

ATOMIZZAZIONE DEI COMBUSTIBILI LIQUIDI

ENERGIA E COMBUSTIBILI LIQUIDI

- La produzione di energia da combustione di **combustibili liquidi** copre approssimativamente **un terzo della domanda mondiale** corrente di energia.
- Nonostante negli ultimi anni tale percentuale sia in **costante declino**, i combustibili liquidi rimangono largamente la **principale fonte di energia per il trasporto** (terrestre, aereo e marittimo) ed una significativa percentuale delle fonti di energia per la generazione di elettricità.
- **Questo scenario non dovrebbe vedere significativi cambiamenti nel medio periodo.**
- Tali considerazione danno una misura chiara della **rilevanza della ricerca e dello sviluppo di processi e tecnologie di alimentazione dei combustibili liquidi** ai sistemi di combustione per l'avanzamento della scienza e delle tecnologie della combustione.

AREA SUPERFICIALE

- La necessità di frammentare un liquido nasce, in genere, dalla opportunità di **aumentare la superficie dell'interfaccia liquido-gas** al fine di migliorare l'efficienza dello **scambio di calore, materia e quantità di moto** tra le due fasi e, dunque, dell'intero processo.
- Nel campo della **combustione di liquidi è necessario** procedere ad una preventiva frammentazione del liquido al fine di garantire la **compatibilità dei tempi di vaporizzazione e miscelamento del combustibile** con l'aria di combustione **con i tempi di residenza** caratteristici dei processi tecnologici.
- Questo processo riveste una importanza **cruciale** per la realizzazione di processi di combustione caratterizzati da un **accettabile grado di efficienza e di emissione di inquinanti**.

ATOMIZZAZIONE E FRAMMENTAZIONE

- Nella pratica è di uso comune il termine **atomizzazione** per indicare la separazione di un volume liquido che conduce alla formazione di una dispersione (più o meno fine) di particelle liquide (gocce).
- Letteralmente il termine atomizzazione richiama una frammentazione molto spinta (fino al livello degli atomi) del liquido.
- In realtà il termine **frammentazione** appare più appropriato a descrivere il processo fisico e andrebbe più propriamente utilizzato per indicare l'insieme dei processi fisici che portano alla disgregazione di un volume liquido in particelle più piccole.
- A causa della oramai largamente accettata consuetudine tecnica di usare il termine **atomizzazione** esso sarà usato nel seguito per fare riferimento alle **tecnologie ed ai sistemi** utilizzati nella frammentazione di liquidi. Facendo riferimento ai **processi fisici** coinvolti nella disgregazione di un volume liquido si farà uso del più appropriato termine di **frammentazione**.

DIMENSIONI E VELOCITÀ DELLE GOCCE

- La necessità, già richiamata in precedenza, di **incrementare l'area superficiale** di un combustibile liquido al fine di garantire efficienti processi di scambio di energia e materia implica la generazione, a partire da un volume iniziale di liquido, di un grande numero di gocce di **dimensioni le più piccole possibile**.
- Difatti nella pratica comune la **qualità** di un processo di atomizzazione è misurata dalla **funzione di distribuzione delle dimensioni** delle gocce realizzata: a dimensioni più piccole corrisponde una qualità migliore del processo.
- In generale è anche desiderabile avere una funzione di distribuzione caratterizzata da una varianza bassa. Nelle applicazioni di combustione ciò è legato principalmente alla necessità di **evitare** code di **gocce di dimensioni molto grandi** che possono facilitare la formazione di inquinanti e ridurre l'efficienza generale del processo di combustione.
- Un altro parametro interessante ai fini del processo di combustione è anche la **energia cinetica residuale** associata alle gocce per la sua rilevanza sulla fluidodinamica generale del processo di combustione. In particolare è di rilievo la funzione di distribuzione congiunta di dimensioni e velocità delle gocce.

MODELLO CONCETTUALE DELLA FRAMMENTAZIONE

- Le dimensioni finali delle gocce di uno spray sono determinate dal meccanismo di frammentazione della struttura liquida originale (**rottura primaria - primary breakup**), dall'eventuale ulteriore frammentazione delle gocce primarie (**rottura secondaria - secondary breakup**) e dai possibili meccanismi di coalescenza delle gocce in seguito a urti tra di esse.
- La **rottura primaria** di una struttura liquida è il **passo iniziale** di ogni processo di frammentazione. La definizione di un modello fisico per la rottura primaria è praticamente irrealizzabile e sono generalmente adottati solo modelli concettuali e/o statistici per la sua descrizione.
- Il modello concettuale più comune è basato sulla ipotesi di un **meccanismo a cascata di frammentazione** di gocce (a partire da una o più gocce iniziali) di dimensioni progressivamente più piccole. Questo approccio si ispira al modello di frammentazione a cascata di particelle solide proposto da Kolmogorov.
- Il raggiungimento del **limite finale della cascata** si ottiene al raggiungimento di un **bilanciamento tra le forze disgregatrici** (principalmente dovute a stress aerodinamici indotti dalla velocità relativa all'interfaccia liquido-gas) **e la pressione capillare** che si viene a generare in corrispondenza di tale interfaccia.

LA FISICA DELLA FRAMMENTAZIONE

- Nell'ambito dello schema concettuale illustrato in precedenza, la **rottura di una struttura liquida** (goccia, getto, lamina) avviene a causa dell'instaurarsi all'interfaccia tra liquido e gas di **oscillazioni ondose** che, in particolari condizioni, possono amplificarsi fino a portare alla disgregazione della struttura stessa o, comunque, favoriscono il distacco di porzioni di liquido da essa.
- Energia cinetica, dovuta alla velocità di trasporto della struttura liquida o di una corrente gassosa che interagisce con essa, o energia meccanica, fornita per mezzo di dispositivi vibranti o in movimento, viene utilizzata al fine di promuovere tali oscillazioni e quindi il processo di frammentazione.
- Nel processo di frammentazione **le forze capillari**, legate alla tensione superficiale, e le **forze inerziali**, dovute alla velocità relativa tra le due fasi, sono le **cause** dell'instaurarsi delle oscillazioni.
- Di contro la **viscosità** agisce in maniera da **ridurre le instabilità** della struttura liquida ritardandone la sua disgregazione e incrementando le dimensioni delle strutture formate.

TENSIONE SUPERFICIALE: DEFINIZIONI

La tensione superficiale (σ) è la **forza per unità di lunghezza che si esercita nel piano tangente alla superficie di discontinuità liquido-gas su un arbitrario segmento della superficie**. La tensione superficiale si misura in N/m.

Alternativamente la tensione superficiale può essere definita come il **lavoro per unità di area necessario per realizzare un'incremento infinitesimo di una superficie** liquido-gas a partire dallo stato di equilibrio. Questo lavoro viene immagazzinato dal liquido come una energia potenziale (superficiale).

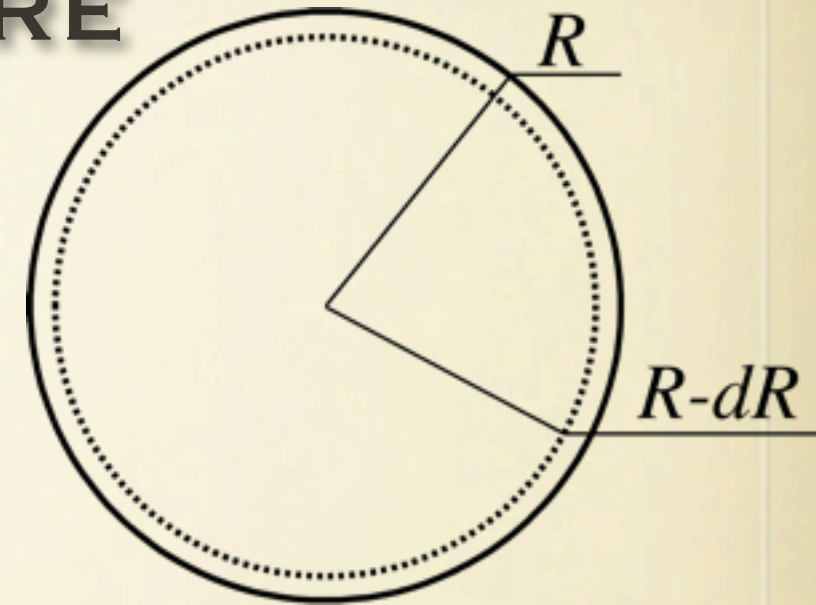
In pratica, in un liquido, la **tensione superficiale** e la **densità di energia superficiale coincidono**.

E' evidente che da un punto di vista energetico l'**energia superficiale** di un volume di liquido tende ad essere la **minima possibile**. Per tale motivo una goccia di liquido tende ad assumere, in assenza di perturbazioni esterne, una forma sferica.

PRESSIONE CAPILLARE

- Per una sfera di raggio R l'energia superficiale sarà:

$$\sigma \cdot 4\pi R^2$$



- per una riduzione del raggio della sfera pari a dR dovuto all'azione della tensione superficiale, sarà necessario fornire una energia pari a: $\Delta E = 8\pi R \sigma dR$

- All'equilibrio la riduzione di energia superficiale relativa alla riduzione del raggio sarà bilanciata da una variazione di pressione ΔP all'interfaccia. Il lavoro eseguito dalla tensione superficiale per bilanciare tale pressione sarà: $L = \Delta P 4\pi R^2 dR$

- Ne segue che: $L = \Delta E \Rightarrow \Delta P 4\pi R^2 dR = 8\pi R \sigma dR \Rightarrow \Delta P = \frac{2\sigma}{R}$

EQUAZIONE DI YOUNG-LAPLACE

L'**equazione di Young-Laplace** permette di calcolare la pressione capillare che si genera su di una interfaccia liquido-gas a causa della tensione superficiale.

Per una generica interfaccia l'espressione della equazione di Young-Laplace è:

$$\Delta P = \sigma \nabla \cdot \vec{n} = 2\sigma H = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Dove R_1 ed R_2 sono i raggi dell'ellissoide osculatore nel punto considerato.

**Le forze capillari crescono al
decrescere delle dimensioni caratteristiche delle
interfacce**

PRESSIONE CAPILLARE

- per una sfera $\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$

- per un cilindro $\Delta P = \frac{\sigma}{R}$

VALORE DELLA TENSIONE SUPERFICIALE

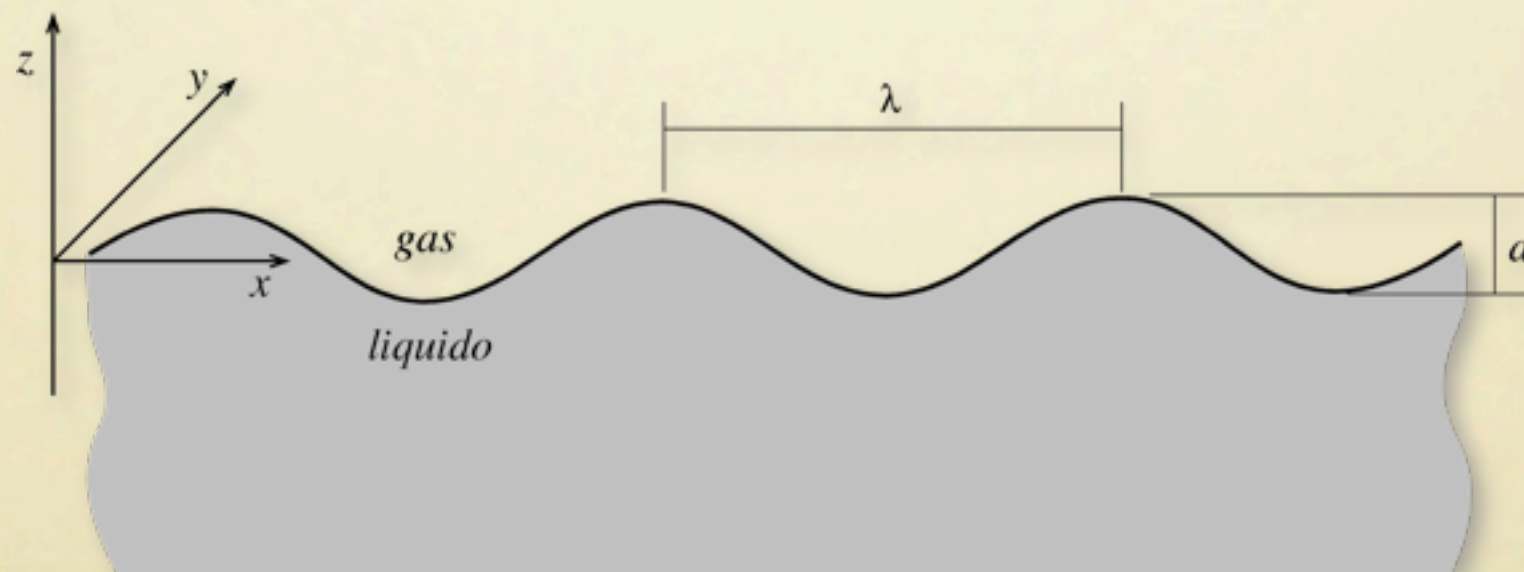
- I valori della tensione superficiale per le principali sostanze sono generalmente disponibili in forma tabellare.
- Esistono, inoltre, alcune correlazioni che permettono di determinare la tensione superficiale di sostanze organiche. La più famosa è quella proposta da Macleod nel 1923:
$$\sigma^{1/4} = \mathcal{P}(\rho_l - \rho_v)$$
- Dove ρ_l e ρ_v sono le densità molari del liquido e del vapore.
- La quantità $\mathcal{P}$ è detta Parachor ed è tabellata per i vari gruppi funzionali. Applicando una semplice regola di additività è possibile calcolare il valore di σ per una vasta classe di sostanze.
- In generale il valore della tensione superficiale decresce al crescere della temperatura fino ad annullarsi in corrispondenza del punto critico.

VALORE DELLA TENSIONE SUPERFICIALE

	TENSIONE SUPERFICIALE [N/M]
ACQUA	0,073
ALCANI	0,020-0,028
ALCOOLI	0,022-0,025

OSCILLAZIONI ONDOSE E FRAMMENTAZIONE

- Il meccanismo di rottura di una goccia, o di un getto o di una lamina liquida, è legato all'instaurarsi di perturbazioni oscillatorie (onde superficiali) all'interfaccia liquido-gas che, in opportune condizioni, dipendenti dalle proprietà del liquido e dalla geometria dell'interfaccia, possono essere amplificate fino a portare al distacco di legamenti, gocce o lamine liquide che permettono la rimozione di liquido dall'interfaccia.
- Una perturbazione ondosa ad un'interfaccia liquido-gas viene sostenuta dalla **energia cinetica** dovuta alla differenza di velocità tra le fasi all'interfaccia. Le **forze capillari** e le **forze gravitazionali** agiscono come forze di reazione vincolare mentre la **viscosità** del liquido può dare luogo a fenomeni dissipativi che smorzano le onde.



OSCILLAZIONI ONDOSE

- Un approccio semplificato al problema della frammentazione dei liquidi basato su una analisi dei bilanci delle principali forze coinvolte può consentire di ricavare utili indicazioni sugli andamenti generali e le lunghezze caratteristiche nonché sulla dipendenza dalle proprietà del liquido.
- Le **forze per unità di volume** agenti all'interfaccia liquido-gas, in assenza di forze esterne, sono:
 - forze di inerzia: $F_I \propto \frac{\rho_l V^2}{L}$
 - forze capillari: $F_C = \frac{\sigma}{L^2}$
 - forze di galegiamento: $F_G = \Delta\rho \ g$
 - forze viscosi: $F_V \propto \frac{\mu V}{L^2}$
- In tali espressioni, L rappresenta la dimensione caratteristica della struttura liquida considerata e V la velocità con cui si muove l'oscillazione ondosa.

LUNGHEZZA CAPILLARE

- E di interesse verificare in quale condizione le due forze resistenti (capillare e gravitazionale) prevalgono.
- Il numero adimensionale che rende conto del bilancio delle forze di buoyancy e di quelle capillari è il **numero di Eötvös** (o di Bond)

$$Eo = \frac{\Delta\rho \, g L^2}{\sigma}$$

- Per Eo significativamente maggiore di 1 si ha una prevalenza delle forze di galleggiamento rispetto a quelle capillari. Viceversa per Eo molto inferiore all'unità si ha la prevalenza delle forze capillari.

- Un risultato corrispondente si ricava anche imponendo l'uguaglianza tra le forze capillari e le forze di galleggiamento:

$$F_c = \frac{\sigma}{L^2}$$

$$F_G = \Delta\rho \, g$$

- da cui si ricava la lunghezza caratteristica:

$$L_c = \sqrt{\frac{\sigma}{\Delta\rho \, g}}$$

LUNGHEZZA CAPILLARE

- L_c (detta lunghezza capillare) è **dell'ordine del centimetro** per un tipico combustibile liquido a temperatura e pressione standard.
- Le perturbazioni ondose di interfacce liquido-gas interessanti in fenomeni pratici di atomizzazione sono mirati alla realizzazione di dispersioni di **gocce con dimensioni caratteristiche ben inferiori al mm.**
- Per tale motivo possiamo affermare che le oscillazioni ondose coinvolte in un processo di frammentazione liquida di interesse sono **controllate dagli effetti della tensione superficiale.**

VELOCITÀ DI FASE

- Ai fini della comprensione dei comportamenti dinamici delle oscillazioni di una superficie è rilevante introdurre il concetto di **velocità di fase** per una perturbazione ondosa ad un'interfaccia liquido-gas. La velocità di fase è essenzialmente la velocità con cui si sposta sull'onda un punto a fase costante.
- Per un'onda capillare (cioè per lunghezze d'onda, λ , significativamente minori di λ_c) la velocità di fase vale:

$$v_{fase} = \sqrt{\frac{2\pi\sigma}{\lambda \Delta\rho}}$$

- E' utile notare che la **velocità cresce al decrescere della lunghezza d'onda**. In altre parole onde più corte si muovono più velocemente di onde più lunghe e le sorpassano.



EFFETTO DELLA VISCOSITÀ

- Un **effetto limitante** alla prevalenza di onde con piccola lunghezza d'onda è connesso con l'effetto delle **forze viscosi**.
- Infatti poichè le forze viscosi e quelle dovute alla tensione superficiale sono proporzionali, rispettivamente a:

$$F_C \propto \frac{\sigma}{L^2} \qquad F_V \propto \frac{\mu V}{L^2}$$

- ne segue che **una oscillazione capillare non è smorzata dalla viscosità se la sua lunghezza d'onda è sufficientemente maggiore di una lunghezza d'onda di dissipazione capillare** data da:

$$\lambda_{DC} = \frac{2\pi\mu^2}{\sigma \Delta\rho}$$

- Per lunghezze d'onda paragonabili e/o inferiori a questa la viscosità smorza in maniera progressivamente più efficace le oscillazioni.

LUNGHEZZA DI DISSIPAZIONE CAPILLARE

- Infatti, le forze viscosi saranno trascurabili se:

$$F_v \ll F_c \Rightarrow \frac{\mu V}{L^2} \ll \frac{\sigma}{L^2} \Rightarrow \mu^2 \frac{2\pi\sigma}{\lambda \Delta\rho} \ll \sigma^2 \Rightarrow \lambda \ll \lambda_{DC} = \frac{2\pi\mu^2}{\sigma \Delta\rho} V$$

NUMERO DI OHNESORGE

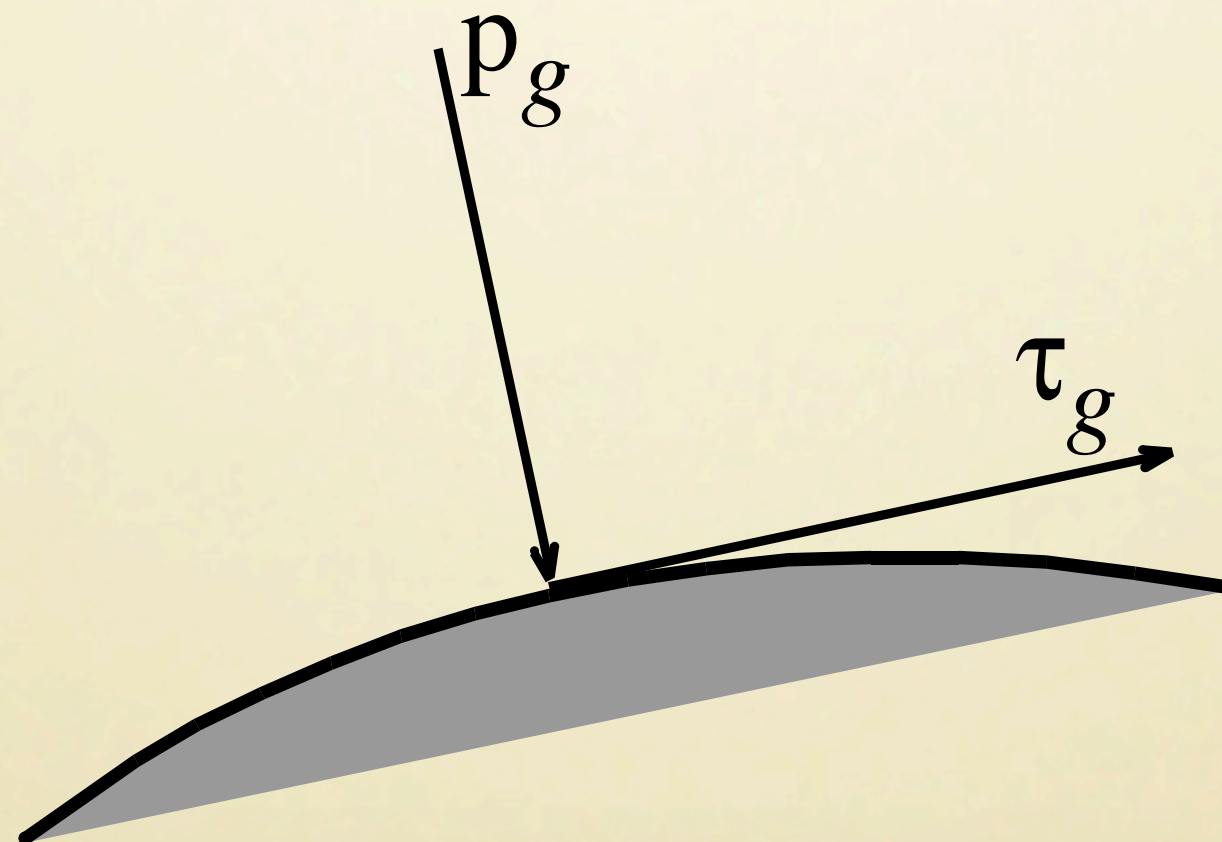
- In questo senso l'effetto di una viscosità crescente è la progressiva scomparsa delle gocce più piccole a causa della sostanziale impossibilità di deformare la superficie con raggi di curvatura locali sufficientemente piccoli da permettere la formazione di gocce o filamenti liquidi di dimensioni piccole.

$$Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\Delta\rho} \sigma L}$$

- Il numero adimensionale che si può usare per dare una valutazione rapida della rilevanza degli effetti viscosi è il numero di **Ohnesorge**:

FORZE AERODINAMICHE

- Per velocità relative tra liquido e gas molto piccole (~ 1 m/s) è possibile considerare solo forze interne al liquido. Ciò consente di studiare i meccanismi di rottura dell'interfaccia in maniera semplificata.
- A velocità maggiori di 1 m/s diventano importanti le **forze aerodinamiche** che si esercitano sull'interfaccia e che, **al crescere della velocità**, diventano le **forze dominanti** dei processi di frammentazione.



IL NUMERO DI WEBER

- Le pressioni aerodinamiche sono proporzionali alla **pressione dinamica del gas**:

$$\frac{1}{2} \rho_g v^2$$

- L'importanza relativa delle forze aerodinamiche rispetto a quelle capillari è data dal valore del numero di Weber, definito come:

$$We_g = \frac{\rho_g v^2}{\sigma / D} = \frac{\rho_g v^2 D}{\sigma}$$

- Il numero di **Weber** è un **indice della possibilità di frammentare** un liquido molto usato nella pratica tecnica.

WEBER CRITICO

- E' possibile fare una stima del valore critico del numero di Weber oltre il quale la rottura di una goccia diventa possibile.
- Se consideriamo la condizione di equilibrio tra le forze aerodinamiche e le forze capillari:

$$C_d \frac{\pi D^2}{4} \frac{\rho_g v^2}{2} = \pi D \sigma$$

⇓

$$We_g^c = \frac{\rho_g v^2 D}{\sigma} = \frac{8}{C_d}$$

CONSIDERAZIONI RIASSUNTIVE

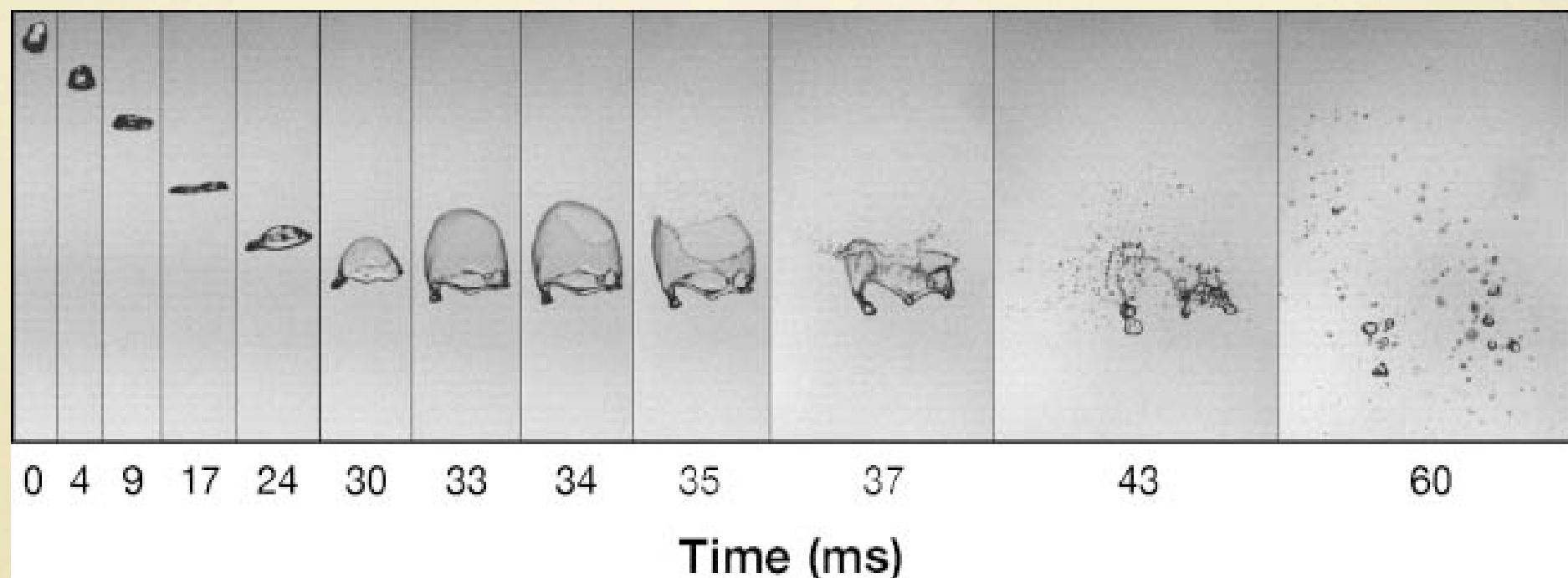
- Dalle considerazioni fatte finora appare chiaro come le principali caratteristiche del mezzo che ne influenzano la sua frammentazione sono in ordine decrescente di importanza:
 - tensione superficiale
 - viscosità
 - densità
- Le prime due decrescono significativamente al crescere della temperatura.
 - Per tale motivo nella pratica industriale è comune l'uso di sistemi di preriscaldamento di combustibili in particolare quando essi abbiano viscosità tali da ostacolare significativamente la frammentazione (Oh maggiori di 1).
 - Per quanto riguarda la densità la sua influenza è tipicamente meno rilevante delle altre proprietà nel determinare l'andamento del processo.

CONSIDERAZIONI RIASSUNTIVE

- L'effetto della pressione ambiente sul processo di frammentazione può essere compreso considerando che il numero di **Weber dipende linearmente dal valore della densità** del gas.
 - Per tale motivo è lecito attendersi un **effetto benefico della pressione sul processo di frammentazione** che però può essere reso meno rilevante da un concomitante incremento della temperatura.
 - A **pressioni e temperature** che si avvicinano a quelle **critiche** per il liquido da atomizzare la fenomenologia può differire anche molto da quanto succede in condizioni standard.
- In generale in tali condizioni gli effetti idrodinamici diventano molto più efficienti in ragione della rapida de-crescita della tensione superficiale e della bassa viscosità, nel deformare l'interfaccia liquido-gas dando luogo a processi di frammentazione superficiali molto rapidi.
 - E' bene tenere, però, presente che in tali condizioni i processi di evaporazione non sono necessariamente favoriti ed il vantaggio finale per i processi di combustione può non essere così marcato (tenendo presente che anche i tempi cinetici sono più brevi).

BREAKUP SECONDARIO

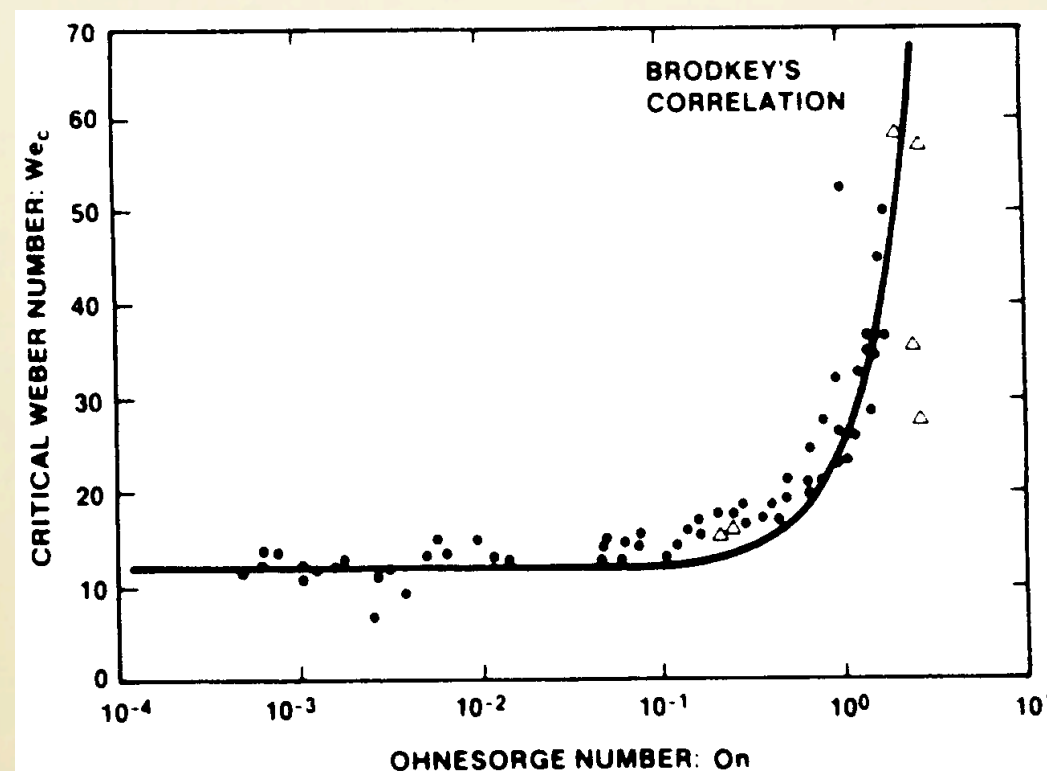
- Il fenomeno della frammentazione secondaria di gocce liquide viene molto spesso indicato come il processo chiave in molti processi di frammentazione.
- Esso rappresenta il punto centrale di un modello a cascata della frammentazione nel quale le rotture delle gocce, che avvengono attraverso pochi meccanismi elementari, si susseguono fino ad arrivare a dimensioni finali dei frammenti liquidi caratterizzate da un We inferiore ad un determinato valore critico.



WEBER CRITICO

- Il valore critico del numero di Weber è intorno a 12 nel caso di viscosità bassa o trascurabile.
- Per valori di viscosità maggiori tale valore va corretto da una correlazione del tipo:

$$We^c = 12 \left(1 + 1.077 \cdot Oh^{1.6} \right)$$

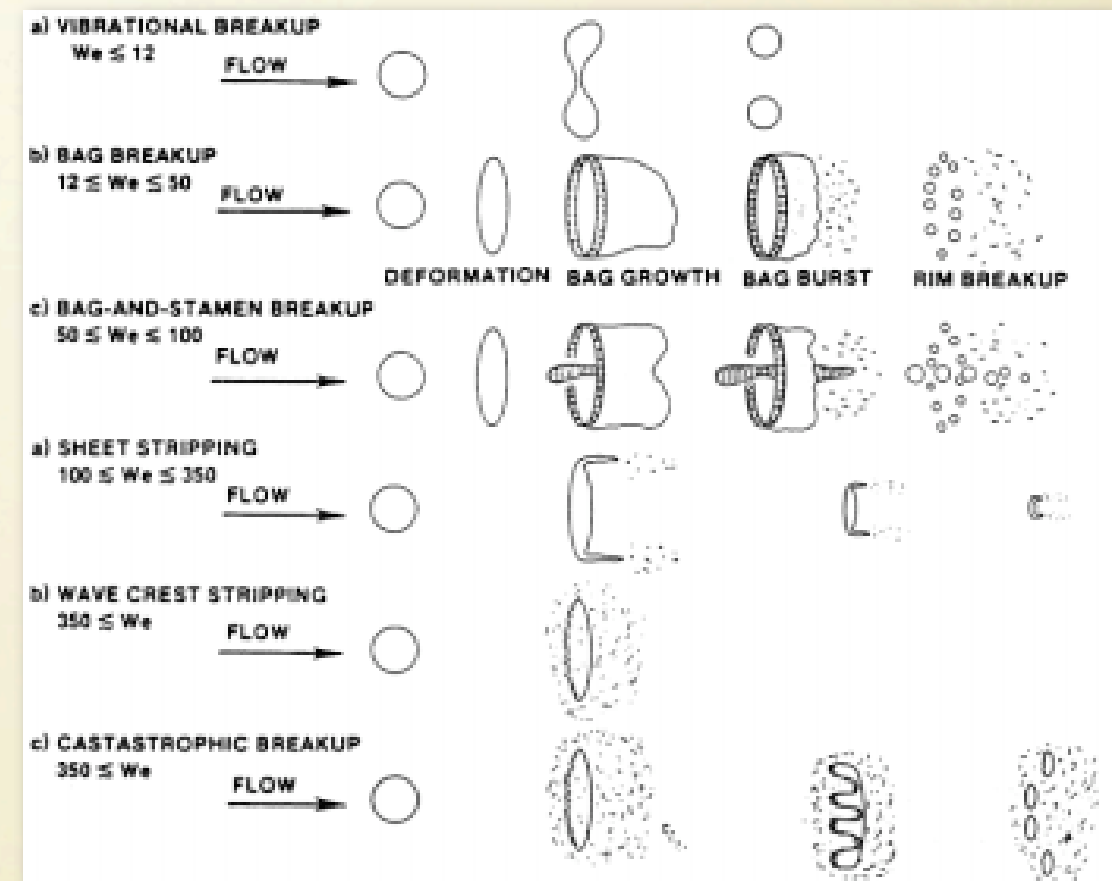


MECCANISMI DI FRAMMENTAZIONE DI GOCCE

- E' molto popolare, nella formulazione di modelli numerici dell'atomizzazione, una classificazione dei fenomeni di frammentazione delle gocce in funzione del numero di We, elaborata da Pilch e Erdman.

- In tale schema si individuano:

- rotture a sacchetto
- rotture ad ombrello
- rottura per strappamento
- rotture catastrofiche



- Tale classificazione non va accettata in maniera acritica in quanto la successione dei regimi (ed anche la reale possibilità del loro manifestarsi) è fortemente dipendente dalle proprietà del liquido e, in particolare, dalla viscosità.

LA RILEVANZA DELL'ATOMIZZAZIONE PRIMARIA

- Un'ulteriore cura da porre nella elaborazione di modelli numerici dell'atomizzazione riguarda la scelta di un accurato sotto-modello del processo di atomizzazione primaria.
- Difatti, nella pratica è comune assegnare al sottomodello di atomizzazione secondaria la responsabilità di ricostruire una distribuzione finale della funzione di distribuzione delle dimensioni e delle velocità delle gocce accurata.
- E' necessario tenere, però, presente differenti processi attivi nel processo di preparazione della miscela ingibibile a partire dal sistema di iniezione possono avere dipendenze funzionali dalle dimensioni delle gocce anche significativamente differenti.
 - Ad esempio, le forze aerodinamiche che agiscono su una particella liquida dipendono dal quadrato delle dimensioni delle gocce mentre la massa delle gocce dipende dal cubo della dimensione.
 - Per questa ragione la interazione tra dinamica delle gocce e loro velocità di vaporizzazione cambia in dipendenza dalle dimensioni delle gocce.
- Una errata valutazione delle dimensioni delle gocce formate nel processo di atomizzazione primaria (ad esempio la rottura di un getto o una lamina liquida) può produrre risultati finali incorretti se i processi di trasporto di massa e quelli di trasporto di calore evolvono su scale spaziali e temporali comparabili.

COALESCENZA

- Un ultima notazione va fatta riguardo i fenomeni di **coalescenza** di gocce.
- Perchè si abbia un fenomeno di coalescenza è necessario che si abbia un **impatto fisico tra due gocce con opportune velocità relativa, diametro relativo e angolo di impatto.**
- Nella pratica la collisione è sicuramente un fenomeno che è favorito nelle regioni molto dense di uno spray e che, per questo motivo, la disponibilità di dati sperimentali è alquanto incerta.
- In definitiva nella maggior parte dei sistemi pratici di combustione di liquidi il fenomeno di coalescenza viene trascurato o tenuto in conto con fattori correttivi empirici.

FUNZIONE DI DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI

- Il processo di disintegrazione di un getto liquido è un processo stocastico che dà 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 $p(D)$ o dalla sua funzione di distribuzione delle probabilità $P(D)$ che sono legate dalla relazione:

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

DIAMETRI MEDI

- 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 definiscono i diametri medi $D_{i,j}$ come:

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

DIAMETRI MEDI

- Esempi di tali diametri medi sono
 - $D_{1,0}$ che è il valore medio statistico delle dimensioni di tutte le gocce dello spray:
 - $D_{2,0}$ 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 dello spray
 - $D_{3,0}$ è il diametro di una goccia il cui volume se moltiplicato per il numero di gocce dello spray dà il valore del volume totale dello spray
- Il momento $D_{3,2}$, 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 calore.

FUNZIONI DI DISTRIBUZIONE DELLE DIMENSIONI

- 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 si tende a ricondurre tali funzioni di distribuzione a delle forme canoniche predefinite.
- Varie classi di funzioni di distribuzioni sono utilizzate e quella più adatta a descrivere il particolare spray considerato va di volta in volta individuata.

DISTRIBUZIONE CONGIUNTA DI DIMENSIONI E VELOCITÀ

- La completa conoscenza dello stato di uno spray implica il poter disporre della funzione di distribuzione congiunta delle dimensioni e delle velocità delle gocce in ogni punto dello spray.
- Tale distribuzione è ovviamente di difficile determinazione in ragione della complessità del sistema e delle limitazioni degli strumenti diagnostici disponibili.

EFFICIENZA DELL'ATOMIZZAZIONE

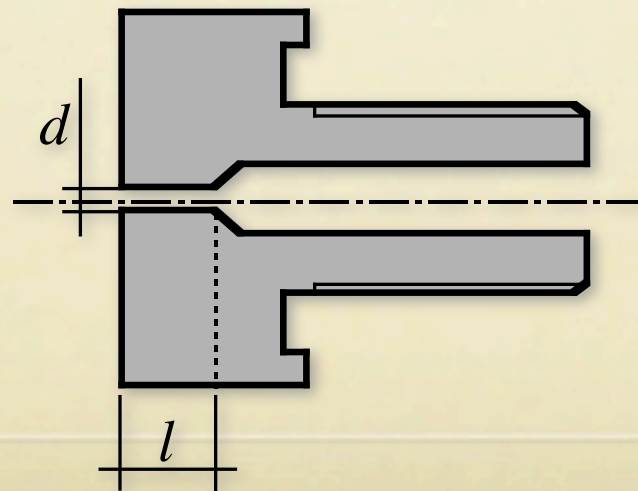
- Dalle quanto illustrato in precedenza è chiaro che l'atomizzazione è un processo complesso di trasferimento di energia al liquido sia in termini di energia superficiale che cinetica dei frammenti liquidi prodotti.
- **L'efficienza del trasferimento in energia superficiale è molto bassa.**
- La rilevante componente di **energia cinetica residuale** può comunque essere vantaggiosamente utilizzata per **favorire la dispersione del liquido** nella corrente gassosa.
- In termini più generali l'**ottimizzazione** di un sistema di atomizzazione non può essere basata **solo sulla scelta del più opportuno atomizzatore** ma deve tenere in conto anche l'**accoppiamento con il campo fluidodinamico dell'aria** di combustione.

CLASSIFICAZIONE DEGLI ATOMIZZATORI

- Una maniera semplice di classificare i molteplici sistemi di atomizzazione commercialmente disponibili è basata sul meccanismo di trasferimento dell'energia al liquido:
 - 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.
 - Ugelli nei quali l'energia cinetica di rottura viene trasferita al liquido per mezzo dell'**interazione con un flusso gassoso** (aria o vapore).
 - Ugelli nei quali l'energia cinetica è trasferita direttamente al liquido per mezzo di **sistemi meccanici**.
- Esistono, infine, altre classi di atomizzatori che non rientrano in questa classificazione generale e che sfruttano sistemi acustici, piezoelettrici o ultrasonici per indurre oscillazioni controllate al liquido. In tal modo essi possono garantire un più efficace controllo del processo e delle dimensioni e velocità finali delle gocce.

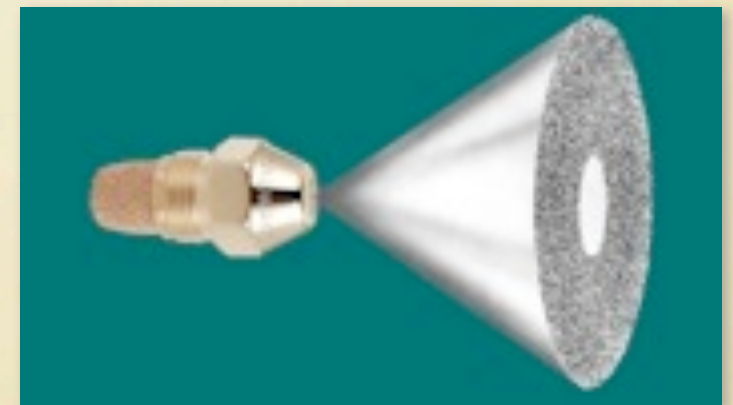
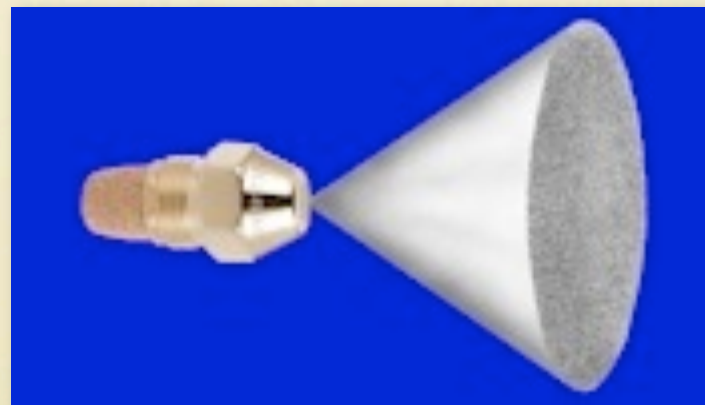
ATOMIZZATORI A PRESSIONE: PLAIN NOZZLES

- I plain nozzles sono gli ugelli più semplici possibili. Essi sono essenzialmente costituiti da un orifizio circolare attraverso cui viene fatto fluire il liquido.
- Il buon funzionamento di tali ugelli si ha in corrispondenza di piccole sezioni di uscita e alti salti di pressione.
- La velocità di uscita è proporzionale alla radice quadrata del salto di pressione.
- Un parametro che viene spesso usato per dare un'idea della natura del flusso nell'orifizio (il grado di turbolenza e l'eventuale presenza di fenomeni di cavitazione) è il rapporto tra la lunghezza dell'orifizio ed il suo diametro (l/d). A tale riguardo è anche importante la geometria della sezione di imbocco.



ATOMIZZATORI A PRESSIONE: SIMPLEX NOZZLES

- Negli 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°).
- Anche 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.
- Si distinguono simple nozzle a cono vuoto (hollow) o pieno (solid).



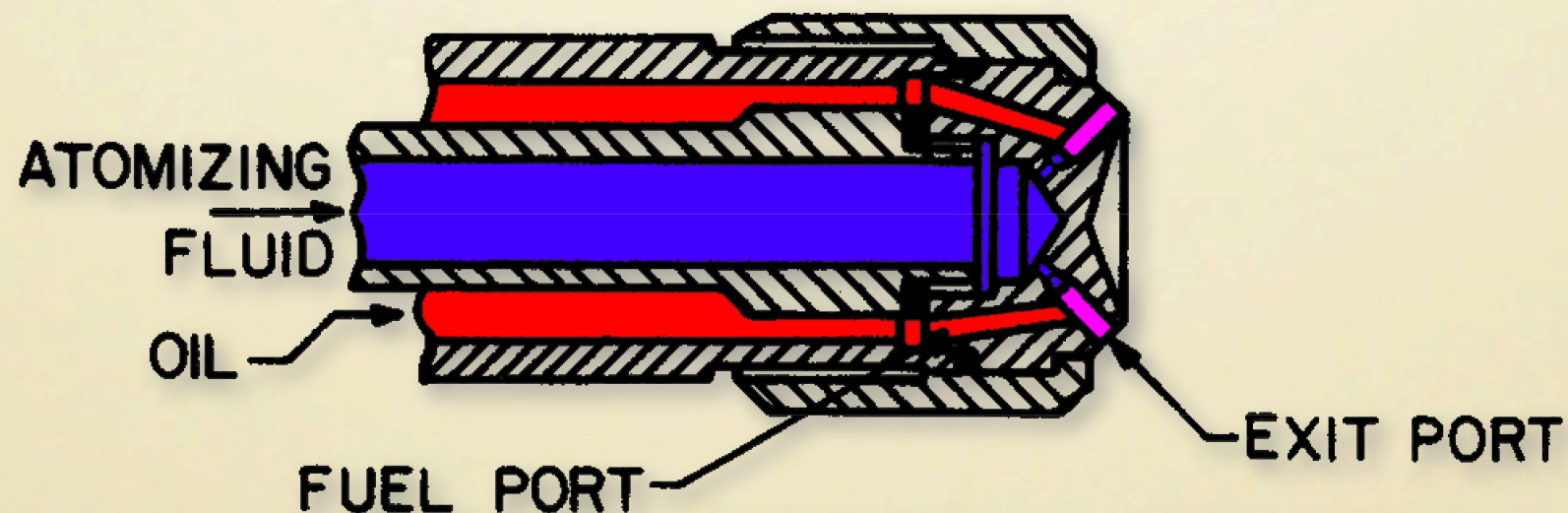
ATOMIZZATORI A PRESSIONE: FAN SPRAY NOZZLES

- Una categoria molto usata in processi industriali (rivestimenti, verniciatura etc.) di ugelli è costituita dai “fan nozzles”.
- In essi attraverso una apposita sagomatura dell’apertura di uscita e dei condotti di adduzione del liquido si generano degli spray sostanzialmente piatti (a forma di lamina liquida).



ATOMIZZATORI ASSISTITI AD ARIA

- Con tali ugelli si possono ottenere spray molto fini anche a partire da liquidi con alta viscosità.
- Si distingue tra ugelli assistiti ad aria (“**air-assisted**”) e a corrente d'aria (“**air-blast**”).
 - 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.



ATOMIZZATORI ASSISTITI AD ARIA

- Gli atomizzatori assistiti ad aria danno buone qualità di atomizzazione in un ampio campo di portate ma oltre ad una maggiore complessità presentano alcuni inconvenienti.
 - Richiedono una fonte supplementare di aria ad alta pressione che può, in certe applicazioni, non essere disponibile
 - 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.