

Lubrificazione dei cambi automobilistici

Il processo di lubrificazione riveste una importanza fondamentale nel funzionamento degli organi di macchine. La lubrificazione viene effettuata per separare, almeno parzialmente, le superfici in moto relativo, al fine di ridurre al minimo la forza d'attrito che si genera tra esse; ciò ha il duplice scopo di limitare l'usura dei componenti, che ne comprometterebbe il funzionamento riducendone la vita utile, e diminuire la potenza dissipata per attrito. Si tratta di due aspetti strettamente interconnessi, dal momento che la dissipazione di energia provoca incrementi localizzati di temperatura che riducono ulteriormente la resistenza meccanica dei componenti.

- impedire usura e il grippaggio
- Proteggere le superfici metalliche dalla ruggine
- non formare schiuma
- asportare il calore
- azionare i servomeccanismi oleodinamici

Le suddette proprietà sono ottenute mediante la scelta di oli base di buona qualità opportunamente additivati per conferire loro quelle proprietà che non potrebbero essere ottenute altrimenti. Le sostanze più frequentemente usate come additivi per gli oli trasmissione sono: antiossidanti, antischiuma, antiusura, antiruggine/anticorrosivi, E.P. (alte pressioni), elevatori dell'indice di viscosità.

La lubrificazione dei cambi automobilistici presenta una notevole complessità, legata a diversi ordini di problemi. Il primo problema è di natura impiantistica: essendo, nella maggior parte dei cambi moderni, tutte le ruote costantemente ingrananti, è necessario che l'impianto garantisca che tutti i denti di ciascuna ruota risultino sempre ricoperti d'olio. Si tratta di una condizione non banale da raggiungere, sia perché le superfici di contatto sono numerose e non tutte facilmente raggiungibili dal lubrificante, sia perché le elevate velocità di rotazione degli organi generano forze centrifughe che tendono ad allontanare il lubrificante stesso dalla superficie di denti.

Vi sono poi problemi di natura prettamente tribologica. Le caratteristiche geometriche e dinamiche degli accoppiamenti con ruote dentate sono tali da determinare un meccanismo di lubrificazione di tipo elastoidrodinamico, per cui, anche disponendo di un sistema di lubrificazione efficiente, il film d'olio, di spessore estremamente ridotto, potrebbe non garantire la perfetta separazione tra le superfici a contatto.

Si capisce da quanto detto come il cambio sia un componente tribologicamente complesso.

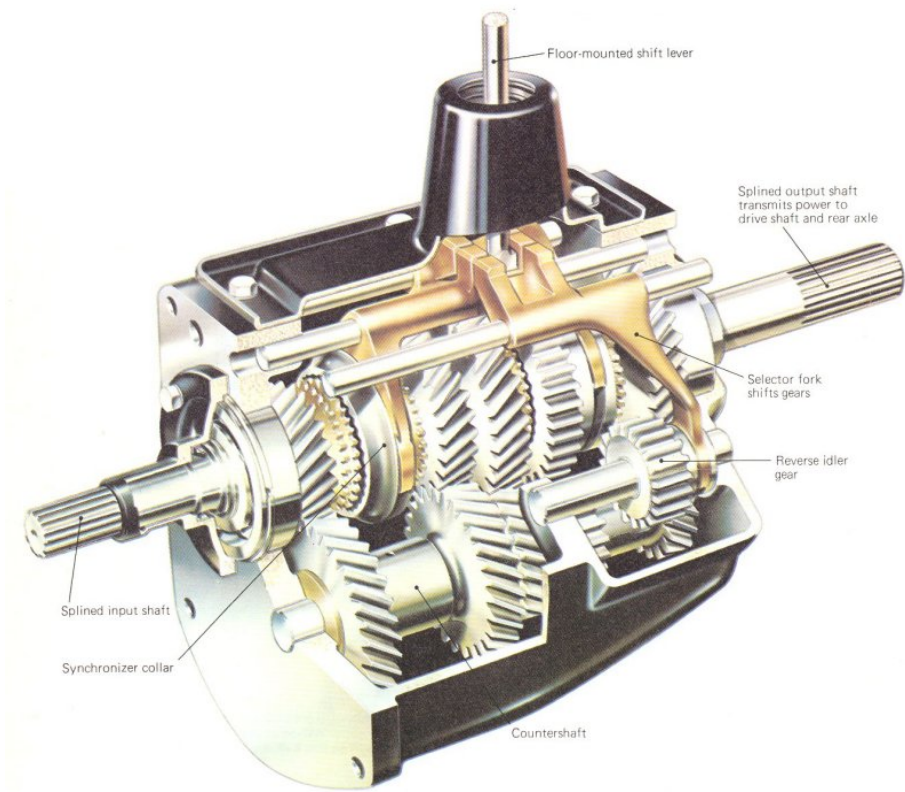


Figura 1.1 Schema di un cambio automobilistico

1.1 Lubrificazione tradizionale dei cambi

Il sistema di lubrificazione più largamente adottato nei cambi automobilistici è quello definito a sbattimento e a bagno d'olio. Il cambio è inserito in un carter nella cui parte inferiore è presente una vaschetta contenente dell'olio; la quantità del lubrificante deve essere sufficiente affinché almeno una delle ruote di ciascuno dei treni di ingranaggi sia immersa nel bagno.



Figura 1.2 Vista frontale di un cambio automobilistico

Quando il sistema entra in rotazione, il pignone inferiore trascina verso l'alto una certa quantità d'olio, e questo permette di lubrificare i pignoni successivi. Quella parte di lubrificante che per effetto della forza centrifuga schizza via da una ruota, va a depositarsi in parte sulle altre ruote, migliorandone così la lubrificazione, in parte sulle pareti del carter, dalle quali ricade per gravità sul cambio stesso.

L'immagine seguente schematizza il processo appena descritto.

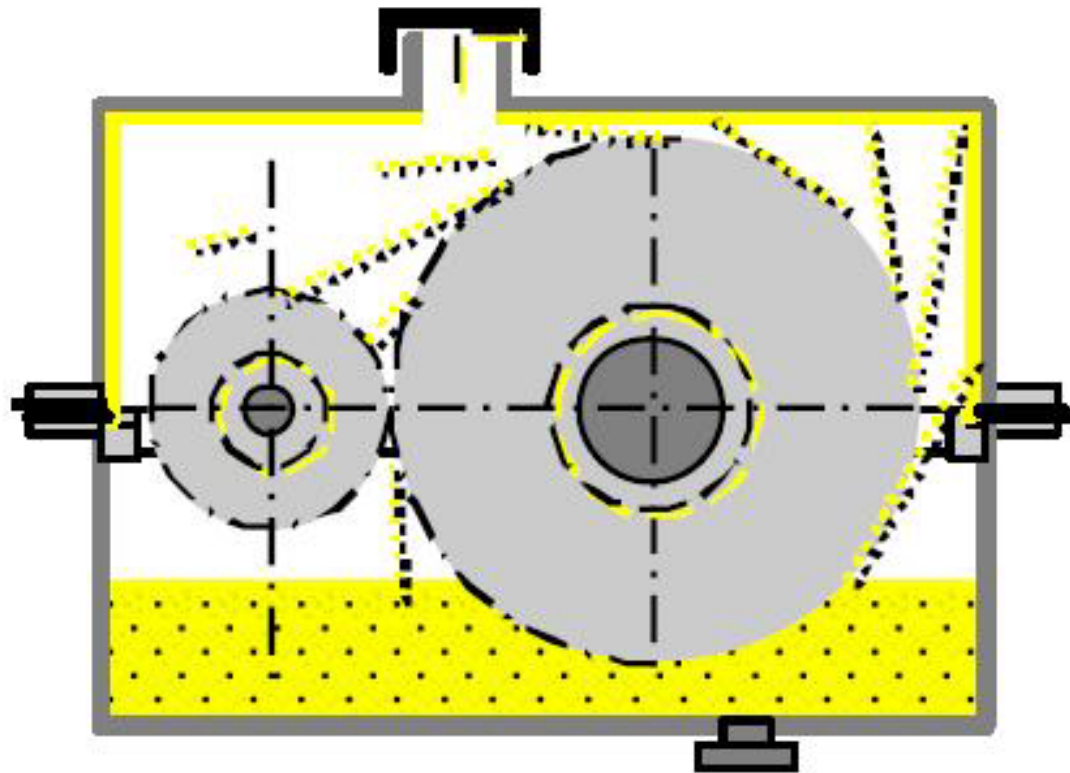


Figura 1.3 Rappresentazione del processo di lubrificazione per sbattimento

Gli oli utilizzati per le trasmissioni devono possedere caratteristiche particolari per far fronte a specifiche esigenze funzionali. Tra queste in primo luogo sono da considerare gli elevati carichi ed elevate pressioni esercitate tra i denti degli ingranaggi che provocano lo schiacciamento del film di lubrificante con conseguente rischio di rottura. A questo si aggiunge il numero elevato di ore di funzionamento che sono richieste all'olio prima di essere sostituito; è quindi necessario che il lubrificante mantenga inalterate nel tempo le sue proprietà chimiche e fisiche.

E' bene in proposito sottolineare che l'effettiva durata del lubrificante dipende fortemente dal regime termico che si instaura all'interno del carter; l'elevata temperatura è infatti la principale causa di guasti degli organi lubrificati, perché essa determina una diminuzione della viscosità e accelera il deterioramento dell'olio, in quanto favorisce i fenomeni di ossidazione.

Il diagramma riportato di seguito mette in relazione la temperatura media di lavoro dell'olio con l'aspettativa di vita dell'olio stesso, cioè il numero di miglia che il veicolo può percorrere prima di dover effettuare il rinnovo del lubrificante.

I dati rappresentano una media di più prove effettuate con diversi oli commerciali per trasmissioni. Si nota come gli oli commerciali non mostrino apprezzabili variazioni delle proprietà lubrificanti per temperature medie di funzionamento fino a 80°C; a questo valore medio di funzionamento corrispondono durate molto elevate, paragonabili al ciclo di vita del veicolo stesso. Se il sistema di lubrificazione è ben progettato da un punto di vista termico, può quindi non essere necessario provvedere alla sostituzione dell'olio del cambio.

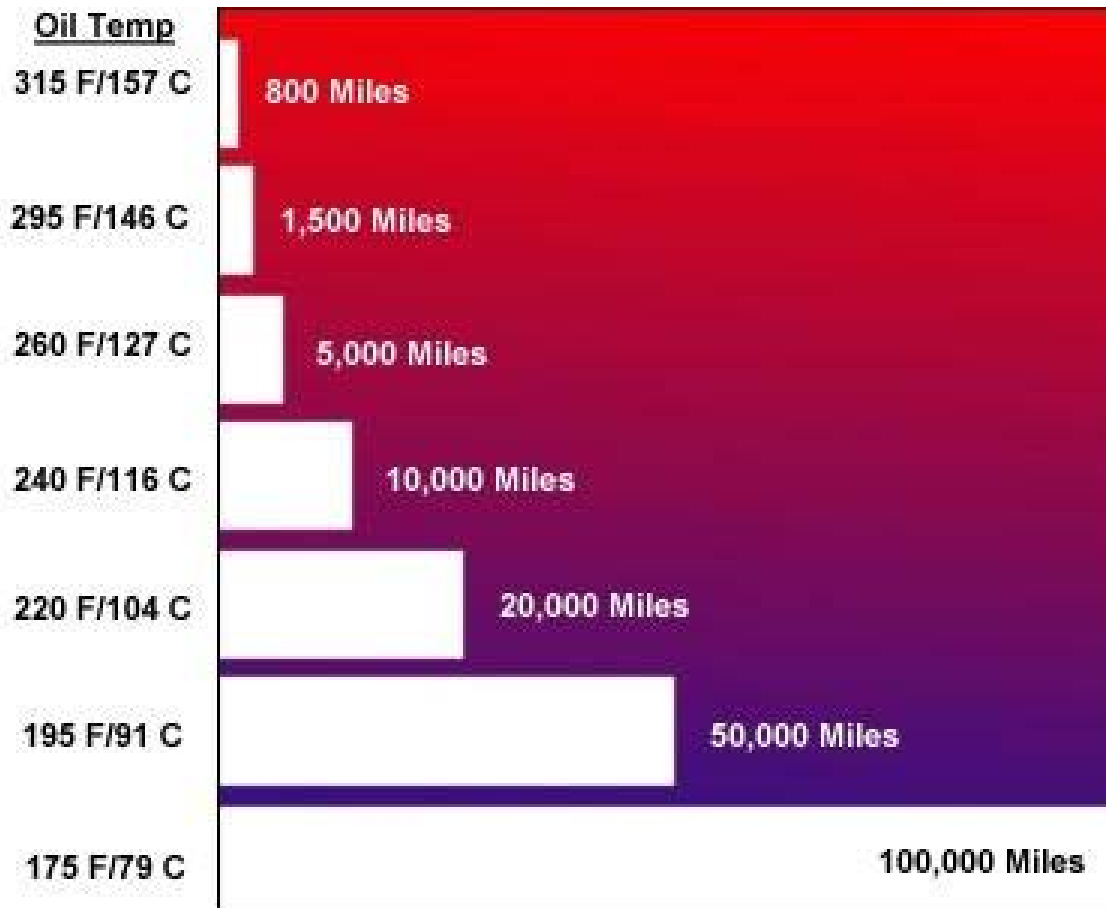


Figura 1.4 Diagramma dell'aspettativa di vita di un cambio in funzione della temperatura

Per incrementi di temperatura anche molto modesti, le proprietà del lubrificante decadono rapidamente: è sufficiente che la temperatura media nel carter passi da 79°C a 91°C perché la durata del lubrificante si dimezzi. Per temperature molto elevate, prossime a 160°C (pari cioè al doppio della temperatura media prevista per un normale cambio di autoveicolo), la vita del lubrificante si riduce a un centesimo di quella prevista in normali condizioni di funzionamento.

Si comprende come il lubrificante svolga un ruolo fondamentale per il buon funzionamento del cambio.

Per poter lubrificare correttamente le trasmissioni meccaniche l'olio deve avere i seguenti requisiti:

- impedire usura e il grippaggio
- proteggere le superfici metalliche dalla ruggine
- non formare schiuma
- asportare il calore
- azionare i servomeccanismi oleodinamici

Le suddette proprietà sono ottenute mediante la scelta di oli base di buona qualità opportunamente additivati per conferire loro quelle proprietà che non potrebbero essere ottenute altrimenti. Le sostanze più frequentemente usate come additivi per gli oli trasmissione sono: antiossidanti, antischiuma, antiusura, antiruggine/anticorrosivi, E.P. (alte pressioni), elevatori dell'indice di viscosità.

Le Specifiche Internazionali classificano i lubrificanti in base alle prestazioni, al tipo di formulazione e alle caratteristiche d'impiego. Evidenziano cioè il livello prestazionale e qualitativo dei vari prodotti. In particolare le più importanti specifiche di riferimento risultano:

- SAE Per la classificazione delle viscosità .
- ISO Per la classificazione delle viscosità .
- MIL-L Emesse dall'esercito Americano.
- API Emesse dall'American Petroleum Institute.
- ACEA Emesse dall'Associazione Costruttori Europei dell'Automobile.

Per le applicazioni veicolistiche le classificazioni più utilizzate sono la SAE e la API.

1.3 Il processo di atomizzazione

1.3.1 Teoria di base

L'atomizzazione è quel processo fisico per il quale una qualunque struttura liquida iniettata in un determinato ambiente va incontro a frammentazione. Tale processo è caratterizzato da due diverse fasi dette rispettivamente atomizzazione primaria, dove dalla struttura liquida si formano gocce e filamenti, ed atomizzazione secondaria, in cui tali strutture si rompono dividendosi fin quando le dimensioni degli agglomerati di particelle sono tanto piccole da non poter essere più frammentate.

In principio è necessario illustrare alcuni concetti generali che sono utili per la comprensione generale delle problematiche legate ai processi di rottura di strutture liquide definendo i parametri fisici che influenzano maggiormente lo sviluppo e l'efficacia del processo.

Il processo di atomizzazione consiste proprio nella frammentazione di strutture liquide realizzata trasformando energia (cinetica o meccanica) in energia superficiale che si manifesta attraverso l'instaurarsi di oscillazioni ondose all'interfaccia liquido-gas che possono amplificarsi fino a portare alla disgregazione la struttura stessa.

Generalmente queste oscillazioni sono di piccola ampiezza, ma 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 possano propagarsi amplificandosi mentre altre si attenuino a causa degli effetti dissipativi generalmente dovuti alla viscosità. In assenza di forze esterne e per valori della velocità relativa tra liquido e gas inferiori a 1 m/s, le forze per unità di volume agenti all'interno del liquido sono:

Forze capillari:

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

Sono quelle di attrazione reciproca delle molecole, possono essere considerate la causa dell'insorgere della tensione superficiale σ . Facendo riferimento alla figura 1.11, si osservi che una molecola di liquido lontana dalla superficie di discontinuità è soggetta ad un sistema di forze il cui risultante è nullo in quanto essa è attratta da tutte le molecole che la circondano. Al contrario una molecola sulla superficie di discontinuità risente solo delle forze di attrazione all'interno del liquido per cui la forza risultante è perpendicolare alla superficie del liquido: tali molecole, quindi, tenderanno ad "affondare" e conseguentemente la superficie di discontinuità tenderà a ridursi.

E' possibile una interpretazione dell' azione della tensione superficiale in termini di energia superficiale considerandola come il rapporto tra il lavoro di frammentazione e l'incremento di area superficiale:

da questa relazione appare chiaro come il lavoro di frammentazione, comportando un aumento della superficie globale, richieda una trasformazione in energia superficiale in misura tanto più grande quanto maggiore è la tensione superficiale del liquido.

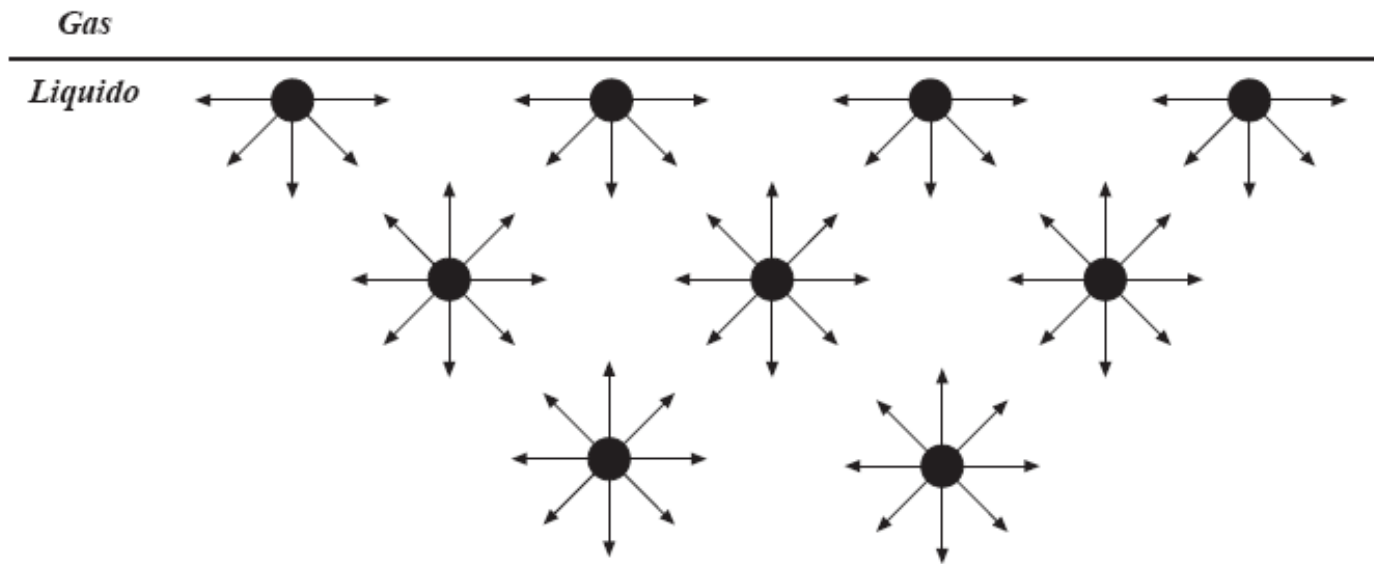


Figura 1.11 Molecole di liquido all'interfaccia liquido-gas

La reazione della tensione superficiale ad una perturbazione (che è quella che genera la frammentazione) applicata ad una interfaccia si manifesta attraverso l'insorgere di una pressione (detta capillare) che si oppone all'azione della perturbazione stessa e quindi al processo di atomizzazione; a titolo di esempio nel caso di una goccia sferica tale pressione vale

$$\Delta P = \frac{2\sigma}{R}$$

dove R è il raggio della sfera, in generale la pressione capillare sarà data dal rapporto tra la tensione superficiale e il raggio di curvatura locale della superficie

- Forze gravitazionali:

$$F_G = \rho g$$

- Al pari delle forze capillari, anche le forze gravitazionali si oppongono alla propagazione dell'oscillazione ondosa che provoca la rottura della struttura liquida e tendono a ristabilire le condizioni iniziali della superficie perturbata.
- Forze viscosose:

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

Poiché la viscosità agisce in maniera da ridurre l'instabilità della strutture liquida, appare chiaro che anche le forze viscosose tendono a smorzare le oscillazioni.

- Forze di inerzia:

$$F_I \propto \frac{\rho_l V^2}{L}$$

Esse sono dovute alla velocità relativa liquido-gas e sono la causa dell'instabilità del sistema.

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

L'importanza relativa delle forze inerziali rispetto alle forze viscosse è data dal numero di Reynolds:

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

Si comprende come quanto maggiori sono le forze inerziali rispetto a quelle viscosse, ossia quanto maggiore è il numero di Reynolds tanto più si otterrà una atomizzazione rapida ed efficiente.

Fin qui sono state considerate solamente forze interne al liquido: ciò permette di studiare i processi di atomizzazione solo per velocità relative tra liquido e gas ($U_l - U_g$) piuttosto basse. Infatti, per velocità maggiori di 1 m/s diventano dominanti nei meccanismi di rottura le forze aerodinamiche che si esercitano sull'interfaccia.

Tali forze sono indicate come p_g e τ_g . La prima agisce perpendicolarmente all'interfaccia e va a contrastare la pressione capillare, generata dalle forze dovute alla tensione superficiale, sostenendo ed amplificando le oscillazioni presenti sull'interfaccia; la seconda, invece, agisce tangenzialmente alla superficie ed aiuta la rimozione di particelle di liquido da essa.

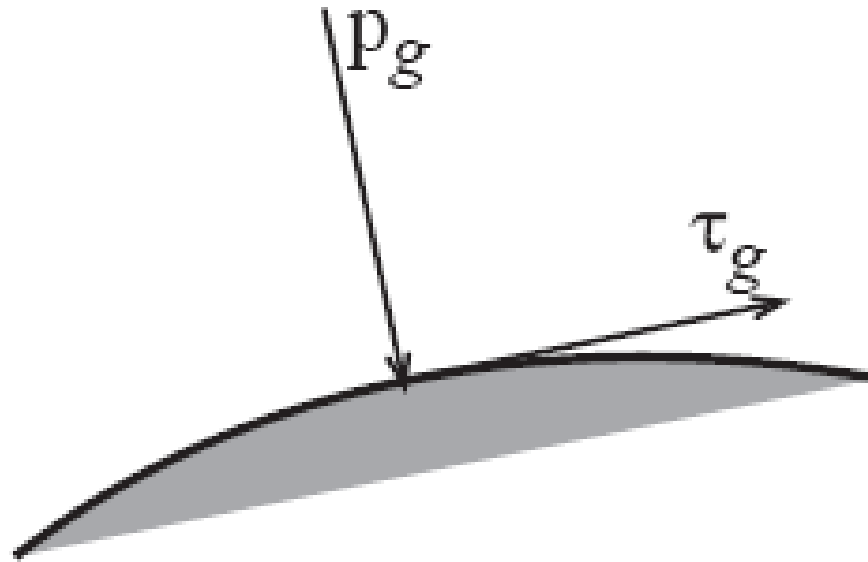


Figura 1.12 Schema delle forze aerodinamiche all'interfaccia liquido gas

Entrambe queste forze sono proporzionali alla pressione dinamica del gas calcolata come :

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

dove v è la differenza tra le velocità assolute del liquido e del gas, ossia la velocità relativa gas-liquido ($v = |U_l - U_g|$).

Una misura dell'importanza relativa della pressione dinamica rispetto a quella capillare, ossia tra le forze di inerzia del getto liquido e quelle capillari, è data da un altro gruppo dimensionale detto numero di Weber:

$$We_l = \frac{\rho_l v^2 D}{\sigma}$$

Analogamente a quanto detto per il numero di Reynolds, è evidente che maggiore è il numero di Weber, cioè maggiore è la velocità relativa liquido-gas rispetto alla tensione superficiale, più facile sarà la frammentazione della struttura.

Un terzo gruppo adimensionale che ci permette di capire quale sia la possibilità di ottenere una buona atomizzazione è il numero di Ohnesorge che rappresenta il rapporto tra la viscosità del liquido e le forze di tensione superficiale:

$$Z = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma D}}$$

Si osservi che tutte le quantità presenti in questa espressione sono riferite al liquido per cui esso dipende solo dalle condizioni termodinamiche, proprietà fisiche e dimensioni caratteristiche della struttura che deve essere atomizzata.

1.3.2 Meccanismi di rottura delle gocce

Alla base del meccanismo di rottura delle gocce c'è la creazione di distribuzioni disuniformi di pressioni sulla gocce, a causa della pressione dinamica dell'aria. Appare, dunque, almeno in prima istanza utile presentare i vari meccanismi di rottura utilizzando come variabile controllante il numero di Weber delle gocce poiché esso rappresenta il rapporto tra forze aerodinamiche che provocano la rottura e la forza stabilizzante dovuta alla tensione superficiale.

In figura 1.13 sono illustrati i cinque principali meccanismi di rottura di gocce di liquido che sono stati osservati in ambiente gas, per mezzo di tecniche ottiche (fotografia ultraveloce, “shadowgraph”). E’ da notare che meccanismi simili sono stati osservati anche per sistemi liquido-liquido (olio in un altro olio, mercurio in acqua).

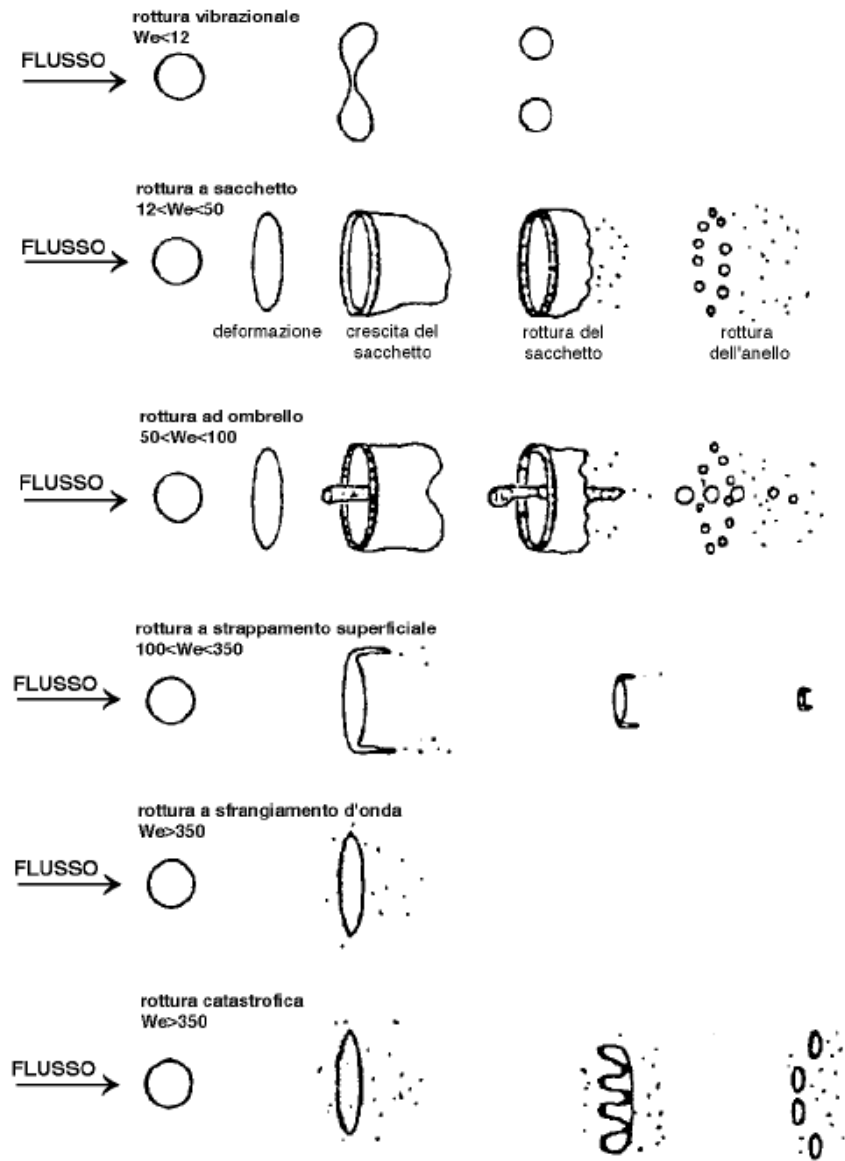


Figura 1.13 I cinque principali meccanismi di rottura delle gocce

Dalla figura 1.13 è possibile costruire un quadro generale della progressione dei vari meccanismi in funzione dell'incremento del numero di Weber, ovvero dello sforzo aerodinamico cui la goccia va soggetta:

- **1) Rottura vibrazionale**

$$We < 12$$

Questa modalità di rottura si verifica quando il numero di Weber è molto basso: sotto certe condizioni il flusso esterno interagisce con la goccia provocandone la divisione in grossi frammenti. Questo tipo di rottura produce solo pochi frammenti liquidi di grandi dimensioni, come si nota dalla figura 1.12. Per questo meccanismo il tempo di rottura è molto lungo in confronto agli altri meccanismi, per cui questo non viene preso in considerazione per lo studio della rottura delle gocce.

- 2) Rottura “a sacchetto”

$$12 < We < 50$$

Il meccanismo della rottura a sacchetto è analogo alla rottura di una bolla di sapone. La parte interna della goccia diviene sottile e si rompe in un gran numero di frammenti piccoli, mentre la parte esterna, più pesante, si rompe poco dopo producendo un minor numero di frammenti più grandi.

- 3) Rottura “a ombrello”

$$50 < Weg < 100$$

Questo tipo di rottura presenta molte caratteristiche in comune con il secondo meccanismo: come in quest'ultimo, si forma una sorta di sacco ancorato ad un anello esterno, ma una colonna liquida è formata lungo l'asse della goccia. La rottura interessa dapprima la zona più sottile e poi la parte centrale.

- 4) Rottura a “strappamento superficiale”

$$100 < We < 350$$

Il meccanismo è differente dai precedenti. Non si forma alcun sacchetto, ma si verifica un continuo consumo di un sottile strato esterno della goccia; questo strato sottile si rompe a poca distanza dietro la goccia, in piccoli frammenti. Una struttura residua di goccia permane durante l'intero processo di rottura.

- 5) Rottura a “sfrangiamento d'onda” o “catastrofica”

$$We > 350$$

A numeri di Weber più alti, si formano sulla superficie della goccia delle onde molto piccole, le cui creste vengono continuamente erose dall'azione aerodinamica. Quando le onde di maggior ampiezza e lunghezza penetrano nella goccia, si verifica il fenomeno della “rottura catastrofica” che porta ad un processo multistadio in cui i primi frammenti sono soggetti ad ulteriore rottura.

1.3.3 Fasi di sviluppo di un getto spray

La caratterizzazione di uno spray non può prescindere da una preliminare osservazione del fenomeno “transitorio”, ovvero da uno studio che ci porti a definire lo spray dalle condizioni di quiete (al tempo $t = 0$, ugello chiuso) a quelle di getto completamente sviluppato ($t = t_{\infty}$, transitorio esaurito).

Un getto liquido iniettato in un ambiente gassoso è sempre soggetto a rottura, anche se non si può propriamente parlare di atomizzazione se i frammenti liquidi non sono molto più piccoli del diametro dell’ugello di iniezione.

Un getto liquido iniettato in un ambiente gassoso è sempre soggetto a rottura, anche se non si può propriamente parlare di atomizzazione se i frammenti liquidi non sono molto più piccoli del diametro dell'ugello di iniezione.

Le forze che entrano in gioco nei meccanismi di rottura sono associate alla pressione capillare e statica del liquido, alla pressione statica del gas e alle forze di trascinamento superficiale dovute alla resistenza aerodinamica di attrito.

All'atto dell'apertura dell'ugello, dopo l'iniziale espulsione del liquido non proveniente dal serbatoio (*ejection*), ma presente in prossimità della sezione di uscita dell'ugello (e quindi non in pressione), inizia il vero e proprio transitorio che consente al getto di portarsi nelle condizioni di getto completamente sviluppato.

Il fenomeno può essere rappresentato qualitativamente mediante l'utilizzo del diagramma in figura 1.14 nel quale è riportata la lunghezza di rottura del getto (distanza dall'orifizio alla quale sull'asse si rileva una discontinuità) contro la sua velocità (che cresce nel tempo). Su questo diagramma si possono individuare quattro diverse regioni che il getto "percorre" partendo dall'istante in cui ha termine la fase di *ejection* a quello in cui il fenomeno transitorio si estingue.

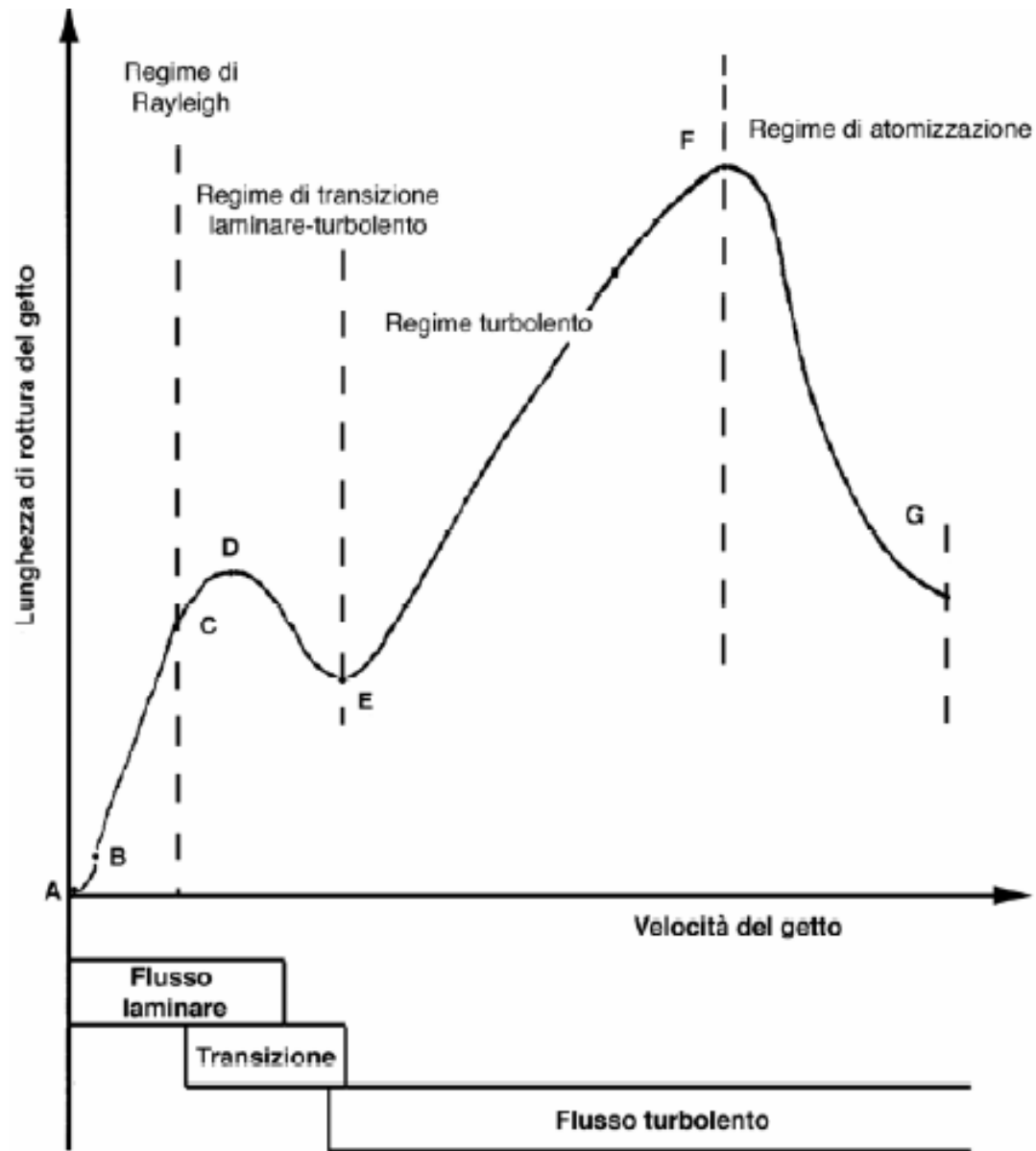


Figura 1.14 Lunghezza di rottura del getto in funzione della sua velocità

La prima regione è definita regime di Rayleigh; in essa la lunghezza di rottura del getto è linearmente dipendente dalla velocità, in particolare cresce con essa (tratto BC del diagramma in figura 1.14). In questo regime, solo onde con lunghezza d'onda maggiore del perimetro del getto si amplificano; la perturbazione che provoca l'innesco delle instabilità può essere anche molto debole: il diametro delle gocce che si vengono a formare in questo meccanismo sono di dimensioni paragonabili a quelle del getto.

L'analisi riguardante le due regioni successive ossia in un campo di velocità intermedie è complicata dal fatto che all'aumentare della velocità aumenta il numero di Reynolds e quindi si passa dal regime laminare (in cui il trasferimento della quantità di moto avviene lungo una sola direzione) a quello turbolento (in cui il trasferimento di quantità di moto avviene lungo più direzioni).

Dall'osservazione sperimentale si è rilevato che in una prima fase la lunghezza di rottura del getto decresce al crescere della velocità (tratto DE del diagramma) a causa di uno spettro di perturbazioni "forti".

Nella regione successiva (tratto EF), invece, descrivere il campo di rottura presenta le maggiori difficoltà: in questo regime intermedio il parametro quantificabile è la lunghezza di rottura superficiale cioè la distanza dall'ugello alla quale si può rilevare una rottura sulla superficie.

In questo regime, che può essere definito come regime “aerodinamicamente indotto” l’azione aerodinamica sulla superficie è più intensa rispetto ai casi precedenti per cui è proprio la riduzione della lunghezza della rottura superficiale ad essere più significativa. Comunque, come si può osservare dal diagramma di figura 1.14, in questa regione la lunghezza di rottura del getto cresce al crescere della velocità con andamento pressoché lineare.

Nella quarta ed ultima regione infine, ossia fin quando il cono non si presenta completamente sviluppato si ha il regime detto di atomizzazione o di *Ranz-Taylor* (tratto FG). In questo caso le più alte velocità favoriscono una crescita delle onde (che causano l’apertura del getto) più veloce per cui si osserva una diminuzione della lunghezza di rottura.

1.4 Comportamento di una goccia che impatta su una superficie solida

In un processo di lubrificazione spray è fondamentale comprendere come le singole gocce, ottenute da un processo di atomizzazione, interagiscono con la superficie da lubrificare. In letteratura non sono reperibili risultati a riguardo, essendo stato il fenomeno dell'impatto goccia indagato esclusivamente con riferimento a fluidi tradizionalmente impiegati per applicazioni spray, come ad esempio l'acqua. Tali studi rappresentano quindi l'unico punto di partenza.

Sulla base di studi sperimentali effettuati su acqua è stato possibile suddividere le gocce di un getto nebulizzato in due classi; una relativa a gocce che non toccano la superficie in quanto evaporano durante il tragitto tra ugello e superficie, la seconda relativa invece alle gocce che vi impattano.

In funzione sia delle proprie caratteristiche chimico-fisiche che della propria quantità di moto posseduta all'atto dell'impatto sulla superficie solida e sia dalle condizioni cinematiche di quest'ultima, le gocce che impattano sulla superficie possono aderire ad essa (fenomeno di deposizione) o rimbalzare ritornando nell'ambiente circostante.

Nel caso di un fenomeno di deposizione la goccia, di forma quasi sferica, al momento dell'impatto si deforma tendendo ad assumere una configurazione a discoide nella parte inferiore mentre la parte superiore assume la forma di una cupola che ha diametro comparabile con quello della sua base. La figura a) mostra l'immagine di una goccia d'acqua che si deposita su una superficie piana. Nel caso di parziale rimbalzo, figura b, una parte di liquido si distacca dalla goccia principale e viene espulsa al di sopra dello strato che ha aderito sulla superficie.

Nel caso di rimbalzo totale la goccia si comporta come un solido elastico, riacquista infatti dopo l'urto la forma sferica iniziale.

Un'altra possibilità è la rottura della goccia principale (splashing) in una serie di piccolissime gocce secondarie che si estendono radialmente sulla superficie iniziale di impatto.

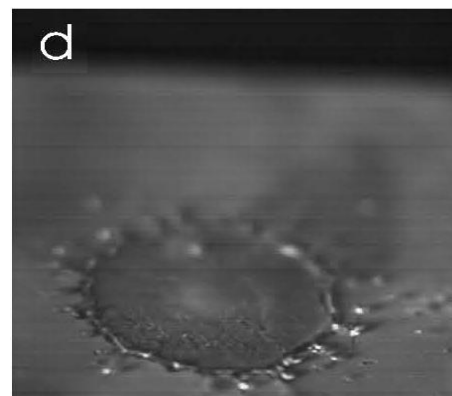
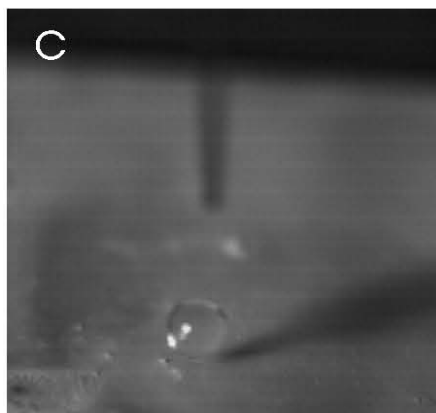


Figura 1.15 Modalità di impatto di una goccia d'acqua su una

1.4.1 Numeri adimensionali

Nella fenomenologia dell'impatto goccia è fondamentale *superficie piana* il numero di Weber che rapporta le forze di deformazione legate alle forze d'inerzia e le forze di recupero di forma ovvero la tensione superficiale

$$We = \frac{\rho_l v^2 D}{\sigma}$$

- D è il diametro della goccia
- v è la velocità della goccia all'istante in cui impatta sulla superficie
- σ è la tensione superficiale
- ρ_l è la densità del liquido

Dalla definizione di numero di Weber si intuisce come a bassi valori del numero stesso, che si traducono in una prevalenza delle forze di tensione superficiale su quelle inerziali, corrisponda un comportamento stabile della goccia, che rimbalza sulla superficie esibendo quindi proprietà elastiche.

Viceversa alti valori del numero di Weber corrispondono a situazioni nelle quali la goccia subisce forti deformazioni, essendo elevati i valori delle forze d'inerzia rispetto a quelle dovute alla tensione superficiale.

In particolare, gli studi effettuati su getti d'acqua nebulizzati hanno permesso di individuare tre intervalli di valori del numero di Weber a cui corrispondono altrettante diverse fenomenologie di impatto:

Le gocce aventi numero di Weber $We \leq 30$ impattano la superficie e per l'elevato valore della tensione superficiale rimbalzano sulla stessa riportandosi nell'ambiente.

Le gocce aventi numero di Weber $30 \leq We \leq 80$ impattano sulla superficie e subiscono una notevole deformazione locale. Tali gocce sono dotate al momento dell'impatto ancora di un discreto contenuto energetico a causa del quale tendono a rimbalzare recuperando la forma sferica.

Per $We \geq 80$ le gocce permangono sulla superficie perdendo completamente la loro forma sferica.

Il numero di Weber non è l'unico parametro che regola la fenomenologia dell'impatto goccia-superficie. Oltre alle forze d'inerzia e quelle di tensione superficiale, bisogna tener conto anche delle forze viscosse, che nel caso degli oli lubrificanti giocano un ruolo fondamentale. Infatti quando la goccia colpisce una superficie e si deforma, nascono in essa forze tangenziali il cui valore dipende dalla viscosità. Per liquidi newtoniani la tensione tangenziale aumenta linearmente con la velocità di deformazione (shear rate). Per liquidi non newtoniani la relazione non è più lineare, essendo la viscosità variabile essa stessa con la velocità di deformazione.

Per tener conto della viscosità si affianca al numero di Weber il numero di Reynolds che, come è noto, è dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e quelle viscosse. Un altro numero spesso utilizzato per descrivere il comportamento di una goccia durante l'impatto è il numero Ohnesorge, nel quale la forza viscosa è rapportata alla forza di tensione superficiale.

$$Oh = \frac{\eta}{\sqrt{\rho\sigma D}} = \frac{\sqrt{We}}{Re}$$

1.5 Il fenomeno della coalescenza

Quando due gocce di liquido si avvicinano con una trascurabile velocità iniziale, le forze di Van der Waals uniscono le due gocce e formano un piccolo ponte liquido. Il ponte, per la sua grande curvatura, si espande rapidamente sotto l'influenza della tensione superficiale, e il moto del fluido che ne risulta porta alla formazione di un'unica goccia più grande con una minore superficie totale.

Molti dei primi lavori teorici e sperimentali sulla coalescenza di gocce sono stati motivati dalle sue applicazioni nei processi industriali, quali stampaggio e processi di sinterizzazione; gli studi più recenti, invece, si concentrano sulle sue applicazioni nel campo delle reazioni microbiologiche.

Una trattazione analitica del fenomeno della coalescenza tra gocce di liquido sotto l'azione della tensione superficiale è stata sviluppata da Eggers, con riferimento a fluidi a bassa viscosità. In queste condizioni Eggers ha proposto una legge di variazione dello spessore del ponte liquido basata sulle seguenti semplici considerazioni fisiche.

Assumendo che la tensione interfacciale sia esprimibile come $\frac{\sigma}{\Delta}$, dove σ è la tensione superficiale e Δ è la più piccola tra le dimensioni del ponte liquido, si ha, bilanciando l'energia cinetica e la tensione interfacciale, la seguente equazione:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 \propto \frac{\sigma}{\Delta}$$

dove ρ è la densità e v la velocità del fluido in prossimità del ponte.

In base a considerazioni geometriche, egli ha ricavato

$$\Delta \propto \frac{r_b^2}{2R}$$

dove r_b è lo spessore del ponte liquido ed R il raggio della goccia.

Si ottiene dunque:

$$\frac{1}{2} \rho v^2 \propto \frac{\sigma}{r_b^2 / 2R}$$

Questa relazione conduce alla seguente legge di proporzionalità:

$$r_b^2 \propto \left(\frac{R\sigma}{\rho} \right)^{\frac{1}{4}} t^2$$

La precedente legge può essere riscritta in forma adimensionale introducendo il tempo caratteristico

$$\tau = \sqrt{\frac{(\rho R^3)}{\sigma}}$$

per cui si ha

$$\frac{r_b}{R} \propto \left(\frac{t}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Per gocce d'acqua di diametro di 0.1 cm, tale costante di tempo vale circa 4 ms.

Duchemin ha trovato, attraverso simulazioni numeriche sulla coalescenza di fluidi basso-viscosi, un valore di 1.62 per la costante di proporzionalità:

$$\frac{r_b}{R} = 1.62 \left(\frac{t}{\tau} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Il legame di diretta proporzionalità tra lo spessore del ponte liquido e \sqrt{t} è stato confermato sperimentalmente da vari studiosi che hanno lavorato con fluidi diversi.

Mingming Wu, Thomas Cubaud e Chih-Ming Ho hanno studiato la coalescenza di due gocce di liquido che entrano in contatto in aria con velocità trascurabili. Essi hanno condotto prove con tre differenti liquidi: acqua deionizzata, miscela di acqua e glicerolo, metanolo. Lavorando con gocce di diametri variabili tra 0.05 cm e 0.3 cm, hanno analizzato mediante fotometria veloce l'evoluzione del ponte liquido. In tutti e tre i casi la proporzionalità ricavata teoricamente da Eggers è stata confermata dai risultati sperimentali.

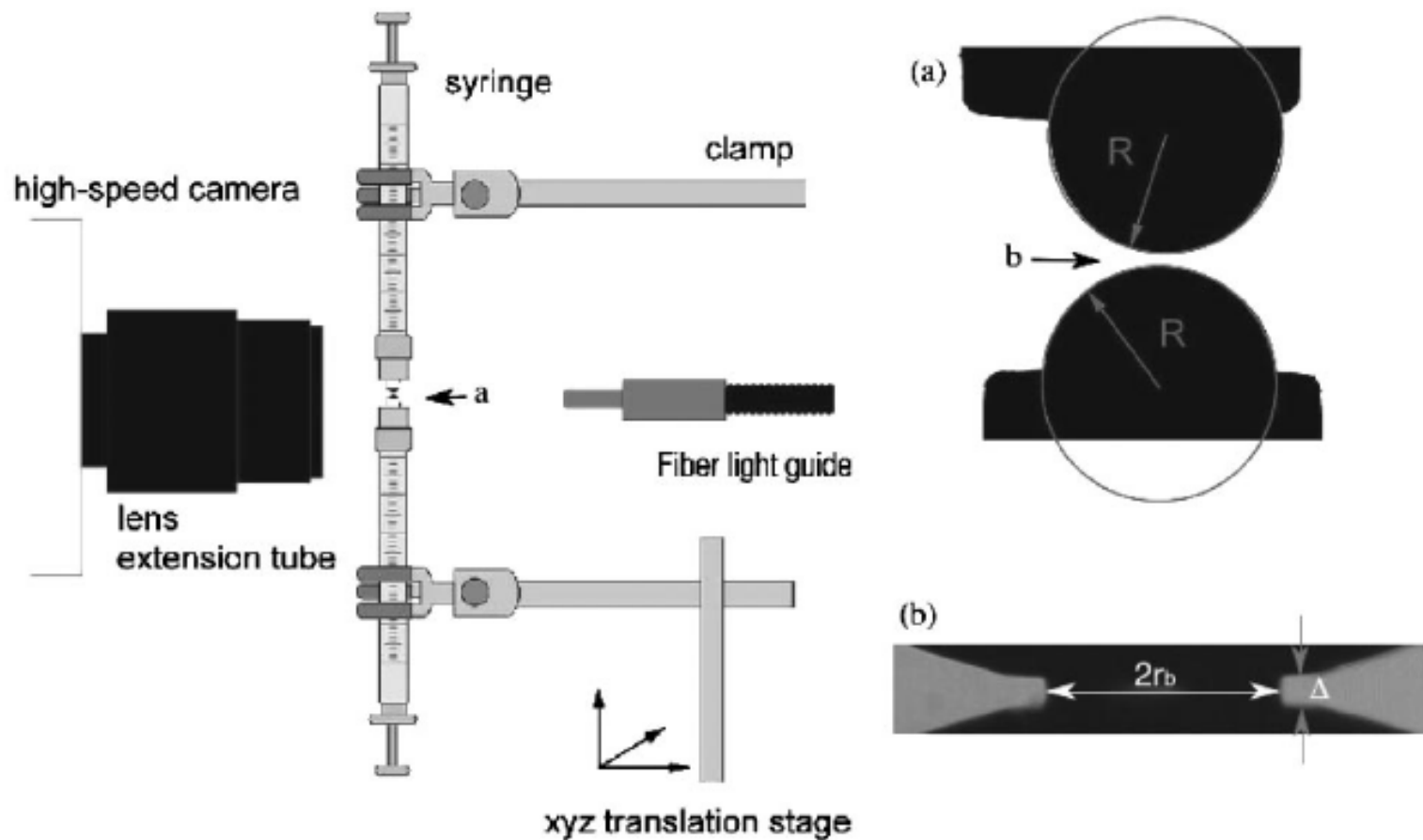


Figura 1.16 Schema della strumentazione adoperata da Mingming Wu, Thomas Cubaud e Chih-Ming Ho

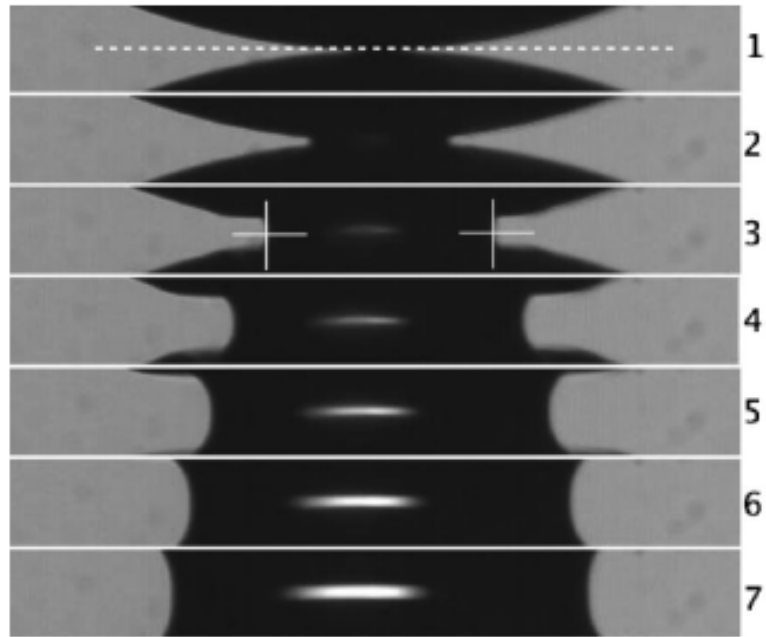


Figura 1.17 Evoluzione del ponte liquido a diversi istanti di tempo

Si riporta, a titolo di esempio, il grafico da essi ottenuto nelle prove con gocce d'acqua; esso reca in ascisse la radice quadrata del tempo e in ordinate lo spessore del ponte. Sullo stesso grafico compaiono punti relativi a prove effettuate con gocce di diametri diversi.

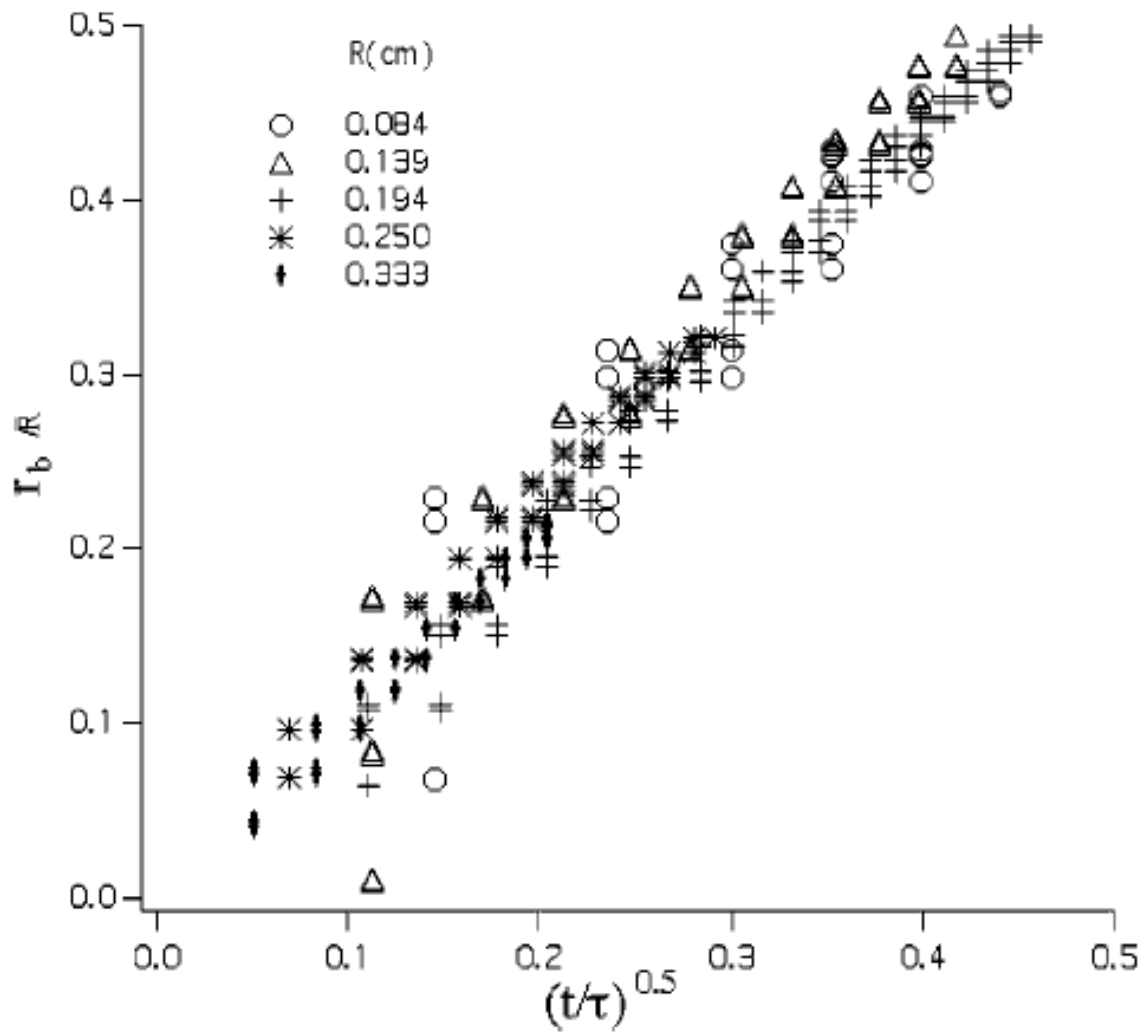


Figura 1.18 Grafico dello spessore del ponte liquido in funzione del tempo

E' evidente come la diretta proporzionalità rimanga confermata indipendentemente dal raggio iniziale delle gocce.

Studi simili sono stati effettuati da Menchaca-Roca su gocce di mercurio, fornendo risultati in accordo con quelli già descritti.

Gli stessi autori hanno dunque concluso che le proprietà del fluido non determinano variazioni significative nella natura del legame funzionale, pur influenzando notevolmente la costante di proporzionalità e il tempo caratteristico del fenomeno.

Naturalmente solo estendendo l'indagine a fluidi diversi sarà possibile confermare questa ipotesi.