

2 Revisão Bibliográfica

Segundo Rossen (1999), a formação de emulsão em meio poroso está baseado na ocorrência de repetidas quebras de gotas de um fluido durante o seu escoamento. Rossen (1999) afirma que repetidas quebra de gotas ocorrem em escoamentos gasosos contidos em capilares. O autor acredita que o mecanismo de formação de emulsão é diferente quando se compara o escoamento gasoso em meio poroso com capilares de laboratório (poros de volume finito). De acordo com Rossen (1999), o conceito de repetidas quebras de gotas, como atualmente é aplicado em experimentos, não explica a formação de emulsão durante escoamentos em regime permanente em meios porosos.

Rossen (1999) acredita que as quebras de gotas de escoamentos bifásicos em meios porosos ocorrem quando um fluido, como a água, acumula-se por ação da capilaridade em uma garganta de um capilar, espaço já ocupado por um fluido em estado gasoso, como o ar. Então, o ar é forçado, e escoo através da garganta formando um bulbo, ainda preso ao volume de ar restante na garganta. Quando há o rompimento do bulbo, forma-se uma bolha que se aloja em um poro. Por haver escoamento, essa bolha será forçada a passar pela segunda garganta do capilar, se rompendo novamente e formando duas bolhas, que se alojam no poro seguinte. A Figura 2.1, extraída de outro trabalho de Rossen (2009) ilustra a sequência de formação de uma terceira bolha, esta ainda na etapa de formação do bulbo.

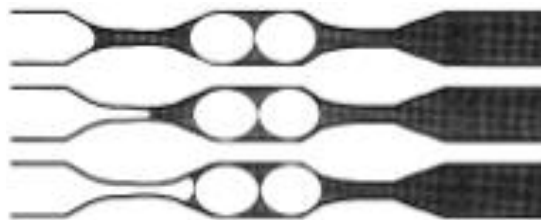


Figura 2.1: Sequência de formação de bolha em um escoamento bifásico em meio poroso. Rossen (2009).

Rossen (2009) cita Roof (1970), que por sua vez considerou duas possibilidades para explicar a quebra de gotas em capilares com garganta modelados por formas poligonais quadradas. A primeira possibilidade ocorre, se o raio do capilar for cerca de duas vezes maior que o raio da garganta. Então o gás forma uma bolha, que ao passar através da garganta ocupa a cavidade com uma forma quadrada arredondada. Isto acontece devido o efeito capilar do líquido que ocupa as paredes do poro evitando a penetração do gás nas quinas. Esse efeito ocorre, pois a pressão do gás (fase dispersa) se mantém equivalente a pressão capilar na garganta. Ao mesmo tempo ocorre escoamento, pois a pressão do líquido (fase contínua) na cavidade a jusante da garganta é inferior a pressão da cavidade a montante. Quando o gás ocupa praticamente toda a cavidade a jusante da garganta, o líquido que se encontra nas paredes do capilar, devido os efeitos da tensão superficial, escoam em fluxo reverso, pois sua pressão é inferior à pressão do gás. Assim, o fluido de fase contínua avança sobre o fluido de fase dispersa na garganta, estrangulando-o e formando uma gota.

Na segunda possibilidade, Roof (1970) cita que a quebra de gota ocorre de maneira repetida, fazendo com que a cavidade a jusante da garganta seja preenchida por várias gotas, e não uma única, como foi o caso da primeira possibilidade. Roof (1970) defende, e Rossen (2009) confirma que esse segundo efeito ocorre quando a pressão do gás é maior que a pressão capilar na garganta, não permitindo que o bulbo de fluido da fase dispersa se prolongue muito. Como as gotas que se formam são pequenas em relação à cavidade a jusante da garganta, a pressão nesta região continua menor do que a pressão na garganta, permitindo o fluxo, e conseqüentemente o efeito se repete. Desconsiderando que haja escoamento forçado, o efeito só cessa quando a cavidade seguinte estiver totalmente preenchida com inúmeras bolhas formadas por sucessivas quebras de gotas. A Figura 2.2 extraída do trabalho de Rossen (1999) ilustra as duas possibilidades apresentadas por Roof (1970).

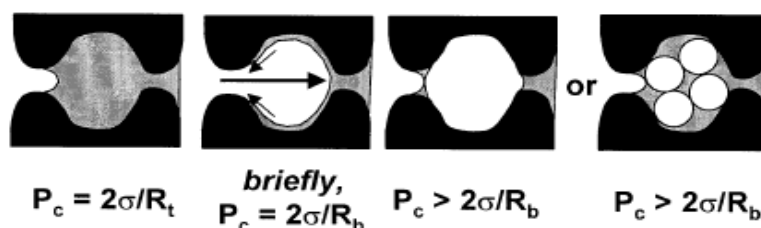


Figura 2.2: Possibilidades de formação de bolhas em uma cavidade, ou poro.
Rossen (1999).

Rossen (2009) adiciona informações importantes à teoria da formação de quebra de gotas em capilares com garganta para experimentos com interfaces gás-líquido. Na Figura 2.3 há nove sequências de imagens, que de cima para baixo ilustram a quebra de gota acontecendo como consequência da variação da pressão capilar. No primeiro instante, a pressão capilar na garganta é inferior a razão de duas vezes a tensão interfacial dos fluidos pelo raio da garganta. No segundo momento, a pressão capilar é menor que a pressão do fluido, assim o gás, representado pela cor branca, escoou para o interior da garganta. No terceiro instante, a pressão capilar é igual à razão de duas vezes a tensão interfacial pelo raio do bulbo. Finalmente, na quarta imagem, há acúmulo de líquido na garganta devido a formação da bolha. Esse rompimento foi causado pelo escoamento do filme de fluido da fase contínua, representado pela cor preta, em direção a garganta, estrangulando o filme de gás, que finalmente se rompe e forma uma bolha. Após a formação da bolha as pressões retornam a condição inicial, e o processo se repete gerando uma segunda bolha.

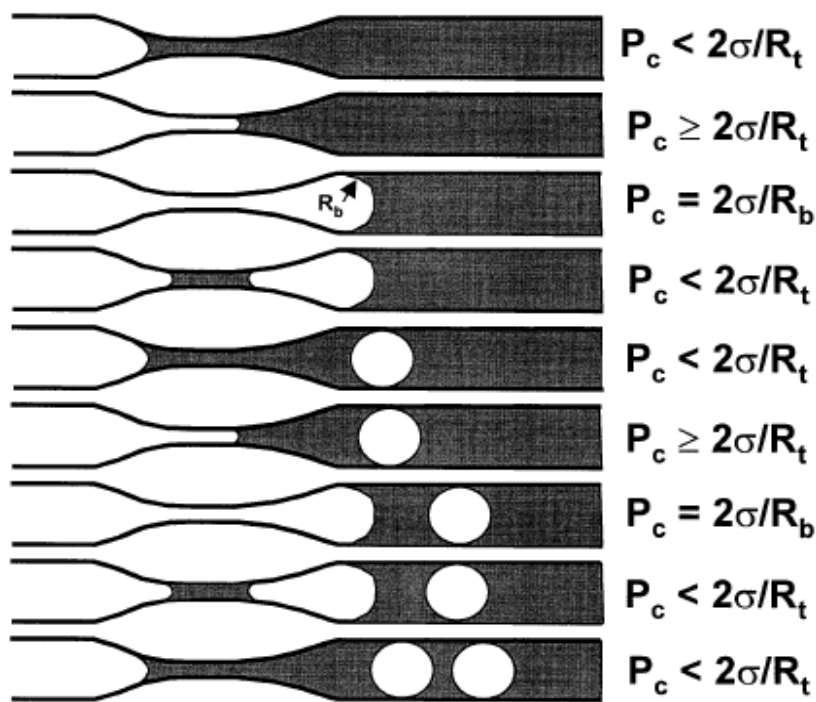


Figura 2.3: Processo de quebra de gota pela variação de pressão capilar. Rossen (2009).

Supondo que em um capilar só há espaço para duas bolhas, quando um bulbo é formado, este pressiona a segunda bolha contra a primeira, conforme ilustrado na Figura 2.4, formando uma lamela de fluido na interface. O fluido da

lamela, pressionado por haver um escoamento forçado, escoar em direção a parede do capilar pela lateral das bolhas (direção radial), e em direção a garganta (direção longitudinal). Este pequeno volume de fluido que estava contido na lamela é o fluido que se acumula na garganta, responsável pelo estrangulamento do filme de gás, que por fim se rompe formando uma terceira bolha.

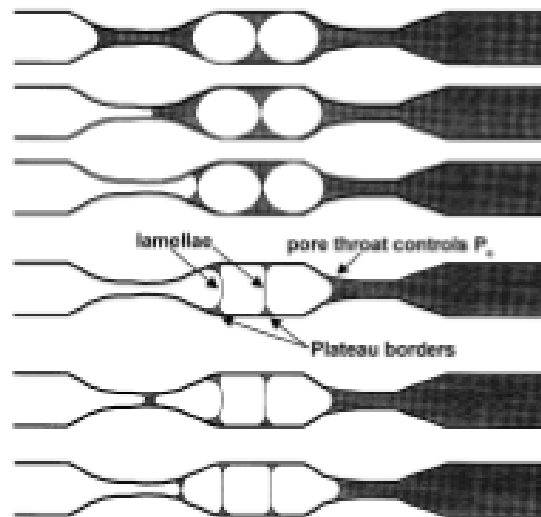


Figura 2.4: Processo de formação da lamela, e seu escoamento para a garganta. Roosen (2009).

Conforme explica Roosen (2009), no caso de não haver escoamento forçado, quando há a ocupação quase que total da segunda cavidade do capilar por bolhas, o processo é cessado. Esse efeito ocorre, pois neste caso a pressão capilar não é suficiente para fazer escoar o fluido contido nas lamelas para a garganta.

O processo de quebra de gotas citado acima, somente ocorre em modelos e experimentos que utilizam uma rede de capilares, pois a diferença de pressão capilar é ditada pela curvatura da lamela. Porém para o caso de modelos como o deste trabalho, que utilizam apenas uma constricção, Roosen (2009) cita que para haver quebra de gota em gargantas com seções estreitas e cilíndricas, a razão entre a pressão capilar da garganta pela pressão capilar da entrada é cerca de dois. O autor ainda extrapola que para seções cilíndricas com estrangulamento suave a razão também é próxima de dois. Se o raio da gota for cerca de duas vezes maior que o raio da garganta, então a pressão capilar da garganta deverá

ser alta o suficiente a ponto de permitir a quebra de gota, mesmo se o capilar estiver sob alta pressão.

Rossen (2009) indica gráficos adimensionais que comparam o raio da gota com o raio da garganta, bem como a razão das pressões dos fluidos. Como será visto no Capítulo 4, tais gráficos são úteis para avaliação do comportamento da interface entre os fluidos, e na determinação de quebra de gota. Por fim, o autor indica medições feitas em laboratório, que envolvem valores da pressão de quebra de gota em capilares estreitos e com gargantas cilíndricas.

A partir de trabalho experimentais Gauglitz, et. al (1988) concluem que a formação de gotas em escoamentos gasosos em capilares cilíndricos com restrições dependem da geometria do capilar e do tempo de quebra gota. Ou seja, os autores quantificam a formação pelo mecanismo de quebra de gotas para escoamentos gasosos em meios porosos, e correlacionam o tempo de quebra com o tamanho da gota formada.

Já Kavscek e Radke (2007) calculam a frequência da quebra de gotas em capilares a jusante da garganta, por um corpo largo e comprido. Kavscek e Radke (2007) assumem como capilar, um tubo suavemente estrangulado em forma de garganta cilíndrica. Em formas quadradas as quinas são preenchidas pelo líquido, efeito já explicado anteriormente. As quinas, rachaduras e rugosidades umedecidas possuem dois papéis fundamentais na quebra de gotas. Primeiramente porque escoamentos através desses canais são mais velozes do que escoamentos em capilares com estrangulamentos mais amenos, reduzindo significativamente o tempo da quebra de gota, se esta ocorrer. Além disso, o líquido presente nas quinas, rachaduras e rugosidades em quantidade significativa (em escala capilar), combinada com uma pressão capilar baixa pode escoar para a garganta. Esse efeito quebra o escoamento do fluido de fase dispersa, influenciando a formação de uma gota, a semelhança do caso das lamelas entre as bolhas citado anteriormente.

Vale ressaltar que Rossen (1999) e (2009), bem como Gauglitz, Laurent e Radke (1988) mencionam em suas análises exemplos de quebra de gotas baseadas em interfaces gás – líquido. Contudo sabe-se que quebra de gotas ocorrem também em interfaces líquido – líquido.

Roof (1970) explica que quando água atravessa um capilar com óleo, as forças interfaciais são tais, que uma pequena porção de óleo deve separa-se em gotículas, causadas pelas quebras de gotas. Segundo a teoria citada por Roof (1970), para cada geometria de capilar com garganta existe um tamanho mínimo para a saliência de óleo que permite a quebra de gotas.

Roof (1970) ainda cita que, como resultados de seus experimentos, se o ângulo de contato entre o óleo e o capilar for zero, e a constrição tiver o formato de uma garganta cilíndrica, então o óleo deve avançar no mínimo sete vezes antes que ocorra a quebra da gota.

Em outras observações, Roof (1970) cita que para capilares com interface água – óleo, mesmo sob condições favoráveis para formação de gota, esta não se forma imediatamente após a passagem da interface óleo – água pela garganta do capilar. A gota somente ocorre após o prolongamento do bulbo, suficientemente longe da garganta, de modo que a pressão capilar decresça a um valor inferior a pressão na garganta. Ou seja, ocorre o escoamento do fluido da fase contínua em sentido contrário ao escoamento forçado, estrangulando o fluido da fase dispersa na região da garganta, formando uma gota.

Novamente, em todos os casos considerados por Roof (1970), a interface óleo – água, ou bulbo de óleo deverá se afastar da constrição a uma distância considerável de cerca de várias vezes o raio da garganta do capilar, antes que ocorra a quebra da gota.

Importante ressaltar que Roof (1970) não utiliza água pura em seus experimentos, mas sim uma mistura de água com álcool. A mistura é ajustada para proporcionar a “água” à mesma densidade que o óleo mineral, de forma a eliminar os efeitos gravitacionais. Quando se trabalha com diâmetros inferiores a dois milímetros tais efeitos trazidos a uma escala capilar podem ser prejudiciais na obtenção dos resultados. Com este ajuste, os resultados segundo Roof (1970) apresentaram-se satisfatórios, confirmando a teoria por ele citada.

Jost (2007) em seu trabalho desenvolveu um modelo de um capilar com garganta. O modelo é simplificado, e considera apenas o escoamento da fase contínua. A Figura 2.5 ilustra tal condição inicial.

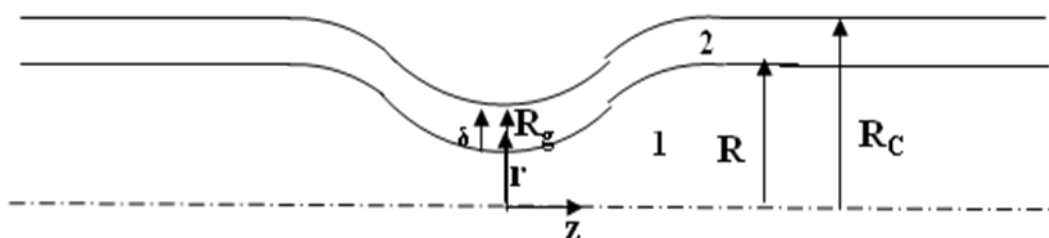


Figura 2.5: Capilar utilizado por Jost (2007) e Pena (2007), e aplicado neste trabalho. Pena (2007).

No modelo de Jost (2007), a fase continua escoava das laterais para o centro da garganta, acumulando-se nesta região. O acúmulo desta fase que se forma causa o estrangulamento da fase dispersa, que está na garganta. A formação da gota é determinada quando o acúmulo da fase contínua na garganta é tal que, forma um raio equivalente a metade do raio da garganta.

O trabalho de Jost (2007) serviu de base para este, e seus resultados foram os que mais se adequaram na literatura para uma comparação. Visto que todos os trabalhos pesquisados na área numérica, e citados aqui no campo experimental diferem ou no tipo de interface (considerando gás – líquido), ou na geometria do capilar com garganta, ou até mesmo no mecanismo de formação de emulsão.

Pena (2007), também utiliza o modelo exemplificado da Figura 2.5, mas seu trabalho está voltado para o campo experimental. Pena (2007) determina o efeito do escoamento em capilares de diversas concentrações de óleo em emulsões de óleo em água, ou de água em óleo. Pena (2007), também cita a formação de emulsão em elementos na tubulação, como junções tipo “T”, ou curvas, com ilustrado na Figura 2.6.

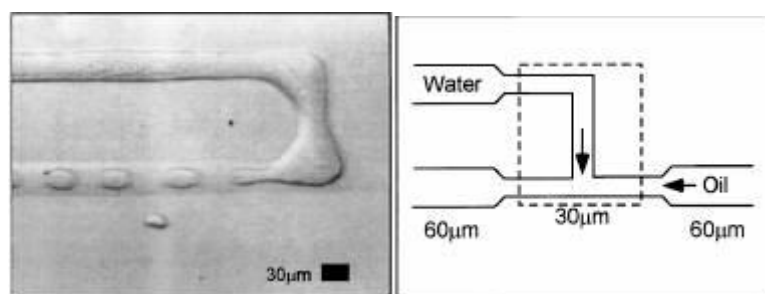


Figura 2.6: Quebra de gotas em elemento de tubulação, como junções tipo "T".
Pena (2007).

De mesmo modo que Rossen (1999) e (2009), Roof (1970), Gauglitz, Laurent e Radke (1988) e Kovscek e Radke (2007), Pena (2007) também simula a formação de gota em capilares com garganta por um escoamento de uma gota já formada. Ao passar através de uma garganta, uma gota de óleo que escoava em um capilar rompe, pelos efeitos já explicados anteriormente, formando gotas menores.

Pena (2007) utilizou diversas geometrias de gargantas, razão de viscosidade entre as fases e traçou curvas para óleo – água onde há ou não a quebra de gota. Pena (2007) explica que através da razão de viscosidade entre

os fluidos de fase dispersa e contínua é possível determinar se haverá ou não quebra de gota para um determinado capilar e sua garganta.

Por exemplo, para razões de viscosidade alta não há quebra de gota, pois a resistência ao escoamento é grande, e o gradiente de pressão capilar não é suficiente para romper o fluido, e formar uma gota. De maneira inversa, há sempre quebra de gota para razões de viscosidades baixas, pois a resistência ao escoamento é muito baixa. A literatura confirma, pois no caso de formação de emulsões as razões de viscosidades são geralmente baixas. Na Figura 2.7, Pena (2007) determina graficamente quando há ou não quebra de gota, em função de dois parâmetros: k (razão das viscosidades entre os fluidos) e Ca (capilaridade).

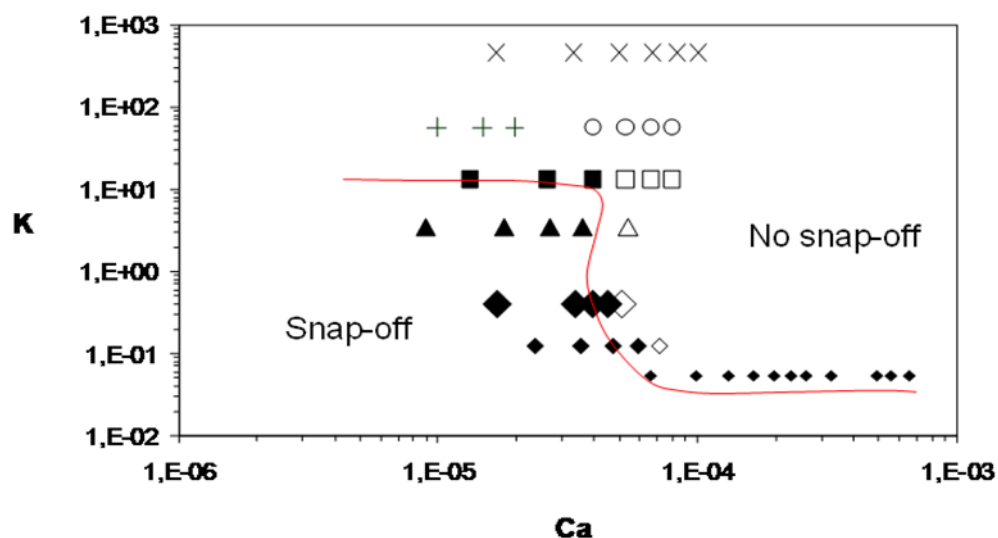


Figura 2.7: Curva limite para a formação de gota em função da razão de viscosidade, k e da capilaridade, Ca . Pena (2007).

Kistler e Schwerzer (1997), apresentam equacionamentos para teoria de lubrificação. O capítulo seguinte dessa dissertação é fundamentado por esta teoria.

Para este trabalho desenvolveu-se um modelo numérico de um capilar, baseado na parametrização apresentada na Figura 1.6, e repetida na Figura 2.8.

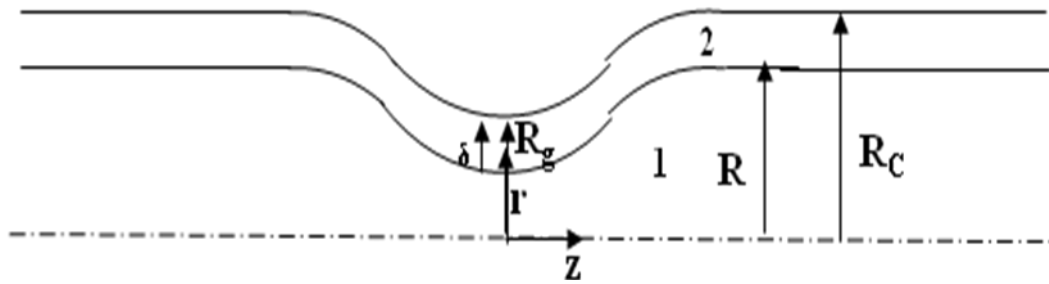


Figura 2.8: Parametrização utilizada no modelo deste trabalho. Pena (2007).

O modelo acrescenta resultados à literatura de escoamento em um capilar com garganta, onde são consideradas na modelagem as características dos dois fluidos. Também se considera que a condição inicial dos fluidos não é a de emulsão, como em um reservatório de petróleo. Somente após o início do escoamento é que há quebra de gota e conseqüentemente a formação de emulsão. Desta forma, pode-se analisar todo o processo de quebra de gota, a influência da geometria do capilar, as propriedades dos fluidos e determinar com maiores detalhes o tempo de formação de gota.