

# **CAPITOLO 5**

# **ATOMIZZAZIONE**

**prof. A.Cavaliere**  
**ing. Raffaele Ragucci**

**SOMMARIO**

<b>LEZIONE 16. ATOMIZZAZIONE: DEFINIZIONI E PRINCIPI GENERALI.....</b>	<b>207</b>
<i>INTRODUZIONE.....</i>	<i>207</i>
<i>TENSIONE SUPERFICIALE ED ENERGIA SUPERFICIALE .....</i>	<i>208</i>
<i>EFFICIENZA DELL'ATOMIZZAZIONE .....</i>	<i>211</i>
<i>DETERMINAZIONE DEL VALORE DELLA TENSIONE SUPERFICIALE.....</i>	<i>212</i>
<i>ONDE SUPERFICIALI.....</i>	<i>214</i>
<i>GRUPPI ADIMENSIONALI.....</i>	<i>217</i>
<i>CLASSIFICAZIONE DEI REGIMI DI ATOMIZZAZIONE CON LA TEMPERATURA.....</i>	<i>218</i>
<i>RIFERIMENTI E NOTE.....</i>	<i>220</i>
<i>Appendice A 16 Viscosità di alcuni liquidi notevoli.....</i>	<i>221</i>

## LEZIONE 16. ATOMIZZAZIONE: DEFINIZIONI E PRINCIPI GENERALI

### *Introduzione*

In un processo di combustione la necessità di atomizzare un liquido nasce 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.

Lo studio dei processi di atomizzazione, ovvero della teoria e della tecnica di frammentazione di un liquido in particelle, può essere considerata una vera e propria disciplina a se stante.

Infatti, le applicazioni in cui si fa uso di dispositivi di atomizzazione vanno ben oltre i soli processi di combustione. Spray di liquidi sono utilizzati oltre che in tali processi (per iniettare il combustibile in bruciatori di fornaci, turbine, motori a combustione interna, razzi, ecc.) anche in agricoltura, medicina, processi di deposizione, verniciatura, sistemi di raffreddamento, ecc.

Le esigenze di tali applicazioni non sono, ovviamente, le stesse e differenti sono dunque i requisiti richiesti per una ottimizzazione dei processi e le configurazioni e le strategie impiegate per soddisfarli. La grande varietà di sistemi utilizzati nella pratica per la realizzazione di spray e la peculiare difficoltà di dare una formulazione matematica ai processi di atomizzazione in condizioni di interesse per le applicazioni rende necessario adottare un approccio largamente empirico alla trattazione dei problemi.

Nel seguito si cercherà di introdurre alcune nozioni di base e di delineare le principali problematiche che possono presentarsi nello studio o nella configurazione di un sistema di atomizzazione con particolare riguardo ai sistemi di combustione.

In questa lezione saranno introdotti alcuni concetti generali che sono utili nella comprensione generale delle problematiche legate ai processi di frammentazione di strutture liquide. Saranno inoltre definiti i parametri fisici e reologici che influenzano maggiormente lo sviluppo e l'efficacia del processo.

Nella pratica comune il processo di atomizzazione consiste nella frammentazione di strutture liquide quali getti, lamine e gocce realizzata trasformando energia (tipicamente meccanica) in energia superficiale. Il caso più semplice di un processo di atomizzazione è quello che ha luogo nella rottura di una colonna liquida all'uscita di un condotto cilindrico o di un foro. Nella esposizione sembrerebbe dunque logico cominciare a trattare tale caso e passare poi a considerare le eventuali rotture secondarie delle strutture che vengono formate nella rottura (primaria) del getto come gocce, filamenti e lamine. In realtà è sembrato più opportuno

illustrare, nella lezione 17, i processi di atomizzazione seguendo un ordine crescente di complessità che parte dalle gocce sferiche e giunge fino ai sistemi complessi passando per le strutture cilindriche e le lamine piane e coniche.

Nella lezione 18 si illustreranno i tipi principali di atomizzatore utilizzati nei sistemi pratici con riferimento ai loro campi di applicabilità ed ai criteri di scelta. Inoltre si definiranno i principali parametri sintetici utilizzati nella descrizione delle caratteristiche degli ugelli e degli spray.

### ***Tensione Superficiale ed Energia Superficiale***

La rottura di una struttura liquida (goccia, getto, lamina) avviene di solito per l'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, del getto liquido stesso o di una corrente gassosa che interagisce con esso, o energia meccanica, fornita per mezzo di dispositivi vibranti o in movimento, viene utilizzata al fine di promuovere tali oscillazioni e l'instaurarsi di un regime di atomizzazione.

In tale processo le forze capillari, legate alla tensione superficiale, e le forze inerziali, dovute alla velocità relativa tra le due fasi, sono la causa dell'instaurarsi delle oscillazioni mentre la viscosità agisce in maniera da ridurre le instabilità della struttura liquida ritardandone la sua disgregazione e incrementando le dimensioni delle strutture formate. In tal senso i parametri che intervengono in tale processo sono sostanzialmente la tensione superficiale ( $\sigma$ ), la densità del mezzo ( $\rho$ ) e la sua viscosità ( $\mu$ ).

A causa della sua rilevanza nei processi di disgregazione di strutture liquide si introdurrà nel seguito il concetto di tensione superficiale e ne verrà data una definizione operativa.

Le forze di attrazione reciproca delle molecole (forze capillari) possono essere considerate la causa dell'insorgere della tensione superficiale. Uno schema esemplificativo di tali forze è rappresentato nella Fig. 5.1.

Una molecola del liquido lontana dalla superficie di discontinuità è attirata da tutte le molecole nel suo intorno. L'insieme delle forze è disposto isotropicamente per cui la sua risultante è nulla. Al contrario una molecola sulla superficie di discontinuità viene attratta solo dalle molecole all'interno del liquido per cui la forza risultante è perpendicolare alla superficie rivolta verso il liquido. Le molecole tendono quindi ad "affondare" nel liquido e conseguentemente la superficie di discontinuità tende a ridursi. La superficie può essere

pensata come una membrana elastica in cui si esercita una tensione non proporzionale all'estensione della superficie (tensione superficiale).

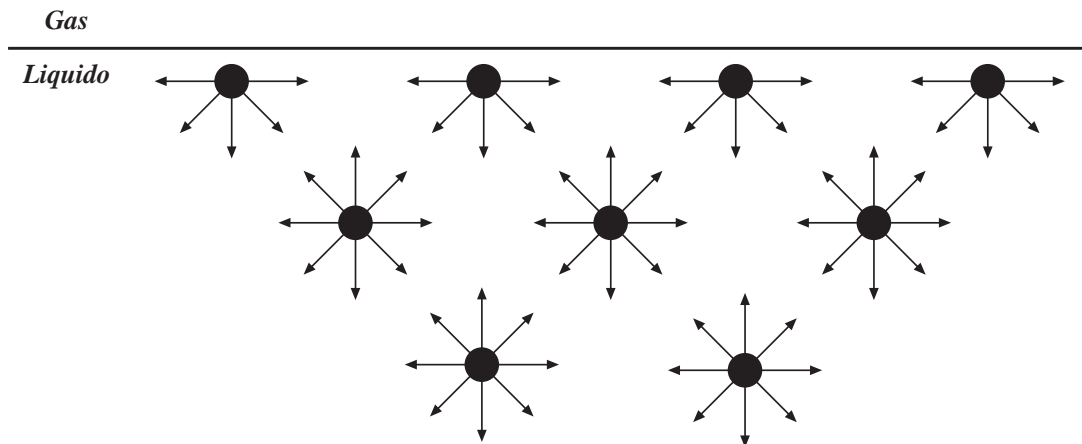


Fig. 5.1 Schema delle forze agenti all'interfaccia tra un liquido ed un gas che danno origine alla tensione superficiale.

Una definizione più formale della tensione superficiale è la seguente:

- La tensione superficiale 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.

Un semplice sistema sperimentale che permette di illustrare l'effetto della presenza della tensione superficiale (ed anche di misurarla) è costituito da una struttura rettangolare filiforme in cui un lato è scorrevole (Fig. 5.2).

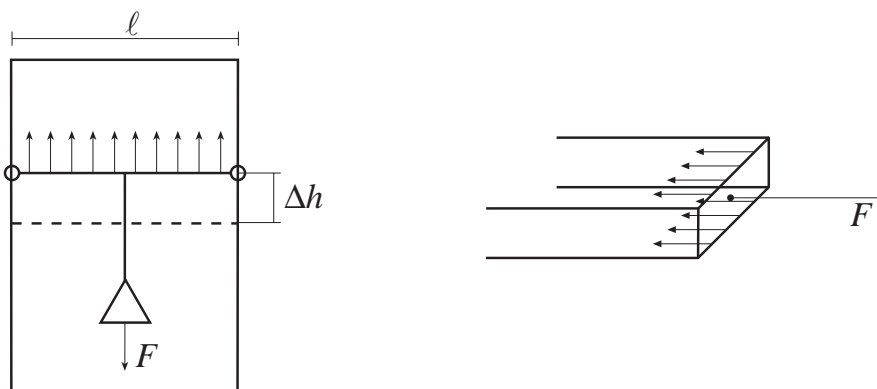


Fig. 5.2

Dopo l'immersione della struttura in un liquido al suo interno si forma una lamina che tende a ritrarsi. Se al lato scorrevole viene applicata una forza  $F$ , che si oppone alla riduzione della

lamina e che la stabilizza, si può dimostrare che  $F$  è linearmente proporzionale alla lunghezza del lato scorrevole. La costante di proporzionalità si pone uguale a due volte la tensione superficiale (perché la forza che si oppone alla tensione superficiale agisce sulle due facce della lamina). All'equilibrio la forza  $F$  è data dall'espressione:

$$F = 2\sigma\ell \quad (5.1)$$

E' possibile anche una interpretazione dell'azione della tensione superficiale in termini di energia superficiale. Consideriamo, infatti, una estensione, dovuta all'applicazione della forza  $F$ , che incrementa di  $\Delta h$  un lato del rettangolo.  $F$  compierà un lavoro:

$$F \Delta h = 2\sigma\ell \Delta h \quad (5.2)$$

da cui dividendo per l'incremento di area:

$$\frac{F\Delta h}{2\ell\Delta h} = \frac{\text{lavoro}}{\text{incremento di area}} = \sigma \quad (5.3)$$

In altri termini la tensione superficiale moltiplicata per l'area della superficie liquido-gas è l'energia di Gibbs (potenziale, libera) associata alla superficie e che, ovviamente, tenderà al minimo possibile (compatibilmente con i vincoli del sistema).

Questa relazione mostra come il lavoro di frammentazione di una struttura liquida, comportando un incremento della superficie globale, richiede la trasformazione di energia in energia superficiale in misura tanto più grande quanto maggiore è la tensione superficiale del liquido.

La reazione della tensione superficiale ad una perturbazione applicata ad una interfaccia si manifesta attraverso l'insorgere di una pressione (detta capillare) che si oppone all'azione della perturbazione. La relazione che lega tale pressione alle caratteristiche geometriche dell'interfaccia ed al valore della tensione superficiale è detta equazione di Laplace. Essa consente di calcolare la forza dovuta alla tensione superficiale. Ad esempio per una sfera di raggio  $R$  (Fig. 5.3) l'energia superficiale sarà  $\sigma 4\pi R^2$ .

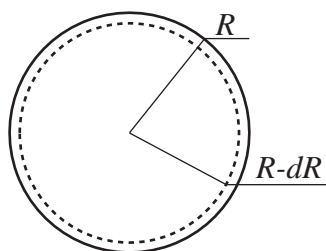


Fig. 5.3

Se consideriamo una riduzione del raggio della sfera di  $dR$  dovuto all'azione della tensione superficiale, la variazione di energia associata sarà  $8\pi R \sigma dR$ . All'equilibrio la riduzione di energia superficiale relativa alla riduzione del raggio sarà bilanciata da una variazione di pressione  $\Delta P$  all'interfaccia. Il lavoro eseguito dalla tensione superficiale per bilanciare tale pressione sarà  $\Delta P 4\pi R^2 dR$ . Ne segue che all'equilibrio:

$$\Delta P 4\pi R^2 dR = 8\pi R \sigma dR \quad (5.4)$$

da cui:

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R} \quad (5.5)$$

Tale relazione è l'equazione di Laplace per una interfaccia sferica e rappresenta la pressione capillare che si genera a causa della tensione superficiale all'interfaccia di una goccia sferica <sup>1</sup>.

Nel caso di un cilindro infinito di raggio  $R$  l'equazione di Laplace sarà:  $\Delta P = \frac{\sigma}{R}$  e, più in generale, la pressione capillare per una arbitraria superficie sarà data dal rapporto della tensione superficiale e del raggio di curvatura locale della superficie. Per tale motivo gli effetti della tensione superficiale saranno tanto maggiori quanto più piccole sono le dimensioni caratteristiche delle strutture liquide considerate.

### ***Efficienza dell'Atomizzazione***

Il processo di trasferimento di energia (meccanica o di altra natura) in energia superficiale,  $E_s$ , durante il processo di atomizzazione è ovviamente non completo. Una parte dell'energia,  $E_a$ , fornita per l'atomizzazione rimane sotto forma di energia cinetica,  $E_c$ , delle strutture liquide formate durante l'atomizzazione. Si ha dunque:

$$E_a = E_s + E_c \quad (5.6)$$

E' possibile definire un'efficienza del processo di atomizzazione come:

$$\eta_a = \frac{E_s}{E_a} \quad (5.7)$$

Il valore della  $\eta_a$  è in generale molto piccolo ed i processi di atomizzazione non sono da considerare molto efficienti dal punto di vista del trasferimento di energia alla superficie. D'altra parte in molti processi di combustione si vuole che il liquido atomizzato abbia una

certa energia cinetica al fine di favorire fenomeni di ulteriore atomizzazione e promuovere gli scambi di calore ed il miscelamento con l'aria del combustibile. Infatti, la distribuzione dello spray nello spazio e il suo accoppiamento con i flussi gassosi di comburente giocano un ruolo determinante nella ottimizzazione del processo globale di combustione.

### **Determinazione del Valore della Tensione Superficiale**

I valori della tensione superficiale per la maggior parte dei liquidi organici (in un campo di temperature ridotte ( $T_r = T/T_c$ ) tra 0,4 e 0,6) varia tra 2 e 4 x 10<sup>-2</sup> Nm<sup>-1</sup>; per l'acqua vale 7,28 x 10<sup>-2</sup> Nm<sup>-1</sup>.

Valori tipici della tensione superficiale per una interfaccia liquido-vapore a 20°C sono riportate nella tabella seguente:

	$\sigma$ (Nm <sup>-1</sup> )
Acqua	0,07288
n-eptano	0,02014
Tetradecano	0,027
Benzene	0,02888
$\alpha$ -metilnaftalene	0,040
Metanolo	0,0225
Olio leggero @ 40°C	0.023
Olio leggero @ 80°C	0.021
Mercurio	0,4865

Tabella 1

Esistono alcune correlazioni che permettono di determinare la tensione superficiale di sostanze organiche. La più famosa è quella proposta da Macleod nel 1923:

$$\sigma^{1/4} = P (\rho_l - \rho_v) \quad (5.8)$$

in tale relazione la quantità  $P$  è una costante indipendente da  $T$  e  $P$ , denominata parachor, che dipende dalla struttura della molecola mentre  $\rho_l$  e  $\rho_v$  sono le densità molari del liquido e del vapore. I valori del parachor per vari gruppi funzionali sono tabellati. Vale, inoltre, una



regola di additività che permette di calcolare il valore del parachor nota la struttura della molecola sommando i valori dei parachor dei singoli gruppi funzionali.

**Structural Contributions for Calculation of the Parachor**

<b>Carbon-hydrogen:</b>		<b>Special groups (<i>Continued</i>):</b>	
C	9.0	Four carbon atoms	20.0
H	15.5	Five carbon atoms	18.5
CH <sub>3</sub> —	55.5	Six carbon atoms	17.3
—CH <sub>2</sub> —	40.0‡	—CHO	66
CH <sub>3</sub> —CH(CH <sub>3</sub> )—	133.3	O (not noted above)	20
CH <sub>3</sub> —CH <sub>2</sub> —CH(CH <sub>3</sub> )—	171.9	N (not noted above)	17.5
CH <sub>3</sub> —CH <sub>2</sub> —CH <sub>2</sub> —CH(CH <sub>3</sub> )—	211.7	S	49.1
CH <sub>3</sub> —CH(CH <sub>3</sub> )—CH <sub>2</sub> —	173.3	P	40.5
CH <sub>3</sub> —CH <sub>2</sub> —CH(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> )—	209.5	F	26.1
CH <sub>3</sub> —C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> —	170.4	Cl	55.2
CH <sub>3</sub> —CH <sub>2</sub> —C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> —	207.5	Br	68.0
CH <sub>3</sub> —CH(CH <sub>3</sub> )—CH(CH <sub>3</sub> )—	207.9	I	90.3
CH <sub>3</sub> —CH(CH <sub>3</sub> )—C(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> —	243.5		
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> —	189.6	<b>Ethylenic bond:</b>	
		Terminal	19.1
<b>Special groups:</b>		2,3 position	17.7
—COO—	63.8	3,4 position	16.3
—COOH	73.8		
—OH	29.8	<b>Triple bond</b>	40.6
—NH <sub>2</sub>	42.5		
—O—	20.0	<b>Ring closure:</b>	
—NO <sub>2</sub> (nitrite)	74	Three-membered	12.5
—NO <sub>3</sub> (nitrate)	93	Four-membered	6.0
—CO(NH <sub>2</sub> )	91.7	Five-membered	3.0
=O (ketone)		Six-membered	0.8
Three carbon atoms	22.3		

‡If  $n > 12$  in  $(-\text{CH}_2-)_n$ , increase increment to 40.3.

Tabella 2 Parachor per i principali gruppi strutturali.

Può essere, inoltre, utile calcolare il valore della  $\sigma$  senza che sia noto il valore delle densità molari alla temperatura desiderata. Infatti poichè:

$$\rho_l - \rho_v = \rho_{lb} \left[ \frac{(1 - T_r)}{(1 - T_{br})} \right]^n \quad (5.9)$$

dove  $n$  varia tra 0,25 e 0,31 (precisamente si può assumere pari a 0,25 per alcoli, 0,29 per idrocarburi e 0,31 per altri composti organici) e  $\rho_{lb}$  è la densità molale del liquido al punto di ebollizione normale.

si ricava: 
$$\sigma = [P \rho_{lb}]^4 [(1 - T_r)/(1 - T_{br})]^{4n} \quad (5.10)$$

Per miscele vale una legge generale di Macleod-Sugden:

$$\sigma^{1/4} = \sum_i P_i \left( \rho_{l_m} X_i - \rho_{v_m} Y_i \right) \quad \text{con } X_i, Y_i \text{ frazioni molari} \quad (5.11)$$

In tale espressione il termine  $\rho_{v_m} Y_i$  è spesso trascurabile

Una buona rassegna delle proprietà di mezzi fluidi, inclusa la tensione superficiale, è reperibile nel libro di Reid, Prausnitz e Sherwood.

### **Onde Superficiali**

Come già detto in precedenza, 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.

Queste oscillazioni sono di piccola ampiezza, rimanendo confinate nello spazio di una lunghezza d'onda, ma sono dispersive, ovvero la loro velocità di propagazione dipende dalla loro lunghezza d'onda. Ciò fa sì che, in dipendenza dalla geometria del sistema e delle proprietà del liquido, alcune oscillazioni possano propagarsi amplificandosi ed altre, invece, si attenuino a causa degli effetti dissipativi (generalmente dovuti alla viscosità).

E' possibile, in prima approssimazione, ricavare informazioni sulle caratteristiche di tali oscillazioni da una semplice analisi dimensionale delle forze in gioco.

Le forze per unità di volume agenti all'interno del liquido in tale fenomeno, in assenza di forze esterne, sono:

- Forze capillari:

dovute alla tensione superficiale che, come visto precedentemente, genera una pressione capillare  $\frac{\sigma}{L}$  ed una forza capillare:

$$F_c = \frac{\sigma}{L^2} \quad (5.12)$$

- Forze gravitazionali:

che generano una forza:

$$F_G = \rho g \quad (5.13)$$

- Forze viscosi:

che tendono a smorzare le oscillazioni e generano una forza:

$$F_V \propto \frac{\mu V}{L^2} \quad (5.14)$$

- Forze di inerzia:

dovute alla velocità relativa gas-liquido e che genera una forza:

$$F_I \propto \frac{\rho_l V^2}{L} \quad (5.15)$$

In tali espressioni,  $L$  rappresenta una dimensione caratteristica della struttura liquida considerata e  $V$  la velocità con cui si muove l'oscillazione ondosa.

Supponiamo di applicare un disturbo ondulatorio all'interfaccia liquido-gas. Le forze capillari  $F_C$  e quelle gravitazionali  $F_G$  sono le due forze che si oppongono alla propagazione dell'onda e che tendono a ristabilire le condizioni iniziali sulla superficie perturbata. Cominciamo con lo stabilire i regimi nei quali ciascuna delle due forze è predominante.

Nella condizione in cui esse sono paragonabili potremo scrivere:

$$F_G \cong F_C \quad \Rightarrow \quad \rho g \cong \frac{\sigma}{L^2} \quad (5.16)$$

ciò permette di definire una lunghezza caratteristica delle oscillazioni in tali condizioni (che è il reciproco del numero d'onda dell'oscillazione):

$$L_C = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho g}} \quad (5.17)$$

detta lunghezza capillare.

(In realtà la lunghezza d'onda delle oscillazioni è pari a  $\lambda = 2\pi L$ )

Oscillazioni con lunghezza d'onda maggiore di  $L_C$  saranno dominate dalle forze gravitazionali mentre per lunghezze d'onda minori di  $L_C$  prevarranno le forze capillari. In altre parole si può dire in maniera semplificativa che onde "lunghe" sono essenzialmente "gravitazionali" mentre onde "corte" sono "capillari".

Se supponiamo che siano presenti onde gravitazionali in condizioni sostanzialmente stazionarie dovrà essere:

$$F_G \cong F_I \Rightarrow \rho g \cong \frac{\rho V^2}{L} \Rightarrow V \cong \sqrt{Lg} \quad (5.18)$$

In tal caso le forze viscosi saranno trascurabili se:

$$\rho g \gg \frac{\mu V}{L^2} \quad (5.19)$$

da cui, sostituendo il valore di  $V$  calcolato precedentemente, si ricava che onde gravitazionali non smorzate dalla viscosità possono esistere solo se:

$$L \gg L_{DG} = \left( \frac{\mu^2}{\rho^2 g} \right)^{1/3} \quad (5.20)$$

$L_{DG}$  è detta lunghezza di dissipazione delle onde gravitazionali.

Analogamente, per onde capillari si ricava che in condizioni stazionarie:

$$F_C \cong F_I \Rightarrow \frac{\sigma}{L^2} \cong \frac{\rho V^2}{L} \Rightarrow V \cong \sqrt{\frac{\sigma}{\rho L}} \quad (5.21)$$

e, affinché siano trascurabili le forze viscosi:

$$L \gg L_{DC} = \frac{\mu^2}{\rho \sigma} \quad (5.22)$$

dove  $L_{DC}$  è detta lunghezza di dissipazione delle onde capillari.

In definitiva le onde capillari saranno possibili sotto la condizione:

$$L_{DC} \ll L \ll L_C \quad (5.23)$$

ovvero:

$$\lambda_{DC} \ll \lambda \ll \lambda_C \quad (5.24)$$

Dalla tabella 3 è possibile osservare che, per tutte le sostanze considerate, le onde gravitazionali non sono mai smorzate dalla viscosità del mezzo. Per quanto riguarda, invece, le onde capillari si può osservare che esse sono possibili in tutti i casi allorché le lunghezze d'onda delle oscillazioni siano minori di 1-2 centimetri, ma che, mentre per l'acqua e per il tetradecano esse possono essere anche molto piccole (rendendo possibile una atomizzazione

molto fine) per l'olio leggero è necessario procedere ad un preriscaldamento perché si possano eccitare onde capillari di piccola dimensione e dunque avere una buona atomizzazione (vedremo in seguito altre conferme di questo fatto).

	$\lambda_{DC}, \text{ m}$	$\lambda_C, \text{ m}$	$\lambda_{DG}, \text{ m}$
Acqua	$6.2 \cdot 10^{-8}$	$1.7 \cdot 10^{-2}$	$2.6 \cdot 10^{-4}$
Tetradecano	$2.6 \cdot 10^{-7}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$
Olio leggero @ 40°C	$7.6 \cdot 10^{-4}$	$1.0 \cdot 10^{-2}$	$4.3 \cdot 10^{-3}$
Olio leggero @ 80°C	$2.1 \cdot 10^{-5}$	$9.7 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-3}$

Tabella 3

### Gruppi adimensionali

Fino ad ora abbiamo considerato solo forze interne al liquido. Ciò consente di studiare i meccanismi di rottura dell'interfaccia per velocità relative tra liquido e gas molto piccole ( $\sim 1 \text{ m/s}$ ). A velocità maggiori diventano invece importanti le forze aerodinamiche che si esercitano sull'interfaccia e che, a grandi velocità, diventano le forze dominanti dei processi di atomizzazione.

Nella Fig. 5.4 tali forze sono indicate come  $p_g$  e  $\tau_g$ . La  $p_g$  agisce perpendicolarmente all'interfaccia e va a contrastare la pressione capillare, generata dalle forze dovute alla tensione superficiale, sostenendo ed amplificando le oscillazioni presenti sulla interfaccia. La  $\tau_g$ , invece, agisce tangenzialmente alla superficie e aiuta la rimozione di particelle di liquido da essa.

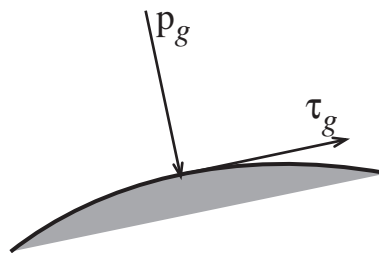


Fig. 5.4 Schema delle forze aerodinamiche ad un interfaccia liquido/gas.

Ambedue queste forze sono proporzionali alla pressione dinamica del gas calcolata come

$\frac{1}{2} \rho_g v^2$ , dove  $v$  è la velocità relativa gas-liquido.

Una misura dell'importanza relativa alla pressione dinamica rispetto a quella capillare è data dal gruppo adimensionale:

$$We_g = \frac{\rho_g v^2}{\sigma / D} = \frac{\rho_g v^2 D}{\sigma} \quad (5.25)$$

detto numero di Weber. Esso può essere considerato un indice della possibilità di atomizzare un liquido.

Talvolta, soprattutto nel caso dei fenomeni di rottura di un getto liquido, si fa riferimento ad un numero di Weber riferito alla colonna liquida in cui compare la densità del liquido e non quella del gas. Indicheremo tale numero come:

$$We_l = \frac{\rho_l v^2 D}{\sigma} \quad (5.26)$$

Tale numero da una misura del rapporto tra le forze di inerzia del getto e le forze capillari.

L'altra forza che si oppone alla atomizzazione è la presenza di forze viscosive nel liquido, in questo caso il numero adimensionale che dà una misura della possibilità di atomizzazione è:

$$Oh = Z = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma D}} \quad (5.27)$$

detto numero di Ohnesorge. Esso può essere considerato (solo dal punto di vista dimensionale) come il rapporto:  $\sqrt{We}/Re$ .

Tutte le quantità presenti nella espressione di  $Oh$  sono generalmente riferite al liquido per cui esso dipende solo dalle condizioni termodinamiche, proprietà fisiche e dimensioni caratteristiche della struttura liquida che deve essere atomizzata.

### ***Classificazione dei regimi di atomizzazione con la temperatura***

Il processo di atomizzazione può essere, in prima istanza, schematizzato come una variazione di pressione isoterma seguita da una variazione di temperatura isobarica. In tal modo si può considerare disgiunto l'effetto del salto di pressione che si realizza alla sezione di uscita dell'ugello e l'eventuale raffreddamento o riscaldamento cui il liquido va soggetto dopo l'iniezione.

Nel diagramma PT di Fig. 5.5 sono schematizzati i diversi regimi di atomizzazione in dipendenza delle condizioni di temperatura e pressione dell'ambiente in cui si immette il

liquido. I diversi percorsi seguiti nei vari casi sono importanti in quanto le proprietà del mezzo liquido (tensione superficiale, viscosità e densità) che influenzano il processo di atomizzazione possono essere significativamente influenzate dalle condizioni ambientali in generale e dalla temperatura dell'ambiente,  $T_a$ , in particolare.

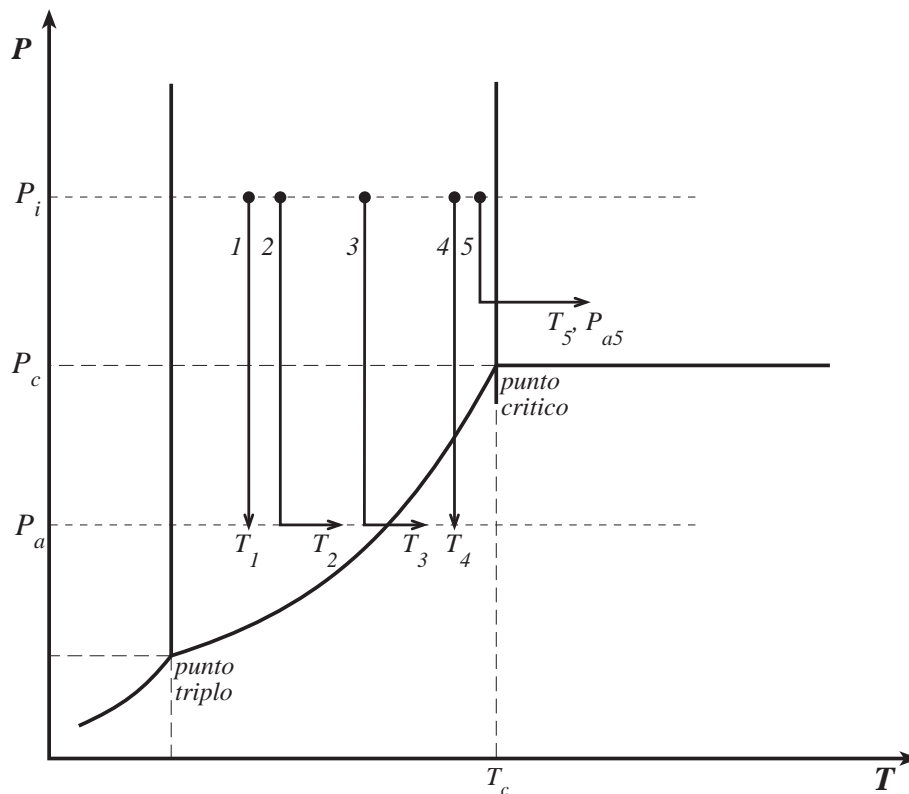


Fig. 5.5

Il salto di pressione e di temperatura del liquido (riscaldamento o raffreddamento) corrispondente al processo di iniezione possono, in prima istanza, essere schematizzati come una variazione di pressione isoterma seguita da un variazione di temperatura isobarica.

Per una iniezione in un ambiente a temperatura uguale o maggiore di quella iniziale del liquido ( $T_L$ ) possiamo distinguere 5 casi tipici di atomizzazione a seconda della temperature  $T_L$  del liquido e  $T_a$  del gas nell'ambiente:

- |                |                                 |                   |                             |
|----------------|---------------------------------|-------------------|-----------------------------|
| 1) $T_a = T_1$ | iniezione fredda                | $T_L = T_a$       | per cui $\sigma = cost$     |
| 2) $T_a = T_2$ | iniezione quasi fredda          | $T_L < T_a$       | per cui $\sigma \cong cost$ |
| 3) $T_a = T_3$ | iniezione calda con ebollizione | $T_L < T_{eboll}$ | (@ $P = P_a$ )              |

- 4)  $T_a = T_4$  iniezione calda con ebollizione a flash  $T_L > T_{eboll}$  ( $@ P = P_a$ )
- 5)  $T_a = T_5$  iniezione supercritica  $T_L < T_c < T_a, P_{a5} > P_c$  per cui  $\sigma \rightarrow 0$

E' importante notare che:

- In molte applicazioni sono anche utilizzate tecniche di atomizzazione in ambienti che inducono raffreddamento e/o solidificazione del liquido.
- Quando la pressione e la temperatura ambiente sono basse, l'atomizzazione può considerarsi un processo "disaccoppiabile" da altri processi basati sullo scambio di calore.
- Nel caso 4  $[T_L > T_{eboll} (@ P = P_a)]$  si ottiene una condizione di atomizzazione a "flash boiling" in cui il liquido alla pressione ambiente si trova in condizioni fuori equilibrio (dovrebbe essere vapore) per cui c'è un effetto di atomizzazione aggiuntivo dovuto al passaggio di stato all'interno del liquido.

### **Riferimenti e note**

Una introduzione ai concetti legati alla nozione di tensione superficiale può essere trovata in:

Adamson A.W.: *A Textbook of Physical Chemistry*, Academic Press, New York, 1979.

Informazioni dettagliate sulle proprietà di liquidi e gas sono contenute nel volume:

Reid R.C., Prausnitz J.M. e Sherwood T.K., *The properties of Gases and Liquids*, Mc-Graw Hill Co., New York, 1977.

La trattazione, basata sull'analisi dimensionale, dei regimi di esistenza di onde superficiali è tratta dagli appunti delle lezioni sui "fenomeni di trasporto" tenuto dal prof. G. Astarita nel marzo del 1997 a Vico Equense (NA) nell'ambito del corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Chimica.



**Appendice A 16 Viscosità di alcuni liquidi notevoli**

	$\mu$ $\text{Kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$
Acqua	0,00085
n-eptano	0,00038
Tetradecano	0.00092
Benzene	0,00065
$\alpha$ -metilnaftalene	0.00078
Metanolo	0,00060
Olio leggero @ 40°C	0.05
Olio leggero @ 80°C	0.008
Mercurio	0,00153