} p \leftarrow \text{Bob}(T_w, T, \rho_o, q_l, u) \cdot \exp\left[C_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) \cdot \left[\frac{P_b(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{\text{psi}} \cdot \frac{P_m(p, p_2) + P_{abs}}{\text{psi}} \right] \right] & \text{if } (P_m(p, p_2) + P_{abs}) > P_b(T_w, T, \rho_o, q_l, u) \\ p \leftarrow 0.972 + 0.000147 \cdot F_1(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u)^{1.175} & \text{otherwise} \\ p \end{cases}$$

$$B_w(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) := 1 + 0.00012 \cdot \left[\left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 - 60 \right) + 0.000001 \cdot \left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 - 60 \right)^2 \right] \dots$$

$$+ \left(\frac{P_m(p, p_2) + P_{abs}}{\text{psi}} \cdot 0.00000333 \right)$$

Vazão do fluido:

Cálculo vazão de água a P & T:

$$q_{agua}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := \begin{cases} (q_a \cdot B_w(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u)) \cdot (1 - \Theta) & \text{if } cor = \text{"Mono Gas"} \\ (q_a \cdot B_w(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u)) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Cálculo vazão de óleo a P & T:

$$q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := \begin{cases} q_o \cdot B_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) \cdot (1 - \Theta) & \text{if } cor = \text{"Mono Gas"} \\ q_o \cdot B_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Vazão Mássica:

$$W_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := \rho_o \cdot q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)$$

$$W_a(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := \rho_w \cdot q_{agua}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)$$

$$W_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := W_a(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) + W_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)$$

Fator de proporcionalidade óleo e água:

Proporcionalidade de óleo:

$$f_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := \frac{q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)}{q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) + q_{agua}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)}$$

Proporcionalidade de água:

$$f_a(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := \frac{q_{agua}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)}{q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) + q_{agua}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)}$$

Vazão de líquido a P & T:

$$q_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) := q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor) + q_{agua}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, cor)$$

$$q_{Liq}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, u, cor) := \begin{cases} i \leftarrow 1 \\ q_1 \leftarrow q_L \\ q_{2,1} \leftarrow q_L(T_{w,1}, T, P, P_2, \rho_o, q_1, U_1, correl_1) \\ \text{while } q_{2,1}^2 - q_1^2 > 0.01 \frac{m^3}{day} \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ \quad q_i \leftarrow q_{2,i-1}^2 \\ \quad q_{2,i} \leftarrow q_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_i, u, cor) \\ q_{2,i} \end{cases}$$

Densidade do fluido:

Densidade relativa do gás Dissolvido
(Correlação de Katz):

$$d_{gdis}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) := \begin{cases} \rho \leftarrow 0.25 + 0.02 \cdot API + 10^{-6} \cdot (0.6824 - 3.586 \cdot API) \cdot R_s(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) \\ R \leftarrow \left[d_g \cdot \left[\frac{P_m(p, p_2) + P_{abs}}{18 \cdot \text{psi}} \cdot \frac{10^{(0.0125 \cdot API)}}{0.00091 \cdot \left(\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)} \right] \right]^{\frac{1}{0.83}} \\ \text{resp} \leftarrow \rho \quad \text{if } R < RGO \\ \text{resp} \leftarrow 0 \frac{kg}{m^3} \quad \text{otherwise} \\ \text{resp} \end{cases}$$

$$d_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) := \begin{cases} d_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) & \text{if } d_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) > d_g \wedge d_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) \geq 0.56 \\ d_g & \text{if } d_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) \leq d_g \wedge d_g > 0.56 \\ 0.56 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Massa específica do gás dissolvido: $\rho_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) := d_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) \cdot \rho_{ar}$

Massa específica do óleo nas condições P&T: $\rho_o(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) := \frac{\rho_{ostd} + \rho_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) \cdot \frac{R_s(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u)}{5.6114584}}{Bo(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u)}$

$$\rho_{oleo}(Tw, T, p, p2, u, cor) := \begin{cases} i \leftarrow 1 \\ \rho_1 \leftarrow \rho_{ol} \\ \rho_{2_1} \leftarrow \rho_o(T_{w1}, T, P, P2, \rho_1, q_{Liq}(T_{w1}, T, P, P2, \rho_1, U1, correl_1), U1) \\ \text{while } \rho_{2_1} - \rho_i > 0.01 \frac{kg}{m^3} \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ \quad \rho_i \leftarrow \rho_{2_{i-1}} \\ \quad \rho_{2_i} \leftarrow \rho_o(Tw, T, p, p2, \rho_i, q_{Liq}(Tw, T, p, p2, \rho_i, u, cor), u) \\ \rho_{2_i} \end{cases}$$

Densidade do gás na condição P e T: $\rho_{glivre} := 0.7 \frac{kg}{m^3}$

$$\rho_{gstd}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \rho_{glivre}, u) := \begin{cases} \rho \leftarrow \frac{(\rho_{gstd} \cdot RGO) - (\rho_{gdis}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u) \cdot R_s(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u))}{(RGO - R_s(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u))} \\ R \leftarrow \left[d_g \cdot \left[\frac{Pm(p, p2) + Pabs}{18 \cdot psi} \cdot \frac{10^{(0.0125 \cdot API)}}{0.00091 \cdot \left(\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)} \right] \right] \frac{1}{0.83} \\ \text{resp} \leftarrow \rho \quad \text{if } R < RGO \\ \text{resp} \leftarrow 0 \frac{kg}{m^3} \quad \text{otherwise} \\ \text{resp} \end{cases}$$

$$\rho_{gstd}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} i \leftarrow 1 \\ \rho_1 \leftarrow \rho_{glivre} \\ \rho_{2_1} \leftarrow \rho_{gstd}(T_{w1}, T, P, P2, \rho_{oleo}(T_{w1}, T, P, P2, U1, correl_1), q_{Liq}(T_{w1}, T, P, P2, \rho_{oleo}(T_{w1}, T, P, P2, U1, correl_1), U1, correl_1)) \\ \text{while } \rho_{2_i} - \rho_i > 1 \cdot \frac{kg}{m^3} \\ \quad i \leftarrow i + 1 \\ \quad \rho_i \leftarrow \rho_{2_{i-1}} \\ \quad \rho_{2_i} \leftarrow \rho_{gstd}(Tw, T, p, p2, \rho_{oleo}(Tw, T, p, p2, u, cor), q_{Liq}(Tw, T, p, p2, \rho_{oleo}(Tw, T, p, p2, u, cor), u, cor), \rho_i, u) \\ \quad \rho_{2_i} \leftarrow \rho_{2_i} \quad \text{if } \rho_{2_i} \geq 0.56 \cdot \rho_{ar} \wedge \rho_{2_i} > d_g \cdot \rho_{ar} \\ \quad \rho_{2_i} \leftarrow d_g \cdot \rho_{ar} \quad \text{if } \rho_{2_i} \geq 0.56 \cdot \rho_{ar} \wedge \rho_{2_i} < d_g \cdot \rho_{ar} \\ \quad (0.56 \cdot \rho_{ar}) \quad \text{otherwise} \\ \rho_{2_i} \end{cases}$$

Calculo fator de compressibilidade Z:

Pressão e temperatura crítica (Correlação de Brown):

$$P_{pc}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \left(708.75 - 57.5 \cdot \frac{\rho_{gstd}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{\rho_{ar}} \right) \cdot \text{psi}$$

$$T_{pc}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \left(169 + 314 \cdot \frac{\rho_{gstd}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{\rho_{ar}} \right) \cdot R$$

$$Pr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{\frac{P_{abs}}{\text{psi}} + \frac{P_m(p, p_2)}{\text{psi}}}{\frac{P_{pc}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{\text{psi}}}$$

$$Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 + \left(\frac{T_{abs}}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)}{\frac{T_{pc}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{R}}$$

Correlação de Beggs & Brill:

$$Az(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 1.39 \cdot \sqrt{Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) - 0.92} - 0.36 \cdot Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) - 0.101$$

$$Bz(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \left[\left(0.62 - 0.23 \cdot Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \right) \cdot Pr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \dots \right. \\ \left. + \left[\frac{0.066}{\left(Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) - 0.86 \right)} - 0.037 \right] \cdot Pr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^2 + \left[\frac{0.32 \cdot \left(Pr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \right)^6}{10^9 \cdot \left(Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) - 1 \right)} \right] \right]$$

$$T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 0.132 - 0.32 \cdot \log(Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}))$$

$$, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 10^{\left[0.3106 - \left(0.49 \cdot Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \right) + 0.1824 \cdot \left(Tr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \right)^2 \right]}$$

$$T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \left[Az(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) + \left(\frac{1 - Az(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{\exp(Bz(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}))} \right) \dots \right. \\ \left. + Cz(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot \left(Pr(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \right)^{Dz(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})} \right]$$

Volume de formação:

$$B_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{\frac{P_{std}}{\text{psi}}}{\left[\frac{T_{std}}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 + \left(\frac{T_{abs}}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) \right]} \cdot \left[\frac{\frac{P_m(p, p_2)}{\text{psi}} + \frac{P_{abs}}{\text{psi}}}{\left[\frac{T_m(T_w, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 + \left(\frac{T_{abs}}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) \right]} \cdot Zz(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \right]$$

$$\rho_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{\rho_{gstd}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{B_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}$$

Vazão de gás dissolvido a P & T:

$$q_{gasdis}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \begin{cases} q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot R_s(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) \cdot (1 - \Theta) & \text{if cor = "Mono Liquido"} \\ q_{oleo}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot R_s(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Vazão de gás livre a P \& T: } q_{gaslivre}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \begin{cases} \frac{q_g}{\frac{\text{m}^3}{\text{day}}} \cdot \frac{6.28981}{86400} \cdot B_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot \frac{\text{ft}^3}{\text{sec}} \cdot (1 - \Theta) & \text{if cor = "Mono Liquido"} \\ \frac{q_g}{\frac{\text{m}^3}{\text{day}}} \cdot \frac{6.28981}{86400} \cdot B_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot \frac{\text{ft}^3}{\text{sec}} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\text{Vazão Mássica de gás: } W_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \rho_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot q_{gaslivre}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})$$

$$Z1 := 3.0324 - 0.02023 \cdot API$$

$$X1(Tw, T, \rho_o, q_l, u) := 10^{Z1} \cdot \left(\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)^{-1.163}$$

$$\mu_{om}(Tw, T, \rho_o, q_l, u) := \left(10^{X1(Tw, T, \rho_o, q_l, u)} - 1 \right) \cdot Pa \cdot sec$$

Viscosidade óleo vivo (Correlação de Beggs & Robison):

$$A1(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) := 10.715 \cdot \left(R_s(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) + 100 \right)^{-0.515}$$

$$B(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) := 5.44 \cdot \left(R_s(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) + 150 \right)^{-0.338}$$

$$\mu_{ov}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) := A1(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) \cdot \left[\frac{\mu_{om}(Tw, T, \rho_o, q_l, u)}{(Pa \cdot sec)} \right]^{B(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u)} \cdot \left(\frac{poise}{100} \right)$$

$$\mu_{ov}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) := \begin{cases} u \leftarrow \mu_{ov}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) & \text{if } Pm(p, p2) + Pabs < Pb(Tw, T, \rho_o, q_l, u) \\ u \leftarrow \mu_{ov}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) \cdot \left(\frac{Pm(p, p2) + Pabs}{Pb(Tw, T, \rho_o, q_l, u)} \right)^{2.6 \cdot \left(\frac{Pm(p, p2)}{psi} \right)^{1.187} \cdot 10^{\left(-0.000039 \cdot \frac{Pm(p, p2)}{psi} - 5 \right)}} & \text{otherwise} \\ u & \end{cases}$$

Cálculo viscosidade da água (Correlação de Wan Wigen):

$$\mu_w(Tw, T, \rho_o, q_l, u) := \exp \left[\left[1.003 - 1.479 \cdot \left(\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) \cdot 10^{-2} + 1.982 \cdot 10^{-5} \cdot \left(\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)^2 \right] \right] \cdot \left(\frac{poise}{100} \right)$$

Cálculo viscosidade do gás (Correlação de Lee et al):

$$\text{Massa molecular: } MM := d_g \cdot (28.963)$$

$$K1(Tw, T, \rho_o, q_l, u) := \frac{(9.4 + 0.02 \cdot MM) \cdot \left[\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 + \left(\frac{Tabs}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) \right]^{1.5}}{209 + 19 \cdot MM + \left[\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 + \left(\frac{Tabs}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) \right]}$$

$$X2(Tw, T, \rho_o, q_l, u) := 3.5 + \frac{986}{\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, q_l, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 + \left(\frac{Tabs}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right)} + 0.01 \cdot MM$$

$$Y(Tw, T, \rho_o, q_l, u) := 2.4 - 0.2 \cdot X2(Tw, T, \rho_o, q_l, u)$$

$$\mu_g(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, cor) := K1(Tw, T, \rho_o, q_l, u) \cdot 10^{-4} \cdot \exp \left[X2(Tw, T, \rho_o, q_l, u) \cdot \left(\frac{\rho_g(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, cor)}{\frac{gm}{cm^3}} \right)^{Y(Tw, T, \rho_o, q_l, u)} \right] \cdot \left(\frac{poise}{100} \right)$$

Cálculo do hold up sem deslizamento (fração líquido e gás)

Hold Up sem Deslizamento (Razão entre vazão volumetrica de líquido e vazão volumetrica total):

$$\lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, cor) := \frac{q_{Liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, u, cor)}{q_{Liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, u, cor) + q_{gaslivre}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, cor)}$$

Propriedade da mistura:

Propriedade do líquido:

$$\text{Densidade do líquido: } \rho_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, cor) := \rho_o \cdot fo(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, cor) + \rho_w \cdot (1 - fo(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, cor))$$

Viscosidade do líquido:
$$\mu_{\text{liq}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \left[\mu_{\text{ov}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) \cdot f_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \dots \right. \\ \left. + \mu_w(T_w, T, \rho_o, q_l, u) \cdot (1 - f_o(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})) \right]$$

1 3 1

Velocidade superficial gás e líquido:

$$v_{\text{SL}}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, u, \text{cor}) := \frac{q_{\text{Liq}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, u, \text{cor})}{A_p(\text{od}, t)}$$

$$v_{\text{sg}}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{q_{\text{gaslivre}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{A_p(\text{od}, t)}$$

Propriedade da mistura sem deslizamento:

Calculo viscosidade da mistura sem deslizamento:

$$\mu_{\text{ns}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \mu_{\text{ov}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u) \cdot \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) + \mu_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot (1 - \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}))$$

Densidade da mistura sem deslizamento:

$$\rho_{\text{ns}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \rho_o \cdot \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) + \rho_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot (1 - \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}))$$

Velocidade da mistura:

$$v_m(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{q_{\text{Liq}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, u, \text{cor}) + q_{\text{gaslivre}}(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{A_p(\text{od}, t)}$$

Vazão Mássica da Mistura:

$$W_m(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := W_g(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) + W_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})$$

$$Y_1(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{W_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{W_m(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}$$

Retornos correlação Beggs and Brill - fluxo horizontal:

$$\text{Fr}_m(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \frac{v_m(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^2}{g \cdot (\text{od} - 2 \cdot t)}$$

$$T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 316 \cdot \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^{0.302} \quad L_2(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 0.0009252 \cdot \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^{-2.4684}$$

$$T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 0.10 \cdot \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^{-1.4516} \quad L_4(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 0.5 \cdot \lambda_L(T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^{-6.738}$$

$$w, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \begin{cases} w \leftarrow \text{"Segregated"} & \text{if } \lambda_L < 0.01 \wedge \text{Fr}_m < L_1 \vee \text{Fr}_m < L_2 \wedge \lambda_L \geq 0.01 \\ w \leftarrow \text{"Transition"} & \text{if } \lambda_L \geq 0.01 \wedge L_2 \leq \text{Fr}_m \leq L_3 \\ w \leftarrow \text{"Intermittent"} & \text{if } (0.01 \leq \lambda_L < 0.4 \wedge L_3 \leq \text{Fr}_m \leq L_1) \vee [(\lambda_L \geq 0.4) \wedge (L_3 \leq \text{Fr}_m \leq L_4)] \\ w \leftarrow \text{"Distributed"} & \text{if } (\lambda_L < 0.4) \wedge (\text{Fr}_m \geq L_1) \vee (\lambda_L \geq 0.4) \wedge (L_4 < \text{Fr}_m) \end{cases}$$

Hold up liquido com escorregamento para escoamento horizontal:

$$a(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \begin{cases} a \leftarrow 0.98 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Segregated"} \\ a \leftarrow 0.845 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Intermittent"} \\ a \leftarrow 1.065 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Distributed"} \\ a \leftarrow 0 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Transition"} \end{cases}$$

$$b(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \begin{cases} b \leftarrow 0.4846 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Segregated"} \\ b \leftarrow 0.5351 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Intermittent"} \\ b \leftarrow 0.5824 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Distributed"} \\ b \leftarrow 0 & \text{if flow}(\text{od}, t, T_w, T, p, p_2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Transition"} \end{cases}$$

$$c(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} c \leftarrow 0.0868 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Segredated"} \\ c \leftarrow 0.0173 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Intermittent"} \\ c \leftarrow 0.0609 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Distributed"} \\ c \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Transition"} \\ c & \end{cases}$$

$$H1_{L0}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \frac{a(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)^{b(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}}{\left(Fr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \right)^{c(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}}$$

$$H_{LS}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \frac{0.98 \cdot \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)^{0.4846}}{\left(Fr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \right)^{0.0868}}$$

$$H_{LI}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \frac{0.845 \cdot \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)^{0.5351}}{\left(Fr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \right)^{0.0173}}$$

$$A(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \frac{\left(L_3(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) - Fr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \right)}{L_3(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) - L_2(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}$$

Fator de correção para inclinação:

$$dd(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} d \leftarrow 0.011 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Segredated"} \\ d \leftarrow 2.96 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Intermittent"} \\ d \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Distributed"} \\ d \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Transition"} \\ d & \end{cases}$$

$$e(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} e \leftarrow -3.768 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Segredated"} \\ e \leftarrow -0.305 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Intermittent"} \\ e \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Distributed"} \\ e \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Transition"} \\ e & \end{cases}$$

$$fff(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} f \leftarrow 3.539 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Segredated"} \\ f \leftarrow -0.4473 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Intermittent"} \\ f \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Distributed"} \\ f \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Transition"} \\ f & \end{cases}$$

$$gl(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} g \leftarrow -1.614 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Segredated"} \\ g \leftarrow 0.0978 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Intermittent"} \\ g \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Distributed"} \\ g \leftarrow 0 & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Transition"} \\ g & \end{cases}$$

Tensão superficial (Baker&Swerdloff):

$$\begin{array}{l} \text{Óleo morto:} \quad \sigma_m(Tw, T, \rho_o, ql, u) := \begin{cases} \sigma 1 \leftarrow (39 - 0.2571 \cdot API) \frac{\text{dyne}}{\text{cm}} \\ \sigma 2 \leftarrow (37.5 - 0.2571 \cdot API) \frac{\text{dyne}}{\text{cm}} \\ \sigma \leftarrow \sigma 2 \quad \text{if } \left(\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) > 100 \\ \sigma \leftarrow \sigma 1 \quad \text{if } \left(\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) < 100 \\ \sigma \leftarrow \sigma 1 - (\sigma 1 - \sigma 2) \cdot \frac{\left[\left(\frac{Tm(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) - 68 \right]}{32} \quad \text{otherwise} \\ \sigma \end{cases} \end{array}$$

$$\text{pressao} := \begin{pmatrix} 0 \\ 200 \\ 400 \\ 600 \\ 1000 \\ 1400 \\ 2200 \\ 2800 \\ 6000 \end{pmatrix} \text{ psi} \quad \text{fator} := \begin{pmatrix} 1 \\ 0.86 \\ 0.73 \\ 0.63 \\ 0.48 \\ 0.37 \\ 0.2 \\ 0.12 \\ 0.6 \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{oleo}}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) := \begin{cases} C \leftarrow \sigma_m(Tw, T, \rho_o, q_l, u) \cdot \text{linterp}(\text{pressao}, \text{fator}, \text{pressao}_1) & \text{if } P_m(p, p2) \leq \text{pressao}_1 \\ C \leftarrow \sigma_m(Tw, T, \rho_o, q_l, u) \cdot \text{linterp}(\text{pressao}, \text{fator}, \text{pressao}_{\text{rows}(\text{pressao})}) & \text{if } P_m(p, p2) \geq \text{pressao}_{\text{rows}(\text{pressao})} \\ C \leftarrow \sigma_m(Tw, T, \rho_o, q_l, u) \cdot \text{linterp}(\text{pressao}, \text{fator}, P_m(p, p2)) & \text{otherwise} \\ C & \end{cases}$$

$$\text{pressao} := \begin{pmatrix} 0 \\ 1000 \\ 2000 \\ 3000 \\ 4000 \\ 5000 \\ 6000 \\ 7000 \\ 8000 \end{pmatrix} \text{ psi} \quad \text{fator1} := \begin{pmatrix} 75 \\ 63 \\ 59 \\ 57 \\ 54 \\ 52 \\ 52 \\ 51 \\ 50 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{dyne}}{\text{cm}} \quad \text{fator2} := \begin{pmatrix} 53 \\ 46 \\ 40 \\ 33 \\ 26 \\ 21 \\ 21 \\ 22 \\ 23 \end{pmatrix} \cdot \frac{\text{dyne}}{\text{cm}}$$

$$\sigma_w(p, p2) := \begin{cases} C \leftarrow \text{fator1} & \text{if } P_m(p, p2) \leq \text{pressao}_1 \\ C \leftarrow \text{fator2} & \text{if } P_m(p, p2) \geq \text{pressao}_{\text{rows}(\text{pressao})} \\ C \leftarrow \frac{\text{linterp}(\text{pressao}, \text{fator1}, P_m(p, p2)) + \text{linterp}(\text{pressao}, \text{fator2}, P_m(p, p2))}{2} & \text{otherwise} \\ C & \end{cases}$$

$$\sigma(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \sigma_{\text{oleo}}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u) \cdot \text{fo}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) + \sigma_w(p, p2) \cdot (1 - \text{fo}(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}))$$

$$N_{LV}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := 1.938 \cdot \frac{v_{SL}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, u, \text{cor})}{\frac{\text{ft}}{\text{sec}}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{\rho_o}{\text{lbm}}}{\frac{\text{ft}^3}{\frac{\sigma(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})}{\frac{\text{dyne}}{\text{cm}}}}}}$$

$$Cc(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := \begin{cases} 0 & \text{if } \text{flow}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Transition"} \\ 0 & \text{if } \text{flow}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) = \text{"Distributed"} \\ \left[(1 - \lambda_L) \cdot \ln \left[\text{dd} \cdot \lambda_L^e \cdot N_{LV}^{\text{ff}} \cdot (Fr_m)^{g1} \right] \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Cc_{\text{seg}}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := (1 - \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})) \cdot \ln \left[0.011 \cdot \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^{-3.768} \cdot N_{LV}^{3.539} \cdot (Fr_m)^{-1.614} \right]$$

$$Cc_{\text{int}}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) := (1 - \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})) \cdot \ln \left[2.96 \cdot \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor})^{0.305} \cdot N_{LV}^{-0.4473} \cdot (Fr_m)^{0.0978} \right]$$

$$\Psi l(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, \theta, u, \text{cor}) := 1 + Cc(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot (\sin(1.8 \cdot \theta) - 0.333 \cdot \sin(1.8 \cdot \theta)^3)$$

$$\Psi l_{\text{seg}}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, \theta, u, \text{cor}) := 1 + Cc_{\text{seg}}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot (\sin(1.8 \cdot \theta) - 0.333 \cdot \sin(1.8 \cdot \theta)^3)$$

$$\Psi l_{\text{int}}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, \theta, u, \text{cor}) := 1 + Cc_{\text{int}}(\text{od}, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, q_l, u, \text{cor}) \cdot (\sin(1.8 \cdot \theta) - 0.333 \cdot \sin(1.8 \cdot \theta)^3)$$

$$H_{L0}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := H_{L0}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)$$

1 3 4

$$H_{Lhorl}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} v \leftarrow A \cdot H_{LS} \cdot \Psi_{1seg} + (1 - A) \cdot H_{LI} \cdot \Psi_{1int} & \text{if flow}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) = \text{"Transition"} \\ v \leftarrow \Psi_{1l}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot H_{L0}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) & \text{otherwise} \\ v & \end{cases}$$

$$H_{Lhor}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} 0 & \text{if } H_{Lhorl}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) < 0 \\ 1 & \text{if } H_{Lhorl}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) > 1 \\ H_{Lhorl}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Parametros correlação Hagedorn and Brown - fluxo vertical:

$$N_{GV}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := 1.938 \cdot \frac{v_{sg}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\frac{m}{sec}} \cdot \sqrt[4]{\frac{\frac{\rho_o}{\frac{kg}{m^3}}}{\frac{\sigma(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\frac{dyne}{cm}}}}$$

$$N_D(od, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \frac{od}{ft} \cdot \sqrt[4]{\frac{\frac{\rho_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\frac{lbm}{ft^3}}}{\frac{\sigma(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\frac{dyne}{cm}}}} \cdot \frac{32.174 \cdot \left(\frac{1000}{2.20462234}\right)}{\frac{dyne}{cm}}$$

$$N_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := 0.15726 \cdot \frac{\mu_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{(Pa \cdot sec)} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\frac{\rho_o}{\frac{kg}{m^3}} \cdot \frac{\sigma(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\frac{dyne}{cm}}}}$$

$$NL := \begin{pmatrix} 0.002 \\ 0.005 \\ 0.010 \\ 0.020 \\ 0.030 \\ 0.060 \\ 0.100 \\ 0.150 \\ 0.200 \\ 0.400 \end{pmatrix}$$

$$CNL := \begin{pmatrix} 0.0019 \\ 0.0022 \\ 0.0024 \\ 0.0028 \\ 0.0033 \\ 0.0047 \\ 0.0064 \\ 0.0080 \\ 0.0090 \\ 0.0115 \end{pmatrix}$$

$$\ln C_{NL}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} C \leftarrow \ln(CNL_1) & \text{if } \ln(N_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)) \leq \ln(NL_1) \\ C \leftarrow \ln(CNL_{rows(CNL)}) & \text{if } \ln(N_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)) \geq \ln(NL_{rows(NL)}) \\ C \leftarrow \text{linterp}(\ln(NL), \ln(CNL), \ln(N_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor))) & \text{otherwise} \\ C & \end{cases}$$

$$C_{NL}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \exp(\ln C_{NL}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor))$$

$$G2(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \frac{N_{LV}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{N_{GV}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)^{0.676}} \cdot \left(\frac{\frac{Pm(p, p2)}{psi} + \frac{Pabs}{psi}}{\frac{Pstd}{psi}} \right)^{0.1} \cdot \frac{C_{NL}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{N_D(od, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}$$

$$G := \begin{pmatrix} 0.010 \\ 0.020 \\ 0.025 \\ 0.030 \\ 0.035 \\ 0.040 \\ 0.045 \\ 0.050 \\ 0.060 \\ 0.070 \\ 0.080 \\ 0.090 \end{pmatrix} \quad \Psi := \begin{pmatrix} 1.00 \\ 1.10 \\ 1.23 \\ 1.40 \\ 1.53 \\ 1.60 \\ 1.65 \\ 1.68 \\ 1.74 \\ 1.78 \\ 1.80 \\ 1.83 \end{pmatrix}$$

$$G1(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) := \frac{N_{GV}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) \cdot N_L(Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor)^{0.380}}{N_D(od, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor)^{2.14}}$$

$$\Psi(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) := \begin{cases} C \leftarrow \Psi_1 & \text{if } G1(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) \leq G_1 \\ C \leftarrow \Psi_{\text{rows}(\Psi)} & \text{if } G1(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) \geq G_{\text{rows}(\Psi)} \\ C \leftarrow \text{linterp}(G, \Psi, G1(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor)) & \text{otherwise} \\ C \end{cases}$$

$$G_2 := \begin{pmatrix} 0.2 \\ 0.5 \\ 1 \\ 2 \\ 5 \\ 10 \\ 20 \\ 50 \\ 100 \\ 200 \\ 300 \\ 1000 \end{pmatrix} \quad \ln G_2 := \ln \left(10^{-5} \cdot G_2 \right) \quad \ln G_2 = \blacksquare \quad HL\Psi := \begin{pmatrix} 0.04 \\ 0.09 \\ 0.15 \\ 0.18 \\ 0.25 \\ 0.34 \\ 0.44 \\ 0.65 \\ 0.82 \\ 0.92 \\ 0.96 \\ 1.00 \end{pmatrix}$$

$$L\Psi(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) := \begin{cases} C \leftarrow HL\Psi_1 & \text{if } \ln(G_2(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor)) \leq \ln G_2_1 \\ C \leftarrow HL\Psi_{\text{rows}(HL\Psi)} & \text{if } \ln(G_2(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor)) \geq \ln G_2_{\text{rows}(HL\Psi)} \\ C \leftarrow \text{linterp}(\ln G_2, HL\Psi, \ln(G_2(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor))) & \text{otherwise} \\ C \end{cases}$$

$$H_{L\text{vert}}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) := H_{L\Psi}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) \cdot \Psi(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor)$$

$$H_{L\text{vert}}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) := \begin{cases} H_{L\text{vert}}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) & \text{if } H_{L\text{vert}}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) > \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) \\ \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$Lb(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) := 1.071 - \left[0.2281 \cdot \frac{\left(\frac{v_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor)}{\frac{\text{ft}}{\text{sec}}} \right)^2}{\left(\frac{od - 2 \cdot t}{\text{ft}} \right)} \right]$$

$$Lb(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) := \begin{cases} 0.13 & \text{if } Lb(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) < 0.13 \\ Lb(od, t, Tw, T, p, p2, \rho o, ql, u, cor) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H_{Lvert}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \begin{cases} 1 - 0.5 \cdot \left[1 + \frac{\frac{v_m}{ft}}{0.8} - \sqrt{\left(1 + \frac{\frac{v_m}{ft}}{0.8} \right)^2 - 4 \cdot \frac{\frac{v_{sg}}{ft}}{0.8}} \right] & \text{if } Lb(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) > \frac{v_{sg}}{v_m} \\ H_{Lvert}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) & \text{otherwise} \end{cases}$$

1 3 6

Hold up liquido com escorregamento:

$$H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} H_{Lhor}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) & \text{if } cor = \text{"Beggs \& Brill"} \\ H_{Lvert}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) & \text{if } cor = \text{"Hagdom \& Brown"} \\ \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Propriedade da mistura com deslizamento:

Densidade da mistura com deslizamento:

$$\rho_{slip}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \left[\begin{aligned} &\rho_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \dots \\ &+ \rho_g(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot (1 - H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)) \end{aligned} \right]$$

Viscosidade da mistura com deslizamento e two phase:

$$\begin{aligned} \mu, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) &:= \left[\begin{aligned} &\frac{\mu_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{(\text{Pa} \cdot \text{sec})} \cdot H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \dots \\ &+ \frac{\mu_g(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{(\text{Pa} \cdot \text{sec})} \cdot (1 - H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)) \end{aligned} \right] \cdot \text{Pa} \cdot \text{sec} \\ t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) &:= \begin{cases} \frac{\rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot \rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\rho_{slip}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)} & \text{if } cor = \text{"Hagdom \& Brown"} \\ \left[\begin{aligned} &\rho_o \cdot \frac{\lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)^2}{H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)} \dots \\ &+ \rho_g(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot \frac{(1 - \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor))^2}{1 - H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)} \end{aligned} \right] & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

Capacidade térmica da mistura:

$$cp_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := cp_o \cdot fo(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) + cp_w \left(\frac{T + T2(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{2} \right) \cdot (1 - fo(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor))$$

$$cp_{slip}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := (1 - H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)) \cdot cp_g + cp_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)$$

$$cp_m(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \left(\begin{aligned} &Wo(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot cp_o + Wa(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot cp_w \left(\frac{T + T2(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{2} \right) \dots \\ &+ cp_g \cdot Wg(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \end{aligned} \right)$$

Joule Thompson:

$$\eta(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := \left[\frac{-1}{(\rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot cp_m(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor))} \cdot \left[\begin{aligned} &(1 - \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)) \dots \\ &+ \left(\frac{-Tm(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{K} \cdot \frac{9}{5} - 459.67 \right) \dots \\ &+ \left(\frac{Zz(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)} \right) \dots \end{aligned} \right] \right]$$

$$Aramey(wg, od, t, cp, u) := \frac{wg \cdot cp}{u \cdot \pi \cdot (od - 2 \cdot t)}$$

Condutividade térmica da mistura (sem deslizamento):

$$k_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := k_o \cdot fo(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) + k_w \left(\frac{T + T2(Tw, T, \rho_o, ql, u)}{2} \right) \cdot (1 - fo(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor))$$

1 3 7

$$k_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) := k_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot \left(1 - \lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \right)^{\frac{3}{2}}$$

Numeros adimensionais:

Numero de Reinold :

$$Re(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} \frac{\rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot od \cdot v_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\mu_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)} & \text{if } cor = \text{"Beggs \& Brill"} \\ \frac{\rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot od \cdot v_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\mu_{slip}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)} & \text{if } cor = \text{"Hagdon \& Brown"} \\ \frac{\rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot od \cdot v_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{\mu_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)} & \text{otherwise} \end{cases}$$

Fator de fricção (Correlação de Swanee):

$$f(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \left[\left(\frac{64}{Re(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)} \right)^8 + 9.5 \cdot \left[\ln \left(\frac{\frac{\epsilon}{od}}{3.7} + \frac{5.74}{Re(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)} \right) \right]^2 + \left[- \left(\frac{2500}{Re(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)} \right)^6 \right] \right]^{0.125}$$

lo do coeficiente global de troca de calor (U):

umero de Prandt:

$$Pr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \frac{cp_{slip}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot \mu_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{k_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}$$

ro de Nussel:

$$Nu(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} \frac{f(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot Re(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot Pr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)}{2} & \text{if } Pr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \geq 10 \\ 1.07 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)}{2}} \cdot \left(Pr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)^{\frac{2}{3}} - 1 \right) & \text{if } Pr_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) < 10 \\ 3.657 & \text{if } Re(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) < 2000 \end{cases}$$

Coeficiente de troca de calor convecção:

$$h(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \frac{Nu(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot k_{liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{od - 2 \cdot t}$$

$$U(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \frac{2 \cdot \pi}{\left[\frac{1}{h(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot \frac{(od - 2 \cdot t)}{2}} \right] + \left(\frac{\ln \left(\frac{od}{od - 2 \cdot t} \right)}{k_{aço}} + \frac{\ln \left(\frac{od + 2 \cdot t_{iso}}{od} \right)}{k_{iso}} \right)}$$

$$U(od, t, Tw, T, p, p2, \theta, cor) := U(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_{oleo}(Tw, T, p, p2, U1, cor), q_{Li}(Tw, T, p, p2, \rho_{oleo}(Tw, T, p, p2, U1, cor), U1, cor), \theta, U1, cor)$$

Gradiente de pressão friccional:

$$y(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \frac{\lambda_L(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)}{(H_L(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor))^2}$$

1 3 8

$$s(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} s \leftarrow \ln(2.2 \cdot y(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) - 1.2) & \text{if } 1 < y(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) < 1.2 \\ s \leftarrow \left[\frac{\ln(y(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor))}{-0.0523 + 3.182 \cdot \ln(y(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)) \dots \dots} \right. \\ \left. + - \left(0.8725 \cdot \ln(y(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor))^2 \right) \right. \\ \left. + 0.01853 \cdot \ln(y(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor))^4 \right] & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$f_{tp}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \exp(s(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)) \cdot f(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)$$

$$\Delta P_f(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} \left[\frac{f_{tp} \cdot \rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot v_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)^2}{2(od - 2 \cdot t)} \right] \cdot \Delta L & \text{if cor = "Beggs \& Brill"} \\ \frac{f_{tp} \cdot \rho_{tp}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot (v_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor))^2}{2(od - 2 \cdot t)} \cdot \Delta L & \text{if cor = "Hagdorn \& Brown"} \\ \left[\frac{2f \cdot \rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot v_m(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor)^2}{(od - 2 \cdot t)} \right] \cdot \Delta L & \text{otherwise} \end{cases}$$

Gradiente de pressão Gravitacional

$$\Delta P_{grv}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) := \begin{cases} \rho_{slip}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta L & \text{if cor = "Beggs \& Brill"} \\ \rho_{slip}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta L & \text{if cor = "Hagdorn \& Brown"} \\ (\rho_{ns}(Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, u, cor) \cdot g \cdot \sin(\theta) \cdot \Delta L) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor := \Delta P_{grv}(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor) + \Delta P_f(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor)$$

cia da bomba:

$$od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor := \frac{q_{Liq}(Tw, T, p, p2, \rho_o, u, cor) \cdot \Delta P_{bomba}}{\Omega}$$

ão final:

$$t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor := (p - \Delta P(od, t, Tw, T, p, p2, \rho_o, ql, \theta, u, cor))$$

para cálculo das propriedades do fluido:

Loop Calculo da Pressão:

```

presl := i ← 1
Pi ← P
P2i ← Pi - 0.3MPa
Ti ← T
Li ← 0m
for x ∈ 1 .. n
    while Li < Lbomba
        Pmi ← Pm(Pi, P2i)
        T2i ← T2(Twx, Ti, ρoleo(Twx, Ti, Pi, P2i, U(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, θx, correlx), correlx), qLiq(Twx, Ti, Pi, P2i, ρoleo(Twx, Ti, Pi, P2i, U(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, θx, correlx), correlx), qLiq(Twx, Ti, Pi, P2i, ρoleo(Twx, Ti, Pi, P2i, U(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, θx, correlx), correlx))
        Tmi ← Tm(Twx, Ti, ρoleo(Twx, Ti, Pi, P2i, U(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, θx, correlx), correlx), qLiq(Twx, Ti, Pi, P2i, ρoleo(Twx, Ti, Pi, P2i, U(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, θx, correlx), correlx)))
        P3i ← P3(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, ρoleo(Twx, Ti, Pi, P2i, U(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, θx, correlx), correlx), qLiq(Twx, Ti, Pi, P2i, ρoleo(Twx, Ti, Pi, P2i, U(odx, tx, Twx, Ti, Pi, P2i, θx, correlx), correlx)))
        if (|P2i - P3i| < 0.3MPa)
            i ← i + 1
            Ti ← T2i-1
            Pi ← P3i-1
            P2i ← Pi - 0.3MPa
            Li ← Li-1 + ΔL
        otherwise
            i ← i
            Ti ← Ti
            Pi ← Pi
            P2i ← P3i
            Li ← Li
    endwhile
endfor
Pi

```


qliq2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow L_{\text{bomba}} \\ \text{for } x \in 3 \dots n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow q_{\text{Liq}}(T_{w_x}, \text{temp}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \rho_{\text{oleo}}(T_{w_x}, \text{temp}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, U_{2_i}, \text{correl}_x), U_{2_i}, \text{correl}_x) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$

qliq2₁ := qliq1_{rows(pres1)}

pb

1 4 3

qgas1 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0m \\ \text{for } x \in 1 \dots n \\ \quad \text{while } L_i \leq L_{\text{bomba}} \\ \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow q_{\text{gaslivre}}(T_{w_x}, \text{temp}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, \rho_{\text{oleo}}(T_{w_x}, \text{temp}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, U_{1_i}, \text{correl}_x), q_{\text{liq1}_i}, U_{1_i}, \text{correl}_x) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$

pb

qgas2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow L_{\text{bomba}} \\ \text{for } x \in 3 \dots n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow q_{\text{gaslivre}}(T_{w_x}, \text{temp}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \rho_{\text{oleo}}(T_{w_x}, \text{temp}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, U_{2_i}, \text{correl}_x), q_{\text{liq2}_i}, U_{2_i}, \text{correl}_x) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$

qgas2₁ := qgas1_{rows(pres1)}

pb

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 081.2200/CA

= $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0m \\ \text{for } x \in 1 \dots n \\ \quad \text{while } L_i \leq L_{\text{bomba}} \\ \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow \rho_{\text{oleo}}(T_{w_x}, \text{temp}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, U_{1_i}, \text{correl}_x) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$

pb

doleo2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow L_{\text{bomba}} \\ \text{for } x \in 3 \dots n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow \rho_{\text{oleo}}(T_{w_x}, \text{temp}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, U_{2_i}, \text{correl}_x) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$

doleo2₁ := doleo1_{rows(pres1)}

pb

dgas1 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0m \\ \text{for } x \in 1 \dots n \\ \quad \text{while } L_i \leq L_{\text{bomba}} \\ \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow \rho_g(T_{w_x}, \text{temp}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, \text{pres}_{1_i}, \text{doleo1}_i, q_{\text{liq1}_i}, U_{1_i}, \text{correl}_x) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$

pb

dgas2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow L_{\text{bomba}} \\ \text{for } x \in 3 \dots n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow \rho_g(T_{w_x}, \text{temp}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \text{pres}_{2_i}, \text{doleo2}_i, q_{\text{liq2}_i}, U_{2_i}, \text{correl}_x) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$

dgas2₁ := dgas1_{rows(pres1)}

pb

Pbolha1 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0m \\ \text{for } x \in 1..n \\ \quad \text{while } L_i \leq Lbomba \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow Pb(T_{w_x}, temp1_i, doleo1_i, qliq1_i, U1_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb

RS1 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0m \\ \text{for } x \in 1..n \\ \quad \text{while } L_i \leq Lbomba \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow R_s(T_{w_x}, temp1_i, pres1_i, pres1_i, doleo1_i, qliq1_i, U1_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 0812200/CA

$\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0m \\ \text{for } x \in 1..n \\ \quad \text{while } L_i \leq Lbomba \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow Bo(T_{w_x}, temp1_i, pres1_i, pres1_i, doleo1_i, qliq1_i, U1_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb

BW1 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0m \\ \text{for } x \in 1..n \\ \quad \text{while } L_i \leq Lbomba \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow Bw(T_{w_x}, temp1_i, pres1_i, pres1_i, doleo1_i, qliq1_i, U1_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb

Pbolha2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow Lbomba \\ \text{for } x \in 3..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow Pb(T_{w_x}, temp2_i, doleo2_i, qliq2_i, U2_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb
Pbolha2₁ := Pbolha1_{rows(pres1)}

RS2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow Lbomba \\ \text{for } x \in 3..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow R_s(T_{w_x}, temp2_i, pres2_i, pres2_i, doleo2_i, qliq2_i, U2_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb
RS2₁ := RS1_{rows(pres1)}

BO2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow Lbomba \\ \text{for } x \in 3..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow Bo(T_{w_x}, temp2_i, pres2_i, pres2_i, doleo2_i, qliq2_i, U2_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb
BO2₁ := BO1_{rows(pres1)}

BW2 := $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow Lbomba \\ \text{for } x \in 3..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \quad \left| \begin{array}{l} pb_i \leftarrow Bw(T_{w_x}, temp2_i, pres2_i, pres2_i, doleo2_i, qliq2_i, U2_i) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right. \end{array} \right|$
pb
BW2₁ := BW1_{rows(pres1)}

1 4 4

```

BG1 :=
| i ← 1
| Li ← 0m
| for x ∈ 1 .. n
|   while Li ≤ Lbomba
|     | pbi ← Bg(Twx, temp1i, pres1i, pres1i, doleo1i, qliq1i, U1i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

BG2 :=
| i ← 1
| Li ← Lbomba
| for x ∈ 3 .. n
|   while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
|     | pbi ← Bg(Twx, temp2i, pres2i, pres2i, doleo2i, qliq2i, U2i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

BG2₁ := BG1_{rows(pres1)}

```

RE1 :=
| i ← 1
| Li ← 0m
| for x ∈ 1 .. n
|   while Li ≤ Lbomba
|     | pbi ← Re(odx, tx, Twx, temp1i, pres1i, pres1i, doleo1i, qliq1i, θx, U1i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

RE2 :=
| i ← 1
| Li ← Lbomba
| for x ∈ 3 .. n
|   while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
|     | pbi ← Re(odx, tx, Twx, temp2i, pres2i, pres2i, doleo2i, qliq2i, θx, U2i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

RE2₁ := RE1_{rows(pres1)}

```

PR1 :=
| i ← 1
| Li ← 0m
| for x ∈ 1 .. n
|   while Li ≤ Lbomba
|     | pbi ← Prm(odx, tx, Twx, temp1i, pres1i, pres1i, doleo1i, qliq1i,
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

PR2 :=
| i ← 1
| Li ← Lbomba
| for x ∈ 3 .. n
|   while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
|     | pbi ← Prm(odx, tx, Twx, temp2i, pres2i, pres2i, doleo2i, qliq2i, θx, U2i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

PR2₁ := PR1_{rows(pres1)}

$\text{NU1} := \left \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0\text{m} \\ \text{for } x \in 1..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \text{Lbomba} \\ \quad \left \begin{array}{l} \text{pb}_i \leftarrow \text{Nu}\left(\text{od}_x, \text{t}_x, \text{T}_{\text{w}_x}, \text{temp1}_i, \text{pres1}_i, \text{pres1}_i, \text{doleo1}_i, \text{qliq1}_i, \theta_x, \right. \right. \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right \\ \text{pb} \end{array} \right $	$\text{NU2} := \left \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow \text{Lbomba} \\ \text{for } x \in 3..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \left \begin{array}{l} \text{pb}_i \leftarrow \text{Nu}\left(\text{od}_x, \text{t}_x, \text{T}_{\text{w}_x}, \text{temp2}_i, \text{pres2}_i, \text{pres2}_i, \text{doleo2}_i, \text{qliq2}_i, \theta_x, \text{U2}_i, \text{correl}_x\right) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right \end{array} \right $	1 4 6
	$\text{NU2}_1 := \text{NU1}_{\text{rows}(\text{pres1})}$	

$\text{fatr1} := \left \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0\text{m} \\ \text{for } x \in 1..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \text{Lbomba} \\ \quad \left \begin{array}{l} \text{pb}_i \leftarrow f\left(\text{od}_x, \text{t}_x, \text{T}_{\text{w}_x}, \text{temp1}_i, \text{pres1}_i, \text{pres1}_i, \text{doleo1}_i, \text{qliq1}_i, \theta_x, \text{U1}_i, \text{correl}_x\right) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right \\ \text{pb} \end{array} \right $	$\text{fatr2} := \left \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow \text{Lbomba} \\ \text{for } x \in 3..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \left \begin{array}{l} \text{pb}_i \leftarrow f\left(\text{od}_x, \text{t}_x, \text{T}_{\text{w}_x}, \text{temp2}_i, \text{pres2}_i, \text{pres2}_i, \text{doleo2}_i, \text{qliq2}_i, \theta_x, \text{U2}_i, \text{correl}_x\right) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right \end{array} \right $	
	$\text{fatr2}_1 := \text{fatr1}_{\text{rows}(\text{pres1})}$	

$:= \left \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow 0\text{m} \\ \text{for } x \in 1..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \text{Lbomba} \\ \quad \left \begin{array}{l} \text{pb}_i \leftarrow \text{H}_L\left(\text{od}_x, \text{t}_x, \text{T}_{\text{w}_x}, \text{temp1}_i, \text{pres1}_i, \text{pres1}_i, \text{doleo1}_i, \text{qliq1}_i, \theta_x, \text{U1}_i, \text{correl}_x\right) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right \\ \text{pb} \end{array} \right $	
$\text{p2} := \left \begin{array}{l} i \leftarrow 1 \\ L_i \leftarrow \text{Lbomba} \\ \text{for } x \in 3..n \\ \quad \text{while } L_i \leq \sum_{y=1}^x L_{v_y} \\ \quad \left \begin{array}{l} \text{pb}_i \leftarrow \text{H}_L\left(\text{od}_x, \text{t}_x, \text{T}_{\text{w}_x}, \text{temp2}_i, \text{pres2}_i, \text{pres2}_i, \text{doleo2}_i, \text{qliq2}_i, \theta_x, \text{U2}_i, \text{correl}_x\right) \\ i \leftarrow i + 1 \\ L_i \leftarrow L_{i-1} + \Delta L \end{array} \right \end{array} \right $	$\text{H}_{\text{Lslip2}_1} := \text{H}_{\text{Lslip1}}_{\text{rows}(\text{pres1})}$

```

flow1 :=
| i ← 1
| Li ← 0m
| for x ∈ 1 .. n
|   while Li ≤ Lbomba
|     | pbi ← flow(odx, tx, Twx, temp1i, pres1i, pres1i, doleo1i, qliq1i, U
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

flow2 :=
| i ← 1
| Li ← Lbomba
| for x ∈ 3 .. n
|   while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
|     | pbi ← flow(odx, tx, Twx, temp2i, pres2i, pres2i, doleo2i, qliq2i, U2i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

1 4 7

```

cp1 :=
| i ← 1
| Li ← 0m
| for x ∈ 1 .. n
|   while Li ≤ Lbomba
|     | pbi ← cpslip(odx, tx, Twx, temp1i, pres1i, pres1i, doleo1i, qliq1
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

cp2 :=
| i ← 1
| Li ← Lbomba
| for x ∈ 3 .. n
|   while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
|     | pbi ← cpslip(odx, tx, Twx, temp2i, pres2i, pres2i, doleo2i, qliq2i, θx, U2i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

| i ← 1
| Li ← 0m
| for x ∈ 1 .. n
|   while Li ≤ Lbomba
|     | pbi ← μliq(Twx, temp1i, pres1i, pres1i, doleo1i, qliq1i, U1i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

ul2 :=
| i ← 1
| Li ← Lbomba
| for x ∈ 3 .. n
|   while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
|     | pbi ← μliq(Twx, temp2i, pres2i, pres2i, doleo2i, qliq2i, U2i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

k1 :=
| i ← 1
| Li ← 0m
| for x ∈ 1 .. n
|   while Li ≤ Lbomba
|     | pbi ← kliq(Twx, temp1i, pres1i, pres1i, doleo1i, qliq1i, U1i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

```

k2 :=
| i ← 1
| Li ← Lbomba
| for x ∈ 3 .. n
|   while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
|     | pbi ← kliq(Twx, temp2i, pres2i, pres2i, doleo2i, qliq2i, U2i, correlx)
|     | i ← i + 1
|     | Li ← Li-1 + ΔL
| pb

```

pot1 :=

```
i ← 1
Li ← 0m
for x ∈ 1 .. n
  while Li ≤ Lbomba
    pbi ← Pot(odx, tx, Twx, temp1i, pres1i, pres1i, ρoleo(Twx, temp1i, pres1i, pres1i, U1i, correlx), qliq1i, θx, U1i, correlx)
    i ← i + 1
    Li ← Li-1 + ΔL
pb
```

1 4 8

pot2 :=

```
i ← 1
Li ← Lbomba
for x ∈ 3 .. n
  while Li ≤  $\sum_{y=1}^x L_{v_y}$ 
    pbi ← Pot(odx, tx, Twx, temp2i, pres2i, pres2i, ρoleo(Twx, temp2i, pres2i, pres2i, U2i, correlx), qliq2i, θx, U2i, correlx)
    i ← i + 1
    Li ← Li-1 + ΔL
pb
```

pot2₁ := pot1_{rows(pres1)}

