

## SOMMARIO

<b>LEZIONE 18. ASPETTI TECNOLOGICI.....</b>	<b>251</b>
<i>DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI DELLE GOCCE IN UNO SPRAY .....</i>	<i>251</i>
<i>PRINCIPALI FUNZIONI DI DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI DELLE GOCCE .....</i>	<i>253</i>
<i>ALTRI PARAMETRI DI UNO SPRAY.....</i>	<i>256</i>
<i>CLASSIFICAZIONE DEGLI UGELLI.....</i>	<i>256</i>
<i>QUADRO SINOTTICO .....</i>	<i>260</i>
<i>RIFERIMENTI E NOTE .....</i>	<i>261</i>

## LEZIONE 18. ASPETTI TECNOLOGICI

### *Distribuzione delle dimensioni delle gocce in uno spray*

Il processo di disintegrazione di un getto liquido è un processo stocastico che, per tale motivo, da luogo ad un insieme di gocce che hanno dimensioni che variano in un intervallo che può essere più o meno largo in dipendenza dell'atomizzatore utilizzato. Le dimensioni delle gocce sono pertanto individuate per mezzo di una funzione densità di probabilità delle dimensioni  $p(D)$ .  $p(D)$  è la probabilità che una goccia abbia dimensione  $D$ . A partire da tale densità è possibile definire anche una funzione di distribuzione delle dimensioni  $P(D)$ :

$$P(D) = \int_0^D p(x) dx \quad (5.23)$$

Ne segue che il numero  $N$  di gocce con dimensioni tra  $D$  e  $D+\Delta D$  è dato da:

$$N(D, D + \Delta D) = N_{tot} (P(D + \Delta D) - P(D)) \quad (5.24)$$

ovvero se consideriamo un intervallo  $dD$ :

$$N(D, D + dD) = N_{tot} \int_D^{D+dD} p(x) dx = N_{tot} p(D) \quad (5.25)$$

Tale definizione dà, dunque, anche una maniera di misurare, ammesso che sia possibile determinare le dimensioni delle gocce isolatamente su un numero sufficiente di campioni in un intervallo  $dD$ , la  $p(D)$ .

Molto spesso vengono utilizzati dei diametri medi, che corrispondono a momenti statistici della  $p(D)$ , che consentono di caratterizzare in maniera sintetica la distribuzione delle dimensioni o di altre quantità quali area superficiale, volume o rapporti tra queste quantità.

In generale si possono definire i diametri medi  $D_{i,j}$  come:

$$\left(D_{i,j}\right)^{i-j} = \frac{\int_0^{\infty} D^i p(D) dD}{\int_0^{\infty} D^j p(D) dD} \quad (5.26)$$

Alcuni diametri medi hanno un impiego più frequente sia perché possono essere determinati direttamente per mezzo di tecniche diagnostiche e sia perché essi hanno un particolare significato fisico.

Ad esempio  $D_{10}$  è il valore medio statistico delle dimensioni di tutte le gocce dello spray:

$$D_{10} = \frac{\int_0^{\infty} D p(D) dD}{\int_0^{\infty} p(D) dD} = \frac{\int_0^{\infty} D p(D) dD}{1} = \bar{D} \quad (5.27)$$

Analogamente  $D_{20}$  è il diametro di una goccia la cui area superficiale se moltiplicata per il numero di gocce dello spray dà il valore dell'area superficiale totale e  $D_{30}$  è il corrispondente diametro relativamente al volume.

Il momento  $D_{32}$ , denominato diametro medio di Sauter (*SMD*), è il diametro di una goccia per la quale il rapporto tra volume e area superficiale sia lo stesso di quello relativo all'intero spray. Esso è particolarmente utilizzato per caratterizzare il comportamento dello spray relativamente ai processi di scambio di materia e di reazione.

Ovviamente un solo parametro non descrive univocamente la distribuzione delle gocce in uno spray a meno che la forma generale della  $p(D)$  non sia nota a priori. Pertanto è di solito utilizzato almeno un altro parametro che dia informazioni sul campo di variabilità delle dimensioni o sulla uniformità della distribuzione o di altre caratteristiche che possono essere utili per la applicazione considerata.

Il più comune parametro, oltre al diametro medio è la varianza della  $p(D)$ :

$$\sigma^2 = \int_0^{+\infty} (D - D_{10})^2 p(D) dD \quad (5.28)$$

Il valore  $\sigma$  rappresenta la deviazione standard dei valori dei diametri dal valore medio.

Si impiegano, inoltre, le quantità  $D_\alpha$  che rappresentano i diametri tali che una frazione di volume dello spray pari ad  $\alpha$  sia costituita da gocce con diametro inferiore a  $D_\alpha$ . Ad esempio  $D_{0.5}$  è il diametro tale che il 50% del volume totale di liquido è costituito da gocce con diametro inferiore ad esso. Numerosi altri parametri caratterizzanti la dispersione delle gocce possono essere definiti a partire da quelli introdotti.

### ***Principali funzioni di distribuzione delle dimensioni delle gocce***

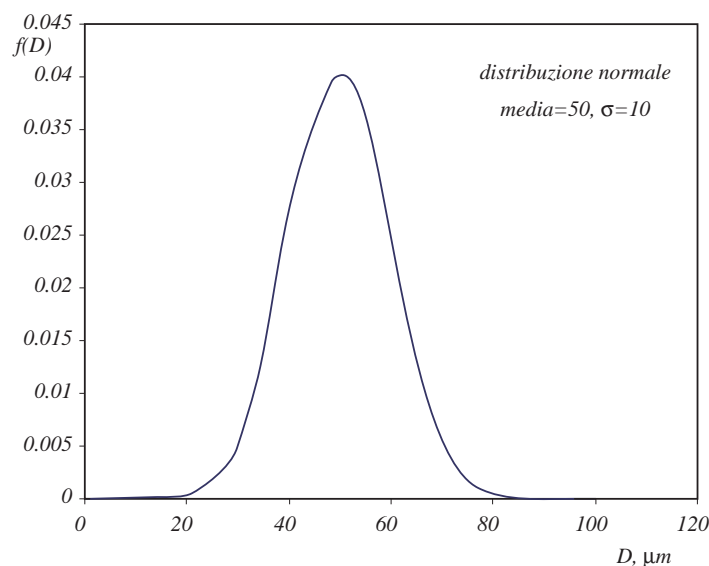
La funzione di distribuzione delle dimensioni di uno spray è una funzione arbitraria e fortemente dipendente dal tipo di atomizzatore impiegato e dal suo regime di funzionamento. Nella pratica, però, si tende a ricondurre tali funzione di distribuzione a delle forme canoniche predefinite. Data la enorme varietà di possibili forme che la  $p(D)$  può avere in dipendenza dell'atomizzatore utilizzato e delle caratteristiche fisiche del liquido non è possibile individuare una sola distribuzione (o una classe di distribuzioni) che possa avere un impiego generale nella caratterizzazione degli spray. Per tale motivo varie classi di funzioni di distribuzioni sono utilizzate e quella più adatta a descrivere il particolare spray considerato va di volta in volta individuata. Nel seguito riportiamo le funzioni di distribuzione più comunemente utilizzate.

#### ***Distribuzione normale***

La funzione di distribuzione delle dimensioni più semplice è la distribuzione normale definita come:

$$f(D) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(D-\bar{D})^2}{2\sigma^2}} \quad (5.29)$$

dove  $\sigma^2$  è la varianza e  $\bar{D}$  il valore medio dei diametri delle gocce. Il diagramma di questa distribuzione è riportato in Fig. 5.22.



**Fig. 5.22** Diagramma della distribuzione normale.

### Distribuzione log-normale

Una variante della distribuzione normale è rappresentata dalla distribuzione log-normale:

$$f(D) = \frac{1}{D\sigma_g \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln(D) - \ln(\bar{D}_{ng}))^2}{2\sigma_g^2}} \quad (5.30)$$

Dove  $\sigma_g$  è la deviazione standard geometrica mentre  $\bar{D}_{ng}$  è la media geometrica. La forma di questa distribuzione (Fig. 5.23) assume, se l'ascissa è riportata in scala logaritmica, un andamento simile alla distribuzione normale.

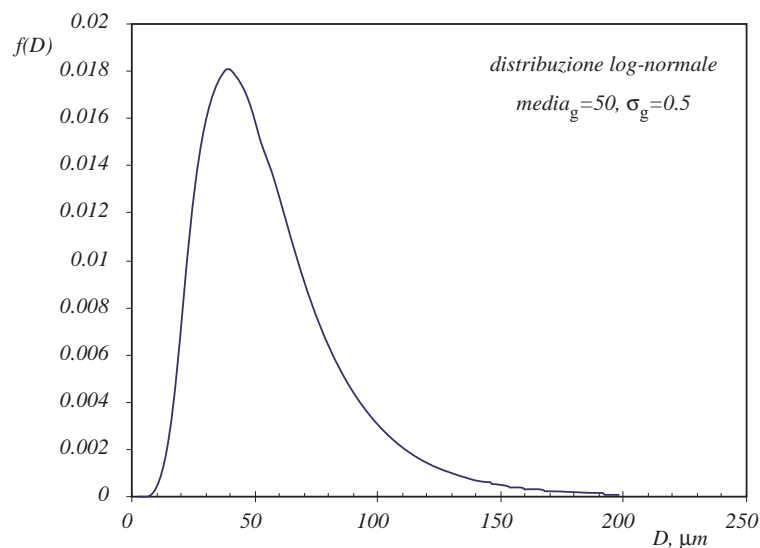


Fig. 5.23 Diagramma della distribuzione log-normale.

La distribuzione log-normale risulta spesso più efficiente di quella normale per rappresentare la distribuzione delle dimensioni di spray pratici.

### Distribuzione di Nukiyama-Tanasawa

La distribuzione di Nukiyama-Tanasawa può essere utilizzata per rappresentare molti casi pratici. L'espressione analitica di questa distribuzione è:

$$f(D) = aD^p e^{-(bq)^q} \quad (5.31)$$

la costante di normalizzazione  $a$  è data da  $\frac{qb^{p+1}}{\Gamma\left(\frac{p+1}{q}\right)}$ .

Più precisamente questa distribuzione è rappresentativa di una classe di distribuzione al variare del valore dei due parametri  $p$  e  $q$ . Nella Fig. 5.24 è riportata la distribuzione di Nukiyama-Tanasawa per  $p=3$  e  $q=2$  e due valori di  $b$ . Si può osservare come il valore di  $b$  determini il valore medio della distribuzione.

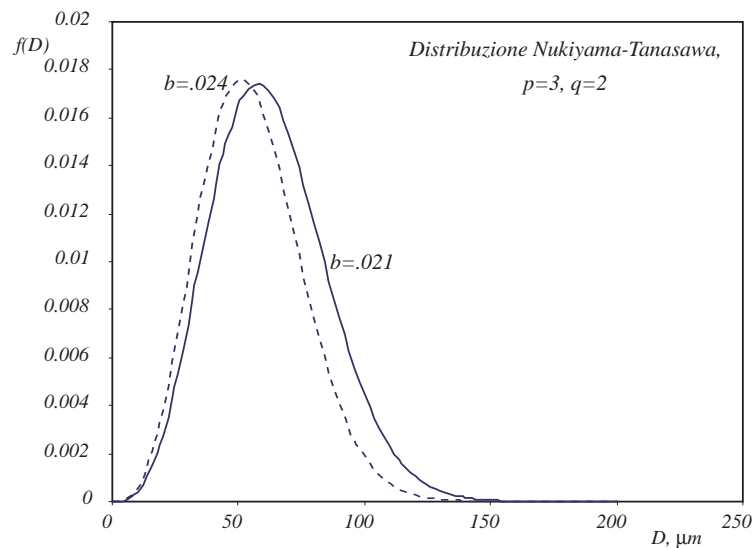


Fig. 5.24 Distribuzione di Nukiyama-Tanasawa per  $p=3$  e  $q=2$  e  $b$  pari a 0.021 e 0.024.

### Distribuzione di Rosin-Rammler

Un discorso a parte merita la distribuzione di Rosin-Rammler. Questa distribuzione è comunemente definita dalla espressione:

$$Q = 1 - e^{-\left(\frac{D}{X}\right)^q} \quad (5.32)$$

dove  $Q$  è la frazione del volume totale di liquido contenuta nelle gocce con diametro inferiore a  $D$ . Il parametro  $X$  rappresenta il diametro (detto di Rosin-Rammler) per il quale  $Q$  è pari a 0.632. Questo diametro viene utilizzato, in alcuni casi, come diametro rappresentativo della dimensioni delle gocce nello spray.

Talvolta viene anche utilizzata una variante della distribuzione di Rosin-Rammler definita da:

$$Q = 1 - e^{-\left(\frac{\ln D}{\ln X}\right)^q} \quad (5.33)$$

che risulta più efficace nel descrivere la parte alta della distribuzione delle dimensioni delle gocce.

### ***Altri parametri di uno spray***

Oltre alle dimensioni delle gocce è anche importante caratterizzare lo spray relativamente alla distribuzione spaziale di queste nel volume di interesse. A tale scopo si utilizzano parametri sintetici, quali l'angolo di spray e la sua penetrazione, o le curve di distribuzione del volume del liquido presente lungo un raggio o una circonferenza a varie distanze dall'ugello.

### ***Classificazione degli ugelli***

Nelle sezioni precedenti si è visto come l'agente promuovente principale dei processi di atomizzazione sia la velocità relativa all'interfaccia liquido-gas. Il principale problema tecnologico che è necessario affrontare nel disegno di un ugello è quello di fornire tale energia cinetica alla struttura (getto o lamina) che si vuole atomizzare. Nella pratica tecnologica ciò è stato realizzato in svariati modi ed è difficile dare una descrizione completa delle possibili configurazioni pratiche che sono state realizzate. A tale scopo esiste in letteratura un certo numero di pubblicazioni che presentano, con un approccio tecnologico, i vari tipi di atomizzatore illustrandone le principali caratteristiche. Il libro di A.H. Lefebvre presenta una buona rassegna di atomizzatori e da un ampio numero di riferimenti bibliografici sull'argomento. Nella Fig. 5.25 è riportata una classificazione degli atomizzatori presentata nel libro suddetto.

Prima di riassumere brevemente le caratteristiche degli ugelli riportati in figura è necessario ricordare che spesso non si utilizza un solo atomizzatore in un sistema di combustione ma che, anzi, le configurazioni più comuni per impianti di dimensioni industriali prevedono l'impiego di un gran numero di atomizzatori. Ciò consente di ottenere migliori distribuzioni del combustibile, maggiore robustezza tecnologica, maggiori efficienze di atomizzazione, modularità dei sistemi, minori problemi di "scale-up".

Gli ugelli si possono dividere, essenzialmente, in tre categorie principali (sezioni a, b e c della Fig. 5.25):

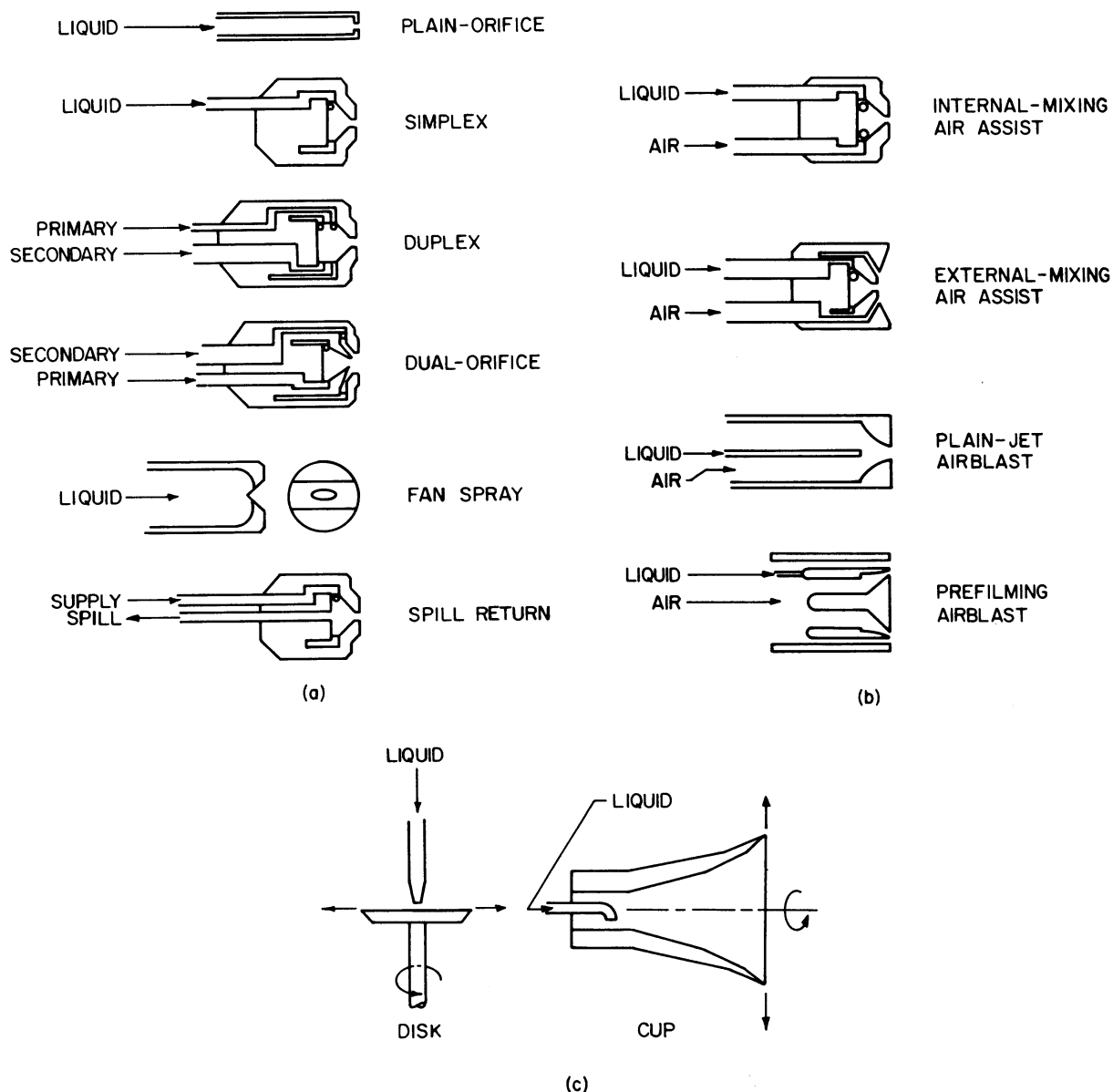


Fig. 5.22

- a) Ugelli in cui l'energia cinetica viene trasferita direttamente al liquido per mezzo di un salto di pressione che avviene in corrispondenza della sezione di uscita dell'ugello. Il buon funzionamento di tali ugelli si ha in corrispondenza di piccole sezioni di uscita e alti salti di pressione (relativamente al diametro dell'ugello). Solitamente (ugelli "simplex") vengono impresse al liquido componenti di velocità radiale e/o tangenziale (swirl), iniettandolo per mezzo di condotti opportunamente inclinati e/o facendolo fluire lungo una superficie conica al fine di disperdere maggiormente il liquido (i coni di apertura di tali spray vanno da 30° fino a circa 180°).



In tal caso la velocità di uscita è proporzionale alla radice quadrata del salto di pressione. Ciò limita il campo di impiego di tali ugelli, nel quale la qualità dell'atomizzazione è soddisfacente, ad un intervallo di portate di circa 10:1.

Per tale motivo si utilizzano configurazioni “duplex” o “dual orifice” in cui in pratica due ugelli di dimensioni differenti sono riuniti in un solo corpo. A basse portate il liquido viene fatto fluire solo nell'ugello più piccolo, mentre ad alte portate viene utilizzato anche l'ugello più grande. In tal caso si ottengono rapporti tra portata massima e minima di 40:1 ma è possibile osservare l'esistenza di una regione di transizione, corrispondente all'inserzione del secondo ugello, nella quale la qualità dell'atomizzazione è bassa. Un'altra maniera per allargare il campo di portate di questo tipo di ugelli è quella di utilizzare una valvola regolabile di spillaggio (“spill return nozzles”) che consente di regolare la portata facendo rifluire dalla camera di swirl dell'iniettore quantità opportune di liquido. In tal modo la pressione di iniezione può essere mantenuta pressochè costante intorno ad un valore ottimale fornendo una buona qualità di atomizzazione indipendentemente dalla portata.

- b) ugelli nei quali l'energia cinetica di rottura viene trasferita al liquido per mezzo dell'interazione con un flusso gassoso (aria o vapore). Con tali ugelli si possono ottenere spray molto fini anche a partire da liquidi con alta viscosità. Si distingue di solito tra ugelli assistiti ad aria (“air assisted”) e a corrente d'aria (“airblast”). Nei primi una piccola portata d'aria ad alta velocità ( $>100$  m/s) viene fatta interagire con il flusso liquido o prima dell'ugello di uscita dell'atomizzatore (“internal mixing”) o dopo un ugello di uscita del liquido (“external mixing”). Nei secondi una grande portata di aria a più bassa velocità ( $<100$  m/s) viene fatta interagire con un getto (“plain jet airblast”) o una lamina (“prefilming airblast”) di liquido.

Entrambe queste configurazioni danno buone qualità di atomizzazione in un ampio campo di portate (maggiore di quello degli ugelli a pressione) ma esse oltre ad una maggiore complicazione, presentano alcuni inconvenienti. Ad esempio, gli ugelli assistiti ad aria richiedono una fonte supplementare di aria ad alta pressione che può, in certe applicazioni, non essere disponibile e, nel caso di configurazioni “internal mixing” e “plain jet airblast” è necessario avere cura che non si abbiano ritorni di aria nel condotto di liquido e viceversa.

- c) ugelli nei quali l'energia cinetica è trasferita direttamente al liquido per mezzo di sistemi meccanici come piatti o coppe rotanti. I vantaggi di tale tipo di configurazione sono la

uniformità delle dimensioni delle gocce e gli ampi angoli di spray realizzabili. inoltre la possibilità di variare indipendentemente pressione di iniezione e velocità di rotazione del piatto (o del cono) può consentire un maggiore controllo della qualità di atomizzazione. Purtroppo l'uso di parti meccaniche in movimento rende più complicato (e dunque meno robusto) e comunque poco applicabile ai processi di combustione questo tipo di ugello.

**Quadro sinottico**

- Riportiamo nel seguente quadro sinottico i vari meccanismi di atomizzazione possibili in corrispondenza delle diverse geometrie delle strutture liquide e delle possibili forze agenti su di esse.


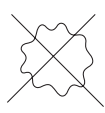
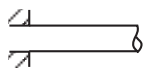
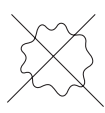
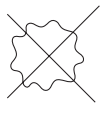
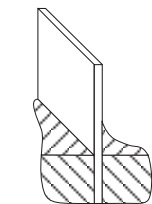
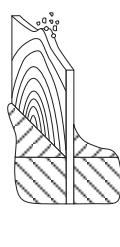

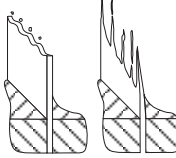




	Tensione Superficiale + forze viscoso liquido + eccitazioni interne piccole		Tensione Superficiale + forze viscoso liquido + forze pressione di eccitazione + eccitazioni interne(turb, cav.)	Tensione Superficiale + (forze viscoso liquido) + forze pressione deformanti + eccitazioni interne(turb, cav.)	Tensione Superficiale + forze viscoso esterne + eccitazioni interne(turb, cav.)
	$\frac{\lambda}{\pi D} = \sqrt{2}$ Rayleigh $\frac{\lambda}{\pi D} = \sqrt{2(1+3z)}$			$We = \frac{\rho_g v^2 D}{\sigma} > 12$ $t_b = \sqrt{\frac{\rho_l D^3}{\sigma}}$	$\frac{We}{\sqrt{Re}} > 0.5$ $t_{rot} = \frac{D}{v} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$
	Rayleigh sul bordo $z \gg 1$	Weber $\frac{\lambda}{\pi D} = \sqrt{2(1+3z)e^{-AWe}}$		turbolenza interna	- $\theta \propto \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}}$ - cavitazione - $L_{breakup}?$
					
	riduzione geometrica della lamina	Onde semicircolari - cuspidi	pressure atomizer	air assisted/ airblast	internal mixing

Fig. 5.26

### **Riferimenti e note**

Una trattazione da un punto di vista applicativo delle problematiche della atomizzazione è reperibile in:

Lefebvre A.H., *Atomization and Sprays*, Hemisphere Publishing Co., New York, 1989.

Bayvel L., Orzechowski Z., *Liquid Atomization*, Taylor & Francis, Washington D.C., 1993.

