

CURSO DE ATOMIZAÇÃO E SPRAYS

ESCOLA DE COMBUSTÃO
FLORIANÓPOLIS
JUNHO/2007

roteiro

- Atomização de jato cilíndrico líquido
- Regimes de atomização
- Atomização de filmes líquidos
- Regimes de atomização
- Funções distribuição de tamanhos de gotas
- FD analíticas, FD matemáticas, FD empíricas
- Evaporação e queima de gotas
- Regimes estacionário e transiente.

ATOMIZAR, PARA QUE?

- A ATOMIZAÇÃO É UM PROCESSO MUITO EFICIENTE PARA PROMOVER O AUMENTO DA ÁREA DE CONTATO ENTRE O ELEMENTO A SER ATOMIZADO E SUAS VIZINHANÇAS.

EXEMPLO

- Se tomarmos um cm^3 de combustível em um recipiente que exponha sua superfície superior para a queima com 1 cm^2 e o transformarmos em um spray com gotas de diâmetro médio $10\mu\text{m}$ a área superficial disponível para queima passará de 1 cm^2 para:

exemplo

$$1\text{cm}^3 = n(\text{gotas}) \cdot \frac{4}{3} \pi r^3 \rightarrow n = \frac{1}{4/3\pi(0,0005)^3} = 1,89 \cdot 10^{10}$$

Área superficial das gotas

$$S = n \cdot (4\pi)r^2 = 1,89 \cdot 10^{10} \cdot 4 \cdot \pi (0,0005)^2 = 59535\text{cm}^2 \cong 6\text{m}^2$$

- A área das gotas aumentou 60.000 vezes
- Ou seja, a atomização é um processo muito eficiente para promover o aumento da superfície para queima ou outro processo que se deseje acelerar

PRINCIPAIS MODOS DE ATOMIZAÇÃO DE UM LÍQUIDO

- Na prática a maioria absoluta dos modos de atomização caem em dois tipos:
- 1 – atomização de uma coluna cilíndrica líquida
- 2 – atomização de um filme líquido
- Existem numerosos tipos de dispositivos (atomizadores) para a realização da atomização.

ATOMIZADORES

- Sprays podem ser produzidos de vários modos. Essencialmente o que se precisa é de uma alta velocidade relativa entre o líquido a ser atomizado e o ar ou gás circundante. Alguns atomizadores fazem isso descarregando o líquido a alta velocidade em uma corrente de ar ou gás movendo-se lentamente.
- Um modo alternativo é expor uma folha ou jato de líquido em baixa velocidade a uma corrente de ar em alta velocidade.

QUEBRA DE JATO LÍQUIDO CILÍNDRICO DE BAIXA VELOCIDADE

- CASO DE DEFORMAÇÕES SIMÉTRICAS
- CASO DE DEFORMAÇÕES ARBITRÁRIAS
- ÍDEM PARA JATOS DE ALTAS VELOCIDADES (ATOMIZAÇÃO)

PARÂMETROS IMPORTANTES

- COMPRIMENTO INTACTO DO JATO
- TAMANHO DAS GOTAS FORMADAS
- TEMPO DE RUPTURA DO JATO
- INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE
- INFLUÊNCIA DA TENSÃO SUPERFICIAL

Soluções tipo ondulatória

- Chega-se a uma função ψ que precisa satisfazer às seguintes equações:

$$\Delta\varphi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0$$

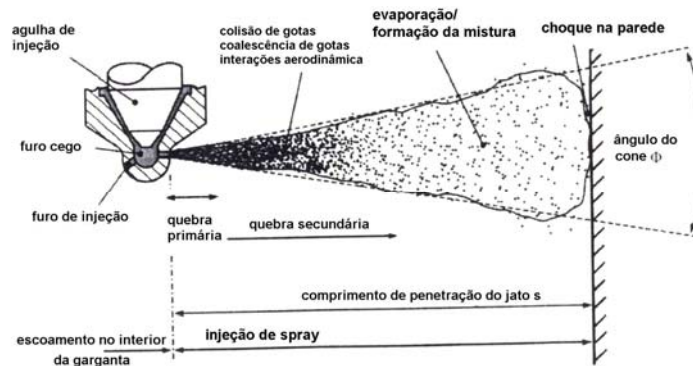
$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} = \frac{1}{\nu} \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

Estamos interessados em movimentos ondulatórios no líquido. Assim procuramos soluções do tipo:

$$\varphi = \Phi(r) e^{ikz + \alpha t}$$

$$\psi = \Psi(r) e^{ikz + \alpha t}$$

RUPTURA SECUNDÁRIA



Estabilidade

- Quando $\rho^g (u^g)^2 > \sigma k$, o valor de α é
- positivo e as ondas são instáveis. Fica claro, porém, que ondas com um baixo valor de k , i.é., ondas longas, são estáveis. Assim, conclui-se que para líquidos altamente viscosos a região de instabilidade é deslocada na direção das ondas longas.

INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE

- Pode ser visto que quando; $\frac{\mu^g}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho^g}{\rho}} \approx 1$, e a viscosidade aumenta, que ambos os termos do denominador se aproximam um do outro e o período de atomização tende ao infinito.
- Este acréscimo no período de atomização está relacionado à energia dissipada no líquido. O aumento ilimitado do período de atomização indica que a atomização não ocorre em líquidos altamente viscosos e a ruptura do jato resulta na formação de gotas relativamente grandes.
- Desse modo o fenômeno da atomização é uma característica da ruptura de jatos de líquidos de baixa viscosidade.

Fluidos muito viscosos

- Dessa forma para fluidos altamente viscosos a fragmentação do jato resulta somente na formação de gotas grandes. O tamanho das gotas não é uma função da viscosidade. O tamanho intacto do jato aumenta com a viscosidade de acordo com a equação.

$$L = \frac{\mu}{\rho^g (u^g)}$$

TAMANHO DA GOTA FORMADA FLUIDOS MUITO VISCOSOS

$$\lambda_{\max} = 6a$$

- Após a quebra, o cilindro de comprimento $6d$ torna-se uma gota esférica, tal que:
- $6d\pi d^2/4 = \pi D^3/6$ e então $D = 2,08d$

RUPTURA DE RAYLEIGH

- Rayleigh mostrou que a taxa de crescimento exponencial da perturbação que cresce mais rapidamente é dada por:

$$q_{\max} = 0,97 \left(\frac{\sigma}{\rho d^3} \right)^{0,5}$$

- E λ ótimo correspondente a q máximo é:

$$\lambda_{\text{otimo}} = 4,51d$$

Diâmetro da gota formada teoria de Rayleigh

- Após a quebra, o cilindro de comprimento $4,51d$ torna-se uma gota esférica, tal que:
- $4,51d\pi d^2/4 = \pi D^3/6$ e então $D = 1,89d$
- Assim, de acordo com o mecanismo de Rayleigh para a ruptura do jato o tamanho da gota média gerada é cerca de duas vezes o diâmetro do jato não perturbado.

REGIMES DE RUPTURA REGIME 1

- Haenlein (7) identificou quatro regimes distintos de ruptura na desintegração de um jato de líquido:
- 1 – Formação de gotas sem influência do gás circunvizinho. Este mecanismo foi estudado por Lord Rayleigh. O termo “varicose” é às vezes usado para o aparecimento deste regime no jato. Ondas radialmente simétricas como ilustrado na figura abaixo, são formadas pela interação de perturbações primárias no líquido com as forças de tensão superficial. Este regime é caracterizado por uma relação linear entre o comprimento intacto do jato antes da quebra e a velocidade do jato. Weber calculou o tempo para a quebra como sendo proporcional a \sqrt{D} para jatos de líquidos sem viscosidade e a d_0 para jatos viscosos.

REGIME 2

- 2 – Formação de gotas com influência do gás circunvizinho. À medida que a velocidade do jato é aumentada as forças aerodinâmicas do gás circunjacente não são desprezíveis e tendem a acentuar as ondas formadas sob o regime 1.

REGIME 3

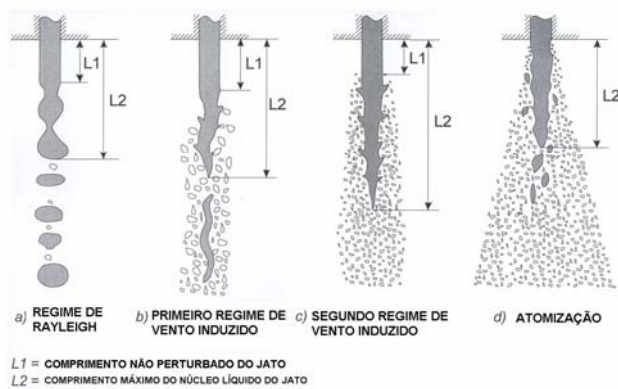
- 3 - Formação devido a perturbações ondulatórias no jato. Este regime é associado com o aumento da efetividade das forças aerodinâmicas e a diminuição da influência das forças de tensão superficial. O termo “sinuoso” tem sido empregado na descrição do jato neste regime.

REGIME 4

- 4 - Desintegração completa do jato, i.é., atomização. O líquido sofre uma ruptura totalmente caótica e de maneira irregular.

ILUSTRAÇÃO REGIMES DE RUPTURA

Ilustração esquemática da ruptura de jatos e respectivos regimes de ruptura



ESQUEMATIZAÇÃO DOS QUATRO REGIMES

- ESQUEMA

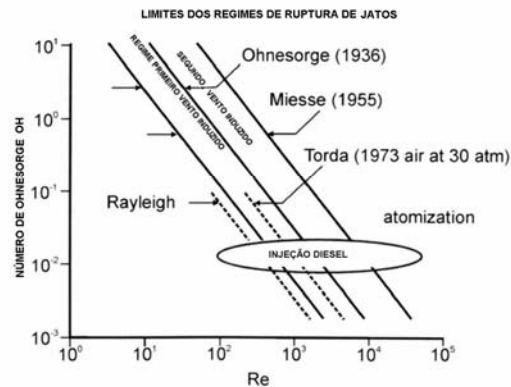


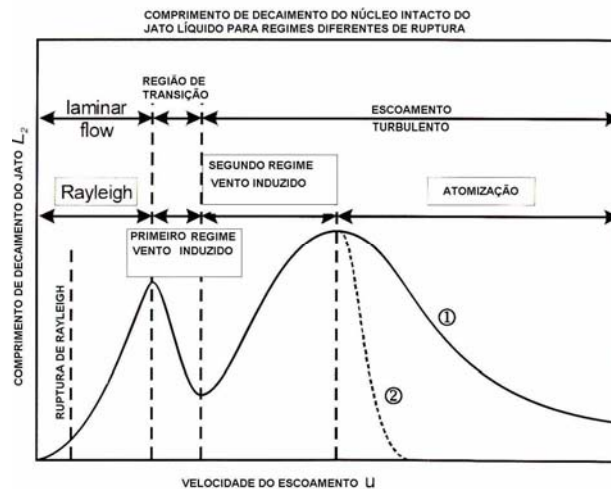
TABELA DE TRANSIÇÃO DE REGIMES

- TABELA

Regime	Descrição	Mecanismo de formação predominante	de	Critério de transição de regimes
1	Rayleigh	Tensão superficial		$> 0,4$
2	primeiro vento induzido	Tensão superficial e pressão dinâmica do gás ambiente		$> 1,2 + 3,4Oh^{0,9}$
3	segundo vento induzido	pressão dinâmica do gás ambiente com tensão superficial opondo-se inicialmente		$> 40,3$
4	Atomização	desconhecido		-

COMPRIMENTO INTACTO DO JATO

- GRÁFICO



Números adimensionais importantes na formação de sprays.

- **Número de Ohnesorge**
- É um número adimensional que relaciona as forças viscosas com a força de tensão superficial é definido como:

$$Z = \frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma D}}$$

Número de Weber

- É muito utilizado na análise de escoamentos em filme e na formação de gotas e bolhas.
- Seu nome é uma homenagem a Moritz Weber (1871 – 1951)
- onde **We** é o *número de Weber*, ρ é a densidade do fluido, v sua velocidade, l é a extensão e σ a tensão superficial.

$$We = \frac{\rho v^2 l}{\sigma}$$

Número de Reynolds

- O seu nome é uma homenagem a [Osborne Reynolds](#), um [físico](#) e [engenheiro irlandês](#). O seu significado físico é um [quociente](#) de [forças](#):
- forças de [inércia](#) ($v\rho$) entre forças de [viscosidade](#) (μ/D). É expresso como:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Número de Euler cavitação

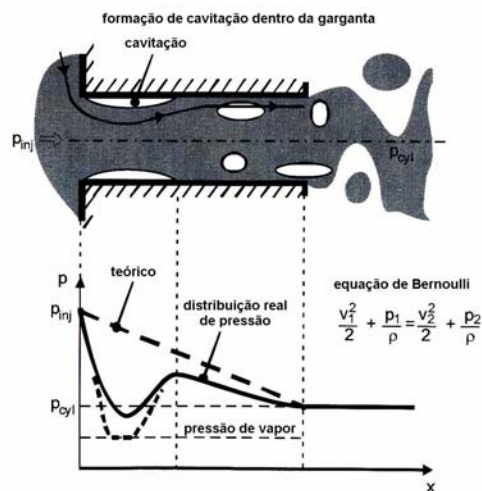
- O número de Euler ou número de cavitação é um número adimensional usado no cálculo de escoamentos. Expressa a relação entre a diferença da pressão do escoamento com a pressão de vapor do fluido em escoamento pela energia cinética do mesmo e é usado para caracterizar a tendência do escoamento para cavitarem. Seu nome é uma homenagem a Leonhard Euler.
 - É definido como:

$$C_a = \frac{P - P_v}{\frac{1}{2} \rho V^2}$$

- onde:
- ρ é a densidade do fluido
- p é a pressão local
- p_v é a pressão de vapor do fluido
- V é uma velocidade característica do escoamento

CAVITAÇÃO NA GARGANTA

- ESQUEMA



Atomização secundária

- A atomização secundária das gotas de um spray influencia o desempenho geral dos sistemas em vários campos da ciência e da engenharia.
- Em particular a atomização e subsequente vaporização de sprays de combustível dentro de motores a ignição por centelha [spark ignition direct injection (SIDI)] e injeção direta por compressão, [compression-ignition direct injection, (CIDI)], afetam diretamente a economia, a combustão, a estabilidade e as emissões.

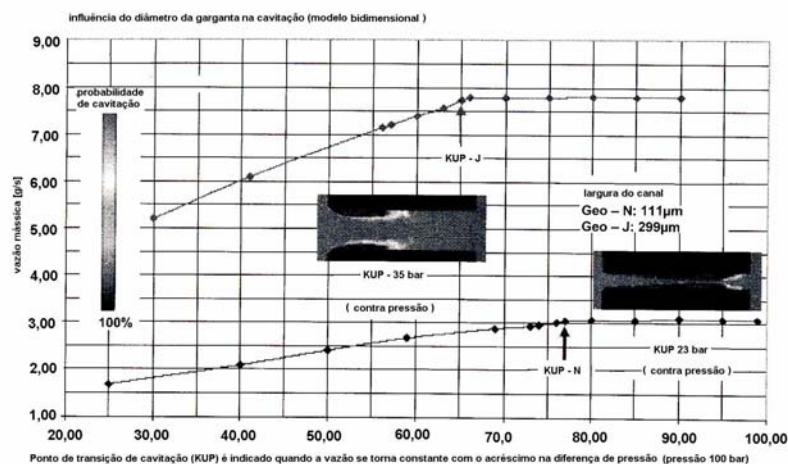
MODELOS TAB E KH

- A atomização ocorre em um ambiente onde às condições no cilindro (temperatura, pressão e campo de velocidades são dependentes do tempo e geralmente não uniformes e a fase gasosa é turbulenta.
- Dois modelos clássicos que têm sido largamente usados na literatura são a Analogia de Ruptura de Taylor (Taylor Analogy Breakup, TAB) e ruptura por instabilidade de Kelvin-Helmholtz (KH), existem vários outros modelos adicionais propostos, porém estes são os mais usados.

Cont.

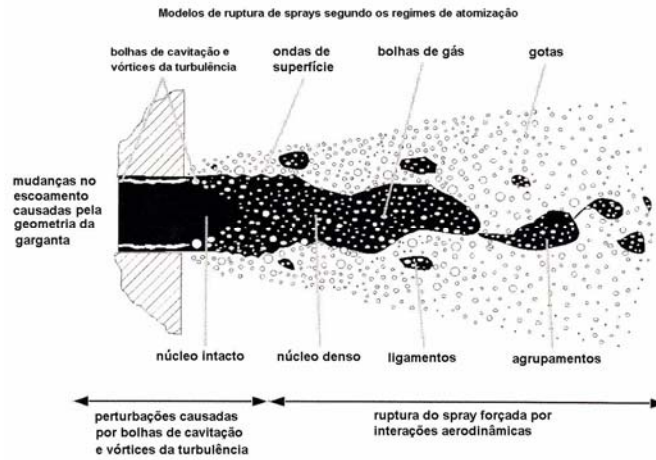
- No modelo TAB, uma gota simples ou um pacote de gotas é atomizado no instante da ruptura. Por outro lado no modelo KH a gota é rasgada em tiras continuamente (cisalhada) a partir de uma gota mãe durante o processo de ruptura.
- Existem muitos desafios para aumentar a capacidade de previsão dos submodelos de sprays operando dentro dos SIDI e CIDI. Um que surge em particular é a garantia de aplicabilidade de um modelo de atomização nas gamas dos regimes de ruptura: tipo bolsa ($13 < We < 18$), multimodo ($18 < We < 80$), filetamento ($80 < We < 800$) e catastrófico ($We > 800$).

Influência do diâmetro da garganta na cavitação



Modelos de ruptura de sprays segundo os regimes de atomização

- Modelos



REGIMES DE RUPTURA SECUNDÁRIA

regime secundário de ruptura de gotas

$$We_g = \frac{\rho_g \cdot U^2 \cdot d}{\sigma}$$

d: diâmetro da gota [m]
 σ : tensão superficial [N/m]
 U: velocidade relativa entre as gotas e a fase gás [m/s]
 ρ_g : densidade do gás [kg/m³]

ruptura vibracional	→ ○		$\tau_{break} = 0.25\pi \cdot \left[\frac{\sigma}{\rho_f \cdot d^2} - 6.25 \cdot \frac{\eta_f}{\rho_f \cdot d^2} \right]^{-0.5}$	$We_g \leq 12$
ruptura tipo bolsa	→ ○		$\tau_{break} = 6 \cdot (We_g - 12)^{-0.25}$	$12 \leq We_g \leq 18$
ruptura tipo bolsa e pistilo	→ ○		$\tau_{break} = 2.45 \cdot (We_g - 12)^{0.25}$	$18 \leq We_g \leq 45$
regime de transição	→ ○		$\tau_{break} = 14.1 \cdot (We_g - 12)^{-0.25}$	$45 \leq We_g \leq 100$
ruptura tipo folha e filetes	→ ○		$\tau_{break} = 14.1 \cdot (We_g - 12)^{-0.25}$	$100 \leq We_g \leq 350$
crista da onda em filetes	→ ○		$\tau_{break} = 0.766 \cdot (We_g - 12)^{0.25}$	$350 \leq We_g \leq 1000$
ruptura catastrófica	→ ○		$\tau_{break} = 0.766 \cdot (We_g - 12)^{0.25}$	$1000 \leq We_g \leq 2760$
ruptura explosiva	→ ○		$\tau_{break} = 5.5$	$We_g > 2760$

Problemas que permanecem necessitando desenvolvimento em sprays de diesel

- 1 – Influência da geometria da garganta no início do regime de cavitação (3D)
- 2 – Posição e condição de geração de gotas e seu crescimento
- 3 – Comportamento de escoamentos com onda de choque: Física do fenômeno
- 4 – Cavitação e condições de escoamento não permanente
- 5 – Condições para evitar os efeitos danosos da cavitação
- 6 – Tamanho das bolhas na saída da garganta
- 7 – Influência dos combustíveis
- 8 – Distribuição de bolhas e gotas na saída da garganta
- 9 – Modelos físicos para a região de ruptura primária
- 10 – direção do escoamento e da velocidade da fase gasosa e da fase líquida próximo da saída da garganta
- 12 – Influência da cavitação sobre a atomização
- 13 – Detalhes da injeção tipo efervescência.

INSTABILIDADE AERODINÂMICA E DESINTEGRAÇÃO DE FOLHAS LÍQUIDAS VISCOSAS

- Outro tipo de atomização largamente usada é aquela que utiliza a desintegração de uma folha (filme) de líquido, sendo exemplos do tipo os seguintes atomizadores: tipo jato em Y (Y-Jet), turbilhão por pressão (pressure swirl), copo rotativo (rotary cup), tipo leque (fan spray), etc.

Filmes líquidos

- A teoria da desintegração de filmes líquidos foi desenvolvida por vários pesquisadores atingindo seu clímax com o trabalho de Dombrowski e Johns (14), sendo a partir de então aceita como o modo de desintegração por excelência de filmes líquidos.

Mecanismo

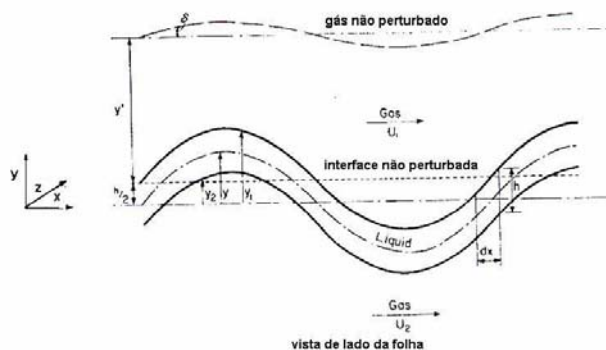
- Segundo o mecanismo proposto por Dombrowski e Johns a causa principal da instabilidade em filmes líquidos é devida às perturbações surgidas na folha devido à irregularidades existentes na garganta do ejetor e pela interação do filme com a atmosfera circunjacente dando origem a perturbações ondulatórias que se amplificam rapidamente. A desintegração ocorre quando a amplitude da onda atinge valores críticos e a folha é fragmentada.

Cont.

- Hagerty e Sea (15) e Squire (16) analisaram as características dessas ondas para folhas formadas por líquidos invíscidos e com espessura uniforme, seus resultados foram usados com sucesso (17) e (18), na previsão do tamanho de gotas produzido por atomizadores do tipo leque para líquidos de viscosidade baixa.

Hagerty e Sea

- Esquema do filme

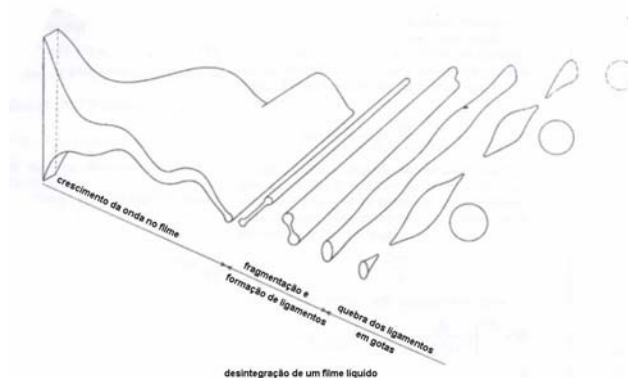


Cont.

- Dombrowski e Johns solucionaram o caso de um filme líquido que vai diminuindo de espessura com o tempo e movendo-se na direção x com velocidade U através de um gás estacionário. A equação para o eixo neutro médio entre as duas interfaces gás líquido é obtida inter-relacionando as forças de pressão do gás, tensão superficial, inércia do líquido e viscosidade. Juntamente com a hipótese de movimento na direção y e com o eixo movendo-se com o filme.

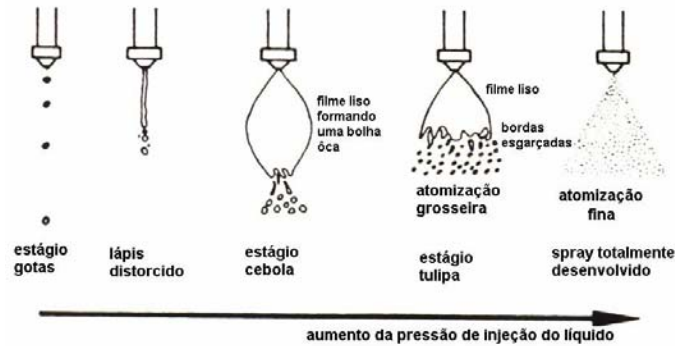
Dombrowski e Johns

- Esquema aceito atualmente

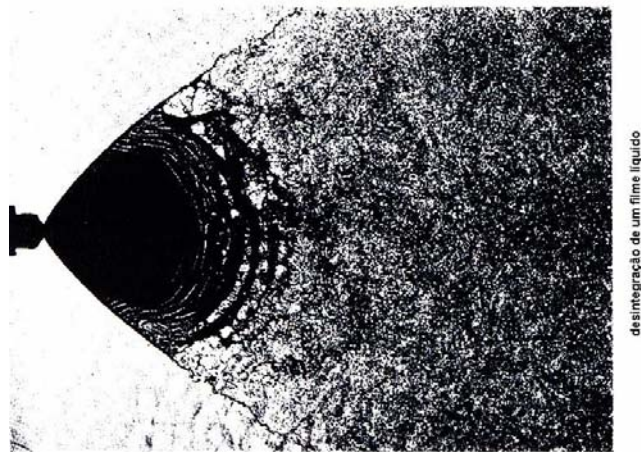


Estágios do desenvolvimento de um spray com o aumento da pressão atomizador tipo turbilhão por pressão, “pressure swirl atomizer”.

- Diagrama esquematizado



Fotografia de um atomizador em leque
Dombrovski e Johns



Dombrowski e Johns

- Diâmetro do ligamento

$$d_l = 0,9614 \left(\frac{K^2 \sigma^2}{\rho \rho_1 U^4} \right)^{1/6} \left[1 + 2,6 \mu_3 \sqrt{\frac{K \rho^4 U^7}{72 \rho_1^2 \sigma^5}} \right]^{1/5}$$

- Tamanho da gota
- $Dd = 1,89d_l$

GENERALIZAÇÃO

- Couto e Bastos-Netto (21), generalizaram a teoria de Dombrowski e Johns (14) calculando os fatores de forma para cada tipo de injetor e propondo uma formalização para o perfil de velocidades, dessa forma a teoria proposta para injetores com filme líquido do tipo leque, aplica-se para todo tipo de injetor que forme um filme líquido tenha ele qualquer formato.

Perfil de velocidades proposto:

- onde U_i é a velocidade resultante que deve ser introduzida na fórmula de dl
- U_{1a} e U_{2a} velocidades do gás de um lado e do outro lado do filme.

$$U_i = \left\{ \frac{1}{3} \left[U_f^2 + (U_{1a} - U_f)^2 + (U_{2a} - U_f)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}}$$

Conclusões

- Couto e outros (22) mostraram que para o caso do injetor por jato em Y (Y-Jet) e outros tipos de injetores que façam uso de correntes de ar ou vapor em alta velocidade que a correção
- $(1 + 3Oh)$ a potência $1/6$, com o fator $\left[\frac{3\pi}{\sqrt{2}} \right]^{\frac{1}{3}}$ é
- praticamente igual ao fator proposto por Rayleigh.
- Dessa forma é mais prático adotar o valor de Rayleigh, ou seja $D = 1,89 dl$

Distribuições de tamanhos de gotas em sprays

- Existem três tipos de distribuições de tamanhos de gotas utilizadas no cálculo das propriedades de um spray.
- 1 – Distribuições analíticas (poucas, emprego restrito)
- 2 – Distribuições matemáticas (várias)
- 3 – distribuições empíricas (maioria)

Analíticas

- Distribuição para o diâmetro dos ligamentos de Dombrowski e Johns
- Generalização feita por Couto e Bastos-Netto
- Função distribuição de gotas para jatos colidentes (Couto e Bastos-Netto)

Funções distribuição matemáticas

- Expressões matemáticas apropriadas devem ter os seguintes atributos:
- 1 – Fornecer um ajuste satisfatório dos dados;
- 2 – Permitir extrapolação dos tamanhos de gotas fora da faixa de valores medidos;
- 3 – Permitir de forma fácil o cálculo dos diâmetros médios representativos e outros parâmetros de interesse inerentes ao escoamento;
- 4 – Fornecer meios de consolidação de um grande número de dados;
- 5 – Idealmente, fornecer alguma perspectiva dos mecanismos envolvidos nos processos básicos da atomização.

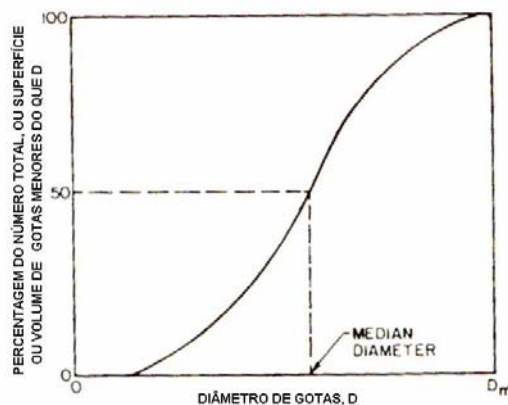
Distribuição normal

- Distribuição baseada na ocorrência aleatória de um dado tamanho de gotas. Relativamente simples, mas sua aplicação restringe-se a processos de natureza aleatória onde não exista uma tendência evidente presente.

$$\frac{dN}{dD} = f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}S_n} \exp\left[-\frac{1}{2S_n^2}(D - \bar{D})^2\right]$$

Distribuição normal

- Formato típico



Formato típico de uma curva de distribuição de tamanhos de gotas

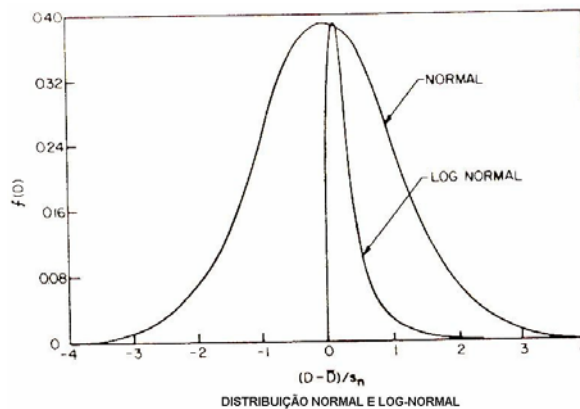
Distribuição Lognormal

- Muitas distribuições de tamanhos de partículas encontradas na natureza seguem uma distribuição Gaussiana ou normal se for usado o logaritmo do diâmetro da partícula como variável. Com esta modificação a equação anterior fica:

$$\frac{dN}{dD} = f(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}DS_g} \exp\left[-\frac{1}{2S_g^2}(\ln D - \ln \bar{D}_{ng})\right]$$

Gráfico da FD normal e Log-normal

- Representação gráfica



A distribuição log-normal pode ser escrita para superfícies e volumes da seguinte forma:

- Distribuição LN de superfície onde \bar{D}_{sg}
- é o diâmetro médio geométrico superficial

$$f(D^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{sg}}} \exp - \left[\frac{1}{2S_g^2} (\ln D - \ln \bar{D}_{sg})^2 \right]$$

- Distribuição log-normal de volume onde \bar{D}_{vg}
- é o diâmetro médio geométrico volumétrico ou mássico.

$$f(D^3) = \frac{1}{\sqrt{2\pi D_{vg}}} \exp - \left[\frac{1}{2S_g^2} (\ln D - \ln \bar{D}_{vg})^2 \right]$$

Relação entre os vários diâmetros médios

- Superfície: $\ln \bar{D}_{sg} = \ln \bar{D}_{ng} + 2S_g^2$

- Volume: $\ln \bar{D}_{vg} = \ln \bar{D}_{ng} + 3S_g^2$

- Volume/Superfície (SMD):

$$\ln \bar{D}_{vsg} = \ln \bar{D}_{ng} + 2,5S_g^2$$

FUNÇÕES DISTRIBUIÇÕES EMPÍRICAS

- Várias relações empíricas foram propostas para caracterizar a distribuição de gotas em um spray. Nenhuma delas é universalmente melhor do que qualquer outra, e o ajuste de um dado conjunto de dados por uma dada função particular depende do mecanismo de desintegração envolvido.

Funções mais comumente usadas

- Nukiyama-Tanasawa
- É uma função matemática relativamente simples que descreve adequadamente distribuições reais.

$$\frac{dN}{dD} = aD^p \exp - (bD)^q$$

- Contém quatro constantes independentes, a, b, p e q.

Simplificações

- A maioria das funções distribuição de tamanho de gotas comumente usadas utilizam simplificações ou modificações desta função. Um exemplo é a Nukiyama-Tanasawa com $p = 2$.

$$\frac{dN}{dD} = aD^2 \exp - (bD)^q$$

- dividindo a equação acima por D^2 e tomando o log vem:

Determinação de a e b

$$\ln\left(\frac{1}{D^2} \frac{dN}{dD}\right) = \ln a - (bD)^q$$

- adota-se um valor de q para um certo conjunto de dados e se plota,

$$\ln\left(\frac{1}{D^2} \frac{dN}{dD}\right) \text{ versus } D^q.$$

- Se o valor adotado de q for correto, a plotagem dará uma linha reta através da qual o valor de a e b poderão ser determinados.

Rosim- Rammler

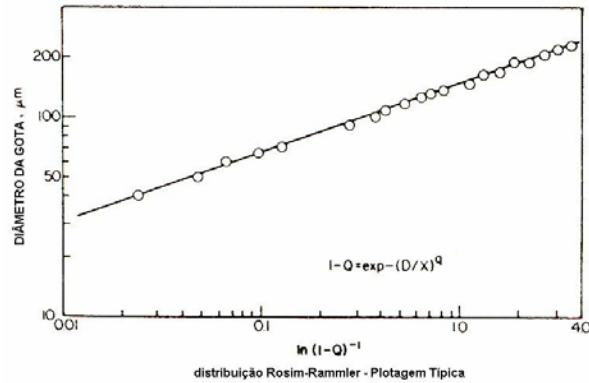
- No presente é a distribuição mais utilizada para o tamanho de gotas, desenvolvida originalmente para pós.

$$1 - Q = \exp - \left(\frac{D}{X}\right)^q$$

- Um gráfico típico de uma distribuição de tamanhos de gotas do tipo RR é mostrado na figura a seguir. O valor de q é obtido da inclinação da reta, enquanto que X (diâmetro representativo de alguma espécie) é dado pelo valor de D para o qual $1 - Q = \exp -1(1)$, que tem por solução $Q = 0,632$, i.é., X é o diâmetro de gota para o qual 63,2% do volume total do líquido está nas gotas de diâmetro menor que D.

Distribuição RR

- Gráfico típico



Rosim-Rammler modificada

- Aplica-se para atomizador do tipo turbilhão por pressão (pressure swirl)
- Devido ao desvio da RR na região de gotas grandes.

$$1 - Q = \exp\left(-\left(\frac{\ln D}{\ln X}\right)^q\right)$$

- a equação para a distribuição de volumes fica dada por:

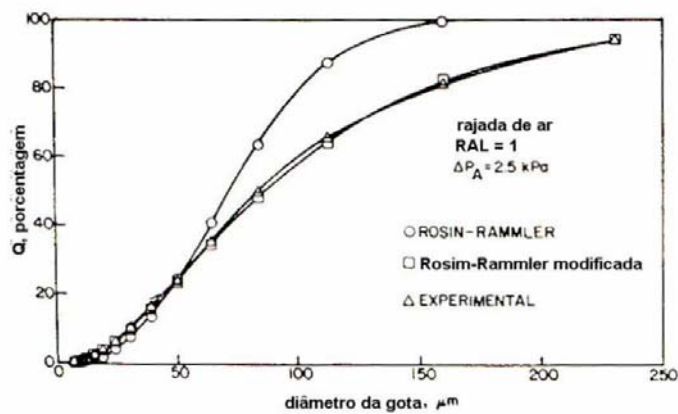
$$\frac{dQ}{dD} = q \frac{(\ln D)^{q-1}}{D(\ln X)^q} \exp\left(-\left(\frac{\ln D}{\ln X}\right)^q\right)$$

Comentário

- Segundo Risk e Lefebvre a RRM permite um ajuste aos dados muito melhor nessa região. Porém há necessidade de muitos mais dados para que possamos afirmar que a versão modificada é melhor do que a versão original.

Gráfico de ajuste

- Comparação entre RR e RRM



Função Limite Superior

- Mugele e Evans (1951) (24) propuseram a função “limite Superior”, como sendo a que melhor se ajusta na representação da distribuição de tamanhos de gotas em sprays. Essa função é uma forma modificada da equação log-probabilística, que é baseada na função distribuição normal.

Limite Superior

$$\frac{dQ}{dy} = \delta \exp\left(-\frac{\delta^2 y^2}{\sqrt{\pi}}\right)$$

$$y = \ln\left(\frac{aD}{D_m - D}\right)$$

- Quando y varia de 0 , D varia de D_0 (diâmetro mínimo) a D_m (diâmetro máximo), enquanto está relacionado ao desvio padrão de y , logo a D , a é uma constante adimensional. O diâmetro médio de Sauter é dado por:

$$SMD = \frac{D_m}{1 + a \exp(1/4 \delta^2)}$$

Diâmetros médios

- Em muitos cálculos de transferência de massa ou escoamentos é conveniente se trabalhar com médias ou diâmetros médios em do uso da DTG completa.
- O conceito de diâmetro médio foi generalizado por Mugele e Evans (24).

Diâmetros médios

- Um dos mais comuns diâmetros médios é D₁₀, onde:

$$D_{10} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D(dN/dD)dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN/dD)dD}$$

- Outros diâmetros médios de interesse são:

$$\text{Diâmetro médio superficial} \rightarrow D_{20} = \left[\frac{\int_{D_0}^{D_m} D^2 (dN/dD)dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN/dD)dD} \right]^{1/2}$$

Diâmetros médios

$$\text{Diâmetro médio volumétrico} \rightarrow D_{30} = \left[\frac{\int_{D_0}^{D_m} D^3 (dN/dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} (dN/dD) dD} \right]^{1/3}$$

- Em geral temos:

$$(D_{ab})^{a-b} = \frac{\int_{D_0}^{D_m} D^a (dN/dD) dD}{\int_{D_0}^{D_m} D^b (dN/dD) dD}$$

- Onde a e b tomam os valores do efeito investigado e a soma a + b é chamada ordem do diâmetro médio.

Diâmetros representativos

- lista

a	b	a + b ordem	Símbolo	Nome do diâmetro médio	Expressão	aplicação
1	0	1	D_{10}	aritmético	$\frac{\sum N_i D_i}{\sum N_i}$	Comparações
2	0	2	D_{20}	superficial	$\left(\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i} \right)^{1/2}$	Controle de área superficial
3	0	3	D_{30}	Volumétrico	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i} \right)^{1/3}$	Controle de Volume hidrologia
2	1	3	D_{21}	Superfície-aritmético	$\frac{\sum N_i D_i^2}{\sum N_i}$	absorção
3	1	4	D_{31}	Volume-aritmético	$\left(\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i} \right)^{1/2}$	Evaporação Difusão molecular
3	2	5	D_{32}	Sauter (SMD)	$\frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$	Transferência de Massa, reação
4	3	7	D_{43}	De Brouckere ou Herdan	$\frac{\sum N_i D_i^4}{\sum N_i D_i^3}$	Combustão equilíbrio

Diâmetros representativos

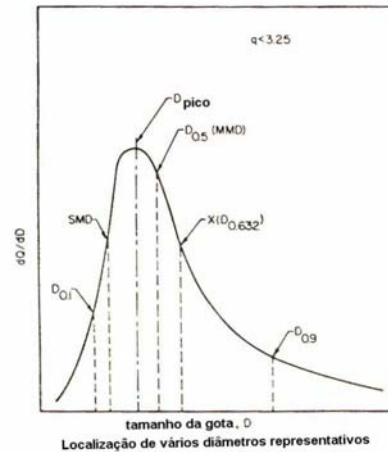
- Para a maioria dos propósitos em engenharia a DTG em um spray pode ser representada concisamente como uma função a dois parâmetros, um dos quais é um diâmetro representativo e o outro uma medida da gama de ocorrência do tamanho das gotas.
- Existem muitas escolhas possíveis de diâmetros representativos, cada um sendo responsável por uma faceta da definição da DTG.

Possibilidades

- $D_{0,1}$ – Diâmetro da gota tal que 10% do volume total do líquido encontra-se em gotas de diâmetros menores.
- $D_{0,5}$ – Diâmetro da gota tal que 50% do volume total do líquido encontra-se em gotas de diâmetros menores. Este é o diâmetro médio mássico (MMD)
- $D_{0,632}$ - Diâmetro da gota tal que 63,2% do volume total do líquido encontra-se em gotas de diâmetros menores. Este é o valor de X na equação (98).
- $D_{0,9}$ - Diâmetro da gota tal que 90% do volume total do líquido encontra-se em gotas de diâmetros menores.
- $D_{0,999}$ - Diâmetro da gota tal que 99,9% do volume total do líquido encontra-se em gotas de diâmetros menores.
- D_{pico} – Valor de D correspondente ao pico (máximo) da DTG.

Localização dos diâmetros representativos

- Diâmetros
- representativos



Resumo

- Chin (27, 28) e colaboradores posicionaram-se a favor do uso da distribuição de Rosin-Rammler, devido à facilidade de uso e de ser obtida diretamente dos dados usando um analisador padrão de tamanho de gotas. Uma outra vantagem consiste em que todos os diâmetros representativos podem ser relacionados um ao outro mediante o parâmetro q .

Por exemplo, se tem:

$$\frac{\text{MMD}}{\text{SMD}} = (0,693)^{1/q} \Gamma\left(1 - \frac{1}{q}\right)$$

- Esta equação (108) mostra que a razão MMD/SMD não é uma constante, como é as vezes afirmado, mas sim uma função única de q.
- A definição de Dpico é evidente por inspeção da figura anterior.

Diâmetros representativos

- Claramente em Dpico:

$$\frac{d^2Q}{dD^2} = q(q-1) \frac{D^{q-2}}{X^2} \exp - \left(\frac{D}{X}\right)^q - \left(q \frac{D^{q-1}}{X^q}\right)^2 \exp - \left(\frac{D}{X}\right)^q = 0$$

- Então:

$$\frac{D_{\text{pico}}}{X} = \left(1 - \frac{1}{q}\right)^{1/q}$$

Outros diâmetros representativos

- Relações

$$\frac{D_{0,1}}{X} = (0,1054)^{1/q}$$

$$\frac{D_{0,9}}{X} = (2,3025)^{1/q}$$

$$\frac{\text{MMD}}{X} = (0,693)^{1/q}$$

$$e \frac{\text{SMD}}{X} = \left[\Gamma \left(1 - \frac{1}{q} \right) \right]^{-1}$$

Diâmetros representativos

- Outras relações são:

$$\frac{D_{0,1}}{\text{MMD}} = (0,152)^{1/q}$$

$$\frac{D_{0,9}}{\text{MMD}} = (3,32)^{1/q}$$

$$\frac{D_{0,999}}{\text{MMD}} = (9,968)^{1/q}$$

$$\frac{D_{pico}}{\text{SMD}} = \left(1 - \frac{1}{q} \right)^{1/q} \Gamma \left(1 - \frac{1}{q} \right)$$

Para uma DRR vem:

- O diâmetro máximo é função apenas de q em um DRR

$$\frac{D_{0,999}}{X} = (6,90775)^{1/q}$$

Algumas observações para se evitar as armadilhas mais comuns ao se usar uma DTG:

- 1 – Nenhum parâmetro simples, pode definir completamente uma DTG. Por exemplo, dois sprays de mesmo SMD ou de mesmo MMD, não são necessariamente similares. Em muitas aplicações práticas é a menor gota de um spray ou a maior gota que tem importância e o SMD ou MMD não pode fornecer esta informação.
- 2 – Não existe uma correlação universal entre um diâmetro médio (ou diâmetro representativo) de um spray e sua DTG. São completamente independentes um do outro.

Observações

- 3 – Diâmetros médios e diâmetros representativos são de natureza diferentes. O MMD não é um diâmetro médio; é um diâmetro representativo. Em particular, não deve ser confundido com o diâmetro médio mássico (ou volumétrico) D30.
- 4 – Se usarmos a DRR a DTG em um spray será definida por dois parâmetros, um diâmetro representativo e uma medida da dispersão do tamanho de gotas q .

Observações

- 5 – O fator de amplitude relativa pode ser usado para indicar o espalhamento do tamanho de gotas de um spray.
- 6 – O fator de dispersão de fronteira pode ser usado para definir-se o tamanho da gota máxima possível em um dado spray.

Distribuições empíricas

- Orifício plano

Equações para o tamanho de gotas de atomizadores tipo orifício plano

investigadores	equação
Merrington and Richardson [2]	$SMD = \frac{500d_v^2 v_i^{0.2}}{U_i}$
Panasenkov [3]	$MMD = 6d_v Re_i^{-0.15}$
Harmon [4]	$SMD = 3330d_v^{0.3} \mu_i^{0.07} \rho_i^{-0.644} \sigma^{-0.15} U_i^{-0.15} \mu_v^{0.78} \rho_v^{-0.052}$
Miesse [6]	$D_{0.99} = d_v We_i^{0.331} (23.5 + 0.000395 Re_i)$
Tanasawa and Toyoda [7]	$SMD = 47d_v U_i^{-1} \left(\frac{\sigma}{\rho G} \right)^{0.25} \left[1 + 331 \frac{\mu_i}{(\rho_i \sigma d_v)^{0.5}} \right]$
Hiroyasu and Katoda [8]	$SMD = 2330 \rho_i^{0.121} Q^{0.131} \Delta P^{-0.135}$
Elkobr [9]	$SMD = 3.08 v_i^{0.441} (\sigma \rho L)^{0.711} \rho_i^{0.06} \Delta P_i^{-0.54}$

Turbilhão por pressão

- Ex.:

Equação para o tamanho de gotas de atomizadores tipo turbilhão por pressão

Investigadores	Equação	NOTAS
Radcliffe [16]	$SMD = 7.3 \sigma^0 v_i^{0.2} m_i^{0.25} \Delta P_i^{-0.4}$	Sem efeito das dimensões da gargante e das propriedades do ar
Jasuja [15]	$SMD = 4.4 \sigma^0 v_i^{0.18} m_i^{0.22} \Delta P_i^{-0.43}$	Sem efeito das dimensões da gargante e das propriedades do ar
Babu et al. [37]	$SMD = 133 \frac{FN^{0.84291}}{\Delta P_i^{0.22365} \rho_i^{0.3215}}$	$\Delta P_i < 2.8 \text{ MPa}$
Babu et al. [37]	$SMD = 607 \frac{FN^{0.75344}}{\Delta P_i^{0.14936} \rho_i^{0.3765}}$	$\Delta P_i > 2.8 \text{ MPa}$
Jones [10]	$MMD = 2.47 m_i^{0.115} \Delta P_i^{-0.47} \mu_i^{0.16} \mu_a^{-0.04} \sigma^{0.25} \rho L^{-0.225} \times \left(\frac{L}{d_v} \right)^{0.05} \left(\frac{L}{D} \right)^{0.07} \left(\frac{A_r}{D d_v} \right)^{-0.13} \left(\frac{D}{d_v} \right)^{0.21}$	Apropriado para grandes capacidades
Lefebvre [13]	$SMD = 2.25 \sigma^{0.25} \mu_i^{0.25} m_i^{0.25} \Delta P_i^{-0.3} \rho_a^{-0.25}$	
Wang and Lefebvre [14]	$SMD = 4.52 \left(\frac{\sigma \mu_i^2}{\rho_a \Delta P_i^2} \right)^{0.25} (t \cos \theta)^{0.25} + 0.39 \left(\frac{\sigma \rho_i}{\rho_a \Delta P_i} \right)^{0.25} (t \cos \theta)^{0.73}$	Inclui efeitos do ângulo do cone do spray

Jato plano com rajada de ar

- Ex.:

Equações para o tamanho de gotas de atomizadores tipo jato plano po rajada de ar

Investigadores	Equações	notas
Nukiyama and Tanasawa [68]	$SMD = 0.585 \left(\frac{\sigma}{\rho_l U_k^2} \right)^{0.5} + 53 \left(\frac{\mu_l^2}{\sigma \rho_l} \right)^{0.225} \left(\frac{Q_l}{Q_a} \right)^{1.5}$	sem efeito das dimensões da garganta e densidade do ar
Lorenzetto and Lefebvre [75]	$SMD = 0.95 \left[\frac{(\sigma m_l)^{0.33}}{\rho_l^{0.37} \rho_a^{0.67} U_k} \right] \left(1 + \frac{m_l}{m_a} \right)^{1.70} + 0.13 \left(\frac{\mu_l^2 d_c}{\sigma \rho_l} \right)^{0.5} \left(1 + \frac{m_l}{m_a} \right)^{1.70}$	líquidos de densidade baixa SMD independente do diâmetro inicial do jato
Jasuja [78]	$SMD = 0.022 \left(\frac{\sigma}{\rho_a U_k^2} \right)^{0.45} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)^{0.5} + 0.00143 \left(\frac{\mu_l^2}{\sigma \rho_l} \right)^{0.45} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)^{0.45}$	ruptura por corrente cruzada
Rizk and Lefebvre [79]	$SMD = 0.48 d_c \left(\frac{\sigma}{\rho_a U_k^2 d_c} \right)^{0.4} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)^{0.4} + 0.15 d_c \left(\frac{\mu_l^2}{\sigma \rho_l d_c} \right)^{0.3} \left(1 + \frac{1}{ALR} \right)$	ar e líquido co-correntes

Atomizadores assistidos por ar

- “Air Assist”

Equações para o tamanho de gotas para atomizadores assistidos por ar

Investigadores	tipo	Equações	Notas
Wigg [64]	mistura interna	$MMD = 20 v_l^{0.5} m_l^{0.1} \left(1 + \frac{m_l}{m_a} \right)^{0.5} h^{0.1} \sigma^{0.2} \rho_a^{0.1} U_k^{1.0}$	h = altura do anel de ar
Sakai et al. [70]	mistura interna	$SMD = 14 \times 10^{-6} d_w^{0.75} \left(\frac{m_l}{m_a} \right)^{0.35}$	d _w = diâmetro da garganta
Inamura and Nagai [71]	mistura interna	$\frac{SMD}{t} = \left[1 + \frac{16850 \text{ Oh}^{0.1}}{\text{We}(\rho_l/\rho_a)} \right] \left[1 + \frac{0.065}{(\dot{m}_a/\dot{m}_l)^2} \right]$	Oh = $\left(\frac{\mu_l^2}{\rho_l t \sigma} \right)^{0.5}$
Elkottb et al. [72]	mistura externa	$SMD = 51 d_c \text{ Re}^{-0.18} \text{ We}^{-0.18} \left(\frac{m_l}{m_a} \right)^{0.28}$	Re = $\frac{\rho_l U_k d_c}{\mu_l}$ We = $\frac{\rho_l d_c U_k^2}{\sigma}$

EVAPORAÇÃO DE GOTAS

- Evaporação de gotas no estado estacionário
- O termo estacionário não é bem utilizado quando aplicada à evaporação de gotas, uma vez que uma gota de combustível jamais atinge uma evaporação estacionária durante seu tempo de duração. O termo é mais apropriado para gotas de combustível multicomponentes, que pode conter vários componentes do petróleo, cada um sendo processado por suas propriedades físicas e químicas. Desse modo, é conveniente, principalmente para óleos destilados leves, considerar um estado quase-estacionário da fase gasosa que engloba as facetas principais dos processos de difusão mássica e térmica.

Medida da taxa de evaporação

- Duas abordagens são usadas no estudo experimental da evaporação de uma gota. Em um a gota é suspensa por uma fibra de sílica ou fio de termopar. (O último permite que a temperatura da gota seja medida). A diminuição do diâmetro da gota com o tempo é gravada usando-se uma câmera cinematográfica operando em uma velocidade de 100 fotos por segundo. O formato elíptico da gota é corrigido para o de uma esfera de mesmo volume.

Evap.

- Após um período transiente inicial, a evaporação no estado estacionário é estabelecida e o diâmetro da gota diminui de acordo com a seguinte relação:

$$D_0^2 - D^2 = \lambda t$$

- Esta expressão é chamada de Lei de Evaporação do Diâmetro Quadrado; e λ é a constante de evaporação.

Evaporação transiente

- Como é sabido o combustível ou outro líquido qualquer é fornecido e atomizado em uma temperatura diferente da temperatura de evaporação (menor que), desse modo deve-se calcular o período de aquecimento da gota até que a mesma atinja a temperatura de evaporação.

Transiente

B_T e B_M

serão dados mais adiante

- Este cálculo também se encontra na referência (12) e da para o período de aquecimento:

$$\Delta t_a = \frac{c_{pf} \rho_f c_{pg} D_a^2 (T_{s_{ec}} - T_{s_0})}{12k_g \ln(1 + B_M) L (B_T / B_M - 1)}$$

- onde D_a é o diâmetro efetivo durante o período de aquecimento e está relacionado ao diâmetro inicial da gota por:

$$D_a = D_0 \left[1 + \frac{c_{pf} (T_{s_{ec}} - T_{s_0})}{2L (B_T / B_M - 1)} \right]^{-0,5}$$

transiente

- O diâmetro da gota no final do período de aquecimento é dado por:

$$D_1^2 = D_0^2 - \lambda_a \Delta t_a$$

- enquanto que o tempo de vida da gota é dado pela soma do tempo de aquecimento mais o período de evaporação no estado estacionário.

Tempo de vida da gota

$$t = \Delta t_a + \Delta t_{ee} = \Delta t_a + \frac{D_1^2}{\lambda_{ee}}$$

$$B_M = \frac{Y_{F_s}}{1 - Y_{F_s}}$$

- onde Y_{F_s} é a fração mássica do vapor de combustível na superfície da gota.
- (BM é chamado de número de transferência de massa).

continuação

- onde L é o calor latente de vaporização do combustível correspondente à temperatura da superfície da gota. Este número denota a razão da entalpia disponível no gás ao redor da gota pelo calor necessário para evaporar o combustível, (número de transferência térmica).

$$B_T = \frac{c_{pg}(T_\infty - T_s)}{L}$$

Tempo de evaporação da gota

Evaporação da gota

$$t = \frac{\rho_F D_0^2}{8 \left(\frac{k}{c_p} \right)_g \ln \left(1 + \frac{c_{pg} (T_f - T_b)}{L} \right) (1 + 0,22 R_{eD_0}^{0,5})}$$

- Onde k é a condutividade térmica
- Cp é o calor específico

transiente

- Grosseiramente pode-se aumentar em 25% o tempo de queima no estado estacionário, que vai se estar sendo conservativo para o tempo de queima total da gota.

FINAL

- MUITO OBRIGADO
- PERGUNTAS?